



## شبیه‌سازی عددی استفاده همزمان تهویه طولی و مکش دود از سقف در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها

سید امید حقانی، ابراهیم براتی\*

دانشکده مهندسی، دانشگاه خیتام، مشهد، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۰

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶

### کلمات کلیدی:

تونل

آتش‌سوزی

بیشینه دما

جریان برگشتی دود

سیستم مکش دود

**خلاصه:** هنگام آتش‌سوزی در تونل‌ها، ایجاد مسیر امن عاری از دود با استفاده از سیستم‌های تهویه، برای فرار مسافران و انجام عملیات نجات ضروری است. چراکه بسته‌بودن محیط تونل عواقب ناشی از تصادفات و سوانح را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. در مطالعه حاضر، استفاده همزمان تهویه طولی و مکش دود از سقف در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها و پدیده‌های فیزیکی حاکم بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش تحقیق به صورت عددی است و از نرم‌افزار متن‌باز شبیه‌ساز دینامیک آتش (افدی‌اس) استفاده می‌شود. این شبیه‌سازی به منظور بررسی تأثیر فاصله طولی سیستم مکش دود از منبع آتش بر روی طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در دو شرایط کاری مورد استفاده این سیستم در پایین‌دست و بالادست منبع آتش انجام شده‌است. در کار حاضر سیستم مکش دود در سقف تونل قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از یک سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش منجر به افزایش میزان بیشینه دما خواهد شد؛ اما استفاده از همین سیستم در پایین‌دست منبع آتش سبب کاهش دما در طول تونل و عدم برگشت جریان دود خواهد شد؛ اما در انتخاب سرعت مکش دود باید دقت شود تا از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود. همچنین بررسی‌ها نشان داد استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در بالادست یا پایین‌دست منبع آتش به جای سیستم‌های منفرد نتیجه مطلوب‌تری خواهد داشت و می‌تواند میزان بیشینه دما را تا ۱۰ درصد کاهش دهد.

### ۱- مقدمه

ترکیب شده و ممکن است در هر لحظه صدمات جبران ناپذیری را وارد نمایند. در یک آتش‌سوزی واقعی، این مشخصه‌ها به طور پیوسته تغییر می‌کنند. بدین ترتیب پیش‌بینی نحوه گسترش آتش‌سوزی، تولید دود و همچنین درصد کاهش اکسیژن در نقاطی که احتمال زیادی برای آتش‌سوزی وجود دارد و یا صدمات ناشی از آتش‌سوزی قابل توجه می‌باشد، حائز اهمیت خواهد بود.

مشهودترین خطر در ارتباط با آتش‌ها، حرارت یا همان گرمای تولیدشده می‌باشد. یک قربانی در حال فرار از محل آتش‌سوزی در تونل جاده‌ای و ریلی تحت تأثیر انتقال حرارت جابجایی و تشعشع قرار می‌گیرد. انتقال حرارت زیاد به پوست، سبب سوختن، درد شدید و در نتیجه عدم توانایی و در نهایت مرگ می‌شود. هنگام آتش‌سوزی،

با توجه به حرکت تعداد زیادی از وسایل نقلیه از داخل تونل‌ها، آتش‌سوزی در این محیط‌ها به دلیل بسته‌بودن فضا و احتمال وجود صدمات قابل توجه انسانی و مالی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آتش‌سوزی در چنین محیط‌های سر بسته‌ای دارای سه منبع اصلی خطر به دلیل ایجاد حرارت، تولید دود و کاهش اکسیژن می‌باشد. نسبت مشارکت هر کدام از خطرات به مشخصات فیزیکی آتش از قبیل نرخ حرارت آزاد شده، منبع سوخت و میزان اکسیژن موجود بستگی دارد. این مشخصات ذکر شده با برخی پارامترهای دیگر نظیر شکل ساختاری محل وقوع آتش‌سوزی و فاصله از منبع حرارت

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: E.Barati@Khayyam.ac.ir



ناشی از آتش‌سوزی در تونل‌ها انجام شده‌است. با توجه به طراحی سیستم تهویه در تونل‌ها برای کاهش آلودگی و خطرات ناشی از آن، بحث آتش‌سوزی در تونل با سیستم تهویه مکانیکی ارتباط پیدا می‌کند. توماس [۱] اولین فردی بود که در سال ۱۹۶۸ از عدد فرود در موقعیت‌های آتش‌سوزی استفاده کرد. او تأثیر سرعت تهویه را بر روی آتش‌سوزی مورد مطالعه قرارداد. او بیان کرد در شرایط بحرانی (شرایط آتش‌سوزی در تونل که با عنوان شرایط بحرانی یا اضطراری معرفی می‌شود و نیاز به جریان تهویه با سرعت بالاتر از حالت عادی است.) نیروی شناوری و نیروی اینرسی برابر بوده و برگشت جریان رخ نمی‌دهد.

نیکنام و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۲ به بررسی محاسبه سرعت بحرانی، در تونل البرز در آزادراه تهران-شمال، حین آتش‌سوزی با انرژی حرارتی آزادشده برابر ۱۰۰ مگاوات به مدت ۹۶۰ ثانیه به کمک یک مدل عددی سه بعدی با نرم‌افزار پرداختند. آن‌ها بیان کردند با توجه به نتایج طراحی عددی و روابط تجربی، برای آتش‌سوزی درون تونل البرز با اندازه ۱۰۰ مگاوات، سرعت بحرانی ۳/۵ متر در ثانیه پیشنهاد می‌شود. این سرعت امکان خروج کاربران و انجام عملیات نجات را در کم‌ترین زمان ممکن فراهم می‌سازد.

به منظور بررسی اثر سیستم‌های اطفاء بر مبنای آب بر کارایی سیستم تهویه طولی، در جلوگیری از تشکیل لایه برگشتی دود در تونل، کو و هادیسوفکلوس [۳] در سال ۲۰۱۳ مطالعه تجربی در مقیاس واقعی و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از کد اف‌دی‌اس در تونلی به طول ۳۷/۵ متر انجام دادند. نتایج تست‌ها نشان داد که سیستم اطفاء، سیستم تهویه را قادر می‌سازد تا با سرعت تهویه کمتری از سرعت تهویه بحرانی از تشکیل لایه برگشتی دود جلوگیری کند. مونسان و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۶ با استفاده از کد اف‌دی‌اس به بررسی سرعت بحرانی تهویه و پارامترهای تأثیرگذار بر روی آن پرداختند. مشاهده شد که با افزایش عرض منبع آتش در حالی که طول آن ثابت است سرعت بحرانی تهویه کاهش می‌یابد. همچنین زمانی که عرض منبع آتش ثابت است، سرعت بحرانی تهویه با افزایش طول منبع آتش در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

تانگ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۷ در مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی پدیده آتش‌سوزی در تونلی مجهز به سیستم اسپری آب با مقیاس ۱۴ به ۱ پرداختند. آن‌ها بیان داشتند پس از اسپری آب از

اکسیژن موجود در هوا با سوخت واکنش داده و به سرعت درصد آن در هوا کاهش می‌یابد. اگر چه در حالت کلی کاهش اکسیژن مسئله اصلی ایجاد خطر در اثر آتش‌سوزی در تونل‌های جاده‌ای و ریلی نمی‌باشد، اما خطرات ناشی از قطع‌شدن اکسیژن و تنفس بیش از ۳ دقیقه در چنین شرایطی بسیار دشوار است. سومین خطر در هنگام آتش‌سوزی تولید دود است. منظور از دود تمام محصولات تجزیه‌شده در اثر حرارت و احتراق مواد است که در فضای اطراف گسترش می‌یابد. دود شامل ذرات دوده، گازهای سمی و ذرات معلق در هوا می‌باشد. ترکیب شیمیایی دود تولیدشده به وسیله آتش به طبیعت سوخت آتش، حجم کل دود تولیدشده، ابعاد فیزیکی و محدودیت‌های آتش بستگی دارد. دوده و ذرات معلق، از یک طرف باعث انتقال مواد سمی قابل جذب به بدن انسان و از طرف دیگر سبب کاهش میدان دید و در نهایت جلوگیری و به تأخیرانداختن فرار از محل وقوع آتش‌سوزی می‌شوند. اکثر مردم بر این باورند که حرارت عامل اصلی مرگ و میر در آتش‌سوزی‌ها می‌باشد در صورتی که این دود و انتشار آن است که تهدیدکننده اصلی جان انسان‌ها می‌باشد.

تهویه هوا برای تونل‌ها می‌تواند با استفاده از شرایط طبیعی، ناشی از اثر پیستونی و یا با استفاده از سیستم‌های مکانیکی صورت پذیرد. در سیستم تهویه طبیعی از حرکت طبیعی هوا در داخل تونل استفاده می‌شود. این فرآیند در نتیجه اختلاف فشار در دو دهانه تونل انجام می‌گیرد. در سیستم تهویه ناشی از اثر پیستونی هر وسیله‌ای که در داخل تونل حرکت می‌کند، اثری مشابه یک پیستون در داخل یک لوله بلند را دارد. در جلو وسیله نقلیه فشار زیاد و در پشت آن فشار کم اثر می‌کند و در نتیجه نیرویی ایجاد می‌شود که هوای داخل تونل را به حرکت در می‌آورد. سیستم‌های تهویه مکانیکی نیز به دو دسته سیستم تهویه طولی و سیستم تهویه عرضی تقسیم می‌شوند. در سیستم تهویه طولی هوا در طول تونل جریان می‌یابد و طی آن هوا از یک طرف دمیده و از طرف دیگر خارج می‌شود؛ یکی از پارامترهای مهم و قابل بررسی در این سیستم سرعت بحرانی تهویه می‌باشد و طبق تعریف به حداقل سرعتی اطلاق می‌شود که از پدیده برگشت دود حاصل از آتش‌سوزی جلوگیری می‌کند. اما در سیستم تهویه عرضی هوای تازه از کف تونل توسط مجرای سرتاسری وارد تونل شده و از نزدیک سقف خارج می‌شود.

در سال‌های اخیر فعالیت‌های زیادی به منظور کاهش خطرات

همچنین یک رابطه جدید برای پیش‌بینی طول جریان برگشتی دود در داخل تونل‌های شیب‌دار ارائه شد.

مینگ و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۰ به بررسی اثر انسداد بر سرعت تهویه بحرانی در آتش‌سوزی تونل‌های مجهز به تهویه طولی پرداختند. نتایج نشان داد در شرایطی که انسداد به حالت افقی و در بالادست منبع آتش قرار گرفته‌است، با افزایش نسبت انسداد سرعت تهویه بحرانی کاهش می‌یابد. اما در شرایطی که انسداد به حالت عمودی و در بالادست منبع آتش قرار گرفته‌است، سرعت بحرانی تهویه ابتدا کاهش سپس افزایش می‌یابد. همچنین در این پژوهش مقایسه سرعت تهویه بحرانی بین داده‌های تجربی و نتایج حاصل از مطالعات قبلی نیز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که سرعت تهویه بحرانی با وجود انسداد متفاوت تغییر می‌کند. موقعیت نسبی بین انسداد و محل آتش‌سوزی و نوع سوخت می‌تواند بر سرعت بحرانی تهویه اثر داشته باشد.

بررسی تحقیقات ذکر شده نشان می‌دهد که تاکنون تلاش‌های زیادی در زمینه محاسبه سرعت بحرانی، کنترل جریان دود و بیشینه دما در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها انجام شده است. در اکثر تحقیقات انجام‌شده، سیستم تهویه طولی تنها سیستم مورد استفاده در داخل تونل به جهت تهویه هوا و کنترل جهت جریان دود می‌باشد. به همین منظور در کار حاضر با استفاده از نرم افزار منبع باز اف‌دی‌اس، بررسی استفاده همزمان تهویه طولی و مکش دود از سقف در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌است. همچنین به جهت بررسی دقیق‌تر، با ایجاد کردن شرایط متنوع در محل قرارگیری سیستم مکش دود و تعداد آن، سناریوهای مختلف آتش‌سوزی در داخل شبیه‌سازی شده‌است. در کار حاضر برای نخستین بار تأثیر استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در بالادست و پایین‌دست منبع آتش شبیه‌سازی شده و پدیده پلاگ هلدینگ<sup>۱</sup> در این شرایط مورد بررسی قرار گرفته‌است.

## ۲- مدل‌سازی میدان جریان و معادلات حاکم

در این مطالعه از نرم‌افزار منبع باز اف‌دی‌اس که توسط موسسه ملی فناوری و استانداردهای ایالات متحده آمریکا منتشر شده‌است، برای انجام شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده‌است. در این نرم‌افزار،

نازل‌ها، سرعت بحرانی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. حداکثر کاهش در میزان سرعت بحرانی حدود ۳۱ درصد می‌باشد که به عواملی از جمله تعداد و محل قرارگیری نازل‌ها وابسته می‌باشد.

حیدری نژاد و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۸ با استفاده از کد متن‌باز شبیه‌ساز دینامیک آتش به بررسی آتش‌سوزی داخل تونل همراه با عملکرد سیستم تهویه و اطفاء پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ جریان آب سبب افزایش ظرفیت خنک‌سازی سیستم اطفاء می‌شود، همچنین با افزایش نرخ جریان آب از ۳۲۰ به ۱۲۸۰ لیتر بر دقیقه تضعیف شار تشعشعی رسیده به پایین‌دست آتش از ۴۰٪ به بیش از ۷۵٪ افزایش می‌یابد.

حقانی و براتی [۷] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از کد اف‌دی‌اس و به کارگیری سیستم تهویه طولی به بررسی تأثیر مکان قرارگیری دمنده بر بیشینه دما و گسترش جریان دود در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها پرداختند. در این پژوهش برای اولین بار پارامتری به نام دبی حجمی بحرانی معرفی شد. بررسی‌ها نشان داد قرارگرفتن سیستم دمنده در نیمه بالایی سطح مقطع تونل، منجر به کاهش ۱۱ درصدی در میزان دبی حجمی بحرانی خواهد شد. همچنین مشخص شد نزدیک‌شدن سیستم دمنده به منبع آتش منجر به کاهش طول جریان برگشتی دود و افزایش بیشینه دما می‌شود. ژانگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۰ در یک تونل با مقیاس ۱:۱۰ به مطالعه تجربی بیشینه دما در زیر سقف تونل در شرایط استفاده از دو منبع آتش پرداختند. نتایج نشان داد در شرایط عدم استفاده از سیستم تهویه طولی و وجود منابع آتش کوچک، پدیده ادغام شعله بین دو منبع آتش وجود دارد. به طور کلی، پدیده ادغام شعله‌های آتش به تدریج و با افزایش فاصله منابع آتش ناپدید می‌شود و حداکثر دما در زیر سقف تونل با افزایش گام منبع آتش به تدریج کاهش می‌یابد. همچنین تحت شرایط استفاده از سیستم تهویه طولی، حداکثر دما در زیر سقف تونل به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

کینگ و همکاران [۹] در سال ۲۰۲۰ به بررسی طول جریان برگشتی دود در داخل تونل‌های شیب‌دار مجهز به سیستم تهویه طبیعی در شرایط قرارگیری منبع آتش در فاصله‌های طولی مختلف پرداختند. شبیه‌سازی در داخل تونلی با شیب ۴ درصد و با استفاده از نرم‌افزار اف‌دی‌اس انجام شد. نتایج نشان داد جریان برگشت دود آتش در تونل شیب‌دار عمدتاً توسط طول پایین‌دست هدایت می‌شود.

1 CFL (Courant friedrichs lewy)

از طریق دو شرط کنترل می‌شود. اولین شرط، شرط سی‌افال<sup>۱</sup> است. این شرط بیان می‌کند که گام زمانی نمی‌تواند از مدت زمان لازم برای عبور ذره‌ای از سیال از یک سلول شبکه محاسباتی، بزرگتر باشد. بر اساس این روش، عدد سی‌افال در هر سلول محاسباتی با ابعاد  $\delta x$ ،  $\delta y$  و  $\delta z$  و مؤلفه‌های سرعت  $u$ ،  $v$ ،  $w$  در گام زمانی  $\delta t$  به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شوند:

$$CFL = \delta t \max\left(\frac{|u|}{\delta x}, \frac{|v|}{\delta y}, \frac{|w|}{\delta z}\right) \quad (6)$$

اگر عدد سی‌افال محاسبه شده در محدوده مقدار ماکزیمم و مینیمم خود که در نرم افزار افدی‌اس به صورت پیش فرض به ترتیب ۱ و ۰/۸ تعریف شده‌است قرار نگیرد، گام زمانی تغییر خواهد کرد تا در نهایت شرط سی‌افال ارضا شود.

در محاسباتی که در آن انتقال جابجایی بر نفوذ غالب است، شرط سی‌افال گام زمانی را کنترل می‌کند. اما در دامنه‌های کوچکتر با شبکه محاسباتی به اندازه کافی ریز شرط ون نیومن<sup>۲</sup> بر گام زمانی حکم فرما است. این شرط نیز مانند عدد سی‌افال در هر سلول از شبکه محاسبه می‌شود و اگر عدد ون نیومن در محدوده ۰/۸ تا ۱ نبود، گام زمانی کوچکتر می‌شود تا شرط مورد نظر را ارضا کند.

### ۳- مشخصات هندسه مورد مطالعه

در کار حاضر هندسه مورد مطالعه توسط لی و همکاران [۱۴] مبنای مطالعه قرار گرفته‌است. لی و همکاران در مطالعه تجربی خود مطابق با شکل ۱ از تونلی با ابعاد  $0.25 \times 0.25 \times 12$  متر استفاده کردند. دیوارها از جنس فولاد ضد زنگ به ضخامت ۱ میلی‌متر ساخته‌شد. پروپان توسط مشعلی با مقطعی دایره‌ای شکل به قطر ۱۰۰ میلی‌متر در وسط تونل سوزانده‌شد، بطوری که سطح بالایی مشعل روی کف تونل قرار گرفته‌بود. آن‌ها هوای یکنواخت‌شده را از دهانه سمت چپ وارد تونل کردند. لی و همکاران در این آزمایش سرعت تهویه بحرانی را به ازای نرخ‌های حرارت آزاد شده متفاوت محاسبه کردند. برای این کار آرایشی از حسگرها مطابق شکل ۲ در راستای طول تونل قرار داده‌شد. سرعت تهویه‌ای که به ازای آن حسگرهای دما طول لایه برگشتی را صفر نشان می‌دادند، به عنوان سرعت تهویه بحرانی در

شکلی از معادلات ناویر-استوکس برای جریان‌های سرعت پایین ناشی از آتش‌سوزی به همراه معادلات انرژی و احتراق حل می‌شود. افدی‌اس به عنوان یک ابزار عددی قدرتمند، به طور گسترده در تحقیقات مرتبط با گسترش آتش و دود مورد استفاده قرار گرفته‌است. دقت و صحت نتایج حاصل از افدی‌اس در شبیه‌سازی‌ها توسط محققان زیادی به اثبات رسیده‌است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات چالاسانی و همکاران [۱۱] و فرایدی و مورر [۱۲] اشاره کرد.

در کد افدی‌اس، مشتقات جری می‌شود در معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی با استفاده از روش تفاضل محدود با دقت مکانی و زمانی مرتبه دوم گسسته شده و در زمان به صورت صریح حل می‌گردند. اما پدیده تشعشع به روش حجم کنترل محاسبه می‌گردد. در این نرم‌افزار شبکه محاسباتی مستقیم الخط بوده و سلول‌ها به شکل مکعب مستطیل هستند. همچنین آشفتگی با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل زیر شبکه اسماکورینسکی مدل می‌شود. معادله انتقال تشعشع نیز با فرض گاز خاکستری حل می‌شود. در نرم‌افزار افدی‌اس معادلات بقای جرم، بقای گونه‌ها، مومنتوم و انرژی به صورت روابط (۱) تا (۴) می‌باشد [۱۳]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b''' \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_\alpha) + \nabla \cdot (\rho Y_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Y_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla P = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (3)$$

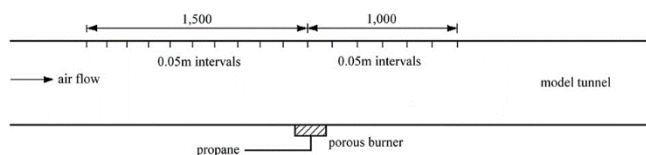
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{DP}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \dot{q}'' - \dot{q}_b''' \quad (4)$$

در نرم افزار افدی‌اس گام زمانی بصورت پیش فرض مطابق رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$\delta t = \frac{5(\delta x \delta y \delta z)^{1/3}}{\sqrt{gH}} \quad (5)$$

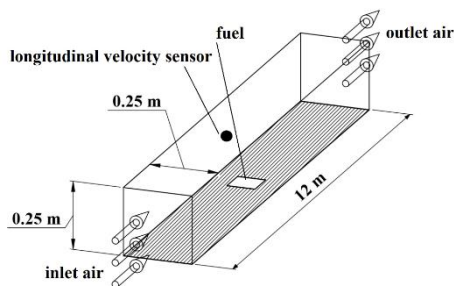
در این رابطه  $\delta x$ ،  $\delta y$  و  $\delta z$  اندازه کوچکترین سلول شبکه محاسباتی و  $H$  ارتفاع دامنه محاسباتی می‌باشند. در شبیه‌سازی با استفاده از افدی‌اس گام زمانی توسط سرعت انتقال جابجایی و نفوذ

1 plug-holding  
2 Von neumann



شکل ۲- محل قرارگرفتن حسگرها در آزمایش لی و همکاران [۱۴] (ابعاد: میلی متر)

Fig. 2. Location of sensors in the work of Lee and et al (Dimensions, mm)



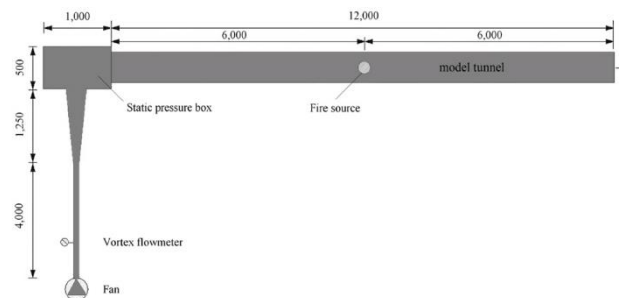
شکل ۳. مشخصات هندسه مورد مطالعه

Fig. 3. A geometrical representation of tunnel

اشاره کردند، هنگامی که نسبت این طول مشخصه به اندازه شبکه از رابطه (۸) پیروی کند، دقت کافی برای شبیه‌سازی بدست خواهد آمد.

$$4 < \frac{D^*}{\delta x} < 16 \quad (8)$$

در تحقیق حاضر، برای تعیین شبکه مناسب علاوه بر استفاده از معیار فوق، استقلال حل از شبکه نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. استقلال از شبکه برای نحوه توزیع دما در طول تونل و نزدیک به سقف تونل انجام شده‌است. نحوه اندازه‌گیری این توزیع دما در نزدیک سقف تونل مطابق شکل ۲ می‌باشد. این بررسی در نرخ رهایش حرارت ۲ کیلووات و در شرایط عدم استفاده از جریان هوای ورودی صورت گرفته‌است، زیرا طبق رابطه (۵) هرچه آتش کوچک‌تر باشد، به شبکه ریزتری نیازمند است. با بررسی استقلال از شبکه در آتش ۲ کیلووات با توجه به رابطه (۵) و با به‌کاربردن کمترین تعداد سلول‌های مورد قبول در رابطه (۶) مقدار  $\delta x$  برابر  $0.02$  متر و تعداد سلول‌های محاسباتی در جهت طول، عرض و ارتفاع تونل  $600$ ،  $12$  و  $12$  در نظر گرفته شده‌اند. در این شرایط مطابق شکل ۴ نمودار تغییرات دمایی در نزدیک سقف تونل رسم شده‌است. همچنین همانطور که در شکل ۴ مشخص شده‌است به منظور دستیابی به جواب‌های مستقل



شکل ۱. تونل مورد آزمایش توسط لی و همکاران [۱۴] (ابعاد: میلی متر)  
Fig. 1. Tunnel tested by Lee and et al (Dimensions, mm)

نظر گرفته‌شد.

#### ۴- شرایط مرزی

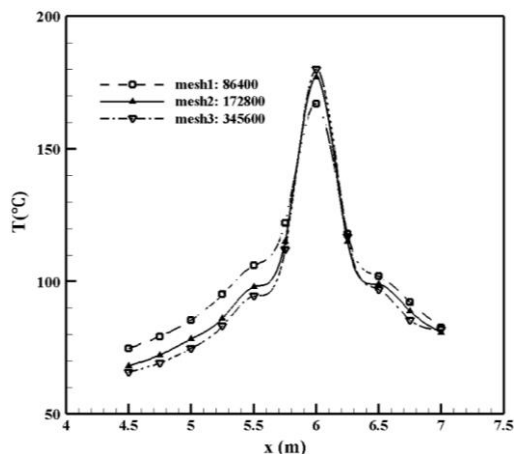
تونل مقیاس کوچک نشان داده شده در شکل ۳ با استفاده از کد اف‌دی‌اس شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی هندسه مذکور تمامی شرایط مورد استفاده در آزمایش تجربی لی و همکاران اعمال شده‌است. برای تشخیص وقوع سرعت بحرانی، علاوه بر استفاده از سنسورهای دمایی یک سنسور سرعت در بالای منبع آتش قرار داده شده‌است تا مولفه محوری سرعت را اندازه‌گیری نماید. در حالت بحرانی، این سنسور باید سرعت تقریباً صفر را نشان دهد. برای مدل کردن آتش‌سوزی، سطح سوخت پروپان در کف تونل در نظر گرفته شده‌است. در حالت بدون تهویه از شرایط محیطی و در حالت با تهویه، از سرعت ورودی به عنوان شرط مرزی در ورودی تونل استفاده شده‌است. در خروجی تونل از شرط مرزی محیط باز استفاده شده‌است. دمای محیط و هوای تهویه،  $20$  درجه سلسیوس در نظر گرفته شده‌است.

#### ۵- شبکه محاسباتی

برای تولید شبکه‌بندی مناسب، طول مشخصه‌ای به نام قطر مشخصه آتش به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

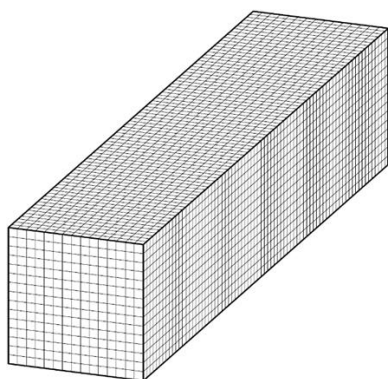
$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} c_p \sqrt{g}} \right)^{0.4} \quad (7)$$

این طول مشخصه تعیین‌کننده اندازه‌های بزرگ در پلوم دود و هم چنین ارتفاع شعله می‌باشد. این پارامتر معیاری برای تعیین اندازه شبکه حل برای جریان‌های ناشی از شناوری از طریق شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ می‌باشد. مک‌گراتن و همکاران [۱۵]



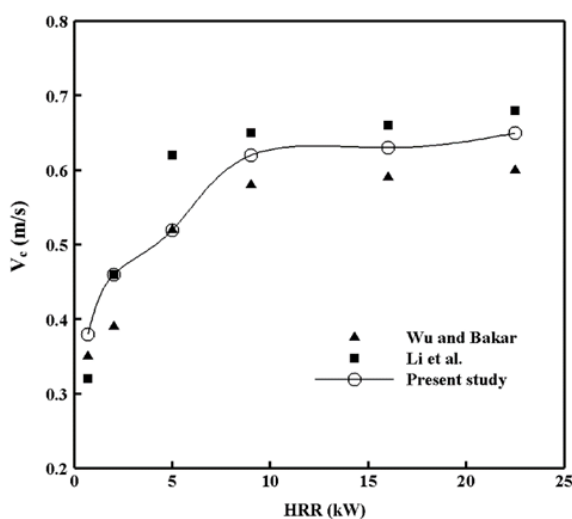
شکل ۴. توزیع دما در شبکه‌های مختلف محاسباتی

Fig. 4. Distribution of temperature in various computational mesh



شکل ۵. شبکه محاسباتی انتخاب شده

Fig. 5. meshing in FDS code



شکل ۶. سرعت بحرانی حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه با نتایج تجربی

Fig. 6. The critical velocity of simulation and comparison with experimental results

از اندازه شبکه محاسباتی، نمودار دمایی در دو شبکه محاسباتی دیگر نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. مشاهده می‌شود که با تغییر تعداد شبکه محاسباتی از ۱۷۲۸۰۰ به ۳۴۵۶۰۰ تفاوت محسوسی در منحنی تغییرات دما حاصل نمی‌شود. بنابراین شبکه محاسباتی با تعداد ۱۷۲۸۰۰ سلول به عنوان شبکه بهینه برای شبیه‌سازی حریق در داخل تونل مذکور در نظر گرفته شده‌است. در شکل ۵ شبکه محاسباتی مورد استفاده نشان داده شده‌است.

## ۶- اعتبارسنجی حل

برای بررسی صحت شبیه‌سازی، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی لی و همکاران [۱۴] مورد استفاده قرار گرفته‌است. برای تونل تشریح شده نرخ رهایش حرارت ۰/۷، ۲، ۵، ۹، ۱۶ و ۲۲/۵ کیلووات اعمال شده، سرعت بحرانی محاسبه و با نتایج تجربی وو و باکار [۱۶] لی و همکاران مقایسه شده‌است. نتایج به دست آمده در شکل ۶ ارائه شده‌است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میان مقادیر عددی مطالعه حاضر و نتایج تجربی خطای ۱۴ درصدی وجود دارد. بنابراین می‌توان بیان کرد که نتایج حاصل از این شبیه‌سازی به کمک نرم افزار افدی‌اس با در نظر گرفتن مقداری خطا قابل استناد و با دقت نسبتاً خوبی قادر به پیش‌بینی فرآیندهای حاصل از آتش‌سوزی در داخل تونل می‌باشد.

## ۷- نتایج

با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته و انطباق مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی، در این بخش شبیه‌سازی تأثیر استفاده همزمان از تهویه طولی و مکش دود از سقف در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها انجام شده‌است. این شبیه‌سازی جهت بررسی تأثیر فاصله طولی سیستم مکش دود از منبع آتش بر روی طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در دو شرایط کاری مورد استفاده این سیستم در پایین دست و بالادست منبع آتش انجام شده‌است.

۷-۱- بررسی جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل با ترکیبی از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش

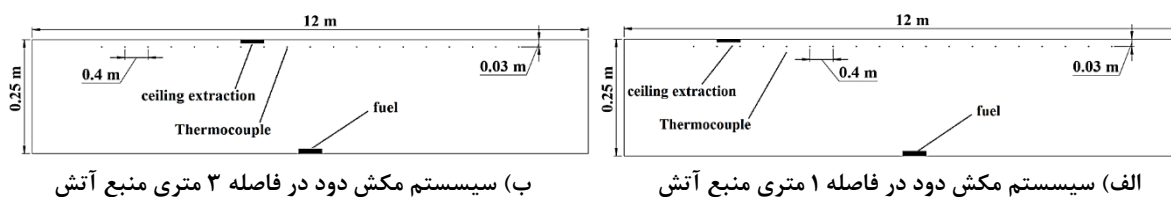
نخستین شرایط مورد بررسی به منظور مشخص شدن طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل قرار گرفتن سیستم

انجام شده در یک مرحله از سرعت بحرانی تهویه (سرعت ۰/۵۳ متر بر ثانیه) و در مرحله بعد از نصف سرعت بحرانی تهویه (سرعت ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه) به عنوان سرعت تهویه طولی استفاده شده است. همچنین جهت بررسی تأثیر استفاده همزمان از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در سقف تونل بر روی جریان برگشتی دود و حداکثر دما، از چهار سرعت مکش ۰، ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه در سیستم مکش دود سقفی استفاده شده است.

شکل ۸ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش دود و در دو شرایط کاری مختلف که سیستم مکش دود در فاصله‌های ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته و سرعت تهویه طولی نیز ۰/۵۳ متر بر ثانیه می‌باشد نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۸ مشخص شده است زمانی که سرعت سیستم مکش دود تعبیه شده در سقف تونل صفر می‌باشد، فرآیند برگشت جریان دود اتفاق نیفتاده است و ترموکوپل‌های قرار گرفته قبل از منبع آتش دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط) را نشان می‌دهند و در این حالت افزایش دمای ثبت شده تنها مختص به ترموکوپل‌های قرار گرفته در

مکش دود در بالادست منبع آتش می‌باشد. همانطور که در شکل ۷ مشخص شده است، در هندسه تونلی که در قسمت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته بود، سیستم مکش دود در قسمت بالادست منبع آتش قرار گرفته است. این سیستم دارای ابعاد ۰/۱ در ۰/۱ مترمربع بوده و فاصله مرکز این سیستم تا مرکز منبع آتش در دو شرایط کاری مختلف ۱ متر و ۳ متر در نظر گرفته شده است. در داخل تونل ۱۹ ترموکوپل نزدیک به سقف تونل و با فاصله ۰/۴ متر از یکدیگر قرار گرفته است. با توجه به خاصیت شناوری، مسیر حرکت دود و گرما به سمت سقف تونل می‌باشد و عموماً حداکثر دما در این ناحیه اتفاق خواهد افتاد. این نقاط محلی مستعد به منظور خرابی ناشی از افزایش دما در داخل تونل می‌باشند؛ به همین منظور ترموکوپل‌ها نزدیک به سقف تونل قرار گرفته‌اند.

در تمامی مراحل شبیه‌سازی نرخ تولید حرارت ۵ کیلووات در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان سرعت بحرانی محاسبه شده در قسمت قبلی، سرعت بحرانی در نرخ رهائش حرارت ۵ کیلووات برابر با ۰/۵۳ متر بر ثانیه می‌باشد. به همین منظور، در فرآیند شبیه‌سازی

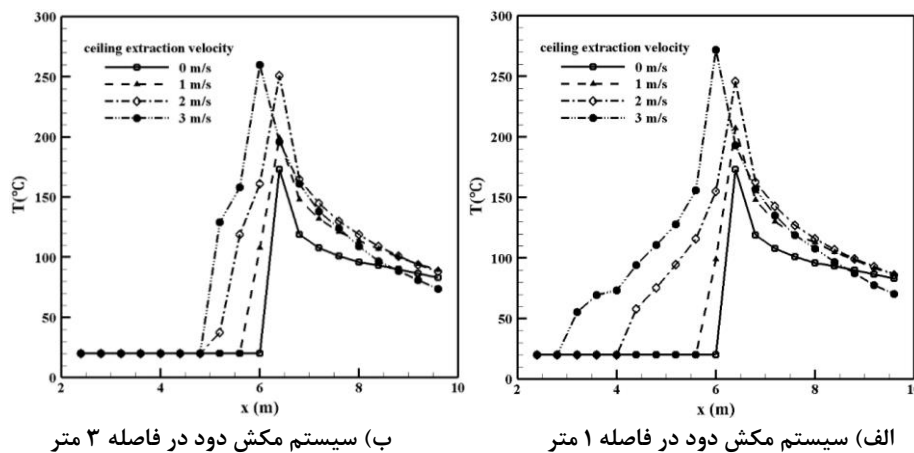


ب) سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری منبع آتش

الف) سیستم مکش دود در فاصله ۱ متری منبع آتش

شکل ۷. هندسه‌های مورد بررسی با قرارگیری سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش

Fig. 7. Geometry examined by placing the smoke extraction system upstream of the fire source.

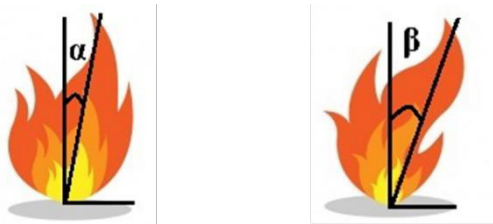


ب) سیستم مکش دود در فاصله ۳ متر

الف) سیستم مکش دود در فاصله ۱ متر

شکل ۸. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده از سیستم تهویه ترکیبی ( $V_L = 0.53 \text{ m/s}$ )

Fig. 8. ceiling temperature distribution through the tunnel with the combination of ceiling extraction and longitudinal ventilation ( $V_L = 0.53 \text{ m/s}$ )



(الف) عدم استفاده از سیستم مکش (ب) استفاده از سیستم مکش

شکل ۹. زاویه انحراف شعله

Fig.9. Flame deflection angle

جریان بیشتری از دود مستقیماً در زیر سقف تونل قرار خواهد گرفت. به همین علت بیشینه دما مطابق شکل ۸ در سرعت مکش دود ۳ متر بر ثانیه اتفاق افتاده است. از طرف دیگر با توجه به مکش سیستم قرار گرفته در سقف تونل، همانطور که در قسمت بالا نیز گفته شده حجم عمده‌ای از جریان دود جهت خارج شدن از داخل تونل به سمت این سیستم حرکت خواهند کرد و باعث می‌شوند بیشینه دما در زمان فعال بودن سیستم مکش سقف در قسمت بالادست منبع آتش اتفاق افتد.

شکل ۱۰ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سیستم مکش دود در فاصله‌های ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته و سرعت تهویه طولی نیز ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه می‌باشد نشان می‌دهد. مطابق این شکل در تمامی سرعت‌های مکش دود و حتی در شرایطی که سیستم مکش دود غیرفعال می‌باشد برگشت جریان دود اتفاق افتاده است. زیرا سرعت تهویه طولی انتخاب شده نصف سرعت بحرانی تهویه می‌باشد و قاعداً استفاده از این سرعت تهویه در شرایطی که سیستم تهویه دیگری نیز فعال نباشد منجر به برگشت جریان دود خواهد شد.

با فعال شدن سیستم مکش دود، در سرعت‌های مکش ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه و در هر یک از شرایط کاری که فاصله سیستم مکش دود از منبع آتش ۱ متر و ۳ متر می‌باشد مشاهده می‌شود که حجم بیشتری از جریان دود به سمت بالادست منبع آتش حرکت خواهد کرد که این مسئله به وضوح با توجه به افزایش دمای ثبت شده توسط ترموکپل‌هایی که در بالادست منبع آتش قرار گرفته‌اند قابل مشاهده است. شایان ذکر است مطابق شکل ۱۰ در شرایطی که سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته است، طول جریان برگشتی دود در تمامی سرعت‌های مکش بیشتر از حالتی می‌باشد که سیستم مکش دود در فاصله ۱ متری قرار گرفته است. در واقع با توجه

پایین دست منبع آتش می‌باشد. زیرا با توجه به جریان هوای طولی برقرار شده در داخل تونل و در روی منبع آتش مسیر حرکت دود به سمت خارج تونل می‌باشد. البته حصول همچنین نتیجه‌ای قابل انتظار نیز بوده است. زیرا شرایط اعمال شده کاملاً مشابه با شرایط اعمال شده در قسمت قبلی کار بوده است و انتظار می‌رفت با اعمال این شرایط فرآیند برگشت جریان دود اتفاق نیفتد.

با فعال شدن سیستم مکش دود، در سرعت‌های مکش ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه و در هر یک از شرایط کاری که فاصله سیستم مکش دود از منبع آتش ۱ متر و ۳ متر می‌باشد مشاهده می‌شود که برگشت جریان دود اتفاق افتاده است. مطابق شکل ۸ هر چه سرعت مکش دود توسط سیستم بیشتر شده است، فرآیند برگشت جریان دود نیز افزایش یافته است. شایان ذکر است در شرایطی که سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته است، طول جریان برگشتی دود در تمامی سرعت‌های مکش بیشتر از حالتی می‌باشد که سیستم مکش دود در فاصله ۱ متری قرار گرفته است.

با توجه به شکل ۸ با افزایش سرعت مکش دود توسط سیستم تعبیه شده در سقف تونل میزان بیشینه دمای ثبت شده توسط ترموکپل‌ها در هریک از دو حالت افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین دماهای ثبت شده توسط ترموکپل‌ها به ترتیب مربوط به سرعت‌های مکش دود ۳، ۲ و ۱ متر بر ثانیه می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگر با توجه به شکل ۸ نزدیک شدن محل ثبت بیشینه دما به سیستم مکش دود با افزایش سرعت مکش دود در هریک از دو حالت قرارگیری سیستم مکش دود می‌باشد. با زیاد شدن سرعت مکش دود حجم بیشتری از دود به سمت مکانیزم مکش دود سقفی حرکت می‌کند؛ در نتیجه محل ثبت بیشینه دما با افزایش سرعت مکش به سمت بالادست منبع آتش تغییر وضعیت پیدا خواهد کرد.

در شرایطی که سیستم تعبیه شده در سقف تونل جهت مکش دود در بالادست منبع آتش قرار داشته باشد، جریان هوای طولی که در داخل تونل به منظور جلوگیری از برگشت جریان دود ایجاد شده است، قبل از رسیدن به منبع آتش تحت تأثیر سیستم مکش دود سقفی قرار گرفته و سرعت آن کم می‌شود؛ در نتیجه مطابق شکل ۹ زاویه انحراف شعله کاهش می‌یابد ( $\alpha < \beta$ ) و باعث می‌شود جریان دود مستقیماً در زیر سقف تونل قرار بگیرد. پس هر چه سرعت مکش دود در سقف تونل بیشتر باشد، میزان زاویه انحراف شعله نیز کمتر خواهد شد و



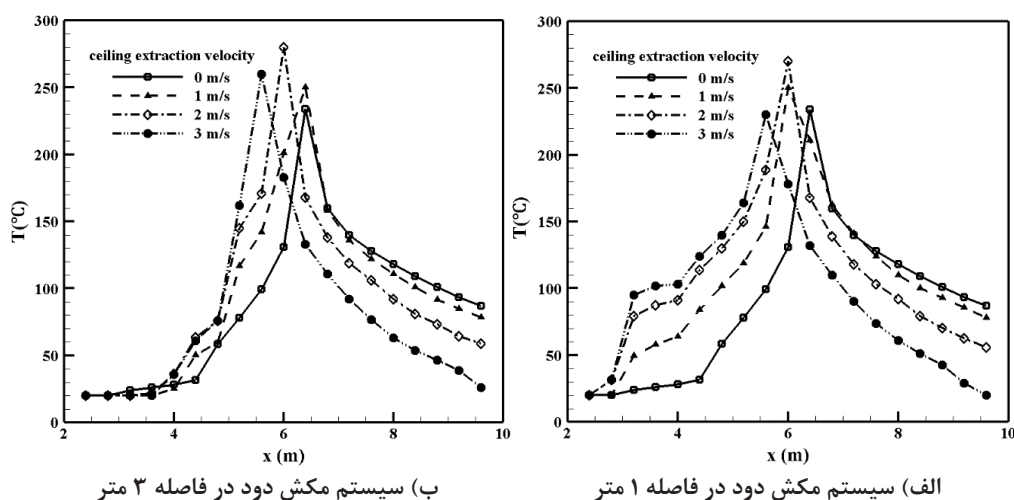
دود خروجی توسط این سیستم از تجمع گرما و دود در بالای منبع آتش جلوگیری شده و سبب شده‌است که میزان بیشینه دما نسبت به شرایط قبل کاهش پیدا کند.

نکته قابل توجه دیگر در این شکل نسبت به شرایط قبل که از سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شده‌بود، کاهش بیشتر دما در قسمت پایین‌دست منبع آتش می‌باشد. در این شرایط با توجه به این که از نصف سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شده‌است حجم عمده‌ای از محصولات احتراق به سمت بالادست منبع آتش حرکت خواهند کرد و توسط سیستم مکش دود سقف از داخل تونل خارج خواهند شد.

اما نکته حائز اهمیت در زمان استفاده از سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش، گسترش جریان دود در هر دو سمت منبع آتش می‌باشد که این مسئله به وضوح در نمودارهای توزیع دما نیز مشخص شده بود. در این شرایط هیچ مسیر کاملاً ایمنی به منظور عبور افراد از داخل تونل به سمت بیرون و امدادسانی وجود نخواهد داشت.

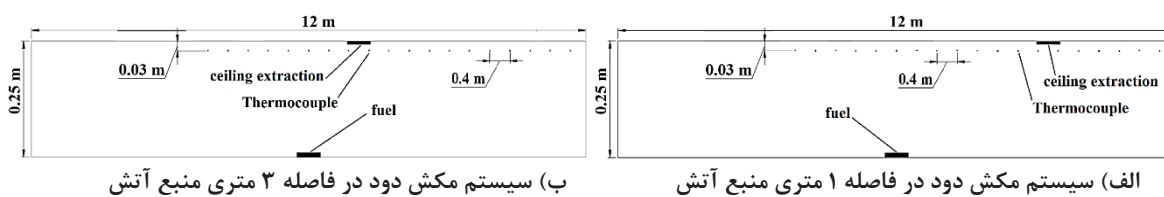
به محل قرارگیری سیستم مکش دود، با فعال شدن این سیستم حجم عمده از جریان دود و محصولات احتراق به سمت بالادست منبع آتش حرکت خواهند کرد و منجر به افزایش طول جریان برگشتی دود خواهند شد.

با توجه به شکل ۱۰ با افزایش سرعت مکش دود از ۱ تا ۲ متر بر ثانیه، میزان بیشینه دمای ثبت‌شده توسط ترموکوپل‌ها در هر یک از دو شرایط کاری که سیستم مکش دود در فاصله‌های ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته افزایش می‌یابد. به طوری که بیشترین دمای ثبت‌شده در هر دو حالت در سرعت مکش ۲ متر بر ثانیه اتفاق افتاده‌است. همانطور که در قسمت قبل نیز گفته شد، زمانی که سیستم تعبیه شده در سقف تونل جهت مکش دود در بالادست منبع آتش قرار داشته‌باشد، جریان هوای طولی قبل از رسیدن به منبع آتش تحت تأثیر سیستم مکش دود سقفی قرار گرفته و در نتیجه موجب کاهش زاویه انحراف شعله و افزایش دما خواهد شد. اما در سرعت مکش دود ۳ متر بر ثانیه با توجه بیشتر شدن میزان جریان



شکل ۱۰. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده از سیستم تهویه ترکیبی ( $V_L=0.265\text{ m/s}$ )

Fig.10. ceiling temperature distribution through the tunnel with the combination of ceiling extraction and longitudinal ventilation ( $V_L=0.265\text{ m/s}$ )



شکل ۱۱. هندسه‌های مورد بررسی با قرارگیری سیستم مکش دود در پایین‌دست منبع آتش

Fig. 11. Geometry examined by placing the smoke extraction system downstream of the fire source

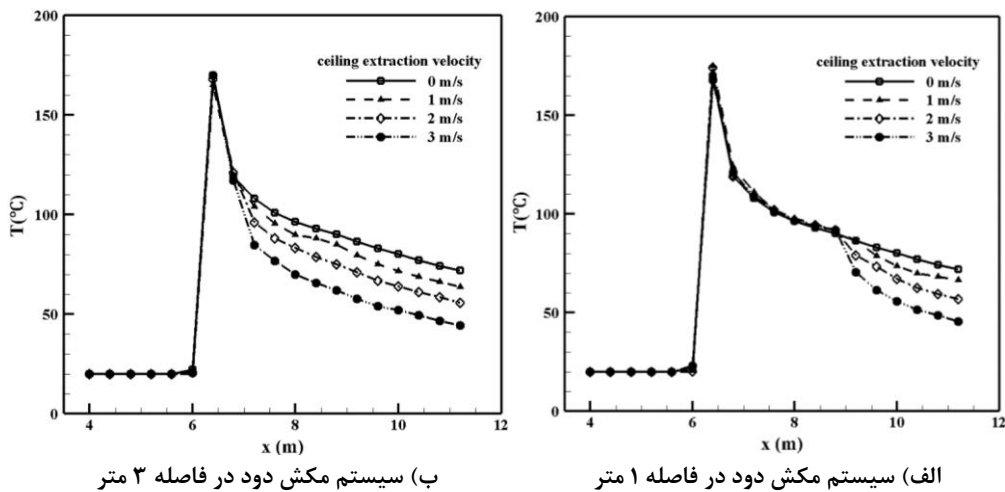
در تمامی مراحل شبیه‌سازی همانند شرایط قبل، نرخ تولید حرارت ۵ کیلووات و سرعت جریان ورودی نیز در دو حالت مختلف ۰/۵۳ و ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌است. به منظور بررسی تأثیر استفاده همزمان از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در سقف تونل بر جریان برگشتی دود و حداکثر دما، با استفاده از چهار سرعت مکش ۰، ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته‌است.

شکل ۱۲ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سیستم مکش دود در فاصله‌های ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته و سرعت تهویه طولی نیز ۰/۵۳ متر بر ثانیه می‌باشد نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص شده‌است و با توجه به این که ترموکوپل‌های قرار گرفته در بالادست منبع آتش در هر چهار سرعت مکش دود و در هر یک از دو شرایط کاری دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند، فرآیند برگشت جریان دود در هیچ یک از حالات اتفاق نیفتاده‌است. دلیل عدم برگشت جریان دود به سمت بالادست را می‌توان در محل قرار گرفتن سیستم تعبیه‌شده در سقف تونل و همچنین راستای حرکت جریان تهویه طولی جست و جو کرد. مطابق شکل ۱۲ سیستم مکش دود سقفی در پایین‌دست منبع آتش قرار گرفته و در نتیجه باعث می‌شود در زمان به کارگیری این سیستم جریان دود نیز به همین سمت هدایت شود. از طرفی جهت جریان هوا در سیستم تهویه طولی نیز از بالادست منبع آتش به سمت پایین‌دست آن می‌باشد. این

علاوه بر این مسئله همانطور که گفته شد با فعال‌شدن این سیستم و افزایش سرعت مکش جریان دود بیشینه دما نیز افزایش خواهد یافت. در نتیجه استفاده همزمان از این دو سیستم در زمان حریق در داخل تونل‌ها چنانچه از سرعت بحرانی تهویه استفاده شود نمی‌تواند شرایط قابل قبولی را ایجاد کند.

## ۷-۲- بررسی جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل با ترکیبی از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در پایین‌دست منبع آتش

شرایط دیگری که در کار حاضر به منظور مشخص‌شدن طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته‌است، قرارگرفتن سیستم مکش دود در سقف تونل و در پایین‌دست منبع آتش می‌باشد. در این مرحله از کار همانطور که در شکل ۱۱ مشخص شده‌است، در هندسه تونلی که در قسمت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفته‌بود، سیستم مکش دود بر خلاف شرایط کار قبلی در قسمت پایین‌دست منبع آتش قرار گرفته‌است. این سیستم مکش دود نیز همانند سیستم قبلی دارای ابعاد ۰/۱ در ۰/۱ مترمربع بوده و فاصله مرکز این سیستم مکش دود تا مرکز منبع آتش در دو شرایط کاری مختلف ۱ متر و ۳ متر در نظر گرفته شده‌است. همانطور که در شکل ۱۱ مشخص شده‌است، ۱۹ ترموکوپل در داخل تونل و نزدیک به سقف تونل به منظور اندازه‌گیری دما با فاصله ۰/۴ متری از یکدیگر قرار گرفته‌است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده از سیستم تهویه ترکیبی ( $V_L=0.53\text{ m/s}$ )

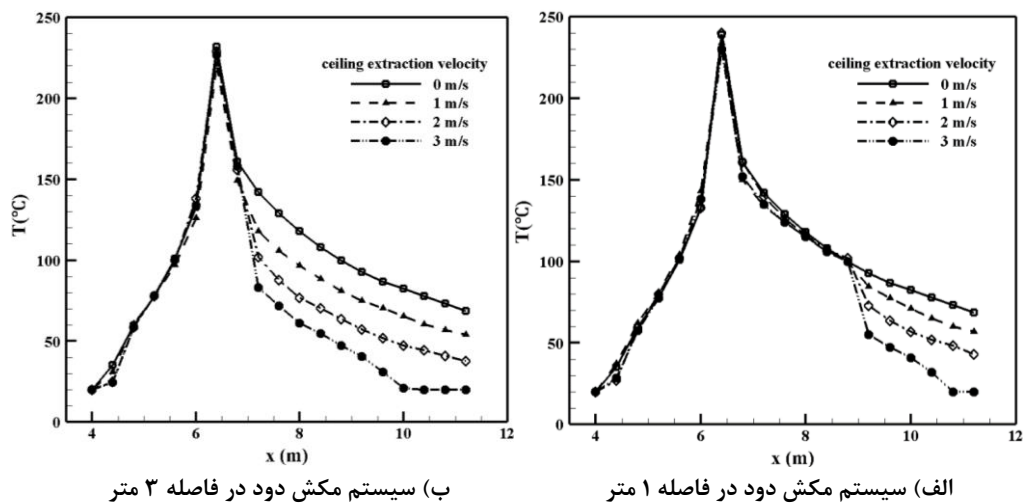
Fig. 12. ceiling temperature distribution through the tunnel with the combination of ceiling extraction and longitudinal ventilation ( $V_L=0.53\text{ m/s}$ )

خودنمایی می‌کند. زیرا بعد از این سیستم فاصله‌ای حدوداً ۵ متری از تونل در معرض هوای خنک قرار خواهد گرفت؛ اما زمانی که سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری از منبع آتش قرار دارد این فاصله از ۵ متر به ۳ متر کاهش خواهد یافت و سبب افزایش خطرات ناشی از دما بالا در طول تونل خواهد شد.

شکل ۱۳ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سیستم مکش دود در فاصله‌های ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته و سرعت تهویه طولی نیز ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه می‌باشد نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص شده‌است در هر چهار سرعت مکش و در هر یک از دو شرایط کاری فرآیند برگشت جریان دود به بالادست منیع آتش، استفاده از اصلی فرآیند برگشت جریان دود به بالادست منیع آتش، استفاده از سرعت تهویه طولی کمتر از سرعت بحرانی تهویه می‌باشد. این عامل باعث شده‌است که هر دو سمت منیع آتش را جریان دود فرا بگیرد و مسیری ایمن جهت خروج مسافران و فرآیند امداد رسانی وجود نداشته‌باشد. اما نکته حائز اهمیت طول جریان برگشتی دود در هر یک از شرایط کاری مختلف می‌باشد که سیستم مکش دود در فاصله ۱ و ۳ متری از منبع آتش قرار گرفته‌است. در هر یک از این دو شرایط کاری با وجود این که سرعت تهویه طولی نسبت به حالت سرعت بحرانی تهویه نصف شده‌است و انتظار برگشت جریان دود چشمگیر می‌باشد اما طول این لایه برگشتی حدوداً ۲ متر می‌باشد.

همراستایی در هدایت جریان دود باعث می‌شود برگشت جریان دود به سمت بالادست اتفاق نیفتد. در شرایطی هم که مکش جریان دود توسط سیستم سقفی انجام نشده‌است (سرعت مکش صفر)، با توجه به بکارگیری سرعت بحرانی در سیستم تهویه طولی باز هم برگشت جریان دود نخواهیم داشت. در نتیجه استفاده از سیستم مکش دود در پایین دست منیع آتش با توجه به این که منجر به برگشت جریان دود نمی‌شود می‌تواند یک مسیر کاملاً ایمن و عاری از دود و محصولات احتراق را برای عبور و فرار مسافران و همچنین فرآیند امداد رسانی ایجاد کند.

همانطور که در شکل ۱۲ مشخص شده‌است هرچه سرعت مکش دود توسط سیستم تعبیه‌شده در سقف تونل بیشتر شده‌است دماهای ثبت‌شده بعد از این سیستم در هر یک از دو حالت کاهش یافته‌است. هرچه سرعت مکش دود سیستم قرار گرفته در سقف تونل بیشتر باشد، حجم بیشتری از دود و محصولات احتراق توسط این سیستم از سقف تونل خارج می‌شود و حجمی کمتری از دود به سمت پایین دست این سیستم حرکت خواهد کرد. به همین علت به ترتیب در سرعت های مکش سقفی ۰، ۱، ۲ و ۳ متر بر ثانیه که حجم بیشتری از دود و محصولات احتراق از سقف تونل خارج شده‌است در قسمت پایین دست این سیستم دماهای کمتری توسط ترموکوپل‌ها ثبت شده‌است. البته این کاهش دما در قسمت پایین دست سیستم مکش دود در شرایطی که این سیستم در فاصله ۱ متری از منبع آتش قرار گرفته‌است بیشتر



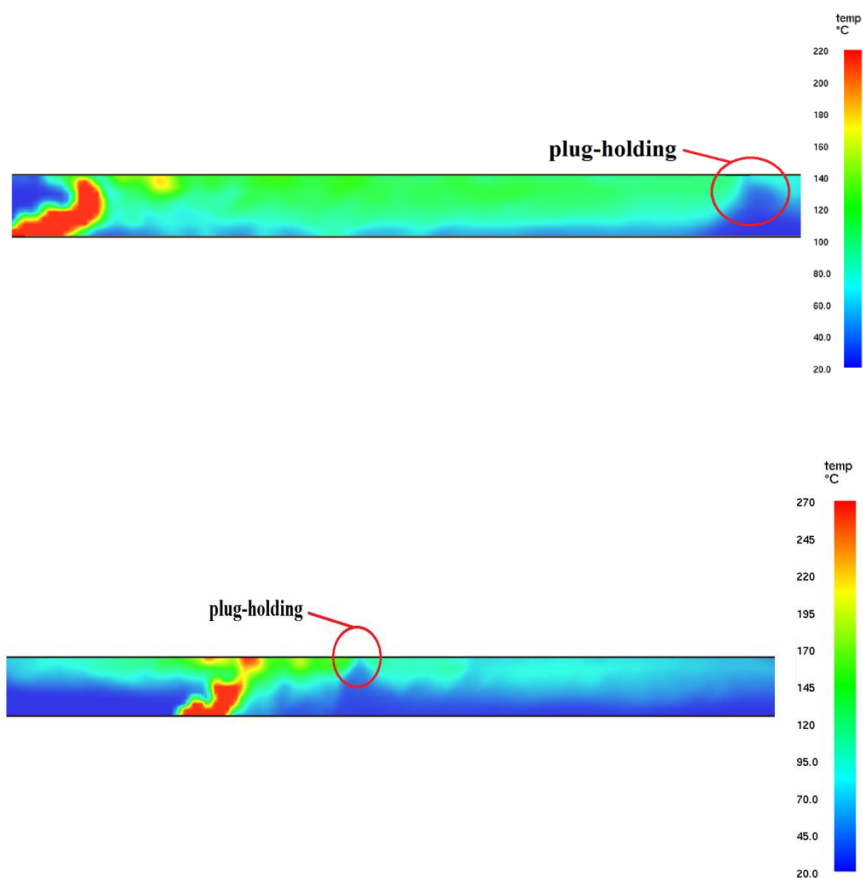
شکل ۱۳. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده از سیستم تهویه ترکیبی ( $V_L=0/265\text{m/s}$ )

Fig. 13. ceiling temperature distribution through the tunnel with the combination of ceiling extraction and longitudinal ventilation ( $V_L=0.265\text{ m/s}$ )

احتراق از سقف تونل خارج شده است در قسمت پایین دست این سیستم مکش دود دماهای کمتری توسط ترموکوپل‌ها ثبت شده است. مطابق شکل ۱۴ بررسی کانتورهای دمایی بدست آمده در شرایط مختلف کاری نشان دهنده پدیده پلاگ هلدینگ می‌باشند. این پدیده در شرایطی که سرعت تهویه طولی  $0/53$  متر بر ثانیه، سیستم مکش دود در فاصله ۳ متری از منبع آتش و فرآیند مکش دود نیز با سرعت ۳ متر بر ثانیه در حال انجام می‌باشد و همچنین در تمامی مواردی که سرعت تهویه طولی  $0/265$  متر بر ثانیه می‌باشد اتفاق افتاده است. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، پدیده پلاگ هلدینگ زمانی اتفاق می‌افتد که هوا تازه از لایه پایین تر به طور مستقیم به داخل سیستم مکش دود کشیده می‌شود. این پدیده که وابسته به پارامترهایی از جمله سرعت مکش دود و ضخامت لایه دود در زیر سقف می‌باشد باعث می‌شود حجم زیادی از هوای داخل تونل به جای دود و محصولات احتراق از داخل تونل خارج شود و سبب کاهش چمگیر کارایی سیستم مکش دود خواهد شد. در نتیجه به

علت کم بودن طول جریان برگشتی دود را در زمان کاهش سرعت تهویه طولی می‌توان در محل قرارگیری سیستم مکش دود سقف جست و جو کرد. با وجود این که سرعت تهویه طولی به طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است اما سیستم مکش سقف به صورت سیستمی مکمل عمل کرده است و مانع از گسترش جریان دود به سمت بالادست منبع آتش شده است. این سیستم با مکش جریان دود و محصولات احتراق به سمت پایین دست منبع آتش، کاهش سرعت ایجاد شده در سیستم تهویه طولی را جبران کرده و مانع از گسترش هرچه بیشتر جریان دود به سمت بالادست منبع آتش می‌شود.

همانطور که در شکل ۱۳ مشخص شده است و همانند شرایط قبل که از سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شده بود، هرچه سرعت مکش دود توسط سیستم تعبیه شده در سقف تونل بیشتر شده است، دماهای ثبت شده بعد از این سیستم در هر یک از دو حالت کاهش یافته است. به طوری که به ترتیب در سرعت های مکش سقفی ۳، ۲ و ۱ متر بر ثانیه که حجم بیشتری از دود و محصولات



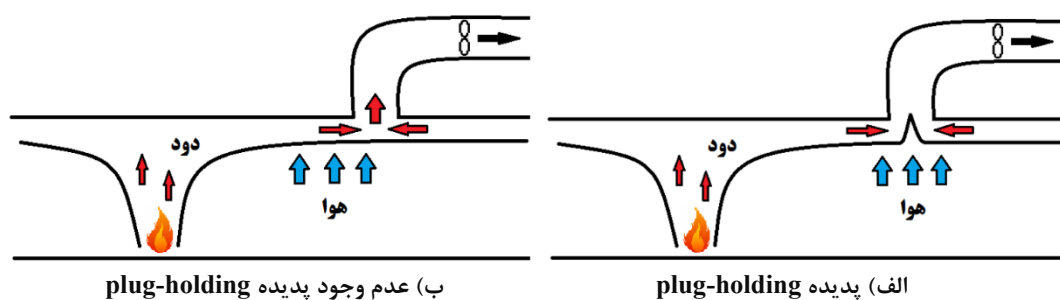
شکل ۱۴. پدیده پلاگ هلدینگ در داخل تونل  
**Fig. ۱۴. Plug-holding Phenomenon in tunnel**

۳ متر می‌باشد. ابعاد تونل در این مرحله از شبیه‌سازی نیز همانند شبیه‌سازی‌های قبل هم اندازه با هندسه تونل مورد استفاده در قسمت اعتبارسنجی می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۶ مشخص شده‌است، ۱۹ ترموکوپل در داخل تونل و با فاصله ۰/۳ متری از سقف تونل در دو شرایط کاری مختلف به منظور اندازه‌گیری دما با فاصله ۰/۴ متری از یکدیگر قرار گرفته‌است.

در تمامی مراحل شبیه‌سازی نرخ تولید حرارت ۵ کیلووات و سرعت تهویه طولی نیز در دو شرایط مختلف ۰/۵۳ متر بر ثانیه (سرعت بحرانی تهویه) و ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه (نصف سرعت بحرانی تهویه) در نظر گرفته شده‌است. به منظور بررسی تأثیر استفاده همزمان از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود در سقف تونل بر جریان برگشتی دود و حداکثر دما، با استفاده از چهار سرعت مکش ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه در هر یک از سیستم‌های مکش دود، طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مرحله از کار حاضر علاوه بر بررسی تأثیر استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در بالادست و پایین‌دست منبع آتش بر جریان برگشتی دود و حداکثر دما، مقایسه عملکرد استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود به جای استفاده از یک سیستم مکش دود مجزا نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است. زیرا مجموع

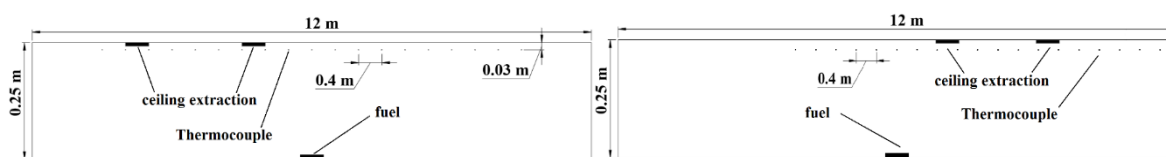
منظور جلوگیری از این پدیده در داخل تونل‌های مجهز به سیستم مکش دود سقفی باید دقت کافی در انتخاب سرعت مکش دود لحاظ شود. در مجموع در زمان استفاده ترکیبی از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش از سقف در پایین‌دست منبع آتش با وجود کاهش دما در طول تونل و عدم برگشت جریان دود در زمان استفاده از سرعت بحرانی تهویه باید در انتخاب سرعت مکش دود دقت شود تا از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود تا سیستم بیشترین کارایی لازم را داشته‌باشد.

۳-۷- بررسی جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل در زمان استفاده همزمان از سیستم تهویه طولی و دو سیستم مکش دود آخرین شرایطی که در کار حاضر به منظور مشخص شدن طول جریان برگشتی دود و حداکثر دما در داخل تونل مورد بررسی قرار می‌گیرد، استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود می‌باشد. در این مرحله از کار همانطور که در شکل ۱۶ مشخص شده‌است، با قرار گرفتن دو سیستم مکش دود در بالادست و پایین‌دست منبع آتش در دو شرایط کاری مجزا مدل‌سازی آتش‌سوزی داخل تونل انجام شده‌است. این سیستم‌ها دارای ابعاد ۰/۱ در ۰/۱ مترمربع بوده و فاصله هر یک از این سیستم‌ها تا مرکز منبع آتش ۱ متر و



شکل ۱۵. بررسی پدیده پلاگ هلدینگ در داخل تونل

Fig. 15. Investigation of the plug-holding phenomenon inside the tunnel



الف) استفاده از دو سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش ب) استفاده از دو سیستم مکش دود در پایین‌دست منبع آتش

شکل ۱۶. هندسه‌های مورد بررسی در زمان استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود

Fig. 16. Geometry examined by placing two smoke extraction system

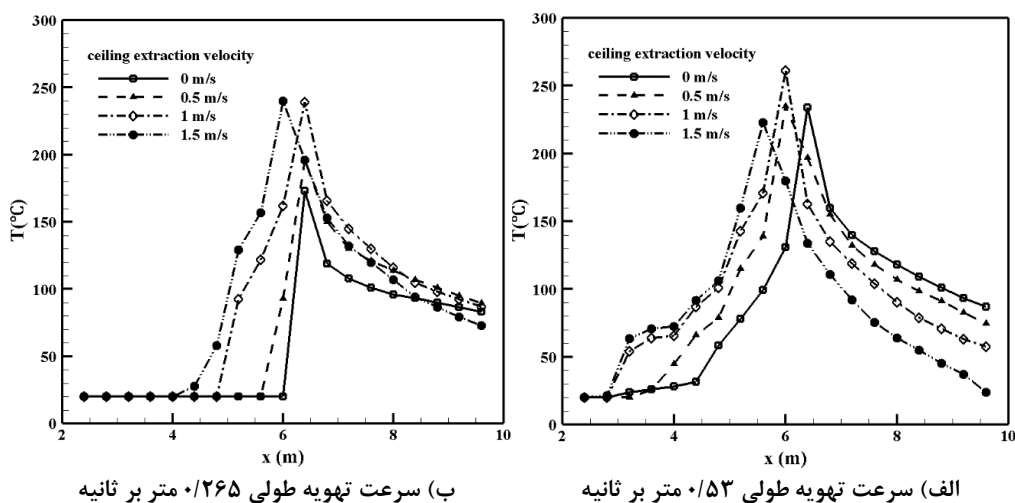
استفاده در سیستم تهویه طولی انتخاب شده است افزایش سرعت مکش دود سبب شده است میزان بیشینه دمای ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها افزایش یابد؛ به طوری که بیشترین دمای ثبت شده در سرعت مکش ۱/۵ متر بر ثانیه اتفاق افتاده است. همانطور که در قسمت قبلی کار نیز توضیح داده شد این مسئله به دلیل تأثیرگذاری سیستم مکش دود بر روی سرعت تهویه طولی و کاهش زاویه انحراف شعله می‌باشد. اما نکته حائز اهمیت در این شرایط کاهش میزان بیشینه دما نسبت به شرایطی می‌باشد که از سیستم‌های منفرد در فاصله‌ای ۱ و ۳ متری استفاده شده است.

در شکل ۱۷ در شرایطی که سرعت ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه در سیستم تهویه طولی استفاده شده است در تمامی سرعت‌های مکش و حتی در شرایطی که سیستم مکش دود غیر فعال می‌باشد برگشت جریان دود اتفاق است؛ زیرا سرعت تهویه طولی انتخاب شده نصف سرعت بحرانی تهویه می‌باشد و این امر سبب برگشت جریان دود خواهد شد. با فعال شدن سیستم مکش دود مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت مکش دود حجم بیشتری از جریان دود به سمت بالادست منبع آتش حرکت خواهد کرد و این امر منجر به افزایش طول جریان برگشتی دود خواهند شد. طول این لایه برگشتی دود نسبت به شرایط مشابهی که از سیستم منفرد در فاصله ۳ متری استفاده شده است کمتر و نسبت به شرایطی که از سیستم منفرد در فاصله ۱ متری استفاده شده است بیشتر خواهد بود.

دبی حجمی هوای مکش شده توسط این دود سیستم برابر با دبی حجمی خارج شده توسط یک فن می‌باشد که در شرایط کاری قبل مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۷ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سرعت سیستم تهویه طولی ۰/۵۳ و ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه می‌باشد و سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش قرار گرفته نشان می‌دهد. مطابق این شکل در شرایطی که سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شده است و سیستم مکش دود نیز غیر فعال می‌باشد برگشت جریان دود اتفاق نیفتاده است. با فعال شدن سیستم مکش دود در این سرعت تهویه طولی در تمامی سرعت‌های مکش دود ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه برگشت جریان دود اتفاق افتاده است. مطابق شکل ۱۷ هرچه سرعت مکش دود توسط سیستم‌های قرار گرفته در سقف تونل بیشتر شده است، فرآیند برگشت جریان دود نیز افزایش یافته است. اما نکته قابل بررسی در این سیستم نسبت به شرایط استفاده مجزا از دو سیستم در فاصله‌های ۱ و ۳ متری تغییر در میزان برگشت جریان دود می‌باشد. در زمان استفاده از دو سیستم تهویه همزمان طول جریان برگشتی دود نسبت به شرایط استفاده از سیستم منفرد در فاصله ۳ متری کاهش و نسبت به شرایط استفاده از سیستم منفرد در فاصله ۱ متری افزایش یافته است.

در همین شرایط که سرعت بحرانی تهویه به عنوان سرعت مورد



شکل ۱۷. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش

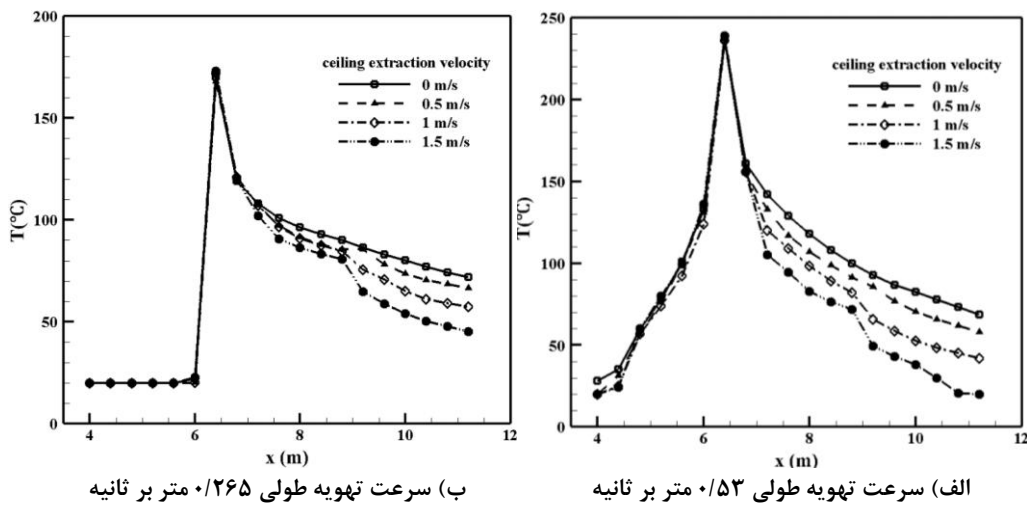
Fig. 17. ceiling temperature distribution through the tunnel with use of two smoke extraction systems upstream of fire source

در همین شرایط که سرعت بحرانی تهویه به عنوان سرعت مورد استفاده در سیستم تهویه طولی انتخاب شده است افزایش سرعت مکش دود در میزان بیشینه دمای ثبت شده در داخل تونل تأثیر زیادی نخواهد داشت. استفاده از سیستم مکش دود همزمان سبب شده در قسمت پایین دست این سیستم هوای نسبتاً خنک تری در داخل تونل جریان داشته باشد. البته این شرایط نسبت به شرایط مشابهی که از سیستم منفرد در فاصله ۳ متری استفاده شده است مطلوبتر و نسبت به شرایطی که از سیستم منفرد در فاصله ۱ متری استفاده شده است کارایی کمتری خواهد داشت.

اما نکته حائز اهمیت آنست که در زمان استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در پایین دست منبع آتش مشاهده می شود از بین رفتن پدیده پلاگ هلدینگ می باشد. همانطور که در قسمت قبل بیان شد در شرایطی که سرعت تهویه طولی ۰/۵۳ متر بر ثانیه، سیستم مکش دود در فاصله ۳ متر از منبع آتش و فرآیند مکش دود نیز با سرعت ۳ متر بر ثانیه در حال انجام بوده است پدیده پلاگ هلدینگ رخ داده و حجم زیادی از هوای داخل تونل به جای دود و محصولات احتراق از داخل تونل خارج شده است. در این مرحله از کار مشاهده شد که استفاده از دو سیستم مکش دود به جای استفاده از یک سیستم منفرد می تواند از این پدیده جلوگیری کند و از خروج هوای داخل تونل به جای دود و محصولات احتراق از داخل تونل جلوگیری شود. همچنین مشاهده شد که با جلوگیری از پدیده پلاگ هلدینگ

در همین شرایط که سرعت ۰/۲۶۵ متر بر ثانیه به عنوان سرعت مورد استفاده در سیستم تهویه طولی انتخاب شده است میزان بیشینه دما نسبت به شرایطی که از سیستم های منفرد در فاصله های ۱ و ۳ متری استفاده شده کاهش پیدا کرده است.

شکل ۱۸ نمودار تغییرات دما در داخل تونل را در چهار سرعت مکش و در دو شرایط کاری مختلف که سرعت سیستم تهویه طولی ۰/۲۶۵ و ۰/۵۳ متر بر ثانیه می باشد و سیستم مکش دود در پایین دست منبع آتش قرار گرفته نشان می دهد. مطابق این شکل در شرایطی که سرعت بحرانی تهویه در سیستم تهویه طولی استفاده شده است، در تمامی سرعت های مکش دود و همچنین شرایطی که سیستم مکش سقف غیر فعال می باشد نشانه ای از برگشت جریان دود دیده نمی شود؛ زیرا تمامی ترموکوپل های قرار گرفته در بالادست منبع آتش دمای ۲۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهند. این موضوع با توجه به بکارگیری سرعت بحرانی در سیستم تهویه طولی و همچنین همراستایی جریان ایجاد شده توسط سیستم تهویه طولی و سیستم مکش سقف قابل توجیه می باشد. عدم برگشت جریان دود به سمت بالادست سبب می شود مسیری ایمن و عاری از دود و محصولات احتراق برای عبور و فرار مسافران و همچنین فرآیند امداد رسانی ایجاد شود. در این مرحله از کار تفاوت به نسبت چشمگیری در لایه برگشتی دود در زمان استفاده از دو سیستم مکش دود فعال و سیستم های مکش دود مجزا در در فاصله های ۱ و ۳ متری دیده نمی شود.



شکل ۱۸. نمودار تغییرات دما در داخل تونل در زمان استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود در پایین دست منبع آتش

Fig. 18. ceiling temperature distribution through the tunnel with use of two smoke extraction systems downstream of fire source

عملکرد سیستم مکش دود نیز بهتر شده و کاهش دمای ۵ درجه‌ای توسط ترموکوپل‌ها ثبت شده‌است.

در شکل ۱۸ در شرایطی که سرعت  $0/۲۶۵$  متر بر ثانیه در سیستم تهویه طولی استفاده شده‌است در تمامی سرعت‌های مکش و حتی در شرایطی که سیستم مکش دود غیرفعال می‌باشد برگشت جریان دود اتفاق افتاده‌است؛ زیرا سرعت تهویه طولی انتخاب شده نصف سرعت بحرانی تهویه می‌باشد و این امر سبب برگشت جریان دود خواهد شد. اما نکته حائز اهمیت جلوگیری سیستم مکش دود از گسترش زیاد جریان دود برگشتی به سمت بالادست منبع آتش می‌باشد. در این شرایط مشابه به شرایط قبلی که از سیستم‌های منفرد و مجزا فاصله‌ای ۱ و ۳ متری استفاده شده‌است، با وجود این که سرعت تهویه طولی به طور چشمگیری کاهش پیدا کرده‌است اما سیستم مکش سقف به صورت سیستمی مکمل عمل کرده و مانع از گسترش جریان دود به بالادست منبع آتش شده‌است.

در همین شرایط که سرعت  $0/۲۶۵$  متر بر ثانیه به عنوان سرعت مورد استفاده در سیستم تهویه طولی انتخاب شده‌است افزایش سرعت مکش دود در میزان بیشینه دمای ثبت شده در داخل تونل تأثیر زیادی نخواهد داشت اما هرچه سرعت مکش دود توسط سیستم تعبیه شده در سقف تونل بیشتر شده‌است، دماهای ثبت شده بعد از این سیستم کاهش یافته‌است. به طوری که به ترتیب در سرعت‌های مکش سقفی  $0/۵$ ،  $1$  و  $0/۵$  متر بر ثانیه که حجم بیشتری از دود و محصولات احتراق از سقف تونل خارج شده‌است در قسمت پایین دست این سیستم‌ها دماهای کمتری توسط ترموکوپل‌ها ثبت شده‌است. در این شرایط بر خلاف شرایط قبل که در تمامی سرعت تهویه طولی  $0/۲۶۵$  متر بر ثانیه پدیده پلاگ هلدینگ اتفاق افتاده بود تا حد زیادی از این پدیده جلوگیری شده‌است.

در مجموع می‌توان گفت استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود نسبت به استفاده از سیستم‌های مجزا می‌تواند مزیت‌های قابل توجهی را ایجاد کند. همانطور که بررسی شد استفاده از دو سیستم مکش دود فعال در بالادست منبع آتش به جای استفاده از سیستم‌های منفرد می‌تواند در میزان ثبت بیشینه دما تأثیرگذار باشد. به طوری که استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود سبب کاهش میزان بیشینه دما شده‌است. همچنین بررسی‌ها نشان داد استفاده از دو سیستم مکش دود فعال در پایین دست منبع آتش نیز می‌تواند مفید

باشد. استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود به جای استفاده از سیستم‌های منفرد و مجزا سبب می‌شود تا حد زیادی از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود که این امر سبب می‌شود تا سیستم بیشترین کارایی لازم را داشته‌باشد.

## ۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی تأثیر استفاده همزمان از تهویه طولی و مکش از سقف در آتش‌سوزی داخل تونل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. این بررسی در دو شرایط متفاوت که سیستم مکش سقف در بالادست و پایین دست منبع آتش قرار گرفته بود انجام شد. شبیه‌سازی آتش‌سوزی برای هندسه مورد نظر با استفاده از نرم افزار منبع باز افدی‌اس صورت گرفت. بررسی آتش‌سوزی در داخل تونل در زمان استفاده همزمان از تهویه طولی و مکش از سقف نشان داد:

۱- در زمان استفاده از سیستم مکش دود در بالادست منبع آتش، گسترش جریان دود در هر دو سمت منبع آتش می‌باشد. در این حالت هیچ مسیر کاملاً ایمنی به منظور عبور افراد از داخل تونل به سمت بیرون و امداد رسانی وجود نخواهد داشت. علاوه بر این مسئله با فعال شدن سیستم مکش دود و افزایش سرعت مکش جریان دود بیشینه دما نیز افزایش خواهد یافت. در نتیجه استفاده همزمان از این دو سیستم در زمان حریق در داخل تونل‌ها نمی‌تواند شرایط قابل قبولی را ایجاد کند.

۲- در زمان استفاده ترکیبی از سیستم تهویه طولی و سیستم مکش دود از سقف در پایین دست منبع آتش با وجود کاهش دما در طول تونل و عدم برگشت جریان دود در زمان استفاده از سرعت بحرانی تهویه باید در انتخاب سرعت مکش دود دقت شود تا از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود تا سیستم بیشترین کارایی لازم را داشته‌باشد.

۳- استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود نسبت به استفاده از سیستم‌های مجزا می‌تواند مزیت‌های قابل توجهی را ایجاد کند. همانطور که بررسی شد استفاده از دو سیستم مکش دود فعال در بالادست منبع آتش به جای استفاده از سیستم‌های منفرد می‌تواند در میزان ثبت بیشینه دما تأثیرگذار باشد. به طوری که استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود سبب کاهش میزان بیشینه دما شده‌است. همچنین بررسی‌ها نشان داد استفاده از دو سیستم مکش دود فعال



- Wind Velocity During Fire Accident in Alborz Tunnel, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 1)44 (2012) 55-47(In Persian).
- [3] Y.J. Ko, G.V. Hadjisophocleous, Study of smoke backlayering during suppression in tunnels, Fire safety journal, 58 (2013) 247-240.
- [4] M. Mounesan, M.R. Talaei, H. molatefi, Investigation of effective parameters on critical ventilation velocity in underground tunnels, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 1)48 (2016) 54-41 (In Persian).
- [5] Z. Tang, Y. Liu, J. Yuan, Z. Fang, Study of the critical velocity in tunnels with longitudinal ventilation and spray systems, Fire Safety Journal, 90 (2017) 147-139.
- [6] G. Heidarinejad, R. Vasheghani Farahani, Numerical Simulation of Fire in Tunnel with Ventilation and Suppression Systems, Modares Mechanical Engineering, 8)18 (2018) 220-209(In Persian).
- [7] S.O. Haghani, E. Barati, Numerical study on the effect of blower location on the maximum temperature and spread of smoke in case of fire inside tunnels, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 11)52 (2019) 180-171 (In Persian).
- [8] Y. Zhang, S. Xing, R. Chen, L. Chen, T. Li, P. Mao, Experimental study on maximum temperature beneath tunnel ceiling under the condition of double fire sources, Tunnelling and Underground Space Technology, 106 (2020) 103624.
- [9] J. Kong, Z. Xu, W. You, B. Wang, Y. Liang, T. Chen, Study of smoke back-layering length with different longitudinal fire locations in inclined tunnels under natural ventilation, Tunnelling and Underground Space Technology, 107 (2021) 103663.
- [10] N. Meng, X. Hu, M. Tian, Effect of blockage on critical ventilation velocity in longitudinally ventilated tunnel fires, Tunnelling and Underground Space Technology, 106 (2020) 103580.
- [11] N. Chalasani, M. Greiner, A. Suo-Anttila, Benchmarking of Container Analysis Fire Environment simulation using the memorial tunnel fire ventilation tests, Journal of Fire Protection Engineering, 1)22 (2012) 70-45.

در پایین دست منبع آتش نیز می‌تواند مفید باشد. استفاده همزمان از دو سیستم مکش دود به جای استفاده از سیستم‌های مجزا سبب می‌شود تا حد زیادی از پدیده پلاگ هلدینگ جلوگیری شود که این امر موجب می‌شود تا سیستم بیشترین کارایی لازم را داشته‌باشد.

## فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$C_p$	گرمای ویژه در فشار ثابت، J/kgk
$D^*$	طول مقیاس چشمه آتش
$D_\alpha$	ضریب نفوذ گونه $\alpha$ ام
$f_b$	نیروی خارجی، Kgm/s <sup>2</sup>
$g$	شتاب گرانشی، m/s <sup>2</sup>
$h_s$	آنتالپی محسوس، J
$\dot{m}_\alpha''$	نرخ تولید گونه $\alpha$ ام، kg/m <sup>3</sup> s
$P$	فشار، kg/ms <sup>2</sup>
$Q$	نرخ گرمای آزاد شده، J/s
$\dot{q}''$	نرخ انرژی آزاد شده بر واحد حجم، J/sm <sup>3</sup>
$\dot{q}''$	بردار شار حرارتی، Kw/m <sup>2</sup>
$u$	سرعت در جهت طولی، m/s
$Y$	کسر جرمی

### علائم یونانی

$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	تنش برشی، kg/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	نرخ اتلاف انرژی، kg/ms <sup>3</sup>
$\alpha$	گونه‌ها

### زیرنویس

$\infty$	شرایط هوای اتمسفری
$S$	دوده

## مراجع

- [1] P.H. Thomas, The movement of smoke in horizontal passages against an air flow, Fire Safety Science, 723 (1968) 1-1.
- [2] B. Niknam, H. madani, H. Salarirad, Determining Critical

- fires, Fire safety journal, 8-6)45) (2010) 370-361.
- [15] K.B. McGrattan, H.R. Baum, R.G. Rehm, Large eddy simulations of smoke movement, Fire Safety Journal, 2)30) (1998) 178-161.
- [16] Y. Wu, M.A. Bakar, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity, Fire Safety Journal, 4)35) (2000) 390-363.
- [12] F.W. Mowrer, P.A. Friday, Comparison of FDS Model Predictions With FM/SNL Fire Test Data, (2001).
- [13] J. Floyd, G. Forney, S. Hostikka, T. Korhonen, R. McDermott, and K. B. McGrattan, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide vol. Volume 1: Mathematical Model, NIST special publication, 1018, (2012).
- [14] Y.Z. Li, B. Lei, H. Ingason, Study of critical velocity and backlayering length in longitudinally ventilated tunnel

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*S.O. Haghani, E. Barati, Numerical simulation simultaneous use of longitudinal ventilation and smoke extraction from the ceiling in fires inside tunnels, Amirkabir J. Mech Eng., 53(7) (2021) 4411-4428.*

DOI: 10.22060/mej.2020.18513.6832

