

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن

رساله دکتری

**مدل سازی و تحلیل توزیع جریان هوا و آلاینده ها در هنگام حفر تونل های بلند
با ماشین حفاری تمام مقطع (TBM)
(مطالعه موردی تونل انتقال آب چم شیر)**

نگارنده: حمیدرضا نظارت

استاد راهنما

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

استاد مشاور

دکتر محسن نظری

شهریور ۱۳۹۸

تقدیم به

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دید

تشکر و قدردانی

در پایان این رساله به منزله آیه شریفه

« من لم يشكر المخلوق، لم يشكر الخالق »

بر خود واجب می دانم از خانواده‌ام که سنگ‌های بنیادین بنای فکری‌ام را مدیون تربیت آنان هستم، تقدیر و تشکر کنم. سپاس بی پایان خود را نیز به پاس همیاری به همسر عزیزم تقدیم می‌دارم؛ و از زحمات و راهنمایی‌های ارزنده دکتر سیدمحمد اسماعیل جلالی و دکتر محسن نظری، استادان علم و اخلاق که در به ثمر رسیدن این رساله نقش بسزایی داشتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. لازم می‌دانم مراتب امتنان خویش را از توجه ویژه‌ای که اعضای هیات علمی و کارکنان دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک به خصوص آقای شاه حسینی به بنده داشته‌اند، تقدیم دارم.

تعهد نامه

اینجانب **حمیدرضا نظارت** دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدل سازی و تحلیل توزیع جریان هوا و آلاینده ها در هنگام حفر تونل های بلند با ماشین حفاری تمام مقطع (TBM)** (مطالعه موردی تونل انتقال آب چم شیر) تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

حکیده

ماشین‌های حفاری تمام مقطع با ایجاد فضای ایمن، سالمتر و اقتصادی، در صنعت تونلسازی انقلابی ایجاد کرده‌اند. برای ایجاد یک محیط امن برای کارکنان و تجهیزات، کمیت و کیفیت جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع باید کافی باشد تا گازها ترقیق شوند، گردوغبار از بین برود و دمای هوا کنترل شود. مدل‌سازی عددی توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها به‌طور عمده در تونل‌های معدنی و کارگاه استخراج متمرکز شده و کمتر به تهویه در طول ساخت‌وساز تونل‌های طولانی به‌ویژه در شرایط حفر با ماشین حفاری تمام مقطع توجه شده است. با توجه به حضور و تردد کارکنان در ماشین حفاری تمام مقطع و وجود آلاینده‌های مختلف، بررسی الگوهای توزیع جریان هوا به‌منظور افزایش ایمنی و سلامت شغلی کارکنان ضروری است. این پژوهش دو هدف اصلی را دنبال می‌کند؛ نخست، مطالعه الگوهای توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع و بررسی راهبردهای کاهش مناطق مرده و دوم، بررسی انتشار آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو و حذف مناطق آلوده برای حل مشکلات ایمنی و سلامت است. در این رساله نقش افزایش شدت جریان هوا در بادبزن دهشی کمکی بر حجم منطقه مرده و ناحیه تنفسی کارکنان بررسی شده است. راهبردهای دیگری نظیر خاموش کردن بادبزن مکشی، نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و تاثیر هم‌زمان نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی به‌منظور کاهش منطقه مرده و آلوده بهینه‌سازی توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع مطالعه شده است. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد استفاده از راهبرد هم‌زمان نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی می‌تواند بهبود چشمگیری در توزیع جریان هوا و کاهش وسعت منطقه مرده و حجم آلودگی غیرمجاز گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع ایجاد کند. در این پژوهش نتایج مدل‌سازی عددی توسط اندازه‌گیری‌های میدانی در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر اعتبارسنجی شده است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی، سامانه تهویه، ماشین حفاری تمام مقطع، دینامیک سیالات محاسباتی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

1. Nezarat H.R, Jalali S.M.E and Nazari M., "Airflow inside tunnel boring machine: A numerical study and an experimental verification" Journal of Mining and Environment, Volume 10, Issue 3, summer 2019, page 623-632.
۲. نظارت ح.ر؛ جلالی س.م.ا؛ نظری م. "بررسی توزیع جریان هوا در قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع تونل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی - مطالعه موردی ماشین حفاری تونل چم-شیر" مجله علمی پژوهشی روشهای تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره ۹، شماره ۱۹ تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۰-۱.
۳. نظارت ح.ر؛ جلالی س.م.ا؛ نظری م؛ خسروتاش م. (۱۳۹۷) "مخاطرات آلودگی هوا در ماشین‌های حفاری تمام مقطع مکانیزه" سومین کنفرانس بین المللی و چهارمین کنفرانس ملی عمران، معماری و طراحی شهری؛ دانشگاه هنر اسلامی تبریز.
۴. نظارت ح.ر؛ جلالی س.م.ا؛ نظری م. (۱۳۹۵) "مدل سازی توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع تونل" پنجمین همایش ملی مدیریت آلودگی هوا و صدا؛ مرکز همایش های بین المللی رازی.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- آشنایی	۲
۲-۱- سامانه تهویه در ماشین حفاری تمام مقطع	۳
۱-۲-۱- بادبزن	۴
۲-۲-۱- لوله تهویه	۶
۳-۲-۱- غبارگیر	۷
۳-۱- پیشینه تحقیق	۷
۱-۳-۱- بررسی مدل‌های مورد استفاده برای طراحی سامانه تهویه در فضاهای زیرزمینی	۸
۲-۳-۱- پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی انتشار گاز، گردوغبار و ذرات دیزلی	۱۰
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق	۱۴
۵-۱- اهداف تحقیق	۱۵
۶-۱- جنبه‌های نوآوری تحقیق	۱۵
۷-۱- روش تحقیق	۱۶
۱-۷-۱- نرم‌افزار مورد استفاده برای ایجاد شبکه عددی	۱۷
۲-۷-۱- نرم‌افزار مورد استفاده برای حل عددی	۱۷
۸-۱- جمع‌بندی	۱۹
فصل دوم: مطالعات میدانی	۲۱
۱-۲- آشنایی	۲۲
۲-۲- طراحی سامانه تهویه تونل چم شیر	۲۳
۱-۲-۲- برآورد شدت جریان هوا بر اساس حداقل هوای لازم برای تنفس کارکنان	۲۳
۲-۲-۲- برآورد شدت جریان هوای لازم برای ترقیق آلاینده‌های خروجی اگزوز لوکوموتیو	۲۳
۳-۲-۲- برآورد حداقل سرعت عبور هوا در تهویه تونل چم شیر	۲۴
۴-۲-۲- برآورد شدت جریان هوای مورد نیاز برای حذف گرد و غبار	۲۴
۵-۲-۲- برآورد شدت جریان هوای مورد نیاز	۲۵
۳-۲- بادبزن‌های تهویه در تونل چم شیر	۲۵
۱-۳-۲- بادبزن اصلی	۲۷
۲-۳-۲- بادبزن کمکی دهشی	۲۹
۳-۳-۲- بادبزن کمکی مکشی	۳۱
۴-۲- بررسی عملکرد بادبزن‌ها از طریق اندازه‌گیری میدانی	۳۱
۱-۴-۲- روش اندازه‌گیری میدانی سرعت و دمای هوا در ماشین حفاری تمام مقطع	۳۱
۲-۴-۲- ابزارهای اندازه‌گیری میدانی سرعت هوا	۳۴
۳-۴-۲- اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع	۳۵
۴-۴-۲- کیفیت هوا در منطقه تنفسی کارکنان	۳۷
۵-۲- جمع‌بندی	۴۲
فصل سوم: روش عددی	۴۳

۴۴	۱-۳- آشنایی
۴۴	۲-۳- مدل سازی هندسی
۴۸	۳-۳- تولید شبکه عددی
۴۹	۳-۳-۱- وضوح شبکه در نزدیکی دیواره (استفاده از Y^+)
۵۱	۳-۳-۲- ضریب رشد لایه مرزی
۵۲	۳-۳-۳- تعداد طبقات لایه مرزی
۵۳	۳-۳-۴- استقلال شبکه
۵۴	۳-۳-۵- کیفیت شبکه
۵۸	۳-۳-۶- پارامترهای آماری کیفیت شبکه توری
۶۱	۳-۴- تعیین شرایط مرزی
۶۳	۳-۵- روش حل
۶۳	۳-۵-۱- فرضیات مساله
۶۳	۳-۵-۲- معادلات حل
۶۴	۳-۵-۳- مدل سازی جریان چند فازی
۶۵	۳-۵-۴- گسسته سازی معادلات
۶۶	۳-۵-۵- تغییرات چگالی وابسته به دما
۶۷	۳-۵-۶- اثرات نیروی شناوری
۶۸	۳-۵-۷- همگرایی مساله
۷۰	۳-۶- جمع بندی
۷۱	فصل چهارم: مدل سازی توزیع جریان هوا
۷۲	۴-۱- مدل سازی توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع
۷۷	۴-۲- تعیین مناطق مرده در ماشین حفاری تمام مقطع
۸۱	۴-۳- تحلیل حساسیت
۸۱	۴-۳-۱- افزایش سرعت جریان هوا در ورودی شماره ۱ و ۲
۸۳	۴-۳-۲- خاموش شدن بادبزن مکشی کمکی
۸۶	۴-۳-۳- نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین
۹۱	۴-۳-۴- نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی
۹۴	۴-۳-۵- کاهش فاصله مجرای تهویه تا سپر ماشین
۹۶	۴-۴- اعتبارسنجی مدل
۹۸	۴-۵- جمع بندی
۹۹	فصل پنجم: چگونگی توزیع آلودگی در ماشین حفاری تمام مقطع
۱۰۰	۵-۱- آشنایی
۱۰۰	۵-۲- مدل سازی توزیع گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو
۱۰۴	۵-۲-۱- تاثیر عملکرد بادبزن مکشی کمکی بر توزیع آلودگی ها در شرایط مینا
۱۰۵	۵-۲-۲- تاثیر عملکرد بادبزن دهشی کمکی بر پراکنش آلودگی ها در شرایط مینا
۱۰۸	۵-۳- تحلیل حساسیت
۱۰۸	۵-۳-۱- خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی
۱۱۰	۵-۳-۲- نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری

۱۱۲.....	۳-۳-۵- نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی به صورت همزمان
۱۱۵.....	۴-۵- جمع بندی
۱۱۶.....	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۱۷.....	۱-۶- نتیجه گیری
۱۱۹.....	۲-۶- پیشنهادها
۱۲۰.....	منابع
۱۲۵.....	پیوست

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ - جانمایی بادبزن و مجرای تهویه در تونل‌ها..... ۳
- شکل ۲-۱ - بادبزن مورد استفاده در دهانه ورودی تونل خط ۷ مترو تهران ۵
- شکل ۳-۱ - اجزای کانال تهویه [۷] ۶
- شکل ۱-۲ - نمایی از اجزای سامانه تهویه در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر ۲۶
- شکل ۲-۲ - نمایی از بادبزن اصلی کوژماکوستیک در دهانه تونل چم‌شیر ۲۷
- شکل ۳-۲ - منحنی مشخصه بادبزنهای اصلی سری شده کوژماکوستیک ۲۸
- شکل ۴-۲ - نمایی از خشاب کانال تهویه و شیپوری بر روی شاسی ۱ و بادبزن دهشی کمکی بر روی شاسی ۲ ۲۹
- شکل ۵-۲ - منحنی مشخصه بادبزن کمکی دهشی ۵۵ کیلووات گیا ۳۰
- شکل ۶-۲ - منحنی مشخصه بادبزن کمکی مکشی ۱۵ کیلووات گیا ۳۲
- شکل ۷-۲ - محل نقاط نمونه‌برداری به روش چندنقطه‌ای ثابت ۳۳
- شکل ۸-۲ - نمونه‌برداری دما و سرعت هوا توسط دستگاه بادسنج مینی پره‌ای ۳۶
- شکل ۹-۲ - محل اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا در ورودی و خروجی بادبزن‌ها ۳۶
- شکل ۱۰-۲ - محل دقیق نمونه‌برداری دما و سرعت جریان هوا در مقاطع عرضی و طولی منطقه تنفسی کارکنان ۳۹
- شکل ۱-۳ - ماشین حفاری تمام مقطع مدل S124 در دهانه ورودی تونل انتقال آب چم‌شیر ۴۶
- شکل ۲-۳ - نمایی از مدل هندسی طراحی شده ماشین حفاری تمام مقطع در تونل چم‌شیر ۴۷
- شکل ۳-۳ - نمایی از لایه مرزی ایجادشده با ۷ طبقه و ارتفاع اولین سلول ۱ سانتیمتر در نزدیکی دیواره ۵۳
- شکل ۴-۳ - تحلیل شبکه با استفاده از تعداد سلولهای مختلف و سرعت محلی هوا در مقطع عرضی ۹ ۵۴
- شکل ۵-۳ - نمایش بردارها و سلول در محاسبه کیفیت تعامدی ۵۵
- شکل ۶-۳ - اندازه بهینه و واقعی سلول ۵۶
- شکل ۷-۳ - نمودار درصد فراوانی شاخص‌های کیفیت شبکه بر اساس نوع سلول ۵۹
- شکل ۸-۳ - جانمایی و محل شرایط مرزی ورودی و خروجی ۶۲
- شکل ۹-۳ - تغییرات سرعت در نقطه پایش بر اساس تعداد تکرار ۶۹
- شکل ۱۰-۳ - مقادیر باقیمانده معادلات پیوستگی و اندازه حرکت برای ۳۰۰۰ مرحله تکرار ۶۹
- شکل ۱-۴ - مقادیر سرعت جریان هوا در مقاطع عرضی قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع ۷۳
- شکل ۲-۴ - الگوی تغییرات سرعت جریان هوا در مقاطع عرضی قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع ۷۵
- شکل ۳-۴ - الگوی تغییرات سرعت در مقطع طولی و محل تردد و حضور کارکنان ۷۶
- شکل ۴-۴ - مناطق مرده در مقاطع عرضی از ماشین حفاری تمام مقطع ۷۹
- شکل ۵-۴ - منطقه مرده در مقطع طولی از محل حضور و تردد کارکنان در شرایط مبنا ۸۰
- شکل ۶-۴ - تاثیر افزایش سرعت هوا در ورودی بر الگوهای تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۷ ۸۲
- شکل ۷-۴ - منطقه مرده در مقطع طولی از محل حضور و تردد کارکنان در صورت خاموش شدن بادبزن مکشی ۸۴
- شکل ۸-۴ - متوسط سرعت هوا در هر مقطع عرضی در صورت خاموش بودن بادبزن مکشی کمکی ۸۵
- شکل ۹-۴ - سرعت هوا در هر ایستگاه برحسب متر بر ثانیه در صورت خاموش بودن بادبزن مکشی کمکی ۸۶
- شکل ۱۰-۴ - مقایسه شرایط مبنا و نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری ۸۷
- شکل ۱۱-۴ - منطقه مرده و منطقه گذار در مقطع طولی ماشین در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه ۸۹
- شکل ۱۲-۴ - حجم منطقه با سرعت بیشینه غیرمجاز در حالت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری ۹۰

- شکل ۴-۱۳- منطقه مرده و منطقه گذار در مقطع طولی در شرایط توامان نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی..... ۹۲
- شکل ۴-۱۴- حجم منطقه با سرعت بیش از حد مجاز در شرایط نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی ۹۳
- شکل ۴-۱۵- منطقه مرده و منطقه گذار در مقطع طولی ماشین و محل تردد کارکنان در شرایط افزایش طول جرای تهویه به میزان ۵ متر..... ۹۵
- شکل ۴-۱۶- منطقه مرده و منطقه گذار در مقطع طولی ماشین و محل تردد کارکنان در شرایط افزایش طول جرای تهویه به میزان ۱۰ متر..... ۹۵
- شکل ۴-۱۷- مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده سرعت هوا با نتایج مدل‌سازی..... ۹۶
- شکل ۴-۱۸- نمودار همخوانی سرعت بین نتایج حاصل از مدل‌سازی و اندازه‌گیری میدانی ۹۷
- شکل ۵-۱- حجم منطقه آلوده به گاز CO در ماشین حفاری تمام مقطع..... ۱۰۳
- شکل ۵-۲- حجم منطقه آلوده به گاز CO₂ در ماشین حفاری تمام مقطع ۱۰۳
- شکل ۵-۳- حجم منطقه آلوده به گاز NO در ماشین حفاری تمام مقطع ۱۰۳
- شکل ۵-۴- حجم منطقه آلوده به گاز NO₂ در ماشین حفاری تمام مقطع ۱۰۴
- شکل ۵-۵- نسبت غلظت گازهای ورودی به بادبزن مکشی به غلظت گازهای تولیدی توسط لوکوموتیو..... ۱۰۵
- شکل ۵-۶- غلظت گاز CO ورودی به بادبزن دهشی کمکی در شرایط مینا ۱۰۶
- شکل ۵-۷- غلظت گاز CO₂ ورودی به بادبزن دهشی کمکی در شرایط مینا..... ۱۰۶
- شکل ۵-۸- غلظت گاز NO ورودی به بادبزن دهشی کمکی در شرایط مینا..... ۱۰۷
- شکل ۵-۹- غلظت گاز NO₂ ورودی به بادبزن دهشی کمکی در شرایط مینا..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۰- حجم منطقه آلوده به گاز CO در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی در مقایسه باحالت مینا ۱۰۸
- شکل ۵-۱۱- حجم منطقه آلوده به گاز CO₂ در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی در مقایسه باحالت مینا ۱۰۹
- شکل ۵-۱۲- حجم منطقه آلوده به گاز NO در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی در مقایسه باحالت مینا ۱۰۹
- شکل ۵-۱۳- حجم منطقه آلوده به گاز NO₂ در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی در مقایسه باحالت مینا ۱۰۹
- شکل ۵-۱۴- حجم منطقه آلوده به گاز CO در حالت نصب کامل مجرای تهویه در مقایسه با حالت مینا..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۵- حجم منطقه آلوده به گاز CO₂ در حالت نصب کامل مجرای تهویه در مقایسه با حالت مینا..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۶- حجم منطقه آلوده به گاز NO در حالت نصب کامل مجرای تهویه در مقایسه با حالت مینا..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۷- حجم منطقه آلوده به گاز NO₂ در حالت نصب کامل مجرای تهویه در مقایسه با حالت مینا ۱۱۲
- شکل ۵-۱۸- حجم منطقه آلوده به گاز CO در حالت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی ... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۹- حجم منطقه آلوده به گاز CO₂ در حالت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی .. ۱۱۳
- شکل ۵-۲۰- حجم منطقه آلوده به گاز NO در حالت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی ... ۱۱۳
- شکل ۵-۲۱- حجم منطقه آلوده به گاز NO₂ در حالت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی .. ۱۱۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱- پیشینه تحقیق مدل‌سازی توزیع جریان هوا در فضاهای زیرزمینی..... ۹
- جدول ۲-۱- پیشینه تحقیق مدل‌سازی انتشار گاز، گردوغبار و آلاینده‌های دیزلی در فضاهای زیرزمینی..... ۱۱
- جدول ۱-۲- برآورد شدت جریان هوای تازه موردنیاز برای تهویه تونل چم‌شیر..... ۲۵
- جدول ۲-۲- مشخصات فنی بادبزن‌های تهویه تونل چم‌شیر..... ۲۶
- جدول ۳-۲- میانگین سرعت و دمای هوا در ورودی و خروجی لوله شماره ۱ و ۲..... ۳۶
- جدول ۴-۲- نتایج اندازه‌گیری میدانی سرعت جریان هوا و دما در مقاطع عرضی از منطقه تنفسی کارکنان..... ۴۰
- جدول ۱-۳- ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از شاخص کیفیت تعامدی..... ۵۶
- جدول ۲-۳- ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار کشیدگی..... ۵۷
- جدول ۳-۳- ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از شاخص کیفیت سلول..... ۵۷
- جدول ۴-۳- پارامترهای آماری کیفیت شبکه تولیدی با ۴۹ میلیون سلول..... ۵۸
- جدول ۵-۳- مشخصات شرایط مرزی ورودی و خروجی..... ۶۱
- جدول ۱-۴- تاثیر افزایش سرعت جریان هوا بر میزان حجم مناطق مرده..... ۸۲
- جدول ۲-۴- حجم منطقه مرده در صورت خاموش شدن بادبزن مکشی..... ۸۳
- جدول ۳-۴- حجم منطقه مرده در صورت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین..... ۸۸
- جدول ۴-۴- حجم منطقه مرده در صورت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی..... ۹۱
- جدول ۵-۴- حجم منطقه مرده در صورت افزایش طول مجرای تهویه..... ۹۴
- جدول ۶-۴- حجم منطقه مرده در راهبردهای مختلف..... ۹۸
- جدول ۱-۵- اندازه‌گیری‌های میدانی سرعت، دما و غلظت گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو..... ۱۰۲
- جدول ۲-۵- محدودیت غلظت آلاینده‌های CO، CO₂، NO₂ و NO طبق استانداردهای مختلف..... ۱۰۲
- جدول ۳-۵- حجم منطقه آلوده در حالت‌های مختلف..... ۱۱۵

فصل اول

کلیات

۱-۱- آشنایی

با ابداع و به کارگیری ماشین‌های حفاری تمام مقطع^۱، سرعت حفاری در فضاهای زیرزمینی با نرخ قابل توجه‌ای رشد یافته است. حفاری با این ماشین‌ها نسبت به سایر روش‌های حفاری تونل نظیر انفجار، مقدار کمتری گردوغبار و آلودگی در داخل تونل تولید می‌کند و از این نظر برای محیط‌زیست بهتر هستند.

در تونل‌های بلند که با ماشین حفاری تمام مقطع حفر می‌شوند، جریان طبیعی هوا برقرار نیست. بنابراین هوادهی باید به صورت مصنوعی به این فضاها انجام شود. هوای ارسالی به درون ماشین حفاری تمام مقطع باید ضمن داشتن کیفیت مناسب برای تنفس کارکنان برای رقیق کردن یا حذف گازهای ورودی به تونل، کاهش میزان گردوغبار و خنک کردن دمای هوا در روند حفاری موثر باشد.

بیشترین هزینه سامانه تهویه، مربوط به بادبزن است. بنابراین انتخاب بادبزن و مقدار انرژی لازم برای عملکرد این سامانه مهم هستند [۱]. سامانه تهویه در فضاهای زیرزمینی با کارکرد ۲۴ ساعته و ۳۶۵ روز کاری در سال در برخی موارد در حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد کل هزینه‌های مصرف انرژی و ۵۰ درصد از میزان مصرف برق معدن را به خود اختصاص می‌دهد [۲]. هرچقدر طول تونل بیشتر شود، هزینه تهویه تونل به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد که این افزایش به دلیل افزایش فشار تولیدی بادبزن است. فشار بادبزن با افزایش طول تونل افزایش می‌یابد، زیرا مقاومت مسیر حرکت هوا با افزایش مسافت جریان هوا، افزایش می‌یابد [۳].

با پیشرفت فنی در ساخت تجهیزات تهویه، به کارگیری روش تهویه دهشی در امتداد تونل‌های بلند مقرون به صرفه شده است. تهویه یکی از بخش‌های کلیدی در تونل‌های بلند است که به صورت مستقیم بر مقطع حفاری، زمان انجام پروژه، مدیریت پروژه و انتخاب تجهیزات تاثیرگذار است. بنابراین، تحقیق و توسعه در زمینه بهینه کردن سامانه تهویه تونل‌های بلند به خصوص در موارد استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع از اهمیت زیادی برخوردار است.

¹ Tunnel Boring Machines

۱-۲- سامانه تهویه در ماشین حفاری تمام مقطع

به طور کلی، سامانه تهویه پروژه‌های ساخت تونل‌های بلند با به کارگیری ماشین حفاری تمام مقطع تونل به سه روش تهویه دهشی، مکشی و ترکیبی انجام می‌شود. در سامانه تهویه دهشی، هوای تازه از خارج تونل به کمک بادبزن نصب‌شده در داخل چاه و یا دهانه ورودی تونل و از طریق مجرای تهویه^۱ نصب‌شده در سقف تونل به داخل ماشین ارسال می‌شود. شکل ۱-۱-الف نمایی از بادبزن نصب‌شده در دهانه ورودی تونل را نشان می‌دهد. هوای ورودی به داخل ماشین از طریق مجرای تهویه پس از عبور از خشاب تهویه و لوله‌های نصب‌شده بر روی دنباله ماشین، با فشار به قسمت سینه کار تونل هدایت می‌شود و در برگشت، هوای آلوده را به همراه خود به خارج از تونل منتقل می‌کند. شکل ۱-۱-ب نمایی از وضعیت قرارگیری مجرای تهویه بر روی پوشش تونل را نشان می‌دهد. این جریان دائمی ورود و خروج هوا در صورت روشن بودن بادبزن برقرار است.

در روش تهویه دهشی فشار هوای داخل ماشین حفاری تمام مقطع از فشار اتمسفر (محیط بیرون) بیشتر است. بنابراین فشار مثبت ایجادشده درون تونل، مانع انتشار آسان گاز از واحدهای سنگی به داخل ماشین حفاری می‌شود. بنابراین در صورت توقف بادبزن اصلی، فشار طبیعی درون ماشین کاهش یافته و موجب افزایش انتشار گاز از واحدهای سنگی به درون ماشین حفاری تمام مقطع می‌شود.



الف- بادبزن نصب‌شده در دهانه ورودی تونل ب- وضعیت قرارگیری مجرای تهویه بر روی پوشش تونل
شکل ۱-۱ - جانمایی بادبزن و مجرای تهویه در تونل‌ها

¹ Duct

در سامانه تهویه مکشی، آلاینده‌های هوا به وسیله یک بادبزن مکشی و از طریق یک مجرای فلزی از قسمت قاب اصلی ماشین به قسمت پشتیبان^۱ ماشین هدایت می‌گردد. هوای آلوده در قسمت پشتیبان به دلیل اختلاف فشار ایجاد شده توسط بادبزن با فشار دهانه تونل، در مسیر تونل حرکت و از دهانه تونل خارج می‌شود.

در روش تهویه مکشی، فشار هوای داخل ماشین حفاری تمام مقطع کمتر از فشار اتمسفر (محیط بیرون) است. بنابراین فشار منفی ایجاد شده درون ماشین حفاری سبب می‌شود که انتشار گاز از واحدهای سنگی به آسانی انجام شود. بنابراین در صورت توقف بادبزن اصلی، فشار طبیعی درون ماشین افزایش یافته و مانع از انتشار بیشتر گاز از واحدهای سنگی به درون ماشین حفاری می‌شود.

در روش ترکیبی هوای تازه از خارج تونل به کمک بادبزن دهشی و از طریق مجرای تهویه نصب شده در سقف تونل به داخل ماشین ارسال می‌شود. هوای ورودی به داخل ماشین از طریق مجرای تهویه پس از عبور از خشاب تهویه و لوله‌های نصب شده بر روی دنباله ماشین، با فشار به قسمت سینه کار تونل هدایت می‌شود. در روش ترکیبی برای کاهش آلاینده‌های محیطی از بادبزن مکشی در محل تولید آلاینده‌ها استفاده می‌شود. بادبزن مکشی آلاینده‌های هوا را از قسمت پشتیبان به خارج از محیط کاری ماشین هدایت می‌کند.

۱-۲-۱- بادبزن

اصلی‌ترین بخش سامانه تهویه در ماشین حفاری تمام مقطع، بادبزن است. تامین هوای تمیز به مقدار کافی و ارسال آن به داخل ماشین حفاری توسط بادبزن‌ها انجام می‌شود. هر بادبزن از یک چرخ دوار با زاویه پره‌های مشخص تشکیل شده که می‌تواند با سرعت مشخصی دوران نماید. عملکرد هر بادبزن با توجه به زاویه پره و سرعت دوران چرخ دوار می‌تواند تغییر یابد [۴]. شکل ۱-۲-۱ نمایی از بادبزن نصب شده در دهانه ورودی تونل خط ۷ مترو تهران را نشان می‌دهد.

¹ Back-up

به‌طور معمول بادبزن‌ها به‌وسیله مبدل‌ها راه‌اندازی می‌شوند چرا که به‌وسیله آن‌ها می‌توان بادبزن را با دور پایین راه‌اندازی کرد و به‌آرامی دور بادبزن را به دور موردنظر رساند. همچنین می‌توان جهت دوران پره‌های بادبزن را از طریق مبدل‌ها تعویض کرد. مبدل‌ها قابلیت مانور بسیار خوبی را برای کنترل شرایط تهویه فراهم می‌نمایند [۵]. از مزایای دیگر به‌کارگیری مبدل‌ها می‌توان به جلوگیری از باد شدن ناگهانی مجرای تهویه و خطر ترکیدگی آن، بهینه‌سازی مصرف انرژی و انعطاف‌پذیری در تغییر شدت جریان هوا اشاره کرد [۶].

هوای خروجی از بادبزن، پس از عبور از مجرا تهویه، وارد لوله‌های انتقال هوا نصب‌شده بر روی دنباله ماشین حفار شده و به جبهه کار حفاری تونل دمیده می‌شود.



شکل ۱-۲- بادبزن مورد استفاده در دهانه ورودی تونل خط ۷ مترو تهران

هوای موردنیاز برای تهویه تونل، توسط بادبزن تامین؛ و از طریق مجرای تهویه در مسیر تونل به انتهای قسمت پشتیبان ماشین و از طریق کانال تهویه به قسمت قاب اصلی ماشین حفاری منتقل می‌شود. خشاب کانال تهویه، در قسمت پشتیبان ماشین و از دو استوانه توخالی تشکیل شده که در داخل هم قرار گرفته‌اند. استوانه بیرونی که بدنه خشاب است؛ چهار گیره در طرفین دارد که به قلاب زنجیر جرثقیل‌ها متصل می‌شود. استوانه کوچک‌تر که جداره داخلی خشاب است در داخل بدنه طوری قرار گرفته که انتهای آن‌ها به هم متصل است. در بالای آن تبدیلی برای افزایش قطر نصب‌شده است و در بین این دو جداره کانالی تعبیه می‌شود که با پیشروی ماشین، در امتداد تونل گسترش می‌یابد. با پیشروی ماشین، لوله موجود در خشاب باز شده و به‌صورت آزادانه از خشاب خارج می‌شود که با گیره و قلاب مخصوص، به سقف تونل متصل می‌شود. این کانال تهویه در طول ماشین حفاری امتداد یافته و موجب انتقال هوا به داخل ماشین حفاری تمام مقطع می‌شود. انتهای خشاب نیز از طریق یک واسطه

دوراهی به لوله‌های تهویه مرتبط می‌شود. پس از اتمام لوله تهویه داخل خشاب، به کمک جرثقیل‌ها و واگن حمل، آن را با خشاب شارژ شده تعویض می‌نمایند. ظرفیت خشاب به‌طور معمول در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر لوله تهویه است که این لوله‌ها پس از اضافه شدن در مسیر تونل با زیپ انتهایی خود، به هم وصل می‌شوند.

۱-۲-۲- لوله تهویه

هوای ورودی پس از عبور از مجرای تهویه مسیر تونل و خشاب لوله تهویه، با توجه به هندسه ماشین ممکن است توسط یک لوله و یا به‌واسطه یک دوراهی (شکل ۱-۳-الف) که در جلوی خشاب نصب شده است، به دو قسمت تقسیم‌شده و وارد دو ردیف لوله‌های انتقال هوا (لوله‌های تهویه) گردد؛ و از طریق این لوله‌ها تا اتاق کنترل، هدایت و هوا به داخل قسمت حفار ماشین دمیده شود. بین لوله‌ها نیز لوله‌های انعطاف‌پذیر قرار می‌گیرند که آن‌ها را در طول بخش پشتیبان ماشین به هم متصل می‌کند. لوله‌های انعطاف‌پذیر با کمربند لاستیکی و گیره مخصوص در انتهای هر لوله مهار می‌شوند. لوله‌های انعطاف‌پذیر از قسمت بالا و در طول بخش پشتیبان توسط سیم بکسل به هم وصل شده و در یک راستا قرار می‌گیرند. این سیم بکسل از افتادگی آن‌ها و انتقال نامناسب هوا جلوگیری می‌کند. شکل ۱-۳-ب نمایی از صفحه اتصال دوراهی و لوله‌های انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد.



ب- صفحه اتصال دوراهی و لوله‌های انعطاف‌پذیر



الف- دوراهی تقسیم هوا به لوله‌ها

شکل ۱-۳- اجزای کانال تهویه [۷]

۱-۲-۳- غبارگیر

به منظور کاهش گردوغبار تولیدی در ماشین‌های حفاری در سنگ سخت به‌طور معمول از دستگاه غبارگیر^۱ استفاده می‌شود. در حال حاضر دو نوع دستگاه غبارگیر خشک و مرطوب در ماشین‌های حفاری تمام مقطع سنگ سخت استفاده می‌شود. در غبارگیرهای خشک از فناوری فیلترهای مختلف و در غبارگیرهای مرطوب از ذرات ریز آب برای کاهش گردوغبار هوا استفاده می‌شود. غبارگیرهای خشک به دلیل سهولت استفاده در ماشین‌های حفاری تمام مقطع بیشتر به کار گرفته می‌شوند؛ به طوری که صندوق بیمه حوادث سوییس^۲ استفاده از این دستگاه‌ها را پیشنهاد می‌دهد [۸، ۹].

۱-۳- پیشینه تحقیق

برای طراحی سامانه تهویه می‌توان از روش‌های تحلیلی، تجربی و آزمایشگاهی، روش‌های مشاهده‌ای و مدل‌سازی عددی استفاده کرد. در روش‌های تحلیلی با استفاده از روابط ریاضی و اصول مکانیک سیالات میزان شدت جریان هوای موردنیاز برای سامانه تهویه برآورد می‌شود. روش‌های تجربی و آزمایشگاهی مبتنی بر تجربیات دیگر پروژه‌های مشابه، قوانین بهداشت و ایمنی کشورها است. یکی دیگر از روش‌های مرسوم برای تحلیل و طراحی سامانه تهویه تونل، ساخت مدل‌های آزمایشگاهی است. در مدل‌های آزمایشگاهی تعمیم نتایج حاصل از این روش به شرایط واقعی بسیار دشوار است و دقت این روش برخلاف روش اندازه‌گیری مستقیم بالا نیست. روش‌های مشاهده‌ای اغلب در تونل‌های جاده‌ای متروکه انجام می‌شود و مبتنی بر رفتارسنجی سامانه تهویه است. این روش پایگاه اطلاعاتی بسیار جامعی تولید می‌کند. در این روش به دلیل بالا بودن هزینه، تنها تعداد محدودی آزمایش برجا می‌توان انجام داد [۱۰].

در سال‌های اخیر مدل‌سازی سیالاتی توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها برای طراحی و بررسی سامانه تهویه در فضاهای زیرزمینی در هندسه‌های پیچیده و شرایط خاص استفاده شده است. در این روش

¹ Deduster

² Swiss Accident Insurance Fund (SUVA)

می‌توان حالات مختلف در سامانه تهویه را از ساده‌ترین حالت (جریان پایدار هوا) تا پیچیده‌ترین حالت (وجود آلاینده‌ها)، بررسی کرد.

۱-۳-۱- بررسی مدل‌های مورد استفاده برای طراحی سامانه تهویه در فضاهای زیرزمینی

مهم‌ترین نرم‌افزارهای کامپیوتری تجاری در دسترس برای طراحی سامانه تهویه در فضاهای زیرزمینی شامل: VnetPC، VentSim، VentGraph، MIVENA و VUMA است. در تمام این نرم‌افزارها، فضاهای زیرزمینی با یک گراف که به شبکه تهویه معروف هستند، شبیه‌سازی می‌شود. در این شبکه مسیر انتقال هوا، که شامل تونل یا چاه است، با مقاومت مسیر هوا^۱ مشخص می‌شود. مقاومت مسیر هوا را می‌توان اندازه‌گیری و یا توسط معادلات اتکینسون^۲ محاسبه نمود. شدت جریان مورد نیاز و بعضی از عامل‌های خروجی مانند کمینه سرعت مورد نیاز، بیشینه مقدار مجاز گاز و فشار بادبزنی قابل قبول در نتیجه شبیه‌سازی به دست می‌آید. اگر نتایج راضی‌کننده نباشد، مشخصه‌های ورودی تغییر و چندین بار مدل‌سازی تکرار می‌شود تا تمام محدودیت‌ها برطرف شوند [۱۱].

اگرچه مدل‌سازی یک‌بعدی جریان سیال می‌تواند برای مطالعه جریان شبکه تهویه در معادن با سامانه تهویه عمومی موثر باشد، اما برای تحلیل سامانه تهویه در ماشین حفاری تمام مقطع تونل به دلیل هندسه پیچیده مساله و آلاینده‌های مختلف نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور به کارگیری مدل‌سازی سه‌بعدی جریان سیال، اطلاعات مفید بیشتری را برای طراحی سامانه تهویه در ماشین‌های حفاری تمام مقطع دسترس قرار می‌دهد.

مدل‌سازی عددی و توزیع جریان هوا در تمام فضاهای زیرزمینی و سازه‌های تونلی توسعه یافته است. بیشتر تحقیقات باهدف بررسی و تحلیل توزیع جریان هوا، گردوغبار و مشکلات متان در فضاهای زیرزمینی انجام شده است. در برخی موارد در تونل‌های جاده‌ای و معادن نیز انتقال حرارت و

¹ Airway resistance

² Atkinson's equations

ملاحظات مربوط به آتش‌سوزی تحلیل‌شده است. برخی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین تحقیقات انجام‌شده باهدف مدل‌سازی توزیع جریان هوا در فضاهای زیرزمینی در جدول ۱-۱ ارائه شده است.

جدول ۱-۱- پیشینه تحقیق مدل‌سازی توزیع جریان هوا در فضاهای زیرزمینی

مرجع	موضوع تحقیق	سال	مؤلف
[۱۲]	الگوهای جریان هوا را در اطراف فضای کاری ماشین حفاری پیوسته ^۲ با طرح‌های های مختلف کردن مطالعه کردند.	۲۰۰۳	والا ^۱ و همکاران
[۱۳]	توزیع جریان هوا در اطراف فضای کاری ماشین حفاری پیوسته در شرایط مختلف استخراج ماشین را با نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی کردند. نتایج مدل‌سازی با اندازه‌گیری میدانی سرعت هوا در معدن زیرزمینی اعتبارسنجی شده است.	۲۰۰۷	هارگریوز و لوندز ^۳
[۱۴]	یک مدل دوبعدی از کارگاه‌های استخراج را برای بررسی تاثیر طول پرده هوا بند بر رفتار جریان سیال در سرعت‌های مختلف جریان هوا مطالعه کردند.	۲۰۰۸	امین الساداتی و هومن
[۱۵]	الگوهای جریان هوا و غلظت گاز خروجی از آگزوز ماشین‌آلات را در معادن زیرزمینی فلزی و غیرفلزی مطالعه کردند.	۲۰۰۸	ژنگ و تین ^۴
[۱۶]	میزان افت فشار در تونل‌های دایره‌ای و با زبری مختلف مدل‌سازی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از روش تئوری با نتایج مدل‌سازی عددی تطابق داشت.	۲۰۱۱	دیگو ^۵ و همکاران
[۱۷]	میزان نشت هوا در مجراهای دایره‌ای را با روش دینامیک سیالات محاسباتی و تجربی مقایسه کردند.	۲۰۱۱	وانگ ^۶ و همکاران
[۱۸]	توزیع جریان هوا و گاز متان را در داخل معدن زیرزمینی اتاق و پایه مدل‌سازی کردند. آن‌ها با استفاده از معادلات کسر جرمی شامل متان، اکسیژن، آب و نیتروژن محاسبات را انجام دادند.	۲۰۱۳	ساسمیتو ^۷ و همکاران
[۱۹]	برای بررسی توزیع جریان هوا از فناوری گاز ردیاب و دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کردند. در این تحقیق راهبردهای تغییرات چگالی، گرانشی و هوا بر غلظت گاز ردیاب در محیط آزمایشگاهی مطالعه شده است.	۲۰۱۳	ژو ^۸ و همکاران
[۲۰]	سامانه تهویه در شرایط بحرانی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی و فناوری گاز ردیاب را در یک معدن واقعی بررسی کردند. راهبردهای مختلفی نظیر خاموش و یا روشن بودن بادبزن، بسته یا باز بودن درب مطالعه شده است.	۲۰۱۵	ژو و همکاران
[۲۱]	الگوهای توزیع جریان هوا و انتشار گاز مونوکسید کربن ناشی از آتشباری و پراکنش گردوغبار را در فضاهای بزرگ زیرزمینی مدل‌سازی کردند.	۲۰۱۶	لی ^۹ و همکاران

¹ Wala

² Continuous miner

³ Hargreaves and Lowndes

⁴ Zheng and Tien

⁵ Diego

⁶ Wang

⁷ Sasmito

⁸ Xu

⁹ Li

۱-۳-۲- پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه مدل سازی انتشار گاز، گردوغبار و ذرات

دیزلی

با توجه به عبور ماشین حفاری تمام مقطع از واحدهای سنگی مختلف، گازهای همراه با این واحدهای سنگی در هنگام حفاری در محیط ماشین منتشر می شوند. برای مثال گازهای سمی همچون متان و سولفید هیدروژن به هنگام حفاری در بسیاری از سنگهای رسوبی یافت می شود. به طور معمول سولفید هیدروژن و دی اکسید گوگرد در شکستگی های هر نوع سنگی که محتوی سولفید آهن (پیریت) باشد، تشکیل می شود. همچنین گازهای مرتبط با سنگهای نفت دار، نظیر اتان، پروپان، بوتان و هیدروکربن های دیگر نیز ممکن است به درون ماشین حفاری تمام مقطع در حین عملیات حفاری نشت کنند. نشت گازهای سمی و خطرناک به داخل تونل، به دلیل کاهش توان کارکنان، کاهش نوبت های کاری، تعطیلی مکرر فعالیت در تونل، اثر خوردگی بر قطعات الکترونیک ماشین حفاری و نیاز به تعویض قطعات و سایر آثار جانبی می تواند نقش منفی بر فعالیت های تونل سازی داشته باشد.

انتشار گاز به داخل فضاهای زیرزمینی به شاخص های مختلفی از جمله روش تهویه (مکشی یا دهشی)، طول پرده هوا بند، فاصله مجرای تهویه تا جبهه کار، حجم و نوع گاز منتشر شده، شدت جریان هوای پاک، شرایط هندسی مساله و ... بستگی دارد. کارکرد ماشین آلات دیزلی در فضاهای زیرزمینی موجب خروج آلاینده های دیزلی از آگزوز و آلودگی محیط کار می شود.

تحقیقات بر روی گازهای منتشر شده از واحدهای سنگی به ویژه متان در معادن زغال سنگ و گازهای خروجی از آگزوز ماشین آلات دیزلی و انتشار گردوغبار در فضاهای زیرزمینی مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. برخی از مهم ترین نتایج مدل سازی انتشار آلاینده ها در فضاهای زیرزمینی در جدول ۱-۲، ارائه شده است.

جدول ۱-۲- پیشینه تحقیق مدل سازی انتشار گاز، گردوغبار و آلاینده های دیزلی در فضاهای زیرزمینی

مرجع	موضوع تحقیق	سال	مؤلف
[۲۲]	فاصله مناسب انتهای مجرای تهویه دهشی تا جبهه کار را به منظور کنترل گردوغبار در مقایسه با تهویه مکشی تعیین نمودند.	۲۰۰۶	پارا ^۱ و همکاران
[۲۳]	تاثیر شاخص های نفوذپذیری و تخلخل را بر میزان نشت گاز متان در کارگاه های استخراج معدن با مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند.	۲۰۰۷	لوکسبیکر ^۲ و همکاران
[۲۴]	سامانه تهویه در یک جبهه کار بن بست را با نگاه ویژه به شاخص های منطقه مرده و توزیع گاز متان مدل سازی و با اندازه گیری میدانی اعتبارسنجی نمودند.	۲۰۰۹	تورانو ^۳ و همکاران
[۲۵]	میزان نشت گاز متان در بسترهای سنگی معادن زغال سنگ را بررسی کردند و بر این اساس میزان شدت جریان هوای ورودی برای تهویه ماشین حفاری تمام مقطع را با استفاده از معادلات ریاضی تخمین زدند.	۲۰۱۰	رودریگوئیز و لمباردیا ^۴
[۲۶]	انتشار گازهای متان، دی اکسید کربن، اکسیژن و نیتروژن را در جبهه کار کارگاه استخراج طولانی مدل سازی کردند. آن ها همچنین میانگین غلظت گرد زغال در هنگام کار ماشین حفاری پیوسته مدل سازی و با اندازه گیری میدانی اعتبارسنجی نمودند.	۲۰۱۰	رن و بالوسو ^۵
[۲۷]	توزیع جریان هوا و پراکنش گردوغبار در اطراف ماشین حفاری رودهدر مدل سازی کردند. نتایج مدل سازی با اندازه گیری های میدانی اعتبارسنجی شده است. همچنین جانمایی مجرای تهویه و تاثیر آن بر غلظت گردوغبار در جبهه کار معدنی مطالعه شده است.	۲۰۱۱	تورانو و همکاران
[۲۸]	غلظت گاز مونوکسید کربن و دی اکسید نیتروژن را پس از انفجار در جبهه کار معدنی و بر اساس حجم گاز تولیدی هر کیلوگرم مواد منفجره مدل سازی و نتایج را با اندازه گیری میدانی اعتبارسنجی نمودند.	۲۰۱۳	تورنو ^۶ و همکاران
[۲۹]	سامانه تهویه و توزیع گردوغبار را در تونل های در حال ساخت با مدل دوفازی لاگرانژی ^۸ و ردیابی ذرات ^۹ مدل سازی کردند.	۲۰۱۴	لیو ^۷ و همکاران
[۳۰]	پراکنش گاز متان در جبهه کار معدنی را با مدل های مختلف آشفتگی K- ω , K- ϵ , Spalart-Allmaras و مدل تنش برشی رینولدز ^{۱۱} مدل سازی کردند.	۲۰۱۴	کورنیا ^{۱۰} و همکاران

¹ Parra

² Luxbacher

³ Torano

⁴ Rodriguez and Lombardia

⁵ Ren and Balusu

⁶ Torno

⁷ Liu

⁸ Lagrange

⁹ Particle tracking

¹⁰ Kurnia

¹¹ Reynolds Stress Model

ادامه جدول ۱-۲- پیشینه تحقیق مدل‌سازی انتشار گاز، گردوغبار و آلاینده‌های دیزلی در فضاهای زیرزمینی

مرفع	موضوع تحقیق	سال	موف
[۳۱]	گازهای خروجی از آگروز ماشین حفاری پیوسته و کامیون معدنی را در جبهه کار استخراجی مدل‌سازی نموده و تاثیر موقعیت مکانی خروجی آگروز و حداقل هوای موردنیاز برای کنترل اکسیژن و ترقیق گازهای خطرناک را مطالعه نمودند.	۲۰۱۴	کورنیا و همکاران
[۳۲]	تاثیر استفاده از پرده هوایند و تغییر فاصله پرده تا جبهه کار را بر کنترل گردوغبار در جبهه کار استخراجی را مدل‌سازی کردند.	۲۰۱۵	کورنیا و همکاران
[۳۳]	انتشار گاز متان در جبهه کار ماشین حفاری پیوسته بافاصله‌های مختلف مجرای تهویه تا جبهه کار را بررسی کردند.	۲۰۱۵	ژو ^۱ و همکاران
[۳۴]	توزیع گردوغبار در داخل یک راهرو مستطیلی معدنی را به روش‌های اویلری- اویلری ^۲ و اویلری-لاگرانژی مدل‌سازی کردند. توزیع گردوغبار در شرایط تغییر نرخ تولید گردوغبار، افزایش سرعت جریان هوا و تغییر جانمایی بادبزن‌های مکشی و دهشی مدل‌سازی شده است.	۲۰۱۵	وانگ و همکاران
[۳۵]	پراکنش هم‌زمان متان و گرد زغال را در جبهه کار اتاق و پایه در حضور و عدم حضور ماشین حفاری پیوسته، وجود سامانه تهویه دهشی، مکشی و وجود پرده هوا با مدل‌سازی عددی بررسی کردند.	۲۰۱۶	یویز ^۳ و همکاران
[۳۶]	ذرات دیزلی خروجی از آگروز دیزل یک لودر معدنی را در یک تونل مستطیلی به دو روش مدل ذرات و مدل گونه ^۵ مدل‌سازی و مقایسه کرد. این مطالعه نشان داد از هر دو روش برای تخمین ذرات دیزلی می‌توان استفاده کرد اما مدل گونه به دلیل زمان کمتر برای مدل‌سازی گزینه ایده‌آل‌تری برای مدل‌سازی انتشار ذرات دیزلی است.	۲۰۱۶	تیروونگدام ^۴ و همکاران
[۳۷]	غلظت گردوغبار ناشی از آتشباری را در یک راهرو معدنی مستطیلی و با استفاده از مدل کره سخت و روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ^۷ مطالعه کردند.	۲۰۱۶	هو ^۶ و همکاران
[۳۸]	مدل‌سازی سامانه تهویه و توزیع گردوغبار در ماشین حفاری تمام مقطع بدون سپر را انجام دادند. تاثیر موقعیت قرارگیری مجرای تهویه، طول دیافراگم هوا ^۹ در قاب اصلی ماشین و شدت جریان غبارگیر بر رفتار گردوغبار مطالعه شده است.	۲۰۱۶	ژیا ^۸ و همکاران
[۳۹]	حد مواجهه شغلی آلاینده‌های دیزلی در کشورهای مختلف را با اندازه‌گیری- های میدانی خروجی آگروز موتورهای دیزلی در دو معدن بررسی کردند.	۲۰۱۷	دبیا ^{۱۰} و همکاران

¹ Zhou

² Euler Euler method

³ Yuez

⁴ Thiruvengadam

⁵ Species Transport

⁶ Hu

⁷ Monte carlo simulation

⁸ Xia

⁹ Air baffel

¹⁰ Debias

ادامه جدول ۱-۲- پیشینه تحقیق مدل سازی انتشار گاز، گردوغبار و آلاینده های دیزلی در فضاهای زیرزمینی

مرجع	موضوع تحقیق	سال	مؤلف
[۴۰]	انتشار ذرات دیزلی در بن بست های معدنی و ورودی های شیب دار را با انتخاب گاز C_8H_{18} به عنوان گاز پایه در محیط اویلری مدل سازی کردند.	۲۰۱۷	ژنگ ^۱ و همکاران
[۴۱]	تاثیر طول پرده هوا بر روی شدت جریان هوای ارسالی به جبهه کار در یک بن بست معدنی را مدل سازی و با اندازه گیری میدانی اعتبارسنجی نمودند.	۲۰۱۷	فروز و ژنگ ^۲
[۴۲]	مدل سازی عددی انتشار گردوغبار در راهرو زغالی با روش های دوفازی جامد- سیال اویلری-اویلری و اویلری-لاگرانژی انجام شده است. تاثیر کسر حجمی ذرات بر روی فاز گاز بررسی و از مدل کره سخت و روش شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده است.	۲۰۱۷	جنگ ^۳ و همکاران
[۴۳]	انتشار ذرات دیزلی خروجی از اگزوز یک لودر را در یک بن بست معدنی به صورت دوبعدی و سه بعدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل دوفازی اویلری-لاگرانژی مدل سازی کردند. غلظت ذرات دیزلی به دست آمده از نتایج مدل سازی با اندازه گیری میدانی اعتبارسنجی شده است.	۲۰۱۸	ژو و همکاران
[۴۴]	غلظت گاز متان در جبهه کار معدن زغال سنگ را با نرم افزار انسیس مطالعه کردند. آن ها تاثیر شاخص های سرعت جریان هوای ورودی، طول پرده هوا بند، فاصله پرده هوا بند از دیواره، فاصله انتهای مجرای تهویه از جبهه کار و قطر مجرای تهویه بر غلظت گاز متان بررسی کردند.	۲۰۱۹	هاشمی نسب و همکاران
[۴۵]	الگوی پراکنش ذرات دیزلی ناشی از کارکرد ماشین آلات بارگیری و باربری در معادن زیرزمینی را به روش انتقال گونه ها مطالعه کردند. راهبردهای تغییر جهت حرکت ماشین و تغییرات سرعت هوا و دمای گازهای خروجی از اگزوز بر پراکنش ذرات دیزلی مطالعه شده است.	۲۰۱۹	مورلا ^۴ و همکاران
[۴۶]	نحوه پراکنش و غلظت ذرات دیزلی در یک جبهه کار زیرزمینی بن بست با مدل اویلری-لاگرانژی مطالعه کردند. نتایج مدل سازی عددی با اندازه گیری های میدانی اعتبارسنجی شده است. همچنین تاثیر موقعیت مکانی مجرای تهویه تا جبهه کار بر غلظت ذرات دیزلی بررسی شده است.	۲۰۱۹	چانگ ^۵ و همکاران

به طور خلاصه، مدل سازی عددی جریان هوا به طور عمده در تونل های معدنی و کارگاه استخراج متمرکز شده و کمتر به تهویه در طول ساخت و ساز تونل های طولانی به ویژه ماشین حفاری تمام مقطع توجه شده است. با توجه به حضور کارکنان در ماشین حفاری تمام مقطع و وجود آلاینده های مختلف، بررسی الگوهای توزیع جریان هوا و آلاینده ها به منظور افزایش ایمنی و حفظ سلامت کارکنان ضروری

¹ Zheng

² Feroze and Genc

³ Geng

⁴ Morla

⁵ Chang

است. مطالعه تجربی پایش توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها به دلیل هزینه بالا و زمان طولانی در هندسه پیچیده ماشین حفاری امکان‌پذیر نیست. لذا مطالعه عددی و تحلیلی توزیع جریان هوا و پراکنش آلاینده‌ها در ماشین حفاری تمام مقطع ضرورت دارد.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

در فضاهای زیرزمینی که دهانه‌های ارتباطی آن با هوای آزاد فاصله زیادی دارد نظیر تونل‌های بلند انتقال آب، بررسی الگوهای توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها بسیار حایز اهمیت است. در نتیجه کارکرد ماشین‌آلات و تجهیزات مختلف در فضاهای زیرزمینی آلاینده‌های گردوغبار، گرما و ذرات دیزلی تولید می‌شود. از آنجاکه فضای ماشین حفاری تمام مقطع کوچک است؛ در نتیجه کارکرد تجهیزات و ماشین‌آلات غلظت ذرات دیزلی، گردوغبار و دمای هوا از حدود مجاز فراتر رفته و باعث ایجاد بیماری‌ها و نارضایتی شغلی برای کارکنان و کاهش راندمان عملیاتی و ایمنی پروژه می‌شود. بدیهی است که به منظور حفظ سلامت نیروی انسانی، باید هوای پاک به گونه‌ای توزیع گردد که قبل از اختلاط با آلاینده‌ها، در دسترس کارکنان عملیاتی قرار گیرد. به این منظور مدل‌سازی توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها در ماشین حفاری تمام مقطع، راهکارهایی را برای کاهش و یا ترقیق آلاینده‌ها پیشنهاد می‌دهد.

اگر به مسایل مربوط به تهویه در ابتدای طراحی و یا اجرا، توجه کافی نشود قطعاً در هنگام انجام عملیات، راندمان کاری کارکنان عملیاتی و ماشین‌آلات بسیار پایین آمده و علاوه بر آن ممکن است خسارت‌های سنگینی به ماشین‌آلات و سلامت نیروی انسانی وارد شود. به عنوان مثال عدم وجود سامانه تهویه مناسب و انفجار گاز متان در تونل انتقال آب لس‌آنجلس موجب صدمه دیدن چهار کارگر و در تونل هیگاشیموراایاما ژاپن موجب کشته و زخمی شدن ۱۱ کارگر شد [۴۷]. در ماشین حفاری تمام مقطع تونل زاگرس نیز گاز سولفید هیدروژن، سیانید هیدروژن و متان مشاهده شد، به طوری که غلظت گاز متان بالاتر از حد انفجار، ثبت و منجر به تعطیلی عملیات به مدت چهار ماه گردید [۴۸].

تاکنون مطالعات زیادی پیرامون مدل‌سازی توزیع جریان هوا و پراکنش گردوغبار و گاز در تونل‌ها و معادن انجام شده است. ولی در آن‌ها به توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها در ماشین حفاری تمام مقطع به دلیل هندسه پیچیده و بزرگ ماشین و حضور آلاینده‌های مختلف پرداخته نشده است. همچنین در فضاهای زیرزمینی لازم است حداقل سرعت جریان هوا به منظور تنفس کارکنان، ترفیق آلاینده‌ها، حذف گردوغبار و کاهش دما تامین شود. پس لازم است چگونگی توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها در ماشین حفاری تمام مقطع بررسی شود.

۱-۵- اهداف تحقیق

هدف اصلی این تحقیق، مدل‌سازی و تحلیل توزیع جریان هوا و آلاینده‌های درون ماشین حفاری تمام مقطع است. برای رسیدن به این هدف با انجام مطالعات میدانی و با بهره‌گیری از دینامیک سیالات محاسباتی جریان هوا و آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع تحلیل شده است. همچنین راهبردهای مختلفی به منظور بهینه‌سازی توزیع جریان هوا از طریق کاهش مناطق مرده و مناطق آلوده شده توسط گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو بررسی شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی عددی، اندازه‌گیری‌های میدانی در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم-شیر انجام شده است.

۱-۶- جنبه‌های نوآوری تحقیق

تاکنون تحقیقات زیادی در زمینه طراحی و پایش سامانه تهویه در فضاهای زیرزمینی تحت شرایط آتش‌سوزی و وجود آلاینده‌های مختلف انجام شده است. با این حال پیرامون مدل‌سازی سامانه تهویه در ماشین حفاری تمام مقطع تحقیق جامعی انجام نشده است. ولی به عنوان تفاوت و جنبه‌های نوآوری انجام شده در این تحقیق با تحقیقات گذشته در زمینه تونل‌های در حال بهره‌برداری و معادن، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اغلب تحقیقات انجام شده مدل سازی هندسی ساده‌ای دارند ولی در این تحقیق مدل سازی هندسی به دلیل هندسه پیچیده ماشین حفاری تمام مقطع به صورت تفصیلی انجام می شود.
- در این تحقیق منطقه مرده به عنوان یکی از شاخص های کلیدی در تعیین وضعیت سامانه تهویه معرفی شده است.
- عملکرد بادبزن های دهشی و مکشی کمکی در ماشین حفاری تمام مقطع و تاثیر آن ها بر توزیع جریان هوا و پراکنش آلاینده های خروجی از اگزوز لوکوموتیو بررسی می شود.
- راهکارهایی به منظور بهبود عملکرد سامانه تهویه نظیر تغییر موقعیت مکانی تجهیزات سامانه تهویه، تغییر سرعت جریان هوا و به کارگیری تهویه موضعی ارایه شده است.
- به علت فقدان امکانات سخت افزاری مناسب، قسمت عمده ای از تحقیقات پیشین در زمینه تهویه معادن و تونل ها در حالت دوبعدی انجام شده است. با توجه به هندسه پیچیده ماشین حفاری تمام مقطع تونل نتایج این تحقیقات برای تحلیل سامانه تهویه در ماشین حفاری مناسب نیست. در این تحقیق مدل سازی به صورت سه بعدی انجام شده است.
- در بیشتر تحقیقات پیشین، معادلات جریان به عنوان هدف اصلی تحقیق انتخاب شده است ولی در این تحقیق معادله انرژی به همراه معادلات جریان مورد تحلیل قرار گرفته است.
- از دیگر ویژگی های این تحقیق مدل سازی پراکنش گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو و در ناحیه ای است که نیروی انسانی در ماشین حفاری تمام مقطع تونل حضور دارند.

۱-۷- روش تحقیق

این تحقیق به منظور درک رفتار جریان هوا و آلاینده ها در ماشین حفاری تمام مقطع و بهبود الگوهای توزیع جریان هوا صورت می پذیرد. هدف اصلی این پژوهش مطالعه الگوهای جریان هوا و تعیین مناطق مرده در ماشین حفاری تمام مقطع و بررسی پراکنش گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو با کمک دینامیک سیالات محاسباتی است. در این پژوهش نقش افزایش شدت جریان هوای

ورودی، تغییر موقعیت مکانی تجهیزات سامانه تهویه و استفاده از تهویه موضعی به منظور بهینه‌سازی توزیع جریان هوا و کاهش حجم مناطق آلوده بررسی شده است. الزامات، روش و ابزار مورد استفاده تحقیق در زیر تشریح شده است.

۱-۷-۱- نرم‌افزار مورد استفاده برای ایجاد شبکه عددی

نرم‌افزار انسیس ای‌سی‌ای‌ام^۱ به‌عنوان زیرمجموعه‌ای از نرم‌افزار انسیس و یکی از قدرتمندترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای تولید شبکه است. این نرم‌افزار در حال حاضر به‌صورت گسترده در مجامع علمی و صنعتی جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. توانایی‌های گسترده این نرم‌افزار در تولید شبکه‌های سازمان‌یافته و بدون سازمان است. همچنین رابط جامع و بدون نقص آن در فراخوانی هندسه‌های تولیدشده در سایر نرم‌افزارهای تولید هندسه مانند اتوکد^۲، کتیا^۳ و سالید ورکس^۴ موجب شده در بسیاری از علوم برای تولید شبکه محاسباتی از آن استفاده شود.

نرم‌افزار انسیس ای‌سی‌ای‌ام در مقایسه با نرم‌افزارهای معمول تولید شبکه مانند گمبیت^۵، قابلیت‌های بیشتر و مناسب‌تری برای تولید شبکه بر روی هندسه‌های مختلف از جمله هندسه‌های پیچیده را دارا است. توانایی ایجاد تغییر و بهبود شبکه تولیدی، همراه با تنظیمات پیشرفته و ارتباط با انواع نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی از جمله مزایای این نرم‌افزار است. در این پژوهش برای ایجاد شبکه از نرم‌افزار انسیس ای‌سی‌ای‌ام استفاده شده است.

۱-۷-۲- نرم‌افزار مورد استفاده برای حل عددی

بسته به روش‌های مورد استفاده، دقت و نرخ همگرایی نتایج و توانایی شبیه‌سازی فیزیک‌های مختلف، نرم‌افزارهای زیادی به بازار عرضه شده است، که هر یک در گستره‌ای از حوزه‌های مرتبط با مهندسی مکانیک، هوافضا، هیدرولیک، شیمی و غیره کاربرد دارند. گفتنی است در کنار نرم‌افزارهای

¹ Ansys ICEM

² Autocad

³ Catia

⁴ Solid works

⁵ Gambit

معرفی شده در این بخش، نرم افزارهایی خاص، با دیدگاه‌های متفاوت از دینامیک سیالات محاسباتی نیز وجود دارد که گستره کاربرد آن‌ها در مقایسه با سایر نرم افزارهای تجاری بسیار محدود است.

نرم افزار سی اف ایکس^۱ یکی از نرم افزارهای به نسبت پر قدمت در تحلیل‌های دینامیک سیالات است که به دلیل امکانات گسترده و کاربری آسان، کاربران بسیاری دارد. نرم افزار سی اف ایکس در حال حاضر، متعلق به خانواده انسیس^۲ بوده و از دیدگاه حجم محدود و میان‌بایی المان محدود با مقادیر ذخیره شده در گره‌های محاسباتی استفاده می‌کند. به دلیل استفاده از حل گر کوپل و ذخیره سازی مقادیر در نقاط شبکه، این نرم افزار نیازمند حافظه موقت^۳ بالاتری نسبت به نرم افزار فلوینت^۴ است. همچنین به دلیل استفاده از روش حل کوپل شبه گذرا^۵ در فیزیک‌های پایا، از همگرایی بالاتری در مقایسه با فلوینت برخوردار است. در سی اف ایکس گسترش مدل‌های آشفتگی در مقایسه با نرم افزار فلوینت، کمی بیشتر بوده، لیکن در فیزیک‌های خاص مانند جریان در هندسه‌های دارای مرز متحرک و همچنین فیزیک‌های واکنشی، فلوینت در مقایسه با آن از توانایی بالاتری برخوردار است. در این تحقیق از نرم افزار سی اف ایکس برای مدل سازی جریان هوا و آلاینده‌ها در ماشین حفاری تمام مقطع استفاده شده است.

نرم افزار اپن فوم^۶، یکی از نرم افزارهای کد باز در زمینه دینامیک سیالات است که به دلیل امکان مشاهده و ویرایش معادلات و روش‌های دخیل در شبیه سازی و همچنین افزودن معادلات و مدل‌های جدید، در بسیاری از پروژه‌های دانشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. توسعه این نرم افزار در مقایسه با نرم افزارهای تجاری همچون فلوینت و سی اف ایکس کندتر، و کاربری آن نیز دشوارتر است.

¹ CFX

² Ansys

³ RAM Memory

⁴ Fluent

⁵ Pseudo Transient Coupled

⁶ Open foam

نرم افزار فلو سه بعدی^۱ در شبیه سازی های هیدرولیکی و ریخته گری کاربرد گسترده ای دارد. این نرم افزار به دلیل استفاده از شبکه های غیر منطبق بر هندسه^۲ استفاده از آن بر روی هندسه های بسیار پیچیده و دارای گوشه ها و زاویای تیز، چندان توصیه نشده است [۴۹]. همان طور که در بالا به آن اشاره شد با توجه به امکانات نرم افزار سی اف ایکس نظیر کاربری آسان و جامع بودن در مدل های آشفتگی و همچنین دقت بالاتر در همگرایی مساله، این نرم افزار برای حل عددی در این پژوهش انتخاب شده است.

۱-۸- جمع بندی

به طور خلاصه، مدل سازی عددی جریان هوا و آلاینده ها به طور عمده در تونل های معدنی و کارگاه استخراج متمرکز شده و کمتر به تهویه در طول ساخت و ساز تونل های طولانی به ویژه در شرایط حفر با ماشین حفاری تمام مقطع توجه شده است. با توجه به حضور و تردد کارکنان در ماشین حفاری تمام مقطع و وجود آلاینده های مختلف، بررسی الگوهای توزیع جریان هوا به منظور افزایش ایمنی و سلامت شغلی کارکنان ضروری است. مطالعه تجربی الگوهای توزیع جریان هوا به دلیل هزینه بالا و زمان طولانی در هندسه پیچیده ماشین حفاری امکان پذیر نیست. بنابراین مطالعه عددی و تحلیلی توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع ضرورت دارد. هدف اصلی این پژوهش مدل سازی توزیع جریان هوا و آلاینده ها در ماشین حفاری تمام مقطع با کمک دینامیک سیالات محاسباتی است. نقش افزایش شدت جریان هوا بر حجم منطقه مرده و ناحیه تنفسی کارکنان نیز در این پژوهش بررسی شده است. همچنین پراکنش گازهای خروجی از آگزوز لوکوموتیو و حجم منطقه آلوده شده در شرایط مختلف سامانه تهویه بررسی شده است. نتایج مدل سازی عددی توسط اندازه گیری های میدانی در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر اعتبارسنجی شده است.

¹ Flow 3D

² Non Body Fitted

فصل دوم

مطالعات میدانی

۲-۱- آشنایی

پروژه انتقال آب چم شیر در بخش جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس واقع شده است. این پروژه در شرق استان بوشهر و در شمال شرق شهرستان بندر دیلم واقع شده است. تونل چم شیر توسط یک دستگاه ماشین حفاری تمام مقطع تونل تک سپره ساخت شرکت هرکنشت^۱ به قطر حفاری ۵/۲ متر و قطر تمام شده ۴/۶ متر در حال اجرا است.

متوسط پیشروی طبق برنامه زمان بندی ۳۰۰ متر در ماه پیش بینی شده است. در زمانی که حفاری انجام می شود، عملیات نصب قطعات پیش ساخته بتنی^۲ متوقف است. پس از یک گام پیشروی به میزان ۱/۲ متر، حفاری متوقف شده و نصب قطعات پیش ساخته بتنی انجام می شود. سرعت حفاری یک گام پیشروی، به عوامل مختلفی از جمله شرایط زمین شناسی، کیفیت دیسک های برشی و ... بستگی دارد و در حال حاضر در حدود ۳۰ تا ۴۰ دقیقه به طول می انجامد [۵۰].

سامانه ترابری تونل به صورت ریلی است و برای تخلیه خاک حاصل از حفاری از واگن های حمل خاک، استفاده می شود. قطارهای سامانه ترابری تونل؛ شامل یک واگن مسطح برای حمل ریل، روغن، فوم و دو واگن برای حمل قطعات پیش ساخته بتنی، چهار واگن برای حمل خاک حاصل از حفاری به خارج از تونل، یک واگن حمل مصالح تزریق پشت قطعات پیش ساخته بتنی، یک واگن نفربر و یک لوکوموتیو ۲۳ تن است.

در فضاهای زیرزمینی که دسترسی مستقیم به هوای آزاد وجود ندارد، نظارت بر هوا و آلاینده ها باهدف صیانت از نیروی انسانی شاغل به کار بسیار مهم است. برای اطمینان حاصل کردن از این که سلامت کارکنان در محیط کار به خوبی محافظت می شود، لازم است ابتدا شدت جریان هوای مورد نیاز و حداکثر غلظت آلاینده ها در فضای زیرزمینی بر اساس استانداردها و الزامات قانونی برآورد شود.

¹ Herrenknecht

² Segment

سپس ارزیابی مواجهه شغلی کارکنان با اندازه‌گیری‌های میدانی سرعت و دمای هوا و پایش غلظت آلاینده‌ها انجام شود.

۲-۲- طراحی سامانه تهویه تونل چم‌شیر

به‌منظور طراحی سامانه تهویه در حین اجرای تونل انتقال آب چم‌شیر از دستورالعمل تهویه در معادن منتشرشده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی و استاندارد کشورهای مختلف استفاده شده است [۵۱]. بر این اساس شدت جریان هوای موردنیاز برای تهویه ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم-شیر برآورد شده است.

۲-۲-۱- برآورد شدت جریان هوا بر اساس حداقل هوای لازم برای تنفس کارکنان

در استانداردهای کشورهای مختلف، شدت جریان هوای تازه موردنیاز به ازای هر نفر از ۵ تا ۶ مترمکعب بر دقیقه متغیر است [۱۱، ۵۱]. به‌منظور ایجاد ضریب اطمینان بیشتر و بر اساس دستورالعمل تهویه در معادن مقدار حداقل شدت جریان هوای لازم برای تنفس کارکنان ۶ مترمکعب بر دقیقه برای هر نفر منظور شده است. مطابق اطلاعات کارفرما حداکثر تعداد کارکنان در تونل برابر ۳۰ نفر در نظر گرفته شده است [۵۰]. لذا حجم هوای موردنیاز برای تامین نیاز تنفسی کارکنان برابر ۳ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است.

۲-۲-۲- برآورد شدت جریان هوای لازم برای ترقیق آلاینده‌های خروجی اگزوز لوکوموتیو

شدت جریان موردنیاز برای ترقیق آلودگی‌های ناشی از هر کیلووات توان موتورهای دیزلی از ۲/۸۳ تا ۴/۸ مترمکعب بر دقیقه در استانداردهای مختلف ارایه شده است [۵۲-۵۴]. بر اساس مقررات تهویه به‌منظور ترقیق دود حاصل از احتراق هر موتور دیزلی به ازای هر کیلووات از توان ماشین، ۰/۰۸ مترمکعب بر ثانیه هوای تمیز لازم است [۵۱]. لذا حجم هوای موردنیاز برای ترقیق آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو در ماشین حفاری تونل چم‌شیر با توان ۱۳۲ کیلووات برابر ۱۰/۵۶ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود.

۲-۲-۳ - برآورد حداقل سرعت عبور هوا در تهویه تونل چم شیر

بر اساس راهنمای انجمن بین‌المللی تونل و فضاهای زیرزمینی و مقررات تهویه در معادن به‌منظور ایمنی شغلی و سلامتی کارکنان در تونل‌های در حال ساخت مقدار سرعت جریان هوا در مسیر برگشت از جبهه کار و یا متوسط سرعت مقاطع عرضی تونل و چاه‌های زیرزمینی باید حداقل بین ۰/۵ تا ۲ متر بر ثانیه باشد [۵۱، ۵۴، ۵۵]. سطح مقطع مفید پس از حفاری در تونل چم شیر برابر با ۱۶/۶ مترمربع است. بنابراین حداقل شدت جریان مورد نیاز برای تامین حداقل سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر برابر ۸/۳ مترمکعب بر ثانیه است.

۲-۲-۴ - برآورد شدت جریان هوای مورد نیاز برای حذف گرد و غبار

در ماشین‌های حفاری سنگ سخت به منظور برش سنگ از دیسک‌های برشی^۱ استفاده می‌شود. منطقه خرد شده در زیر تیغه‌ها با حرکت سطح برشی دیسک بر روی سنگ‌های جبهه کار، توسعه می‌یابد. سپس ترک‌ها از منطقه خرد شده آغاز و در جهت‌های خاصی (جهت میانی و جانبی) گسترش پیدا می‌کنند. هنگامی که یک یا چند ترک از دو برش مجاور به همدیگر می‌رسند یا سطح آزاد را قطع می‌کنند، تراشه ایجاد می‌شود. تولید تراشه‌ها و کنده شدن آن‌ها موجب ایجاد گرد و غبار می‌گردد. در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر برای جلوگیری از ورود گرد و غبار به داخل فضای عملیاتی از یک دستگاه غبارگیر با شدت جریان ۵ مترمکعب بر ثانیه استفاده شده است. بنابراین برای تامین هوای مورد نیاز غبارگیر و عدم ورود گرد و غبار به فضای ماشین حداقل ۵ مترمکعب بر ثانیه هوا نیاز است.

¹ Disc Cutter

۲-۲-۵- برآورد شدت جریان هوای موردنیاز

بر اساس استانداردهای موجود، مقدار شدت جریان هوای تازه محاسبه شده در قسمت قبل در جدول ۱-۲، ارایه شده است. لذا کمینه شدت جریان هوای لازم برای تهویه تونل چم شیر برابر ۱۰/۵۶ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است.

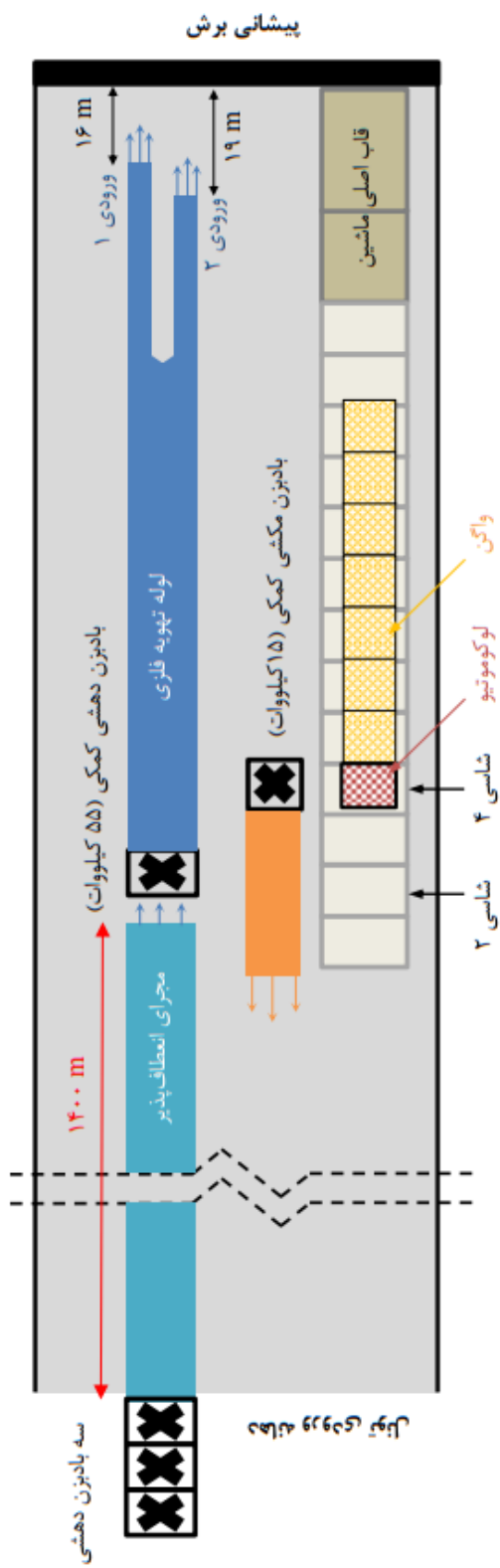
جدول ۱-۲- برآورد شدت جریان هوای تازه موردنیاز برای تهویه تونل چم شیر

معیار	حجم هوای موردنیاز (مترمکعب بر ثانیه)
تنفس کارکنان	۳
آلاینده دیزلی	۱۰/۵۶
حداقل سرعت هوا	۸/۳
حذف گرد و غبار	۵
کمینه شدت جریان هوای موردنیاز	۱۰/۵۶

۲-۳- بادبزن های تهویه در تونل چم شیر

بادبزن ها در سامانه تهویه تونل چم شیر به سه دسته تقسیم شده است. بادبزن اصلی وظیفه انتقال هوا از دهانه تونل تا قسمت پشتیبان ماشین را بر عهده دارد. بادبزن دهشی کمکی هوای تمیز را از قسمت پشتیبان به قاب اصلی ماشین حفاری ارسال می کند. علاوه بر این ها، شرکت سازنده ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر یک دستگاه بادبزن مکشی کمکی در بالای شاسی^۱ شماره ۴ در قسمت پشتیبان ماشین قرارداد داده است. شکل ۲-۲ به صورت شماتیک سامانه تهویه و جانمایی بادبزن ها در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر را نشان می دهد. مشخصات فنی بادبزن ها نیز در جدول ۲-۲، ارایه شده است.

¹ Gantry



شکل ۱-۲- نمایشی از اجزای سامانه تهویه در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر

جدول ۲-۲- مشخصات فنی بادبزنی های تهویه تونل چم شیر

دور موتور (rpm)	فرکانس (Hz)	قطر (mm)	توان (kW)	بادبزنی اصلی کوزماکوستیک ^۱
۱۵۰۰	۳۷	۱۲۰۰	۳×۱۱۰	
۲۹۸۲	۵۰	۱۰۰۰	۵۵	بادبزنی دهشی کمکی گیاه ^۲
۲۹۵۰	۵۰	۷۱۰	۱۵	بادبزنی مکشی کمکی گیاه

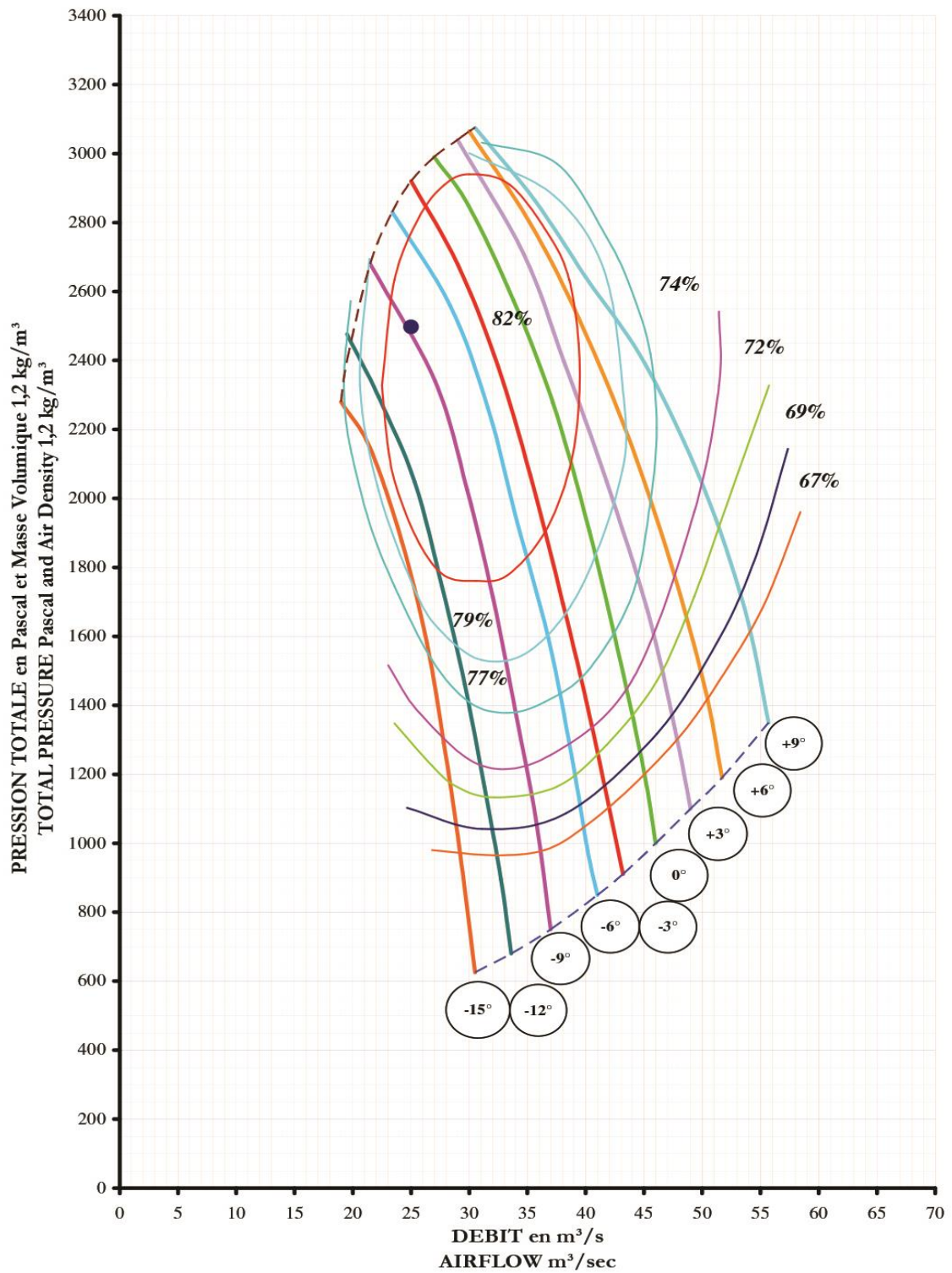
۲-۳-۱- بادبزنی اصلی

مطابق محاسبات صورت گرفته در بخش ۲-۲-۶ و به منظور تامین شدت جریان هوای مورد نیاز برای تهویه تونل چم شیر لازم است بادبزنی مناسبی انتخاب شود. در این تونل سه بادبزنی ۱۱۰ کیلووات ساخت شرکت کوژماکوستیک فرانسه که به صورت سری در دهانه تونل قرار گرفته هوای مورد نیاز برای تهویه تونل را تامین می کنند. شکل ۲-۲، نمایی از بادبزنی های اصلی در دهانه تونل چم شیر را نشان می دهد. بادبزنی های مذکور قادرند ۲۲ تا ۳۷ مترمکعب بر ثانیه هوا با فشار کلی ۲۶۵۰ تا ۷۵۰ پاسکال را تولید نمایند. به منظور کنترل شدت جریان هوای تولیدی توسط این بادبزنی ها از یک مبدل کنترل دور استفاده شده است. منحنی مشخصه بادبزنی های اصلی تونل چم شیر در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است.

هوای تولید شده توسط بادبزنی اصلی به وسیله مجرای تهویه انعطاف پذیر از دهانه ورودی تونل تا قسمت پشتیبان ماشین انتقال می یابد. در قسمت پشتیبان ماشین خشاب تهویه قرار دارد تا با پیشروی ماشین عملیات انتقال هوا بدون وقفه ادامه یابد. هوای تازه پس از خروج از خشاب تهویه توسط یک شیپوری در قسمت پشتیبان ماشین و در انتهای شاسی شماره ۱ رها می شود.



شکل ۲-۲- نمایی از بادبزنی اصلی کوژماکوستیک در دهانه تونل چم شیر



Angle -15° : 90 kW ; -12° : 90 kW ; -9° : 110 kW ; -6° : 132 kW ; -3° : 160 kW
 Angle 0° : 160 kW ; +3° : 200 kW ; +6° : 200 kW ; +9° : 200 kW

شکل ۲-۳- منحنی مشخصه بادبزن‌های اصلی سری شده کوژماکوستیک [۵۰]

۲-۳-۲- بادبزنی کمکی دهشی

به منظور ارسال هوای تازه از قسمت پشتیبان به قاب اصلی ماشین حفاری از بادبزنی کمکی دهشی گیا (۵۵ کیلووات) استفاده شده است. این بادبزنی در بالای شاسی شماره ۲ نصب شده است. انتقال هوا از قسمت پشتیبان به قاب اصلی ماشین حفاری توسط لوله‌های فلزی نصب شده بر روی دستگاه انجام می‌شود. به دلیل کمبود فضا در ماشین حفاری، لوله تهویه فلزی به واسطه یک دوراهی، به دو قسمت تقسیم شده و هوا وارد دو ردیف لوله‌های انتقال هوا با قطر کوچک‌تر می‌گردد. از طریق این لوله‌ها جریان هوا تا اتاق کنترل هدایت و هوا به داخل قاب اصلی ماشین دمیده می‌شود. شکل ۲-۴، نمایی از جانمایی خشاب تهویه، شیپوری و بادبزنی دهشی کمکی گیا در قسمت پشتیبان ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر را نشان می‌دهد. طبق شکل ۲-۵ بادبزنی کمکی دهشی گیا در شرایط ایده‌آل قادر است ۹/۵ تا ۱۸ مترمکعب بر ثانیه هوا با فشار کلی ۱۶۸۰۰ تا ۴۰۰ پاسکال را تولید کند.




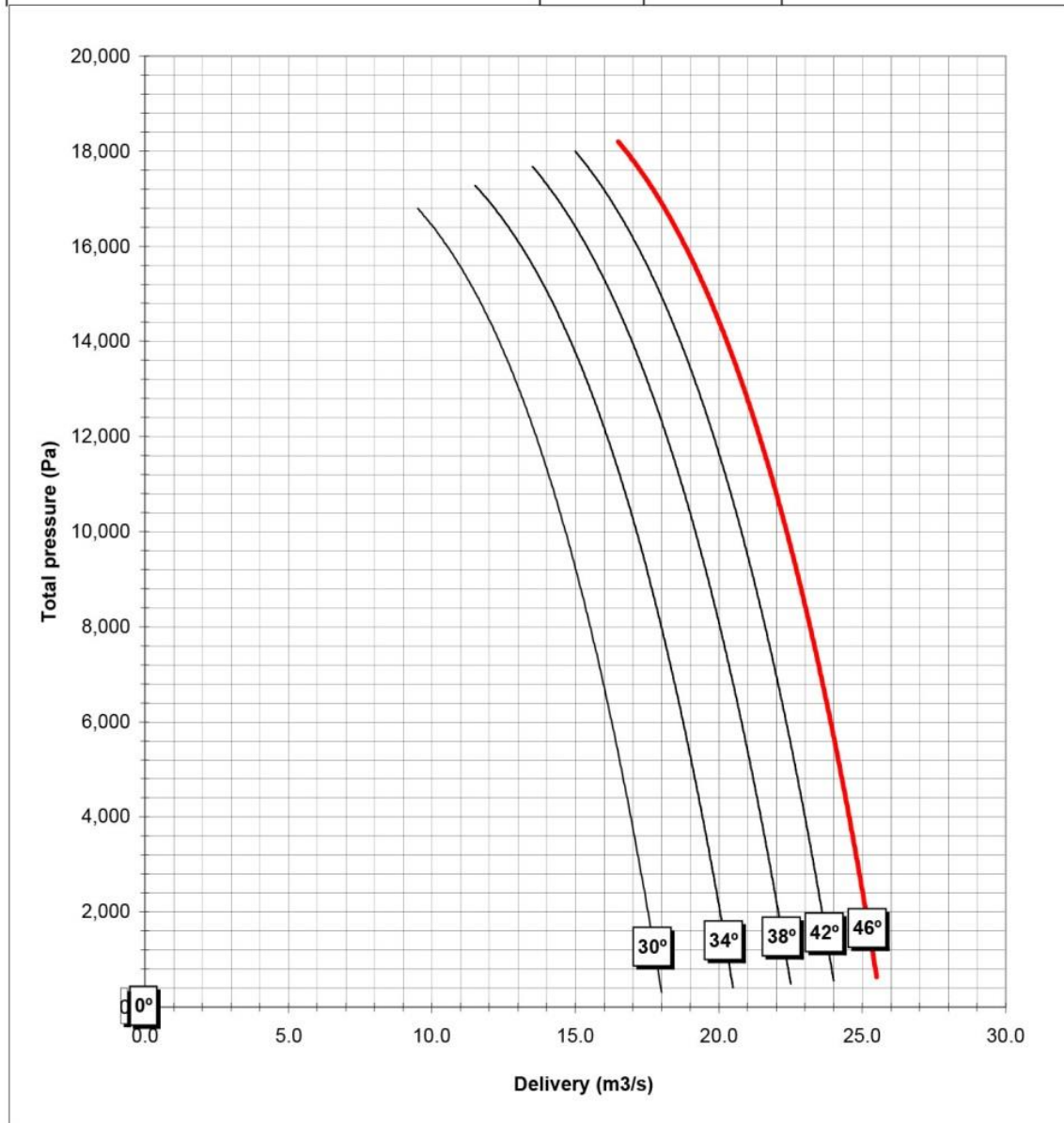
شکل ۲-۴- نمایی از خشاب کانال تهویه و شیپوری بر روی شاسی ۱ و بادبزنی دهشی کمکی بر روی شاسی ۲

GIA SwedVent High Pressure Axial Mining- and Tunnelling Fan

Project: 0
Customer: 0

Quotation No: 0
Calculation ID: 0

 SwedVent <small>UNDERGROUND VENTILATION SYSTEM</small>	4xAVH100	Ø 1000 mm	50 Hz	n = 2982 rpm	
β	kW	Type	β	kW	Type
30°	55 kW	AVH100.55.2.8/50Hz	46°	110 kW	AVH100.110.2.8/50Hz
34°	75 kW	AVH100.75.2.8/50Hz			
38°	75 kW	AVH100.75.2.8/50Hz			
42°	90 kW	AVH100.90.2.8/50Hz			



شکل ۲-۵- منحنی مشخصه بادبزن کمکی دهشی ۵۵ کیلووات گیا [۵۰]

۲-۳-۳- بادبزنی کمکی مکشی

یک بادبزنی مکشی گیا (۱۵ کیلووات) در بالای شاسی شماره ۴ نصب شده است. بادبزنی مکشی وظیفه انتقال آلاینده‌های دیزلی تولیدشده توسط لوکوموتیو و کاهش غلظت گردوغبار تولیدی در محل قیف تخلیه مصالح را بر عهده دارد. براساس منحنی مشخصه بادبزنی مطابق شکل ۲-۶، این بادبزنی ۱۵ کیلووات توانایی انتقال ۵/۷ تا ۹/۲ مترمکعب بر ثانیه هوا را با فشار ۹۵۰۰ تا ۳۸۰ پاسکال دارا است.

۲-۴- بررسی عملکرد بادبزنی‌ها از طریق اندازه‌گیری میدانی

بررسی عملکرد بادبزنی‌ها و تاثیر آن بر الگوهای توزیع جریان هوا در داخل ماشین حفاری تمام مقطع از طریق اندازه‌گیری دما و سرعت هوا در محل‌های ورودی و خروجی بادبزنی انجام شده است. این روش باوجود دقت نسبتاً بالا، به دلیل هزینه‌های بالای انجام آزمایش از یک‌سو و عدم امکان آزمایش در تمام قسمت‌های ماشین حفاری دارای محدودیت است.

۲-۴-۱- روش اندازه‌گیری میدانی سرعت و دمای هوا در ماشین حفاری تمام مقطع

برای اندازه‌گیری میدانی سرعت و دمای هوا روش‌های مختلف توسعه داده شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های اندازه‌گیری میدانی استفاده از روش چندنقطه‌ای ثابت است. در این روش چندین نقطه ثابت برای اندازه‌گیری در مکان‌های مشخص انتخاب می‌شود. دو روش چندنقطه‌ای ثابت با مساحت‌های مساوی^۱ و روش چندنقطه‌ای ثابت با لگاریتم چباچف^۲ برای انتخاب مکان اندازه‌گیری میدانی سرعت هوا در مقاطع دایره‌ای و مستطیلی ارایه شده است [۵۶].

^۱ Equal Area Method

^۲ Tchebycheff Method

GIA SwedVent High Pressure Axial Mining- and Tunnelling Fan


Project: 0

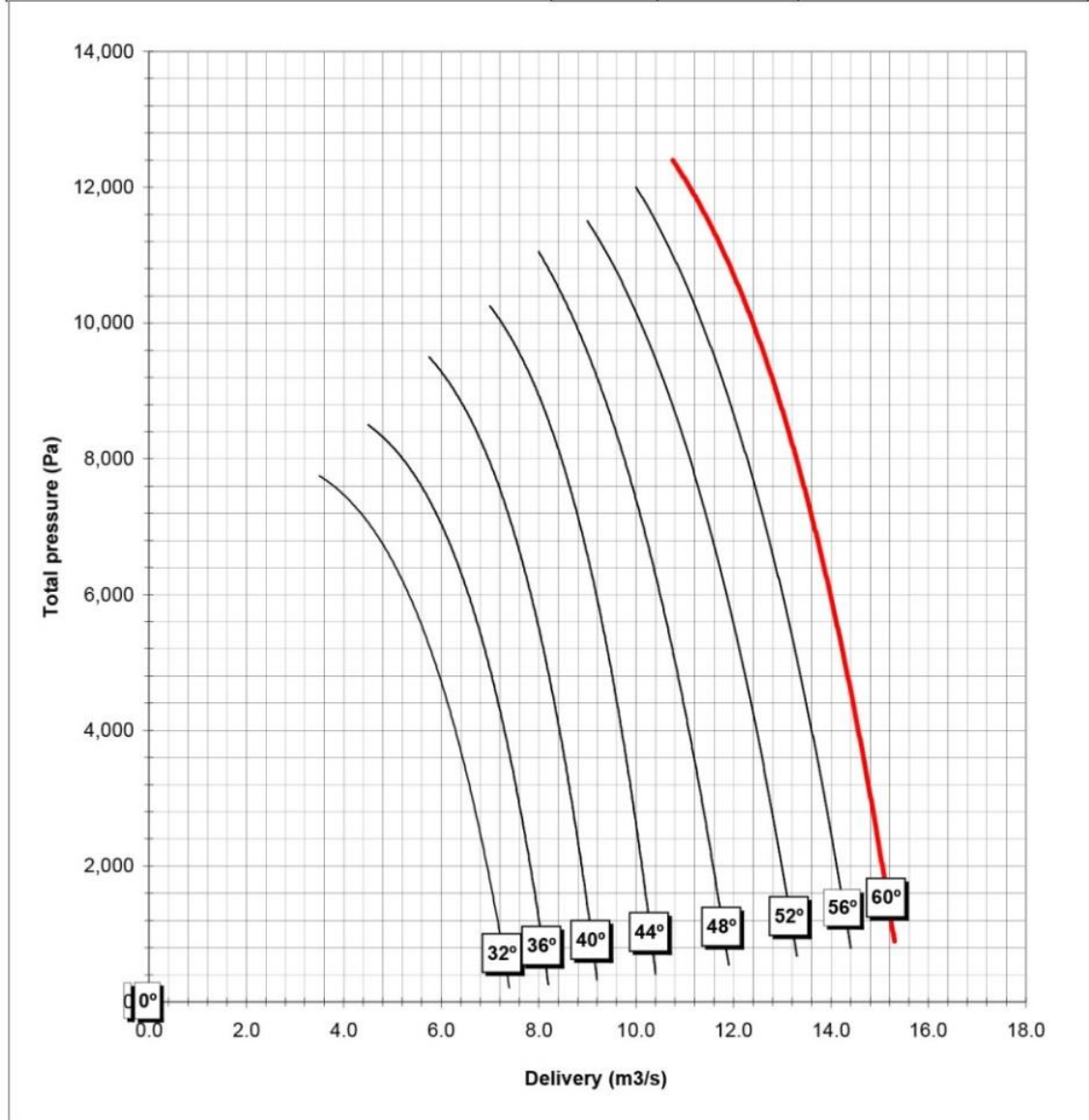
Quotation No:

0

Customer: 0

Calculation ID:

		5xAVH71.	Ø 710 mm	50 Hz	n = 2950 rpm
β	kW	Type	β	kW	Type
32°	11 kW	AVH71.11.2.8/50Hz	48°	30 kW	AVH71.30.2.8/50Hz
36°	11 kW	AVH71.11.2.8/50Hz	52°	30 kW	AVH71.30.2.8/50Hz
40°	15 kW	AVH71.15.2.8/50Hz	56°	30 kW	AVH71.30.2.8/50Hz
44°	18.5 kW	AVH71.18.2.8/50Hz	60°	37 kW	AVH71.37.2.8/50Hz

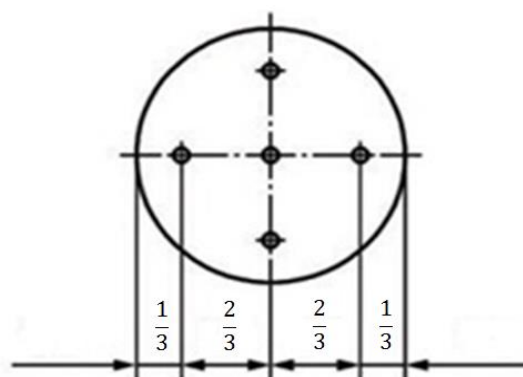


شکل ۲-۶- منحنی مشخصه بادبزن کمکی مکشی ۱۵ کیلووات گیا [۵۰]

روش چندنقطه‌ای ثابت با مساحت‌های مساوی بر اساس تقسیم سطح مقطع به تعداد سطح‌های کوچک‌تر با مساحت مساوی است. در این روش مرکز هر سطح کوچک به‌عنوان یک نقطه برای نمونه-برداری انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است دقت اندازه‌گیری‌های میدانی در روش چندنقطه‌ای ثابت با مساحت‌های مساوی در تعداد نقاط اندازه‌گیری شده است. تعداد نقاط اندازه‌گیری شده نیز تابعی از عدد رینولدز و نسبت طول به قطر سطح مقطع اندازه‌گیری شده است [۵۷].

در روش چندنقطه‌ای ثابت با لگاریتم چباجف موقعیت نقاط اندازه‌گیری آن با توجه به تاثیر تابع اصطکاک دیواره و کاهش سرعت در نزدیکی دیواره‌های لوله تهویه مشخص می‌شود. این روش برای اندازه‌گیری سرعت هوا در مقاطع مستطیلی از روش مساحت‌های مساوی بهتر است [۵۸].

به‌منظور اندازه‌گیری میدانی شدت جریان هوا موسسه استاندارد انگلستان^۱ و استاندارد ۱۹۸۹۴ سازمان ملی استاندارد ایران پیشنهاد می‌دهند از روش چندنقطه‌ای ثابت و مساحت‌های مساوی استفاده شود [۵۹، ۶۰]. در روش چندنقطه‌ای ثابت، در صورتی که قطر کمتر از ۱۲۵ سانتیمتر باشد، به چهار قسمت مساوی تقسیم‌شده و چهار مرکز و مرکز کل، و در کل پنج نقطه، به عنوان نقاط نمونه-برداری انتخاب می‌شود [۶۱]. میانگین حسابی این پنج نقطه، به عنوان متوسط سرعت هوا استفاده می‌شود. شکل ۷-۲ نمایی از محل نقاط نمونه‌برداری به روش چندنقطه‌ای ثابت و مساحت‌های مساوی را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲- محل نقاط نمونه‌برداری به روش چندنقطه‌ای ثابت

¹ British Standard Institute (BSI)

۲-۴-۲- ابزارهای اندازه‌گیری میدانی سرعت هوا

سرعت هوا در فضاهای زیرزمینی به طور معمول با استفاده از بادسنج اندازه‌گیری می‌شود. گرچه بادسنج‌ها انواع مختلفی دارند، ولی اساس کار اکثر آن‌ها یکسان است. مهم‌ترین نمونه‌های آن‌ها در ادامه شرح داده شده است.

۲-۴-۲-۱- بادسنج پره‌ای و مینی‌پره‌ای^۱

بادسنج‌های دارای پروانه‌ای هستند که در اثر برخورد با هوا، به گردش درمی‌آید و سرعت دوران این پروانه متناسب با سرعت هوا است. این دستگاه‌ها دارای دورشماری هستند که به کمک آن می‌توان در زمان معین تعداد دورهای پره را شمارش کرد. نحوه اندازه‌گیری سرعت با بادسنج بدین ترتیب است که ابتدا تعداد دورهای دستگاه را در زمان معین به کمک عقربه‌های دستگاه مشخص می‌کنند و از تقسیم تعداد دورها بر زمان، سرعت دوران دستگاه را به دست می‌آورند [۴]. این دستگاه‌ها با ساختار بسیار ساده در اندازه‌گیری سرعت‌های پایین دقت کمی دارند [۶۲].

۲-۴-۲-۲- بادسنج‌های حرارتی^۲

در بادسنج حرارتی حرکت هوا موجب خنک شدن حس‌گر حساس دستگاه می‌شود و میزان خنک شدن آن بستگی به سرعت جریان هوا دارد. کاربرد اصلی بادسنج‌های حرارتی در اندازه‌گیری سرعت‌های پایین است. معمولاً این بادسنج‌ها در محیط‌های با حرارت زیاد پایداری خود را از دست می‌دهند. در محیط کاری با دمای بالا انتقال حرارت در نزدیکی حس‌گرهای بادسنج سبب ایجاد خطای اندازه‌گیری سرعت به‌ویژه در محدوده سرعت ۰ تا ۰/۲۵ متر بر ثانیه می‌شود [۵۶].

¹ Vane anemometer and mini vane anemometer

² Hotwire Anemometer

۲-۴-۳- لوله پیتو^۱

لوله پیتو وسیله‌ای است که سرعت جریان هوا را با اختلاف فشار تعیین می‌کند. لوله پیتو شامل دو لوله متحدالمرکز است که از طریق روزنه لوله داخلی فشار برخوردی یا فشار کل و از طریق روزنه‌های روی بدنه لوله خارجی فشار استاتیک اندازه‌گیری می‌شود. اختلاف بین فشار کل و فشار استاتیک برابر فشار سرعت است [۶۳].

۲-۴-۳- اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع

برای اندازه‌گیری سرعت هوا، روش‌های مختلفی به شرح زیر وجود دارد [۵۱]:

- برای اندازه‌گیری سرعت‌های کم (کمتر از ۰/۲۵ متر در ثانیه) استفاده از روش گازهای ردیاب توصیه شده است.

- برای اندازه‌گیری سرعت‌های متوسط (۰/۲۵ تا ۵ متر در ثانیه) استفاده از سرعت‌سنج و بادسنج پره‌ای توصیه شده است. بادسنج پره‌ای، دارای پره‌های بزرگی است و گاهی به جای آن از بادسنج مینی پره‌ای استفاده می‌شود.

- برای اندازه‌گیری سرعت‌های زیاد (بیش از ۵ متر در ثانیه) استفاده از لوله پیتو توصیه شده است.

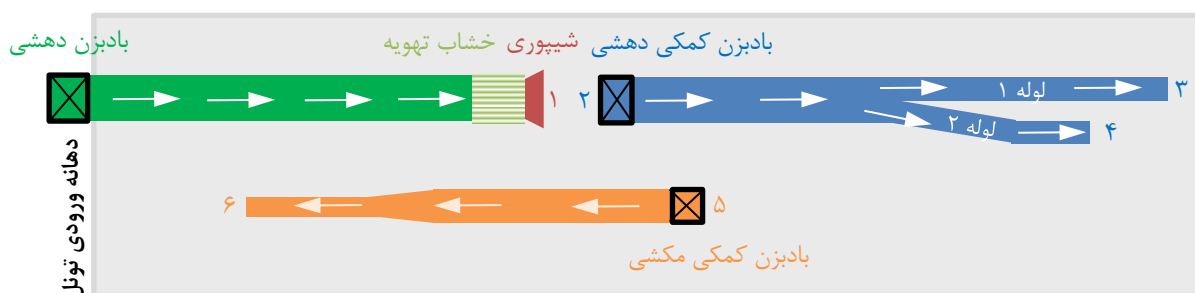
در این پژوهش با توجه به سرعت بالای هوا در بعضی مجراهای تهویه امکان استفاده از بادسنج‌های حرارتی وجود نداشته، بنابراین به منظور بهینه‌سازی و استفاده از تجهیزات با سطح مقطع کوچک‌تر از بادسنج مینی‌پره‌ای مدل EM-9000 استفاده شده است. شکل ۲-۸، نمایی از نمونه برداری دما و سرعت هوا در خروجی از لوله تهویه را نشان می‌دهد.

¹ Pitot tube



شکل ۲-۸- نمونه برداری دما و سرعت هوا توسط دستگاه بادسنج مینی پره‌ای

به منظور تحلیل عملکرد بادبزن‌ها و پایش مقدار هوای موجود در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر، میانگین سرعت و دمای هوا در ورودی و خروجی بادبزن‌ها مطابق شکل ۲-۹، اندازه‌گیری شده است. نتایج اندازه‌گیری میدانی سرعت و دمای هوا در قسمت‌های مختلف ماشین حفاری در جدول ۲-۳، ارائه شده است.



شکل ۲-۹- محل اندازه‌گیری سرعت و دمای هوا در ورودی و خروجی بادبزن‌ها

جدول ۲-۳- میانگین سرعت و دمای هوا در ورودی و خروجی لوله شماره ۱ و ۲

شماره	محل اندازه‌گیری	میانگین سرعت (متر بر ثانیه)	شدت جریان هوا (مترمکعب بر ثانیه)	میانگین دما (درجه سانتیگراد)
۱	خروجی شیپوری مرتبط با خشاب تهویه	۱۰/۰۴	۹/۴۵	۲۹/۶
۲	مجرای ورودی بادبزن کمکی دهشی	۲/۷۳	۲/۷۷	۲۹/۶
۳	خروجی لوله تهویه فلزی ۱ مرتبط با بادبزن کمکی دهشی	۷/۹	۱/۶۲	۳۱/۳
۴	خروجی لوله تهویه فلزی ۲ مرتبط با بادبزن کمکی دهشی	۵/۶	۱/۱۵	۳۱/۴
۵	مجرای ورودی بادبزن کمکی مکشی	۷/۷	۴/۰۳	۳۱/۲
۶	خروجی لوله تهویه مرتبط با بادبزن کمکی مکشی	۱۸	۲/۷۱	۳۲/۸

مطابق جدول ۲-۳، نتایج اندازه‌گیری سرعت هوا نشان می‌دهد شدت جریان هوای ارسال شده به قسمت پشتیبان ماشین در خروجی شیپوری برابر ۹/۴۵ مترمکعب بر ثانیه است. مطابق محاسبات صورت گرفته در بخش ۲-۲-۶، باید حداقل ۱۱ مترمکعب بر ثانیه هوای تازه به منظور ترقیق آلاینده‌ها به داخل ماشین حفاری تمام مقطع ارسال شود. نتایج اندازه‌گیری‌های میدانی نشان می‌دهد در شرایط فعلی، جریان هوا توانایی پوشش شاخص‌های حداقل شدت جریان لازم برای تنفس کارکنان و حداقل سرعت هوا در مقاطع عرضی را دارد ولی توانایی کاهش آلاینده‌های خروجی از آگروز لوکوموتیو و ترقیق گازهای منتشر شده از واحدهای سنگی را ندارد.

اندازه‌گیری‌های میدانی نشان می‌دهد کل شدت جریان هوای تمیز رها شده در قسمت پشتیبان ماشین ۹/۴۵ مترمکعب بر ثانیه است. که از این مقدار، بادبزن دهشی کمکی حدود ۳۰ درصد از هوای سالم را از قسمت پشتیبان به قسمت قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع ارسال می‌کند. مطابق جدول ۲-۳، لوله تهویه فلزی ۱ و ۲ به ترتیب ۵/۵۸ و ۵/۴۱ درصد از حجم هوا را از خود عبور داده و در قسمت قاب اصلی ماشین حفاری رها می‌کنند. علت اختلاف در شدت جریان خروجی لوله‌های تهویه فلزی، نشت هوا و افت اصطکاکی ناشی از اختلاف طول لوله‌ها و افت موضعی ناشی از نحوه قرارگیری لوله‌ها نسبت به یکدیگر است.

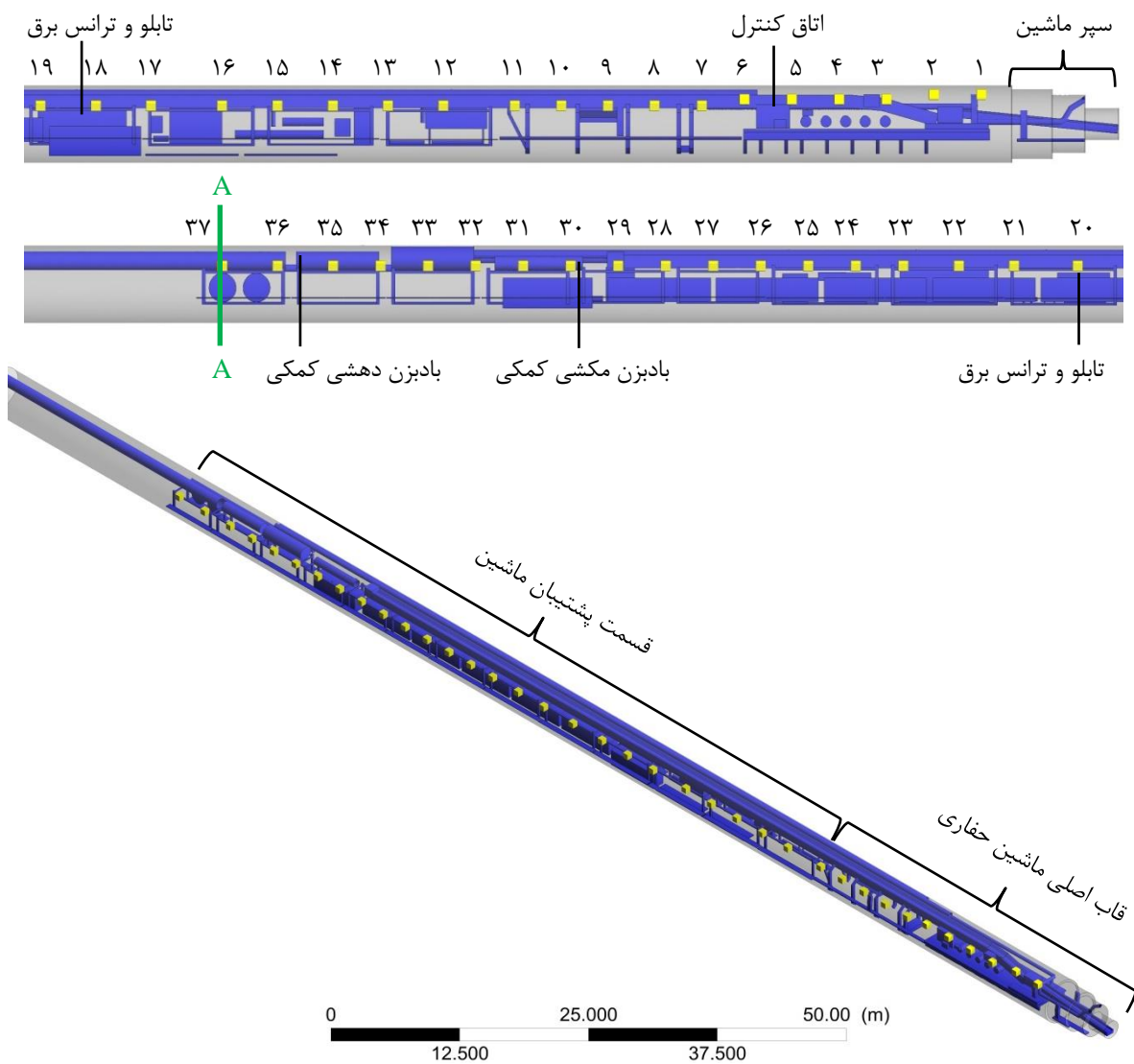
۲-۴-۴ - کیفیت هوا در منطقه تنفسی کارکنان

کیفیت هوا در محیط‌های کاری به شاخص‌های مختلفی نظیر حرارت محیط، کیفیت هوا، میزان نور، صدا و ... وابسته است [۶۴]. یکی از مهم‌ترین محل‌ها برای سنجش کیفیت هوا، منطقه تنفسی کارکنان است. هنگامی که هدف نمونه‌برداری ارزیابی و تعیین میزان تماس فرد با آلودگی و سنجش کیفیت هوا است، نمونه‌برداری از منطقه تنفسی لازم است [۶۳]. در منطقه تنفسی و در فاصله ۱۷۰ سانتیمتری از محل حضور و تردد کارکنان، حداقل سرعت هوای عبوری شرط لازم برای حذف و یا ترقیق آلاینده‌های محیطی و افزایش کیفیت هوا را تامین می‌کند [۶۵].

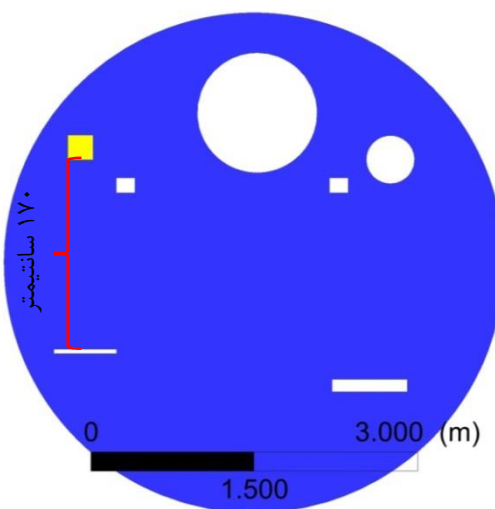
دمای هوای محیط بر آسایش حرارتی و کارایی کارکنان تاثیر دارد. تغییرات دمایی بین ۲۱ تا ۲۵ درجه سانتیگراد تغییر زیادی بر کارایی کارکنان ندارد. مطالعات نشان می‌دهد در دمای ۲۵ تا ۳۲ درجه سانتیگراد بازای هر یک درجه افزایش دما ۲ درصد از کارایی کارکنان کم می‌شود [۶۴]. به‌منظور تحلیل کیفیت هوا در محل حضور و تردد کارکنان از شاخص میانگین دما و سرعت هوا در منطقه تنفسی کارکنان استفاده شده است.

اندازه‌گیری‌های میدانی سرعت و دمای هوا در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر در تابستان ۱۳۹۷ انجام شده است. در این شرایط، میانگین دمای هوا در دهانه ورودی تونل ۳۶/۳ درجه سانتیگراد و میانگین رطوبت هوا ۱۲/۲ درصد اندازه‌گیری شده است.

در مقاطع عرضی از ماشین حفاری تمام مقطع در فاصله ۱۷۰ سانتیمتری از کف و در محل حضور و تردد کارکنان نمونه‌برداری از دما و سرعت هوا انجام شده است. محل دقیق نمونه‌برداری دما و سرعت هوا در منطقه تنفسی کارکنان در شکل ۲-۱۰ مشخص شده است.



ب- محل نمونه برداری در مقطع عرضی A-A



الف- مقطع عرضی A-A

شکل ۱۰-۲- محل دقیق نمونه برداری دما و سرعت جریان هوا در مقاطع عرضی و طولی منطقه تنفسی کارکنان

اندازه‌گیری دما و سرعت جریان هوا با استفاده از یک دستگاه بادسنج مینی پره‌ای مدل EM-9000 مجهز به سنسور دما و ۵ بار تکرار انجام شده است. در مواردی که نمونه برداشت شده به میزان ۲۰ درصد و یا بیشتر انحراف داشت، نمونه حذف شده و نمونه‌برداری مجدد انجام شده است. جدول ۴-۲، نتایج اندازه‌گیری میدانی دما و سرعت جریان هوا در مقاطع عرضی از منطقه تنفسی کارکنان را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۲- نتایج اندازه‌گیری میدانی سرعت جریان هوا و دما در مقاطع عرضی از منطقه تنفسی کارکنان

مقطع عرضی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
میانگین سرعت هوا (متر بر ثانیه)	۰/۴	۱/۲۸	۰/۶۵	۱/۲	۰/۵	۰/۴	۰/۳	۰	۰	۰	۰
میانگین دما (درجه سانتیگراد)	۳۰/۳	۳۰/۲	۳۰/۶	۳۰/۷	۳۰/۹	۳۱	۳۱/۳	۳۱/۴	۳۱/۵	۳۱/۶	۳۱/۷
مقطع عرضی	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲
میانگین سرعت هوا (متر بر ثانیه)	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
میانگین دما (درجه سانتیگراد)	۳۰/۴	۳۰/۴	۳۰/۵	۳۰/۶	۳۰/۶	۳۰/۸	۳۱/۲	۳۱/۴	۳۱/۲	۳۱/۲	۳۱/۴
مقطع عرضی	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵
میانگین سرعت هوا (متر بر ثانیه)	۰/۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۸	۰/۳۵	۰/۴۲
میانگین دما (درجه سانتیگراد)	۳۱/۷	۳۱/۵	۳۱/۴	۳۱/۲	۳۰/۹	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۰/۸	۳۰/۴

اختلاف تراز ارتفاعی در محل تردد و یا حضور کارکنان بین مقاطع عرضی ۱ تا ۱۱ و مقطع عرضی ۱۲ تا ۳۷ وجود دارد، لذا به منظور تحلیل و مقایسه صحیح نتایج با یکدیگر مطالعات به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول در مقاطع ۱ تا ۱۱ (ناحیه قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع) و بخش دوم در مقاطع ۱۲ تا ۳۷ (ناحیه پشتیبان ماشین) واقع است. نتایج اندازه‌گیری میدانی سرعت جریان هوا در منطقه تنفسی کارکنان ماشین حفاری تونل چمشیر در جدول ۴-۲، نشان داد سرعت هوا در مقطع عرضی ۱ تا ۵ (از قسمت انتهایی سپر ماشین تا اتاق کنترل) از سرعت قابل قبولی برخوردار

است و از قسمت اتاق کنترل ماشین تا انتهای قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع (مقطع عرضی ۶ تا ۱۲) جریان هوای کافی وجود ندارد.

جدول ۲-۴، نشان می‌دهد در منطقه پشتیبان ماشین به‌جز در مقاطع عرضی ۳۴ تا ۳۶ (محدوده قرارگیری بادبزن دهشی کمکی) در سایر قسمت‌های پشتیبان ماشین سرعت جریان هوای کافی در محدوده تنفسی کارکنان وجود ندارد.

نتایج اندازه‌گیری دما در قسمت‌های مختلف ماشین نشان می‌دهد دمای هوا در داخل ماشین برای آسایش حرارتی کارکنان مناسب نیست. در قسمت قاب اصلی ماشین حفاری دمای هوا در محیط کار با فاصله از سپر به سمت ناحیه پشتیبان افزوده می‌شود. با توجه به قرارگیری هیدروموتورهای ماشین در مقطع عرضی ۳ تا ۵ و انتقال حرارت از سطح هیدروموتورها به هوا می‌توان انتظار داشت دمای هوا در این ناحیه نسبت به سایر قسمت‌های قاب اصلی ماشین حفاری بیشتر باشد. با توجه به قرارگیری تابلو و ترانس‌های برق در شاسی شماره ۹ و ۱۰ حرارت تولیدشده در اثر کارکرد این ترانس‌ها موجب افزایش دمای محیط در قسمت پشتیبان ماشین (مقطع عرضی ۲۲، ۲۳ و ۲۴) شده است. وجود بادبزن مکشی کمکی در مقطع عرضی ۲۹ و ۳۰ موجب انتقال بهتر هوا و کاهش نسبی دمای محیط شده است. همچنین آزادسازی هوای تازه در قسمت پشتیبان ماشین و در مقطع ۳۵ و ۳۶ سبب کاهش دمای محیط در این قسمت‌ها شده است.

۲-۵- جمع بندی

مطالعات تعیین شدت جریان مناسب برای تهویه ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر براساس معیارهای مختلف نظیر ترقیق آلاینده های خروجی از اگزوز لوکوموتیو، حداقل سرعت هوا و هوای مورد نیاز برای تنفس کارکنان، ترقیق گرد و غبار و گازهای منتشر شده از واحدهای سنگی ارزیابی شده است. سپس عملکرد سامانه تهویه و مشخصات بادبزن های موجود در این تونل بررسی شده است. مطالعات میدانی سرعت و دمای هوا در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر توسط یک دستگاه بادسنج مینی پره ای مدل EM-9000 مجهز به سنسور دما به روش چند نقطه ای ثابت با مساحت های مساوی اندازه گیری شده است. نتایج نشان می دهد میانگین دمای هوا در محیط تنفسی کارکنان بالاتر از حد آسایش حرارتی برای کارکنان شاغل در ماشین حفاری است. پیشنهاد می شود برای کنترل دمای هوای داخل ماشین حفاری تمام مقطع از دستگاه های تهویه مطبوع در دهانه بادبزن اصلی استفاده شود. نمونه برداری سرعت هوا در محل حضور و تردد کارکنان نشان می دهد از ناحیه اتاق کنترل ماشین تا محدوده قرارگیری بادبزن دهشی کمکی در ناحیه پشتیبان ماشین جریان هوای کافی وجود ندارد. بنابراین باید تمهیداتی برای بهینه سازی توزیع جریان هوا در داخل ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم شیر اندیشیده شود.

فصل سوم

روش عددی

۳-۱- آشنایی

بررسی رفتار سیالات به روش‌های ریاضی و تحلیلی به‌جز در موارد بسیار محدود و با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌سازی امکان‌پذیر نیست. حل مستقیم مسایل دینامیک سیالات محاسباتی به دلیل پیچیدگی‌های هندسی و حضور گزاره‌های غیرخطی و همبستگی معادلات ناویر استوکس به یکدیگر بسیار دشوار است. در این شرایط با توجه به ضعف روش‌های ریاضی در حل معادلات ناویر استوکس روش دیگری نیاز است. بر این اساس، استفاده از روش‌های عددی در بسیاری از پروژه‌های دینامیک سیالات محاسباتی مورد توجه قرار گرفته است. در روش‌های عددی، ابتدا دامنه حل به اجزای بسیار کوچکی به نام سلول‌های محاسباتی تقسیم می‌شود. مجموع سلول‌های محاسباتی تشکیل شبکه محاسباتی را می‌دهند. تقسیم دامنه حل به سلول‌های بسیار کوچک، موجب می‌شود بتوان تغییرات متغیرهای حل در فاصله کوتاه یک سلول را خطی فرض نمود. بدین ترتیب امکان خطی‌سازی و ساده‌سازی معادلات ناویر استوکس بر روی اجزای دامنه حل فراهم می‌شود. از یکپارچه‌سازی و برقراری ارتباط بین سلول‌ها، در مجموع رفتاری تقریبی از جریان سیال نشان داده می‌شود. در ادامه از روش عددی برای مطالعه الگوهای توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها در محدوده‌ی ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر استفاده شده است.

۳-۲- مدل‌سازی هندسی

محدوده موردنظر برای مدل‌سازی، کل فضای داخل ماشین حفاری تمام مقطع است. مدل‌سازی موردنظر در ماشین حفاری تمام مقطع تونل انتقال آب چم‌شیر به‌عنوان یک محدوده مطالعاتی پیاده‌سازی شده است. ماشین حفاری مورد مطالعه یک ماشین حفاری تمام مقطع تک سپر^۱ مدل S124 ویژه حفاری در سنگ سخت است. شکل ۳-۱، نمایی از ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر نمایش می‌دهد.

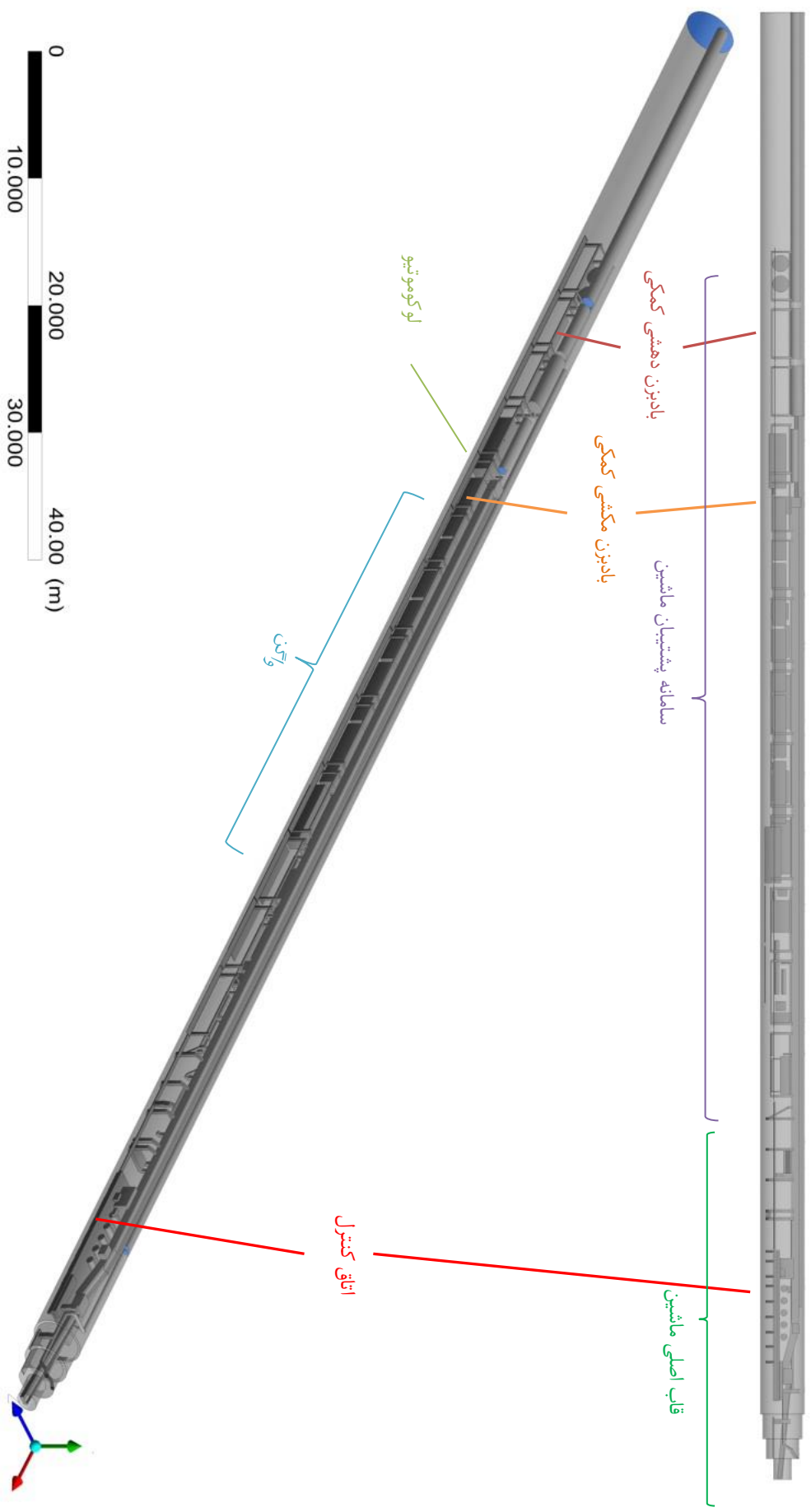
¹ Single Shield Tunnel Boring Machine

هندسه سه‌بعدی مساله با کمک نقشه‌های طراحی و برش‌های عرضی و طولی از ماشین حفاری تمام مقطع و همچنین اندازه‌گیری‌های میدانی تهیه شده است. به دلیل قطعات، تجهیزات و جزییات بسیار زیاد در هندسه مساله و نقاط با زوایای تیز اندازه سلول‌ها در حدی کوچک شد که انجام عملیات ایجاد شبکه توری در عمل غیرممکن شد. لذا با نظر کارشناسی، در قسمت‌هایی که تاثیری بر روند حل مساله نداشته ساده‌سازی‌هایی صورت گرفته است. در مدل‌سازی هندسی سعی شده ساده‌سازی‌ها به‌گونه‌ای باشد که بر دقت نتایج حاصله اثرگذار نباشد و رفتار سیال درون مدل بسیار شبیه به رفتار آن در داخل فضای واقعی ماشین باشد.

یکی از مسایلی که بر روی همگرایی و دقت نتایج شبیه‌سازی جریان بر روی موانع تاثیرگذار است، ادامه دامنه حل در منطقه گردابی است. در جریان‌های آشفته، جریان بر روی مانع دچار جدایش می‌شود در نتیجه، دنباله‌ای تشکیل می‌شود که تا چندین برابر طول مشخصه ادامه می‌یابد [۶۶]. در صورتی که منطقه گردابی و چرخشی پشت جسم تا خروجی ادامه یابد، بر روی خروجی، جریان بازگشتی رخ می‌دهد. این مساله علاوه بر آن که همگرایی حل را به‌طور مستقیم تحت تاثیر قرار می‌دهد، به دلیل ورود اطلاعات ناشناخته از پایین دست، می‌تواند موجب بروز خطای شبیه‌سازی شود. بنابراین در این شرایط به‌طور معمول دامنه حل تا ۱۰ برابر طول مشخصه ادامه داده می‌شود تا دنباله‌ها، درون دامنه حل میرا شده و در خروجی تنها جریان خروجی وجود داشته باشد [۴۹]. بنابراین ضروری است در پژوهش حاضر هندسه مساله تا طولی بیشتر از طول فعلی ماشین حفاری تمام مقطع امتداد داده شود. شکل ۲-۳ نمایی از مدل هندسی ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱ - ماشین حفاری تمام مقطع مدل S124 در دهانه ورودی تونل انتقال آب چمشیر



شکل ۳-۲- نمایی از مدل هندسی طراحی شده ماشین حفاری تمام مقطع در طول چم شیر

دامنه حل در مدل‌سازی عددی به صورت نواحی از فضا تعریف می‌شود که معادلات جریان سیال و انتقال حرارت در آن حل می‌شود. در این دامنه‌ی حل، مشخصات کلی از قبیل موقعیت و مکان هندسی، نوع دامنه، محور مختصات، شرایط فشار مرجع، نیروی شناوری^۱، انتقال حرارت و رژیم جریان مشخص می‌شود. در مساله حاضر، دامنه‌ی حل، کل فضای داخل ماشین حفاری تمام مقطع است که در آن جریان سیال هوا و به صورت فاز پیوسته و در فشار مرجع یک اتمسفر حرکت می‌کند. شکل ۳-۲ نمایی از مدل هندسی تولید شده را نشان می‌دهد.

۳-۳- تولید شبکه عددی

تقسیم دامنه حل به سلول‌های بسیار کوچک، موجب می‌شود تغییرات متغیرهای حل، در فاصله کوتاه یک سلول را خطی و در بعضی موارد ناچیز فرض نمود. بدین ترتیب، امکان خطی‌سازی و ساده‌سازی معادلات ناویر استوکس، بر روی اجزای دامنه حل فراهم می‌شود. از یکپارچه‌سازی و برقراری ارتباط بین سلول‌ها در مجموع، رفتاری تقریبی از جریان سیال، بروز می‌نماید. با افزایش تعداد سلول‌ها در دامنه حل و به دنبال آن کوچک‌تر شدن سلول‌های محاسباتی، فرض خطی‌سازی برخی متغیرها و ثابت ماندن برخی دیگر در هر سلول، منطقی‌تر بوده و نتایج محاسبات به داده‌های واقعی، نزدیک‌تر خواهد شد [۶۷].

شبکه‌های محاسباتی، خود به دو نوع کلی سازمان‌یافته و بدون سازمان، تقسیم‌بندی می‌شوند. در شبکه سازمان‌یافته، شناسایی سلول‌های مجاور، به صورت ماتریسی انجام می‌شود و شبکه ساختاری منظم دارد. سلول‌های مورد استفاده در این نوع از شبکه، چهارگوش در دو بعد و شش‌وجهی در سه بعد هستند. این نوع از شبکه، به دلیل منظم بودن و الزامات هندسی خاص، برای بسیاری از هندسه‌های پیچیده قابل استفاده نیست.

¹ Buoyancy Force

در هندسه‌های پیچیده و مقاطع دایره‌ای با انحنای زیاد، از شبکه بدون سازمان استفاده می‌شود [۶۸]. این نوع از شبکه به صورت نامنظم و گاهی تصادفی و البته با استفاده از روش‌های هوشمند تولید می‌شود. سلول‌های مورد استفاده در این نوع از شبکه، غالباً مثلث در دو بعد و چهاروجهی در سه بعد است. از سلول‌های چهاروجهی^۱ و هرم^۲ نیز در موارد خاص استفاده می‌شود. در کنار این‌ها، سلول‌های مورد استفاده در شبکه سازمان‌یافته، در شبکه بدون سازمان نیز کاربرد دارند که البته کاربرد آن‌ها، قدری از سلول‌های اصلی (مثلث و چهاروجهی) کمتر است.

با توجه به پیچیدگی هندسه سه‌بعدی مساله، به منظور تولید شبکه عددی و صرفه‌جویی در زمان و کاهش تعداد سلول‌های شبکه از روش خودکار^۳ و پیشنهادی نرم‌افزار استفاده شده است. استفاده هم‌زمان از سلول‌های چهاروجهی، هرم و گوه^۴ سبب می‌شود که دقت حل، افزایش و همچنین مدت‌زمان حل نیز کاهش یابد [۶۷]. با توجه به هندسه پیچیده مساله به منظور ایجاد دقت بیشتر در بخش‌هایی از هندسه که انحنای سطوح و خطوط بزرگ است یا دو صفحه و خط به یکدیگر نزدیک هستند نرم‌افزار به صورت هوشمند ابعاد شبکه را کاهش داده تا انحنا و یا شیارها با شبکه ریزتر پوشیده و در روند حل نشان داده شوند.

در فرایند ریز کردن ابعاد شبکه بر روی سطوح منحنی و شیارها، ممکن است اندازه سلول‌ها در حدی کوچک شود که به دلیل تعداد بالای سلول‌ها، شبیه‌سازی غیرممکن شود. بدین منظور با تنظیم حداقل ابعاد سلول به ۱۵ میلی‌متر از ریز شدن بیش از حد شبکه جلوگیری شده است.

۳-۱-۳- وضوح شبکه در نزدیکی دیواره (استفاده از Y^+)

یکی از مساله‌های مهم در مدل‌سازی جریان‌های آشسته، در نظر گرفتن تعداد کافی تقسیمات در لایه مرزی مجاور دیواره است. این تقسیمات ابتدا بر حسب ارتفاع بی‌بعد Y^+ محاسبه شده است. سپس

¹ Tetrahedron

² Pyramid

³ Automatic

⁴ Prism/wedge

با روابط تقریبی، تبدیل به ارتفاع دارای بعد شده و در نرم‌افزار تولید شبکه اعمال شده است. اگر مقدار Y^+ خیلی بزرگ باشد، شرط مرزی دیواره به درستی اعمال نمی‌شود.

بسته به مدل آشفتگی و جزییات مورد نیاز از لایه مرزی، ارتفاع مجاور دیواره متفاوت خواهد بود. در حل مدل‌های آشفتگی به روش‌های SST و $K-\omega$ از مقدار ارتفاع بی‌بعد Y^+ کمتر یا مساوی ۱ و در مدل‌های $K-\epsilon$ و RSM از Y^+ برابر یا بزرگ‌تر از ۱۱ استفاده می‌شود [۶۹]. همچنین به منظور مطالعه جریان‌های داخلی^۱ در ناحیه زیر لایه لزج^۲ مقدار Y^+ بین ۱ تا ۳ و در ناحیه لایه انتقالی^۳ بین ۳ تا ۱۱ تغییر می‌کند. در ناحیه تابع لگاریتم^۴ نیز از مقدار Y^+ بین ۱۱ تا ۳۰ (در برخی موارد تا ۶۰) می‌توان استفاده کرد. در جریان‌های خارجی^۵ نیز مقدار Y^+ بیشتر از ۱۳۰ پیشنهاد شده است [۶۹]. از آنجاکه در این مدل‌سازی، جزییات جریانی فواصل بسیار نزدیک به دیواره شامل زیرلایه لزج و لایه انتقالی مدنظر نیست، می‌توان از اعداد بزرگ‌تری در حدود ۱۱ برای Y^+ استفاده نمود.

با توجه به دمای داخل ماشین حفاری تمام مقطع، چگالی سیال هوا برابر $1/177$ کیلوگرم بر مترمکعب و گرانش دینامیکی آن 1.846×10^{-5} کیلوگرم بر متر در ثانیه منظور شده است. همچنین با در نظر گرفتن حداقل سرعت متوسط هوا در ماشین حفاری تمام مقطع برابر $0/3$ متر بر ثانیه و قطر مفید $4/6$ متر، مقدار ارتفاع اولین سلول در مجاورت دیواره با فرض Y^+ برابر ۱۱ مطابق روابط (۱-۳) تا (۵-۳) محاسبه شده است [۷۰].

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} = \frac{1.177 \times 0.3 \times 4.6}{1.846 \times 10^{-5}} = 87988 \quad (1-3)$$

$$C_f = [2 \log_{10} Re - 0.65]^{-2.3} = [2 \log_{10}(87988) - 0.65]^{-2.3} = 0.006 \quad (2-3)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \cdot \rho \cdot U^2 = \frac{1}{2} \times 0.006 \times 1.177 \times 0.3^2 = 0.0003 \quad (3-3)$$

¹ Inner Layer

² Viscose Sublayer

³ Buffer layer

⁴ Log- Law Region

⁵ Outer Layer

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{0.0003}{1.177}} = 0.0164 \quad (4-3)$$

$$Y = \frac{Y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot U^*} = \frac{11 \times 1.846 \times 10^{-5}}{1.177 \times 0.0164} = 0.01 \text{ m} = 1 \text{ cm} \quad (5-3)$$

در این روابط؛

R_e : عدد رینولدز

ρ : چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

U : حداقل سرعت هوا در مقطع عرضی ماشین حفاری تمام مقطع بر حسب متر بر ثانیه

L : قطر مفید مقطع عرضی از ماشین حفاری تمام مقطع بر حسب متر

μ : گرانروی دینامیکی هوا بر حسب کیلوگرم بر متر در ثانیه

C_f : ضریب اصطکاک روی دیواره

τ_w : تنش برشی روی دیواره بر حسب پاسکال

U^* : سرعت اصطکاکی بر حسب متر بر ثانیه

Y^+ : ارتفاع بی بعد

Y : ارتفاع اولین سلول بر حسب متر

بنابراین در شبکه توری حاضر ارتفاع اولین سلول در مجاورت دیواره برابر ۱ سانتیمتر انتخاب شده است.

۳-۳-۲- ضریب رشد لایه مرزی^۱

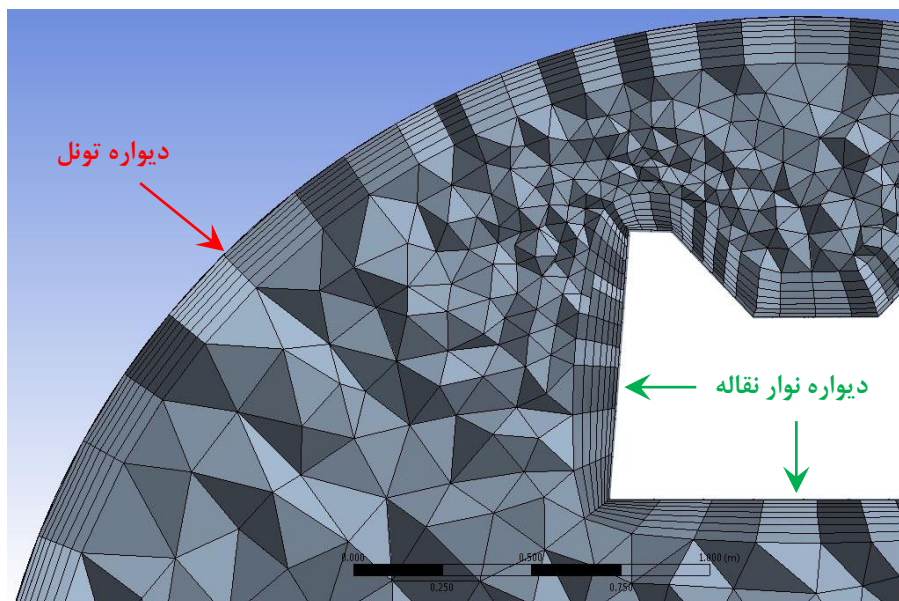
ضریب رشد لایه مرزی باید در محدوده ۱ تا ۱/۲ باشد [۷۱]. مقادیر بسیار نزدیک به ۱ موجب افزایش بی دلیل حجم شبکه و شبیه سازی خواهد شد و همچنین ممکن است مشکلاتی در تغییرات

¹ Growth rate

ملايم اندازه سلول‌ها در منطقه مشترك لايه مرزی با فضای اطراف نیز پيش آورد. مقادير بزرگ‌تر از ۱/۲ نیز موجب کاهش دقت شبیه‌سازی در لايه مرزی می‌گردد. در حالت عادی، می‌توان بدون هیچ نگرانی این ضریب را تا ۱/۲ افزایش داد. لیکن در مواقعی که محدودیتی از نظر حجم محاسبات وجود ندارد، استفاده از مقادير کوچک‌تر بهتر است [۷۱]. در این پژوهش مقدار ضریب رشد در منطقه لايه مرزی با توجه به هندسه مساله و پیشنهاد نرم‌افزار شبکه‌بندی برابر ۱/۱۵ در نظر گرفته شده است.

۳-۳-۳- تعداد طبقات لايه مرزی

به‌طور معمول بسته به مدل آشفتگی مورد استفاده و جزییات مورد نیاز لايه مرزی، پیشنهاد می‌شود تعداد طبقات لايه مرزی بین ۱۰ تا ۱۵ طبقه در نظر گرفته شود. برای غالب شبیه‌سازی‌هایی که جزییات لايه مرزی در مجاورت دیواره (زیر لايه لزج و منطقه انتقالی) مورد نظر نیست، در نظر گرفتن ۱۰ طبقه کاملاً قابل قبول است و بسته به هزینه محاسباتی و برخی محدودیت‌ها در جریان داخلی، می‌توان تعداد آن را تا ۷ و یا ۶ طبقه کاهش داد [۴۹]. پس از بررسی و تغییر تعداد طبقات در نتایج مدل‌سازی مشخص شد تغییر محسوسی در نتایج در اثر تغییر تعداد طبقات لايه مرزی از ۱۰ طبقه تا ۷ طبقه ایجاد نشده است. بنابراین با توجه به هندسه پیچیده و تعداد زیاد سلول‌های شبکه و به‌منظور کاهش هزینه محاسباتی تعداد ۷ طبقه برای لايه مرزی در مدل‌سازی نهایی انتخاب شده است. شکل ۳-۳، نمایی از لايه مرزی ایجاد شده با ۷ طبقه و اولین فاصله گره ۱ سانتیمتر و ضریب رشد ۱/۱۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳- نمای از لایه مرزی ایجادشده با ۷ طبقه و ارتفاع اولین سلول ۱ سانتیمتر در نزدیکی دیواره

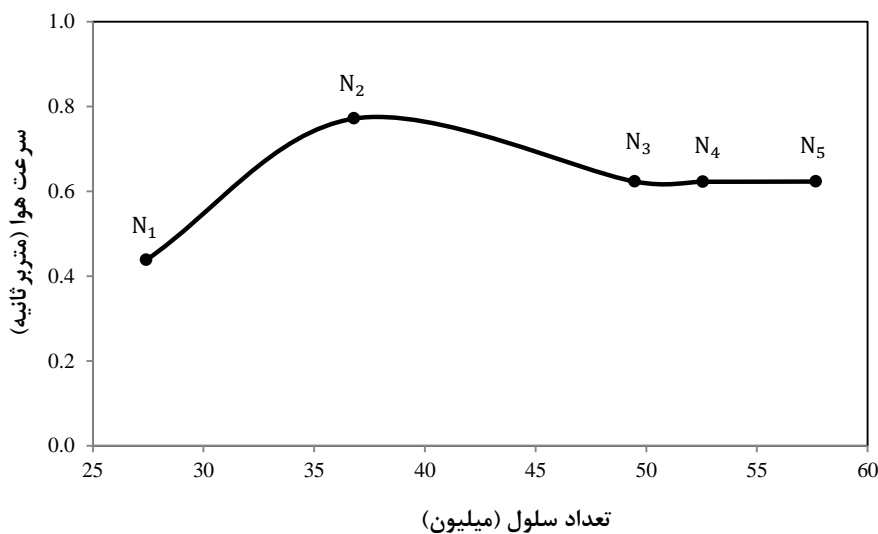
۳-۳-۴- استقلال شبکه

ریز کردن اندازه سلول‌های محاسباتی و در پی آن افزایش تعداد سلول‌ها باعث افزایش خطای گرد کردن^۱ می‌شود. از طرف دیگر به علت افزایش تعداد شبکه، تعداد محاسبات لازم و همچنین هزینه محاسباتی نیز افزایش پیدا می‌کند. از این‌رو فضای محاسباتی در این تحقیق با شبکه‌بندی با اندازه‌های متفاوت مورد تحلیل قرار گرفته تا شبکه مناسبی که مقدار خطای عددی آن در حد خطای قابل قبول باشد و همچنین به ازای آن هزینه محاسباتی افزایش چندانی نداشته باشد، انتخاب شود.

به‌منظور بررسی استقلال شبکه و برای اطمینان از یک‌راه حل مستقل مقدار سرعت محلی در یک نقطه با تغییر ابعاد شبکه در شکل ۳-۴ مقایسه شده است. مقایسه شبکه‌های توری نشان می‌دهد در میان شبکه‌های تولیدشده دو شبکه ابتدایی N_1 و N_2 خطای زیادی در جواب‌ها ایجاد می‌کنند. تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۹ با ابعاد شبکه ۴۹ میلیون سلول در مقایسه با ۵۲ میلیون سلول کمتر از ۳ درصد اختلاف دارد درحالی‌که نتایج ابعاد شبکه با ۳۶ میلیون بیش از ۲۰ درصد در مقایسه با مقدار ۴۹ میلیون سلول انحراف دارد.

¹ Round

نتایج نشان می‌دهد کوچک کردن اندازه سلول‌های شبکه باعث افزایش دقت جواب‌ها در مساله می‌شود. ولی در تغییر شبکه از N_3 به N_4 و N_5 تغییر زیادی در دقت جواب‌ها حاصل نشده است. باین حال هزینه محاسبات به نحو چشمگیری افزایش پیدا کرده است. با توجه به این که خطای حاصل از شبکه‌بندی N_3 برای این محاسبات قابل قبول بوده و از طرف دیگر افزایش تعداد سلول‌ها هزینه محاسبات را به مقدار زیادی بالا می‌برد، شبکه با ۴۹ میلیون سلول به‌عنوان شبکه بهینه در محاسبات بعدی استفاده شده است.



شکل ۳-۴- تحلیل شبکه با استفاده از تعداد سلول‌های مختلف و سرعت محلی هوا در مقطع عرضی ۹

۳-۳-۵- کیفیت شبکه

استفاده از شبکه‌ای با کیفیت مناسب، نقش بسیار مهمی در دقت و پایداری محاسبات عددی دارد. معیارهای اصلی سنجش کیفیت شبکه را می‌توان از نظر شاخص‌های کیفیت تعامدی^۱، کشیدگی^۲، کیفیت سلول^۳ و نسبت عرضی^۴ بررسی کرد.

¹ Orthogonal quality

² Skewness

³ Element quality

⁴ Aspect ratio

۳-۳-۵-۱- شاخص کیفیت تعامدی

بالاترین شاخص کیفیت تعامدی در سلول‌های چهارگوش دوبعدی مربوط به زاویه قائم و برای مثلث‌ها نیز بالاترین آن مربوط به زاویه ۶۰ درجه است. شاخص کیفیت تعامدی، تاثیر بسیاری بر روند همگرایی و دقت نتایج دارد. بازه کیفیت تعامدی بین صفر و یک تغییر می‌کند که مقدار صفر، بیانگر بدترین و مقدار یک، بیانگر بهترین حالت است [۷۱]. معیار کیفیت تعامدی به ترتیب برای هر سلول و هر سطح بر اساس رابطه‌های (۳-۶) و (۳-۷) محاسبه می‌شود. نمایی از بردارها و سلول در محاسبه شاخص کیفیت تعامدی در شکل ۳-۵ ارائه شده است. نحوه ارزیابی کیفیت شبکه تولید شده با استفاده از شاخص کیفیت تعامدی در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

$$\text{کیفیت تعامدی} = \text{Min} \left[\frac{A_i C_i}{|\vec{A}_i| |\vec{C}_i|}, \frac{A_i f_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|} \right] \quad (۳-۶)$$

$$\text{کیفیت تعامدی} = \text{Min} \left[\frac{A_i e_i}{|\vec{A}_i| |\vec{e}_i|} \right] \quad (۳-۷)$$

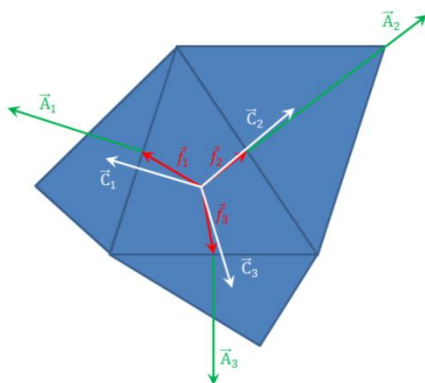
که در این رابطه:

A_i : بردار نرمال سطح

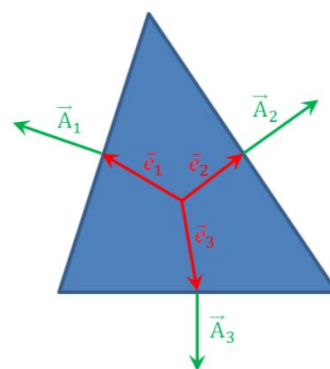
C_i : بردار مرکز سلول به مرکز هریک از سلول‌های مجاور

f_i : بردار مرکز سلول به هر وجه

e_i : برداری از مرکز وجه با مرکز لبه است.



ب- برای یک سلول



الف- برای یک سطح

شکل ۳-۵- نمایش بردارها و سلول در محاسبه کیفیت تعامدی

جدول ۳-۱- ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از شاخص کیفیت تعامدی [۷۱]

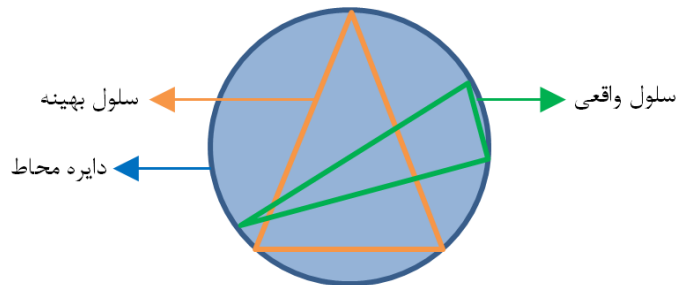
توصیف کمی کیفیت تعامدی	عالی	بسیار خوب	خوب	قابل قبول	بد	غیر قابل قبول
	۰/۹۵ تا ۱	۰/۷ تا ۰/۹۵	۰/۲ تا ۰/۷	۰/۱ تا ۰/۲	۰/۰۰۱ تا ۰/۱	۰ تا ۰/۰۰۱

۳-۳-۵-۲- شاخص کشیدگی

کشیدگی سلول‌ها به صورت اختلاف بین شکل یک سلول و شکل متقارن آن سلول است. برای تعیین کشیدگی دو روش انحراف حجمی معادل^۱، و انحراف زاویه نرمال شده وجود دارد [۷۲]. روش انحراف حجمی معادل، تنها برای سلول‌های مثلثی و چهاروجهی اعمال می‌شود. در این روش شاخص کشیدگی به صورت رابطه (۳-۸) تعریف می‌شود [۷۱]:

$$(۳-۸) \quad \text{کشیدگی} = \frac{\text{سایز واقعی سلول} - \text{سایز بهینه سلول}}{\text{سایز بهینه سلول}}$$

اندازه بهینه سلول مطابق شکل ۳-۶، از اندازه یک سلول متساوی‌الاضلاع و شعاع دایره محاط بر آن به دست می‌آید.



شکل ۳-۶- اندازه بهینه و واقعی سلول

در روش انحراف زاویه نرمال، مقدار کشیدگی به صورت رابطه (۳-۹) تعریف می‌شود:

$$(۳-۹) \quad \text{کشیدگی} = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right]$$

در رابطه فوق:

θ_{max} بزرگ‌ترین زاویه در سطح با سلول

θ_{min} کوچک‌ترین زاویه در سلول

¹ Equilateral Volume Deviation

θ_e زاویه معادل سطح با سلول است.

θ_e برای مثلث و هرم ۶۰ درجه و برای مکعب و چهارضلعی ۹۰ درجه است. در جدول ۲-۳ نحوه ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از شاخص کشیدگی ارائه شده است.

جدول ۲-۳- ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار کشیدگی [۷۱]

توصیف کمی معیار کشیدگی	عالی	بسیار خوب	قابل قبول	بد	غیر قابل قبول
	۰ تا ۰/۲۵	۰/۲۵ تا ۰/۵	۰/۵ تا ۰/۷۵	۰/۷۵ تا ۰/۹	۱ تا ۰/۹

۳-۳-۵-۳- شاخص کیفیت سلول

شاخص کیفیت سلول برای تمام سلول‌های شبکه توری محاسبه می‌شود. این شاخص بر اساس نسبت حجم سلول به طول لبه برای هر سلول محاسبه می‌شود. شاخص کیفیت سلول بین مقدار صفر تا ۱ تغییر می‌کند. مقدار ۱ بیانگر یک مکعب کامل و یا مربع است و مقدار صفر برای این شاخص بیانگر وجود حجم صفر یا منفی برای سلول است [۷۱].

جدول ۳-۳- ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از شاخص کیفیت سلول [۷۲]

توصیف کمی کیفیت سلول	عالی	بسیار خوب	خوب	قابل قبول	بد	غیر قابل قبول
	۰/۹۵ تا ۱	۰/۷ تا ۰/۹۵	۰/۲ تا ۰/۷	۰/۱ تا ۰/۲	۰/۰۰۱ تا ۰/۱	۰ تا ۰/۰۰۱

۳-۳-۵-۴- شاخص نسبت عرضی

شاخص نسبت عرضی به صورت نسبت طول بزرگ‌ترین وجه سلول به کوچک‌ترین وجه تعریف می‌شود. به عنوان یک دستورالعمل در طول تولید شبکه توری باید نسبت عرضی در دامنه سیال همیشه کوچک باشد. افزایش نسبت عرضی می‌تواند دقت حل را کاهش دهد و ممکن است سبب واگرایی حل مساله شود [۷۳].

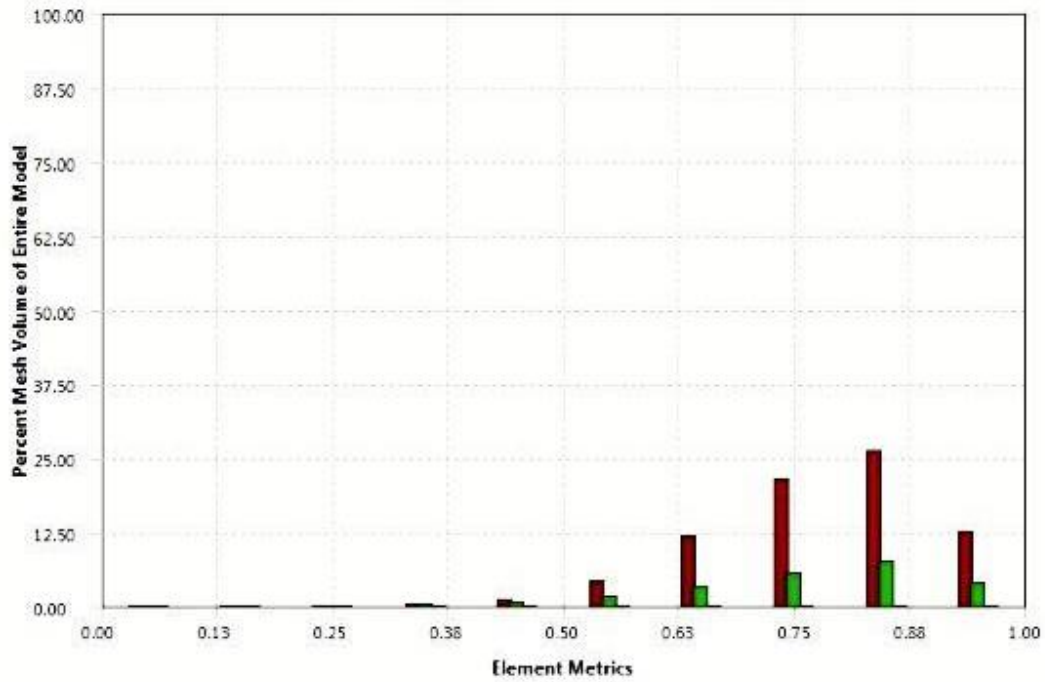
۳-۳-۶- پارامترهای آماری کیفیت شبکه توری

پارامترهای آماری کیفیت شبکه در مدل با ۴۹ میلیون سلول از نظر معیارهای کیفیت سلول، نسبت عرضی، کشیدگی و کیفیت تعامدی در جدول ۳-۴ ارائه شده است. پارامترهای مذکور نشان می‌دهند شبکه ایجاد شده از کیفیت قابل قبولی برخوردار است.

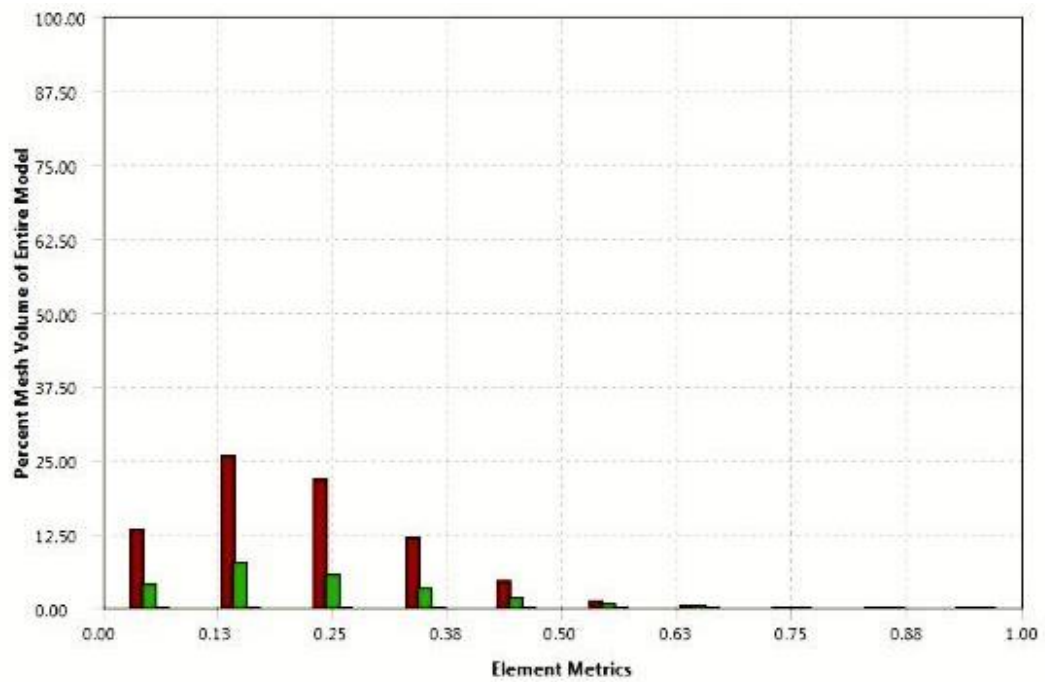
جدول ۳-۴- پارامترهای آماری کیفیت شبکه تولیدی با ۴۹ میلیون سلول

انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	
۰/۱۵۲۶	۰/۷۲۰۲	۰/۹۹۹۲	۰	کیفیت تعامدی
۰/۱۵۳۶	۰/۲۷۹	۱	۰/۰۰۰۱	کشیدگی
۰/۲۱۵۹	۰/۷۰۳۶	۱	۰	کیفیت سلول
۶/۶۲۷۴	۲/۷۹۱۲	۱۴۸۴	۱/۱۶۱۱	نسبت عرضی

از آنجاکه کیفیت شبکه تولید شده، بسیار مهم است گزارشی از وضعیت کیفیت شبکه به صورت درصد فراوانی براساس نوع سلول در شکل ۳-۷، ارائه شده است. در خصوص شبکه تولید شده در این پژوهش مشاهده می‌شود، شاخص‌های کیفیت تعامدی و کشیدگی در بیشتر حجم سلول‌های شبکه تولیدی از کیفیت قابل قبولی برخوردار است. سلول‌های چهاروجهی تولید شده نسبت به سلول‌های هرم و گوه کیفیت بسیار بالاتری دارد. علت اصلی کیفیت پایین سلول‌های گوه وجود زوایای تیز در هندسه پیچیده مساله و استفاده از این نوع سلول‌ها در تولید لایه مرزی است که موجب شده کیفیت این نوع سلول‌ها کمتر شود.

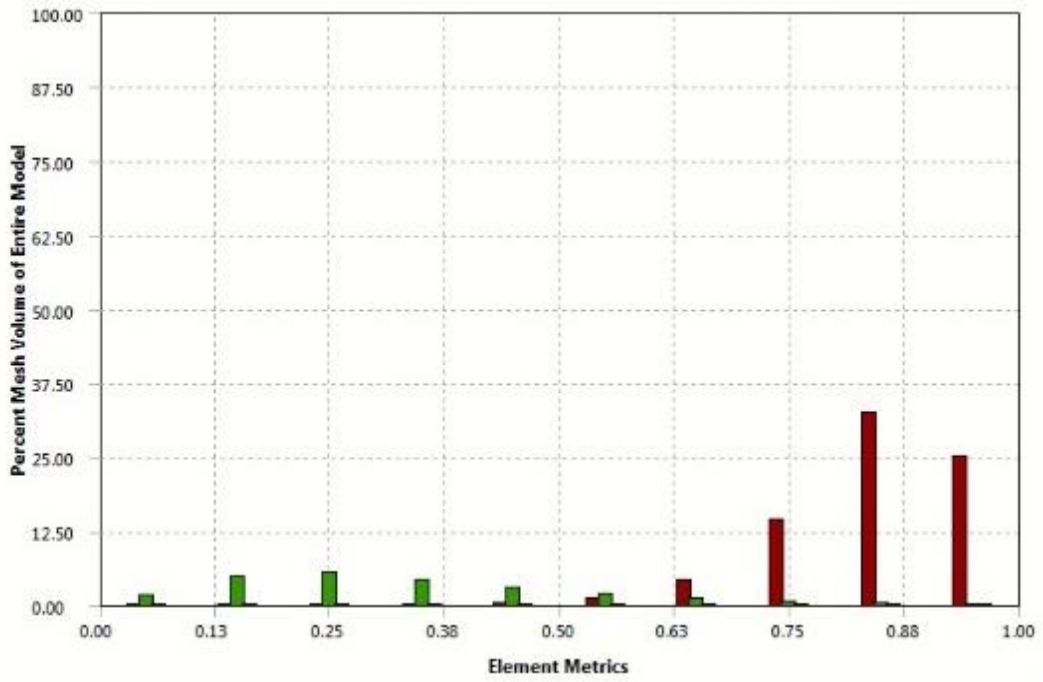


الف) کیفیت تعامدی

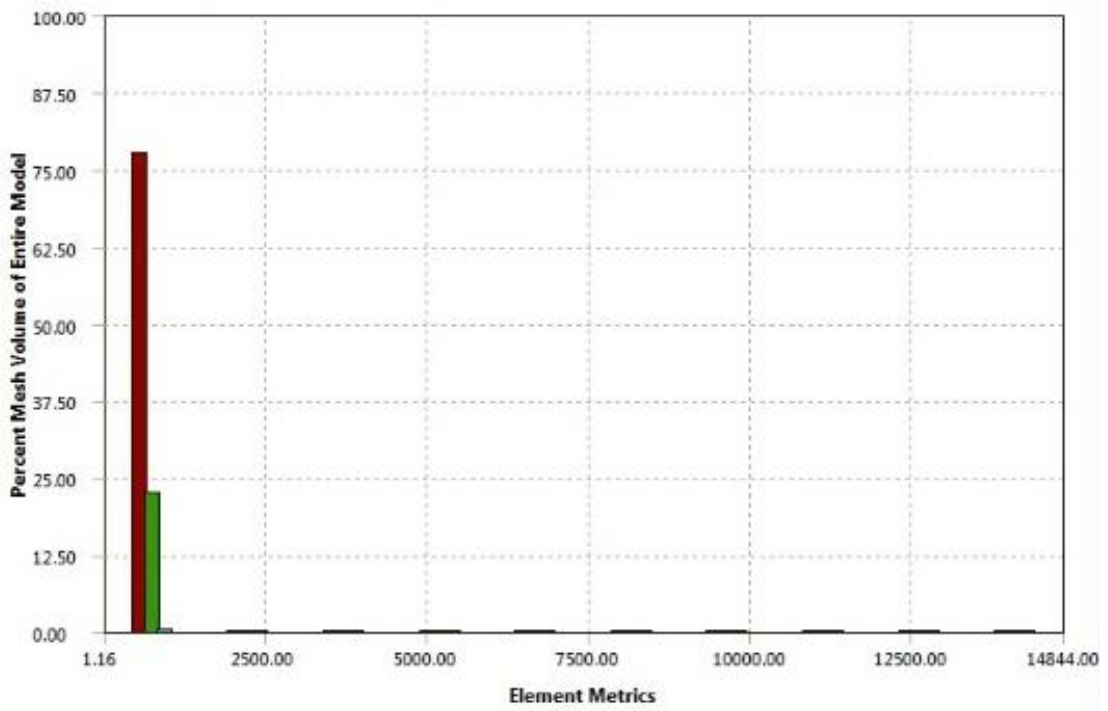


ب) کشیدگی

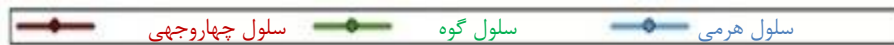
شکل ۳-۷- نمودار درصد فراوانی شاخص‌های کیفیت شبکه بر اساس نوع سلول



ج) کیفیت سلول



د) نسبت عرضی



ادامه شکل ۳-۷- نمودار درصد فراوانی شاخص‌های کیفیت شبکه بر اساس نوع سلول

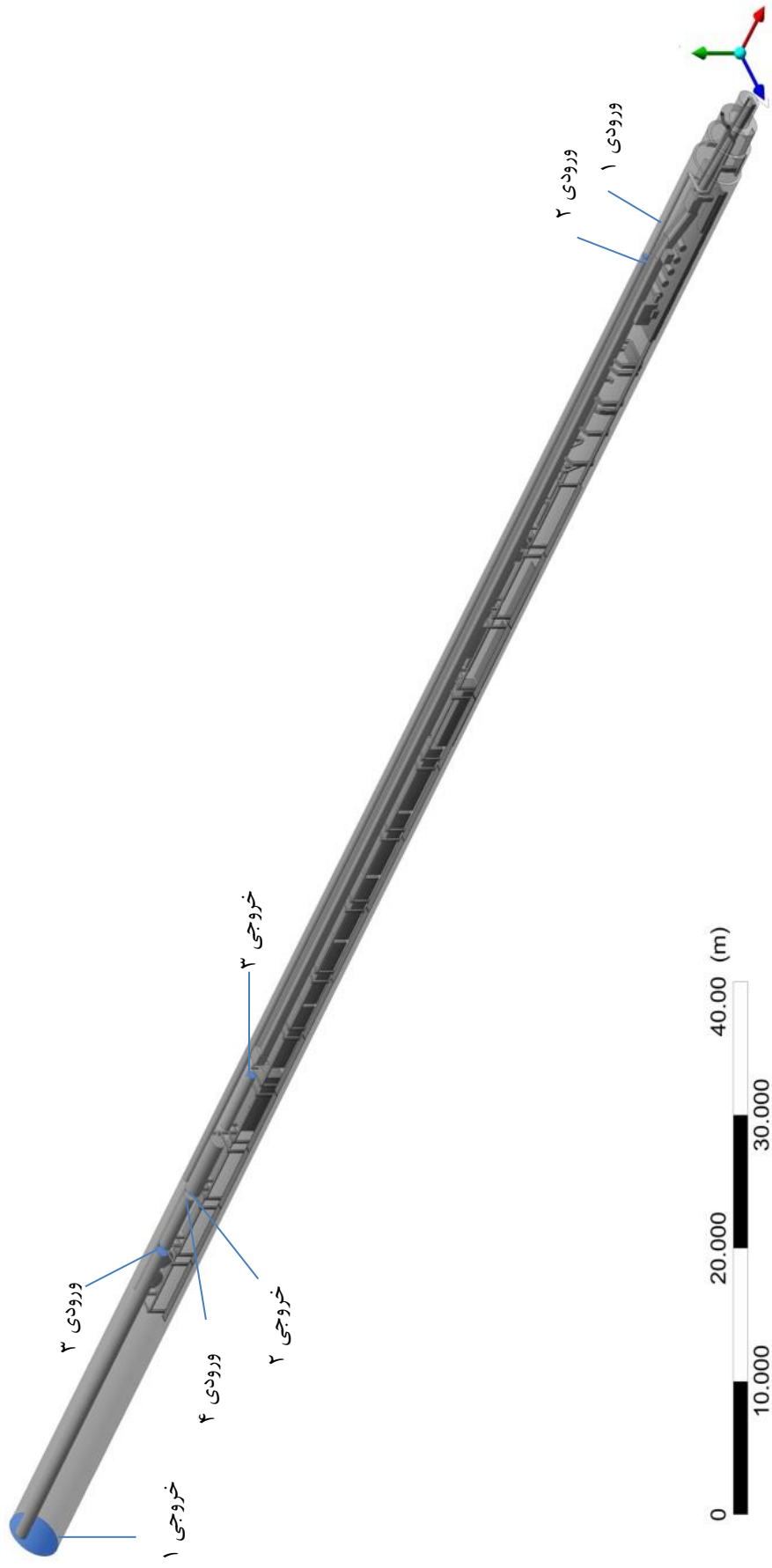
۴-۳- تعیین شرایط مرزی

در مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی سه نوع شرط مرزی دیواره، ورودی و خروجی وجود دارد. در مدل محاسباتی این پژوهش علاوه بر دیواره، چهار ورودی و سه خروجی جریان هوا وجود دارد. شرایط مرزی ورودی و خروجی‌ها، بر اساس نتایج نمونه‌برداری سرعت جریان هوا و دما مطابق جدول ۳-۵، تعیین شده است. شکل ۳-۸، موقعیت مکانی ورودی و خروجی‌های شرایط مرزی را در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵- مشخصات شرایط مرزی ورودی و خروجی

شماره	جانمایی شرایط مرزی	میانگین سرعت (متر بر ثانیه)	میانگین دما (درجه سانتیگراد)
۱	خروجی لوله تهویه فلزی ۱ مرتبط با بادبزن کمکی دهشی (ورودی ۱)	۷/۹	۳۱/۳
۲	خروجی لوله تهویه فلزی ۲ مرتبط با بادبزن کمکی دهشی (ورودی ۲)	۵/۶	۳۱/۴
۳	خروجی لوله تهویه مرتبط با بادبزن کمکی مکشی (ورودی ۳)	۱۸	۳۲/۸
۴	خروجی شیپوری مرتبط با خشاب تهویه (ورودی ۴)	۱۰/۰۴	۲۹/۶
۵	مجرای ورودی بادبزن کمکی دهشی (خروجی ۲)	۲/۷۳	-
۶	مجرای ورودی بادبزن کمکی مکشی (خروجی ۳)	۷/۷	-

در این مساله، شرط مرزی ورودی‌های ۱ تا ۴ و خروجی ۲ و ۳ بر اساس سرعت ثابت و شرط مرزی خروجی شماره ۱ بر روی فشار یک اتمسفر تنظیم شده است. شرایط مرزی سطوح دیوار به صورت شرط مرزی لغزش یا عدم لغزش اعمال شده است. در این حالت سیالی که بلافاصله در نزدیکی دیواره قرار دارد، سرعت دیواره را به خود می‌گیرد که این مقدار به طور پیش فرض صفر است.



شکل ۳-۸- جانمایی و محل شرایط مرزی ورودی و خروجی

۳-۵- روش حل

فرضیات مساله، معادلات و همگرایی نقش بسیار تعیین کننده‌ای در دقت حل و میزان زمان مورد نیاز برای مدل‌سازی دارد. جزئیات روش حل مساله شامل معادلات حاکم، فرضیات و شاخص‌های همگرایی مدل عددی در ادامه بحث شده است.

۳-۵-۱- فرضیات مساله

مدل سه‌بعدی سیال هوا در مساله با شرایط ویسکوز، نیوتنی، آشفته^۱ و به‌صورت پیوسته حل شده است. دیواره‌های تونل در ماشین حفاری تمام مقطع به دلیل پوشیده شدن با قطعات پیش‌ساخته بتنی عایق‌بندی شده است. لذا می‌توان فرض کرد دیواره‌های تونل عایق و انتقال حرارت بین سیال و دیواره تونل وجود ندارد.

۳-۵-۲- معادلات حل

بر اساس این فرضیات، جریان هوا در داخل ماشین حفاری تمام مقطع به روش میانگین‌گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس^۲ حل شده است. معادلات فوق به‌صورت زیر تعریف می‌شوند [۷۴]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (10-3)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U) + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (11-3)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (12-3)$$

¹ Turbulent

² Reynolds Average Navier Stokes (RANS)

که در آن‌ها ρ چگالی هوا، $\vec{U} = (v_x, v_y, v_z)$ بردار سرعت هوا، $\vec{\nabla P}$ گرادیان فشار، τ تانسور تنش،
 $S_M = (S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz})$ بردار منبع اندازه حرکت، h_{tot} آنتالپی کل، $\nabla \cdot (U \cdot \tau)$ تنش ویسکوز، $U \cdot S_M$
 منبع خارجی اندازه حرکت و S_E منبع انرژی است.

پژوهشگران مختلف همبستگی مثبتی بین نتایج اندازه‌گیری میدانی و مدل‌سازی جریان هوا و
 آلاینده‌ها با استفاده از مدل دوجمله‌ای $K-\epsilon$ در تونل و فضاهای زیرزمینی دست‌یافته‌اند [۲۸، ۳۰، ۳۳،
 ۳۵، ۴۱، ۷۵]. علاوه بر این ساسمیتو و همکاران پیشنهاد دادند که مدل $K-\epsilon$ نتایج بهتری را در
 مقایسه با مدل‌های Spalart Allmares، $K-\omega$ و انتقال تنش برشی^۱ ارائه می‌دهد [۱۸]. با توجه به
 رفتار خوب مدل $K-\epsilon$ در فضاهای زیرزمینی، در این تحقیق نیز از این روش استفاده و معادلات حاکم
 بر مساله در داخل هر حجم کنترل، حل شده است. معادله انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال
 انرژی در مدل دوجمله‌ای $K-\epsilon$ به صورت زیر است:

معادله انرژی جنبشی آشفتگی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k U) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (3-13)$$

معادله نرخ اضمحلال آشفتگی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \epsilon U) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (3-14)$$

که در آن‌ها k انرژی جنبشی آشفتگی، λ ضریب لامه، ϵ نرخ اضمحلال آشفتگی و P_k تولید
 آشفتگی است. مقادیر ثابت برای مدل آشفتگی $C_{\epsilon 1} = 1.44$ و $C_{\epsilon 2} = 1.92$ است [۴۹].

۳-۵-۳- مدل‌سازی جریان چند فازی

مدل‌سازی سیالات چند فازی به‌ویژه توزیع آلاینده‌های خروجی از آگزوز می‌تواند از طریق مدل
 ذرات و مدل گونه‌ها انجام شود. استفاده از مدل گونه‌ها در مدل‌سازی گازها و ذرات خروجی از آگزوز
 در فضاهای زیرزمینی به دلیل زمان کمتر برای مدل‌سازی و دقت بالای نتایج با اندازه‌گیری‌های

¹ Shear-Stress Transport (SST)

میدانی توصیه شده است [۳۶]. در این پژوهش نیز برای مدل‌سازی چند فاز گازهای خروجی از آگزوز لوکوموتیو گاز و هوا به‌عنوان یک محیط پیوسته در هم نفوذکننده^۱ در نظر گرفته شده و از مدل گونه‌ها استفاده شده است. در این مدل هر فاز به‌صورت جداگانه در نظر گرفته می‌شود و معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی به‌صورت مستقل برای هر فاز نوشته می‌شود [۷۶].

۳-۵-۴ - گسسته سازی معادلات

در شبیه‌سازی عددی، نتایج حل به‌صورت اطلاعاتی در نقاط ذخیره می‌شود، اما به‌منظور محاسبه شارها نیاز به مقادیر مختلف پارامتر در صفحه‌های حجم کنترل است. به‌منظور محاسبه مقدار پارامترها روی صفحه‌های حجم کنترل از رابطه (۳-۱۵) استفاده می‌شود [۷۲].

$$\varphi_{ip} = \varphi_{up} + \beta \nabla \varphi \cdot \Delta \vec{r} \quad (۳-۱۵)$$

که در آن؛ φ_{up} مقدار پارامتر در نقطه بالادست و φ_{ip} مقدار پارامتر در مرکز حجم کنترل است. $\nabla \varphi$ گرادیان پارامتر موردنظر و $\Delta \vec{r}$ بردار بین نقطه بالادستی و نقطه مرکز حجم کنترل است به‌عبارت‌دیگر مقدار پارامتر در مرکز حجم کنترل برابر با مقدار پارامتر در نقطه بالادستی به‌علاوه یک مقدار به خاطر گرادیان بین دو نقطه است. در رابطه فوق، β می‌تواند مقداری بین صفر تا ۱ باشد. با توجه به معادله فوق سه انتخاب برای β وجود دارد:

- ۱- اگر $\beta = 0$ باشد در حقیقت مقدار پارامتر در مرکز حجم کنترل برابر با مقدار پارامتر در گره بالادستی است. به همین دلیل به این روش طرح بالادستی می‌گویند. این روش دارای دقت مرتبه اول است و در بعضی موارد به‌عنوان حل‌های اولیه مفید بوده اما همواره پاسخ صحیحی نمی‌دهد.
- ۲- در طرح ترکیب ویژه^۲ مقدار عددی β بین صفر تا ۱ انتخاب می‌شود. مقدار بالادستی اصلاح می‌شود که امکان تخمین‌های بیش یا کمتر از مقدار فیزیکی را ممکن می‌سازد.

^۱ Interpenetrating continua

^۲ Specified Blend

۳- در طرح وضوح بالا^۱ مقدار بیشینه β برای جابه‌جایی در تمام دامنه حل انتخاب می‌شود که با این عمل، حل محدود نگه داشته می‌شود. به‌منظور افزایش دقت در مساله حاضر در گسسته‌سازی معادلات جابه‌جایی و آشفتگی از گزاره وضوح بالا در محاسبات استفاده شده است.

۳-۵-۵- تغییرات چگالی وابسته به دما

وقتی حرارت به سیال اضافه می‌شود؛ چگالی سیال با حرارت تغییر می‌کند به‌عنوان مثال، گاز خروجی از آگزوز لوکوموتیو با درجه حرارت بالا می‌تواند نیرویی شناوری را ایجاد کند. اهمیت نیروی شناوری در جریان‌های پیچیده توسط نسبت گراش^۲ و عدد رینولدز محاسبه می‌شود [۷۷]. در انتقال حرارت جابه‌جایی عدد ریچاردسون^۳ برای تعیین اهمیت جابه‌جایی آزاد نسبت به جابه‌جایی اجباری است. عدد ریچاردسون برابر با تقسیم عدد گراش بر مجذور عدد رینولدز است. اگر فرض شود میانگین دمای هوا در حین کارکرد لوکوموتیو به ۴۰ درجه سانتیگراد افزایش پیدا کند، آنگاه مقدار عدد ریچاردسون بر اساس فرمول (۳-۱۶) محاسبه خواهد شد [۷۸].

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L}{u^2} = \frac{9.8 \times 0.0032 \times 100 \times 2.5}{(6.1)^2} = 0.21 \quad (۳-۱۶)$$

که در آن؛ g شتاب جاذبه برحسب $(\frac{m}{s^2})$ ؛ β ضریب انبساط حرارتی هوا $(\frac{1}{K})$ ؛ ΔT اختلاف دمای محیط با گازهای خروجی آگزوز $(^{\circ}K)$ ؛ L طول شاخص وابسته به گرادیان دمای عمودی (m) و u سرعت متوسط جریان هوا $(\frac{m}{s})$ است.

اگر عدد ریچاردسون کوچک‌تر از ۰/۱ باشد جابه‌جایی طبیعی قابل صرف‌نظر است. اگر عدد ریچاردسون بزرگ‌تر از ۱۰ باشد، جابه‌جایی اجباری قابل صرف‌نظر است. اگر عدد ریچاردسون بین ۰/۱ تا ۱۰ باشد هر دو نوع جابه‌جایی طبیعی و اجباری باید در نظر گرفته شوند [۷۸]. لذا انتظار می‌-

¹ High Resolution

² Grashof Ratio

³ Richardson

رود که اثر نیروی شناوری بر روی جریان بیشتر شود. در این مورد $0.1 < Ri < 10$ است، بنابراین باید نیروی شناوری مورد توجه قرار گیرد.

۳-۵-۶- اثرات نیروی شناوری

نیروهای شناوری در معادله اندازه حرکت یا ناویر استوکس ظاهر می‌شود. این نیرو ناشی از اختلاف بین چگالی سیال و چگالی مرجع است و توسط معادله (۳-۱۷) محاسبه می‌شود.

$$S_{M,Buoy} = (\rho - \rho_{ref})g \quad (۳-۱۷)$$

در معادله فوق، ρ_{ref} چگالی مرجع است که با توجه به نوع سیال انتخاب می‌شود. در نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس دو مدل برای مدل‌سازی اثرات نیروی شناوری در نظر گرفته شده است [۷۶]:

الف) مدل شناوری کامل^۱: در این مدل اختلاف چگالی بین چگالی محلی سیال و چگالی مرجع به صورت مستقیم وارد محاسبات می‌شود. این مدل زمانی استفاده می‌شود که سیال عامل به صورت گاز ایده‌آل، گاز واقعی یا مخلوطی از چند جز^۲ در نظر گرفته شود. بنابراین در این مدل یک چگالی مرجع باید تعریف شود.

ب) مدل بوزینسک^۳: این مدل زمانی به کار می‌رود که چگالی سیال عامل ثابت در نظر گرفته شود و توزیع دما نیروی شناوری را ایجاد نماید. در این صورت نیروی شناوری توسط اختلاف دمای مکانی و دمای مرجع محاسبه می‌شود. بنابراین در این مدل باید یک دمای مرجع نیز تعریف شود. در این صورت اختلاف چگالی در نیروی شناوری با استفاده از معادله (۳-۱۸) محاسبه می‌شود.

$$(\rho - \rho_{ref}) = \rho_{ref}\beta(T - T_{ref}) \quad (۳-۱۸)$$

که در آن؛ β ضریب تراکم‌پذیری حجمی، ρ چگالی سیال، ρ_{ref} چگالی سیال مرجع، T دمای سیال و T_{ref} دمای سیال مرجع است.

¹ Full Buoyancy Model

² Multicomponent Fluids

³ Boussinesq Model

در مساله حاضر برای مدل‌سازی اثرات نیروی شناوری ناشی از گازهای داغ خروجی از اگزوز لوکوموتیو از مدل بوزینسک استفاده شده تا چگالی هوا و گاز خروجی از اگزوز ثابت و توزیع دمایی، نیروی شناوری را ایجاد نماید.

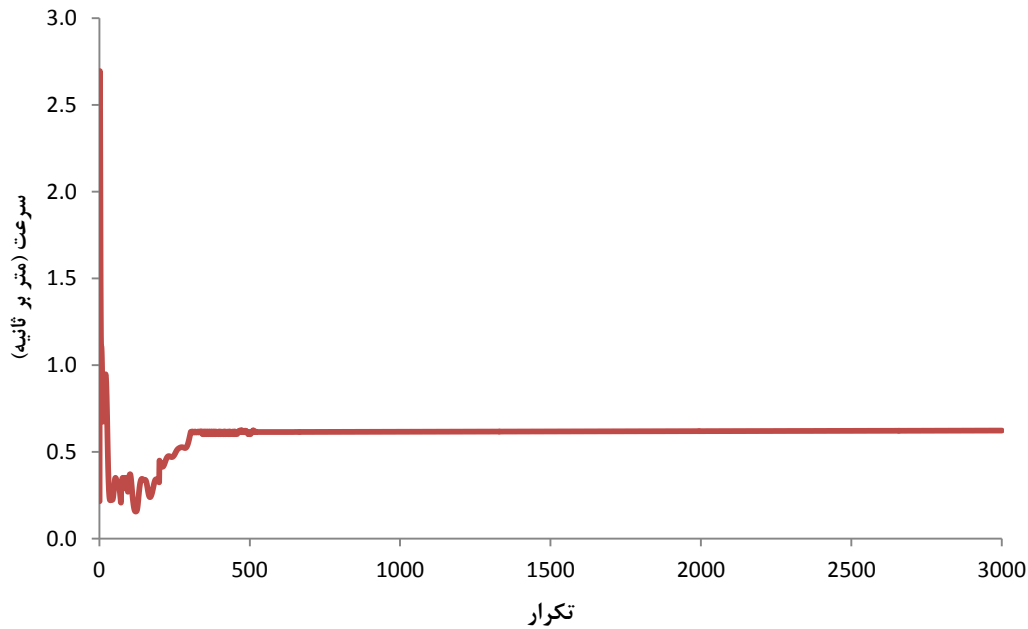
۳-۵-۷- همگرایی مساله

تنظیمات معیار همگرایی به منظور تعیین زمان توقف محاسبات مورد توجه قرار می‌گیرد. در این پژوهش از معیار میانگین متوسط باقیمانده در معادلات حل، ارضای بقای شار و کنترل تغییرات سرعت استفاده شده است. معیار همگرایی برای شاخص میانگین متوسط باقیمانده معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و آشفتگی کمتر از 10^{-4} در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی همگرایی مساله، عدم توازن شار جرمی و اندازه حرکت در راستاهای مختلف کمتر از ۱ درصد منظور شده است.

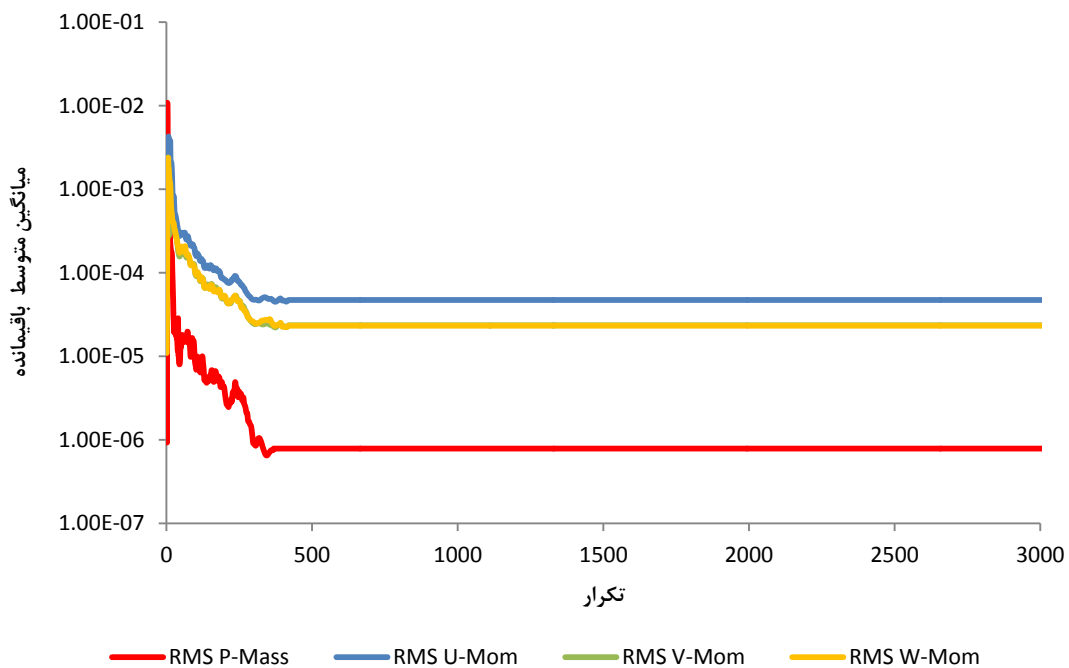
در مسایل مدل‌سازی تعریف و بررسی ابزار پایش از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا در بسیاری از شبیه‌سازی‌ها مشاهده می‌شود که با وجود کاهش باقیمانده‌های حل، برخی از پارامترهای مورد نظر مانند دمای متوسط، سرعت و فشار موضعی در مناطقی از حل در حال تغییر هستند. بدین منظور نقاط پایش تعریف می‌شوند تا علاوه بر کاهش چند مرتبه‌ای باقیمانده‌های حل، اطمینان از ثبات عددی ابزارهای پایش نیز حاصل شود. انتخاب نقاط پایش بر اساس شناخت از فیزیک، قضاوت مهندسی و تجارب شبیه‌سازی، انجام می‌شود. در این پژوهش برای اطمینان از همگرایی مساله، تغییرات سرعت در نقاطی از دامنه حل متناسب با تعداد تکرار بررسی شد. نمودار تغییرات سرعت در نقطه پایش بر حسب تعداد تکرار در شکل ۳-۹، ارائه شده است.

در این پژوهش تعداد تکرار بیشینه ۳۰۰۰ منظور شده است تا در صورت عدم همگرایی در شاخص‌ها، عملیات متوقف شود. شکل ۳-۱۰، مقادیر باقیمانده معادلات پیوستگی و اندازه حرکت برای ۳۰۰۰ مرحله تکرار را نشان می‌دهد. برای اطمینان از همگرایی، یک‌بار مساله تا ۳۰۰۰ تکرار حل و مشخص شد پس از ۵۶۰ مرحله تمام شاخص‌ها همگرا است. بنابراین برای ادامه تحلیل‌ها تعداد تکرار

بیشینه ۶۰۰ مرحله منظور شده است. در این پژوهش برای کاهش زمان مدل‌سازی از روش پردازش موازی در یک رایانه با ۲۴ هسته محاسباتی و ۶۰ گیگابایت حافظه داخلی استفاده شده است.



شکل ۳-۹- تغییرات سرعت در نقطه پایش بر اساس تعداد تکرار



شکل ۳-۱۰- مقادیر باقیمانده معادلات پیوستگی و اندازه حرکت برای ۳۰۰۰ مرحله تکرار

۳-۶- جمع‌بندی

به‌منظور بررسی الگوهای توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها در ماشین حفاری تمام مقطع، مدل هندسی سه‌بعدی تونل چم‌شیر با کمک نقشه‌های طراحی ماشین و اندازه‌گیری‌های میدانی ترسیم شده است. شبکه عددی با استفاده از سلول‌های چهاروجهی، هرم و گوه‌ای در نرم‌افزار ای‌سی‌ای‌ام تولید و استقلال شبکه با ریز کردن اندازه سلول‌ها تحلیل شده است. بررسی معیارهای سنجش کیفیت شبکه نشان داد مدل تهیه شده از کیفیت قابل قبولی برخوردار است. شرایط مرزی مساله مطابق با نتایج نمونه‌برداری‌های انجام شده سرعت و دمای هوا تعیین گردید.

در این پژوهش از مدل دوجمله‌ای $K-\epsilon$ به دلیل دقت مناسب در حل مسایل توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها در فضاهای زیرزمینی و هزینه محاسباتی پایین استفاده شده است. مدل‌سازی عددی به روش حجم محدود مبتنی بر المان و در نرم‌افزار انسیس سی‌اف‌ایکس انجام شده است. به‌منظور افزایش دقت برای مسایل لایه مرزی در گسسته‌سازی معادلات جابه‌جایی و آشفتگی از ترم کیفیت بالا در محاسبات استفاده شده است. معیار همگرایی برای شاخص میانگین متوسط باقیمانده معادلات کمتر از 10^{-4} و شاخص عدم توازن شار جرمی و اندازه حرکت کمتر از ۱ درصد در نظر گرفته شده است. برای اطمینان از همگرایی مساله نقاطی برای پایش سرعت محلی در طول زمان حل در نظر گرفته شده است. مطالعات نشان داد مساله پس از ۵۶۰ تکرار در تمام شاخص‌ها همگرا شده است.

فصل چهارم

مدل سازی توزیع جریان هوا

۴-۱- مدل سازی توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع

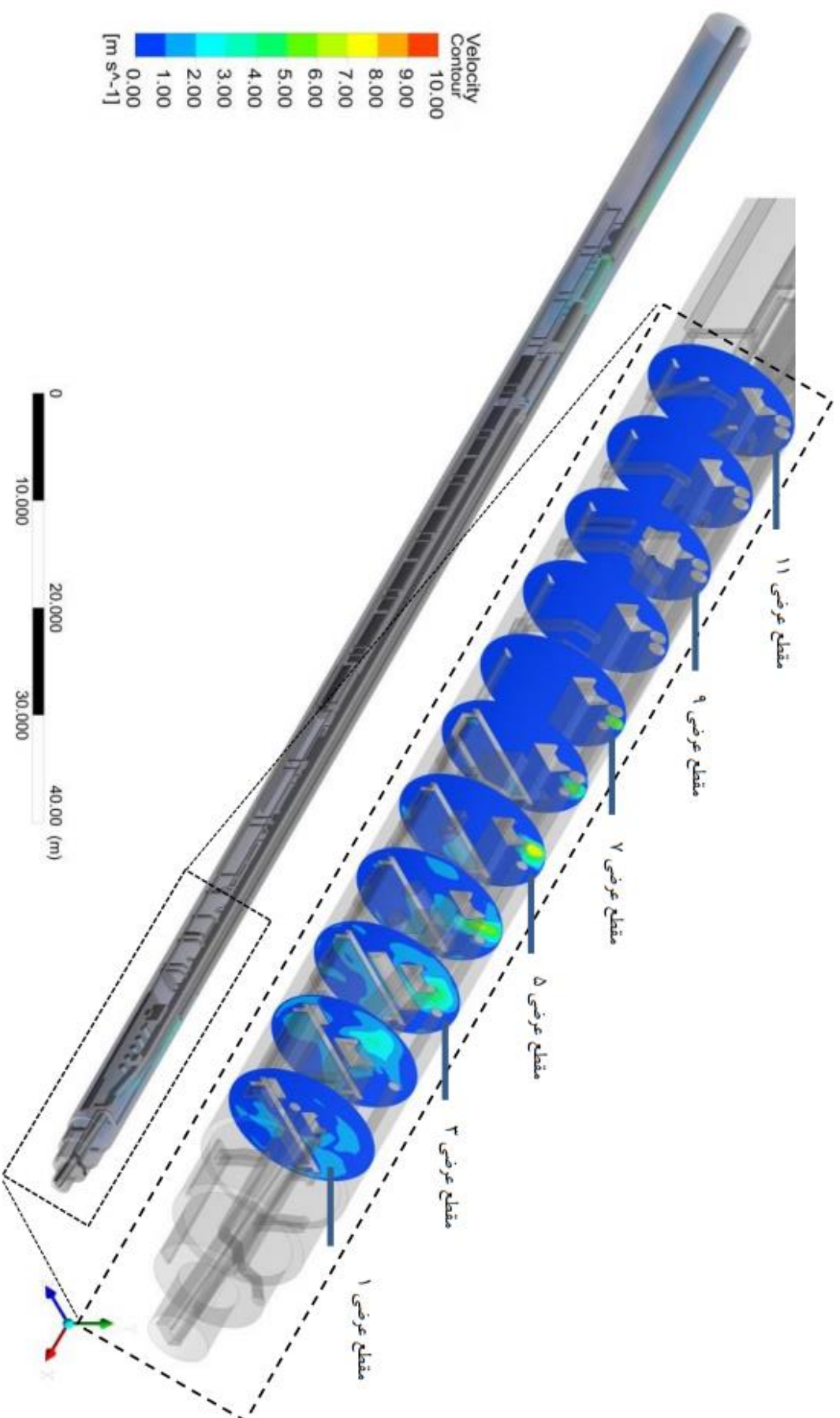
مدل سازی عددی توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع تونل با توجه به شرایط مرزی که در بخش ۳-۴ به آن اشاره شد، به عنوان شرایط مبنا در ماشین حفاری تحلیل شده است. در مورد حضور زمان در مدل سازی، به واسطه حضور گردابه های جریان آشفته و همچنین جریان گردابه ای پشت جسم، همواره تغییراتی بر روی الگوی جریان از دیدگاه میکرو و ماکرو وجود دارد، لیکن با استفاده از روش میانگین گیری رینولدز معادلات ناویر استوکس، که از معادلات جریان بر روی زمان میانگین گیری می کند، مدل سازی به صورت مستقل از زمان انجام شده است.

یکی از شاخص های کلیدی در بررسی کارایی سامانه تهویه ماشین حفاری تمام مقطع، تعیین میزان سرعت جریان هوا است. با توجه به حضور دائمی کارکنان در قسمت قاب اصلی ماشین حفاری وضعیت توزیع جریان هوا در این قسمت با جزییات بیشتری مورد بررسی قرار گرفته است. سرعت جریان هوا در هر یک از مقاطع عرضی از قاب اصلی ماشین حفاری در شکل ۴-۱ و شکل ۴-۲، نشان داده شده است.

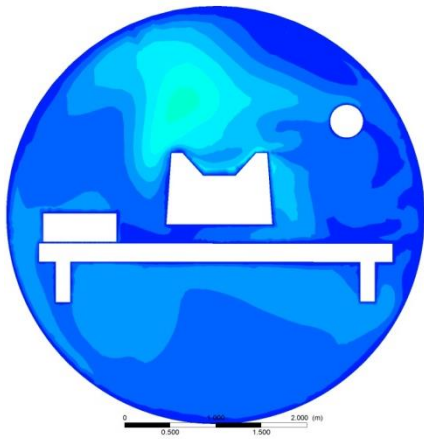
نتایج نشان می دهد هوا پس از خروج از ورودی های ۱ و ۲ به سمت سپر ماشین به صورت مستقیم حرکت می کند. در قسمت سپر ماشین، هوا با تغییر مسیر و برگشت از پایین مقطع عرضی شماره ۱ به سمت مقطع عرضی شماره ۱۱ در ناحیه تغذیه کننده قطعات پیش ساخته بتنی^۱ حرکت می کند.

سرعت جریان هوا در مقطع طولی از محل تردد و حضور کارکنان در شکل ۴-۱ و شکل ۴-۲ ارایه شده است. همان طور که در شکل ۴-۳ با خط چین مشخص شده است؛ سه منطقه در قاب اصلی ماشین حفاری، ناحیه قرارگیری بادبزن دهشی و در پشت قسمت پشتیبان ماشین سرعت هوای بیشتری وجود دارد.

¹ Segment feeder



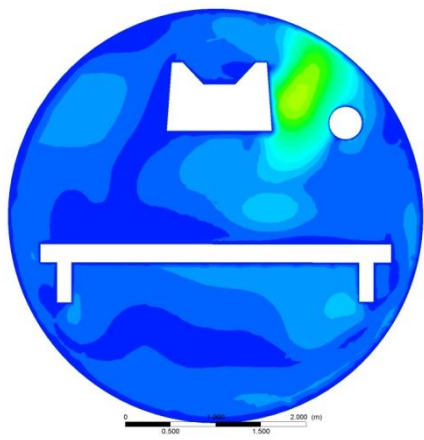
شکل ۴-۱- مقادیر سرعت جریان هوا در مقاطع عرضی قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع



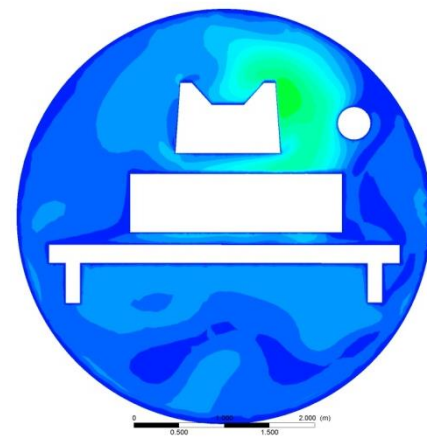
ب) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۲



الف) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۱



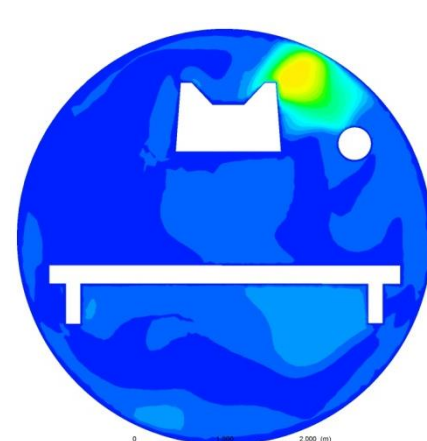
ت) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۴



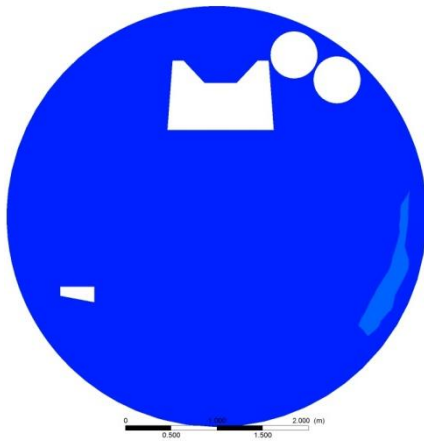
پ) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۳



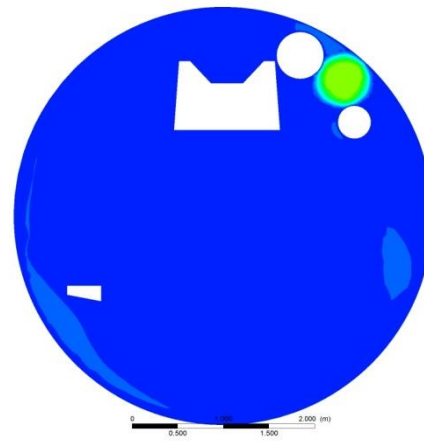
ج) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۶



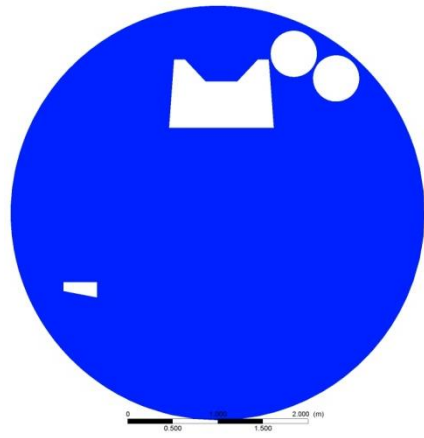
ث) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۵



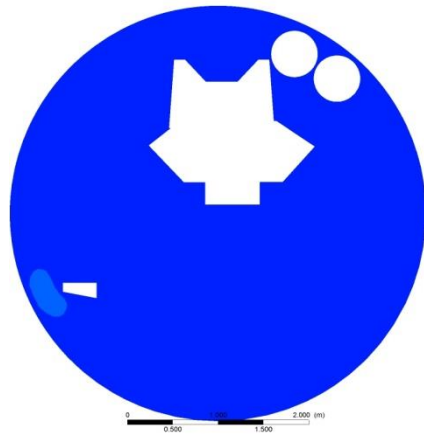
ج) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۸



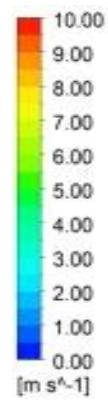
چ) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۷



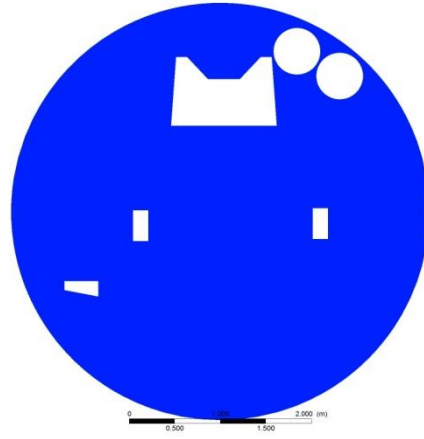
د) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۱۰



خ) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۹

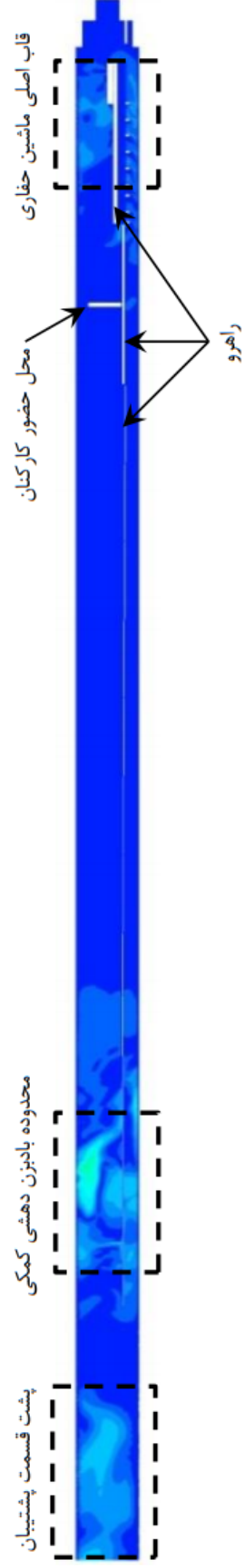


ر) راهنمای الگوی تغییرات سرعت



ذ) الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی ۱۱

شکل ۴-۲- الگوی تغییرات سرعت جریان هوا در مقاطع عرضی قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع



شکل ۴-۳- الگوی تغییرات سرعت در مقطع طولی و محل ترده و حضور کارکنان

۲-۴- تعیین مناطق مرده در ماشین حفاری تمام مقطع

راهرو^۱ محل تردد، حضور و فعالیت کارکنان در ماشین حفاری تمام مقطع است. بنابراین سرعت جریان هوا در این منطقه باید کافی باشد. مطابق استاندارد هوای کشور انگلستان در فضاهای زیرزمینی، حداقل سرعت هوای در تونل‌ها در صورتی که گردوغبار موجود باشد ۰/۵ متر بر ثانیه و در حضور گاز متان ۲ متر بر ثانیه پیشنهاد شده است [۵۴].

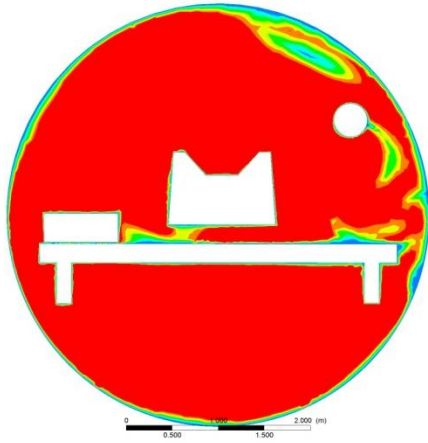
آیین‌نامه ایمنی در معادن ایران نیز حداقل سرعت مجاز جریان هوا در کلیه قسمت‌های معدن را ۰/۲۵ متر بر ثانیه تعیین کرده است [۷۹]. انجمن بین‌المللی تونل و فضاهای زیرزمینی^۲ برای حفظ ایمنی و سلامت در تونل‌های در حال ساخت مقدار سرعت هوا در مسیرهای رفت و برگشت از جبهه کار را به صورت میانگین در هر مقطع عرضی تونل و چاه بین ۰/۳ تا ۲ متر بر ثانیه پیشنهاد کرده است [۵۵]. با توجه به نبود وحدت رویه در تعیین حداقل سرعت هوا در فضاهای زیرزمینی؛ مناطقی که سرعت هوا در آن از سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه کمتر باشد، به عنوان منطقه مرده^۳ نامگذاری شده است. در این مناطق ممکن است گازهای خطرناک و سایر آلاینده‌ها به دلیل سرعت پایین جریان هوا تجمع یابد [۸۰].

بر این اساس مناطق مرده در مقاطع عرضی و طولی قاب اصلی ماشین حفاری مطابق شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵ شناسایی و مشخص شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داد منطقه مرده در مقاطع عرضی ۶ تا ۱۱ و در محل تردد و حضور کارکنان وجود دارد. حجم منطقه مرده در شرایط مبنا با حداقل سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه ۱۲۶۸ مترمکعب و با حداقل سرعت ۰/۳ متر بر ثانیه ۸۶۴ مترمکعب است. به عبارت دیگر منطقه مرده حدود ۶۰ درصد از حجم کل ماشین را اشغال کرده است. بنابراین توزیع جریان هوا در این حالت مناسب نبوده به صورتی که در فاصله ۲۰ متری از پیشانی برش و در فاصله اتاق کنترل تا شاسی شماره ۶ منطقه مرده وجود دارد.

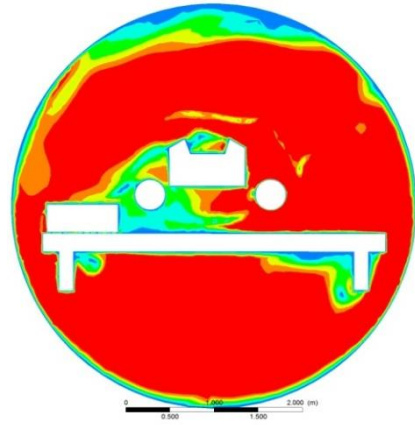
¹ bridge

² International Tunneling and underground space Association (ITA)

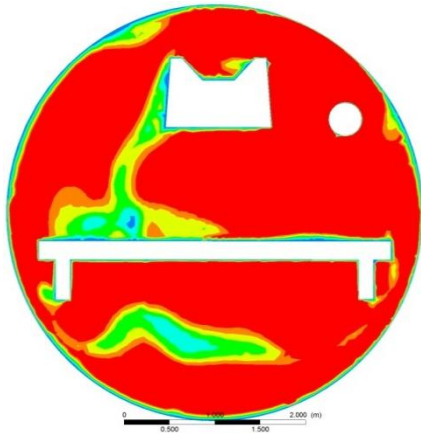
³ Dead Zone



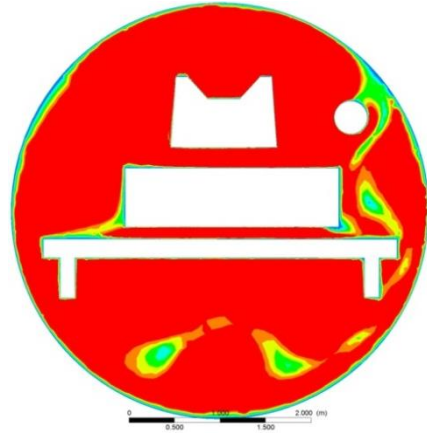
ب) منطقه مرده در مقطع عرضی ۲



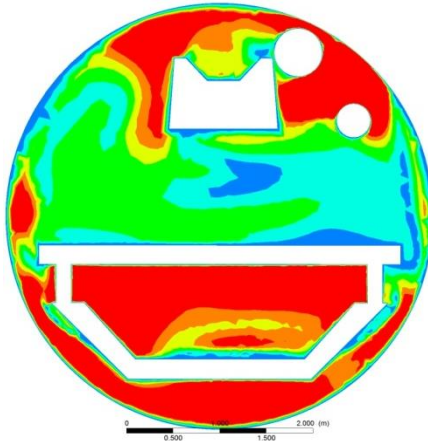
الف) منطقه مرده در مقطع عرضی ۱



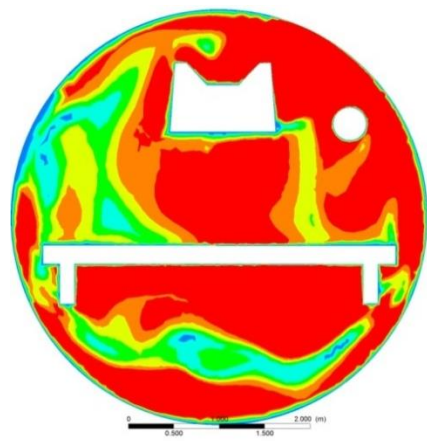
ت) منطقه مرده در مقطع عرضی ۴



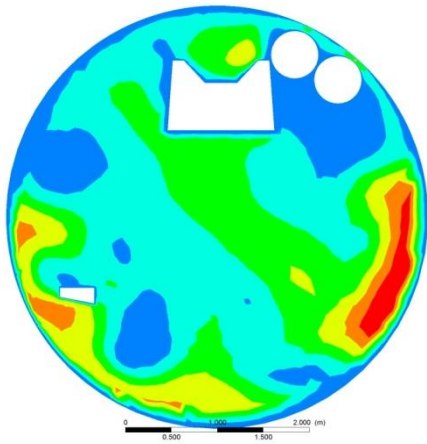
پ) منطقه مرده در مقطع عرضی ۳



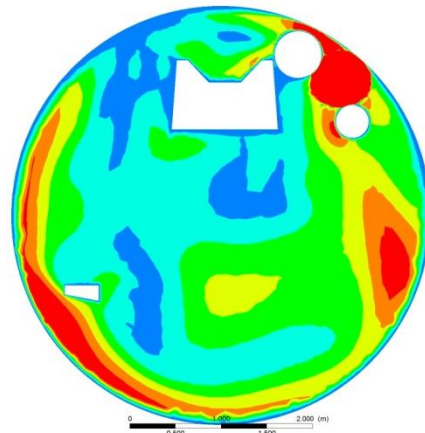
ج) منطقه مرده در مقطع عرضی ۶



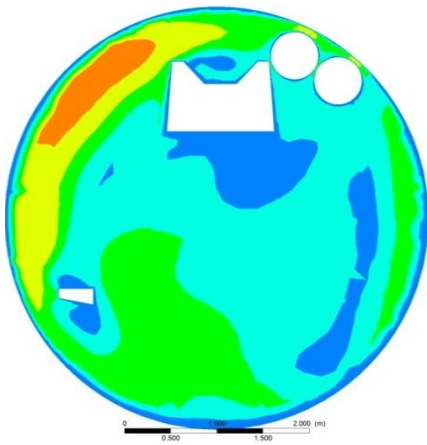
ث) منطقه مرده در مقطع عرضی ۵



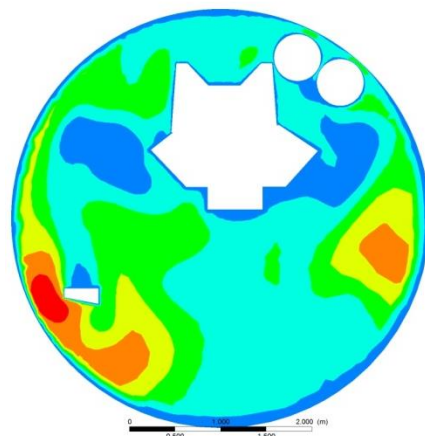
ج) منطقه مرده در مقطع عرضی ۸



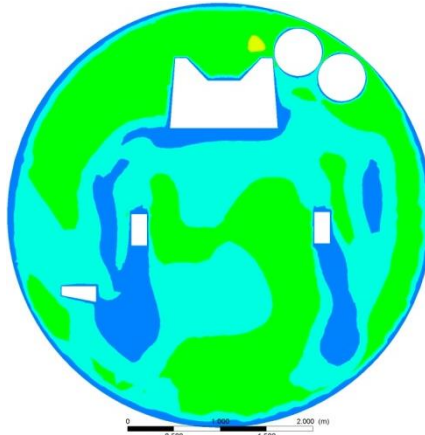
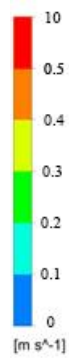
چ) منطقه مرده در مقطع عرضی ۷



د) منطقه مرده در مقطع عرضی ۱۰



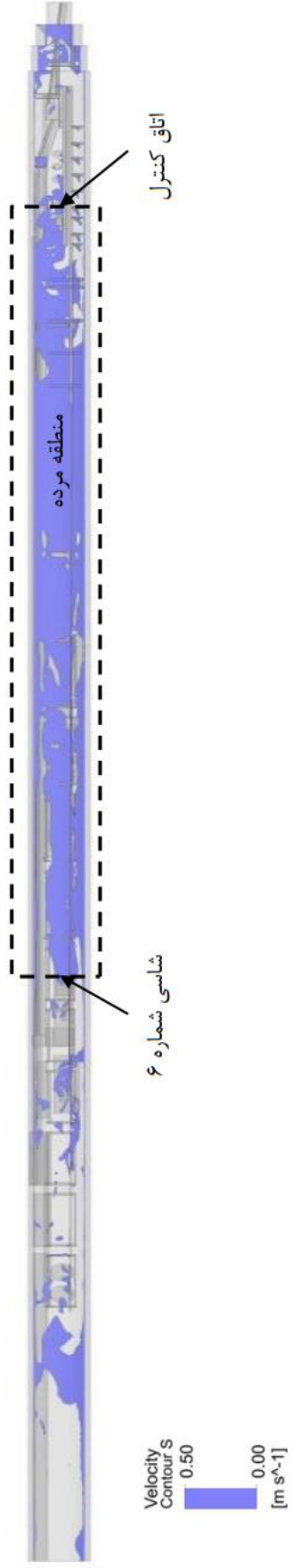
خ) منطقه مرده در مقطع عرضی ۹



ز) منطقه مرده در مقطع عرضی ۱۱

ر) راهنمای الگوی تغییرات سرعت

شکل ۴-۴- مناطق مرده در مقاطع عرضی از ماشین حفاری تمام مقطع



شکل ۴-۵- منطقه مرده در مقطع طولی از محل حضور و تردد کارکنان در شرایط مینا

۳-۴- تحلیل حساسیت

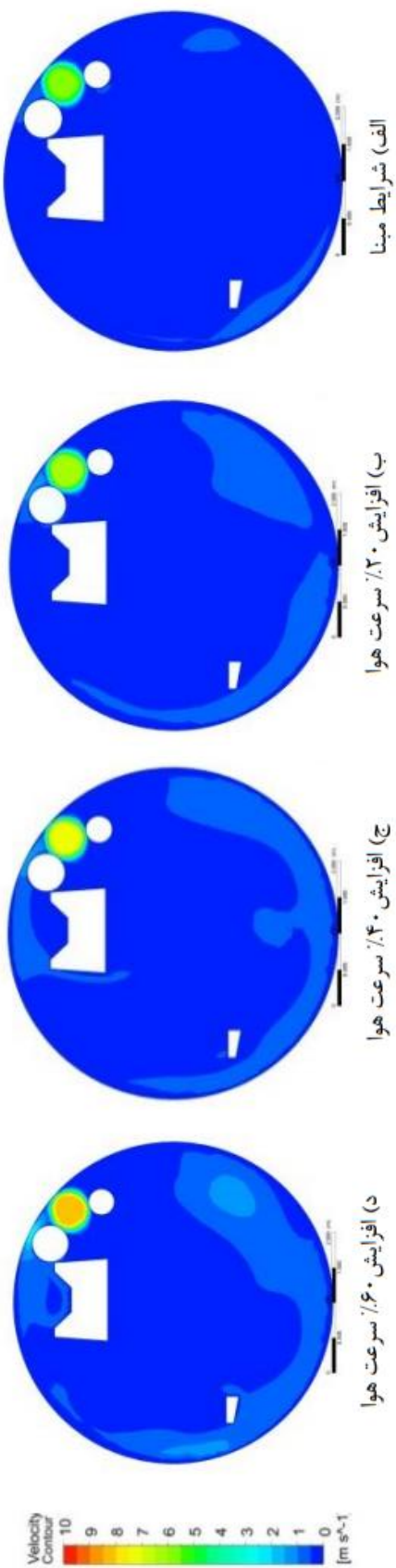
راهبردهای مختلفی باهدف کاهش منطقه مرده در ماشین حفاری تمام مقطع و بهینه‌سازی توزیع جریان هوا در این بخش پیاده‌سازی شده است. همچنین با توجه به امکان افزایش شدت جریان ورودی و خاموش نمودن بادبزن مکشی میزان مناطق مرده در این حالت‌ها نیز پیش‌بینی شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت با شرایط مبنا مقایسه و تحلیل شده است.

۳-۴-۱- افزایش سرعت جریان هوا در ورودی شماره ۱ و ۲

پاپار^۱ و همکاران معتقدند افزایش سرعت بادبزن به میزان ۱۰ درصد، توان مصرفی بادبزن را تا ۲۷ درصد افزایش می‌دهد [۸۱]. از این رو افزایش سرعت بادبزن توجیه اقتصادی ندارد ولی با توجه به مشکلات ایمنی به‌عنوان یکی از راهبردهای در دسترس برای توزیع بهتر جریان هوا مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به امکان افزایش سرعت هوای خروجی از بادبزن دهشی کمکی راهبردهای افزایش سرعت جریان هوا به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد نسبت به شرایط مبنا بررسی شده است. مطابق شکل ۴-۶ افزایش سرعت جریان هوا تاثیر مطلوبی بر کاهش میزان مناطق مرده در محل حضور و تردد کارکنان دارد. با افزایش سرعت جریان هوا مقدار کمینه سرعت جریان هوا در منطقه تنفسی کارکنان نیز بهبود یافته است به طوری که در مقطع عرضی شماره ۷ با افزایش سرعت جریان هوا به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد به ترتیب سرعت هوا در منطقه تنفسی کارکنان به میزان ۲۱، ۳۷ و ۶۵ درصد افزایش یافته است. نتایج مدل‌سازی انجام شده هریک از راهبردها به تفکیک در جدول ۴-۱، ارائه شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد، افزایش سرعت جریان هوا توسط بادبزن دهشی کمکی می‌تواند حداکثر تا ۵/۲ درصد از حجم منطقه مرده را نسبت به شرایط مبنا کاهش دهد.

¹ Papar et al



شکل ۴-۶- تاثیر افزایش سرعت هوا در ورودی بر الگوهای تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۷

جدول ۴-۱- تاثیر افزایش سرعت جریان هوا بر میزان حجم مناطق مرده

سرعت متوسط ورودی ۱ (متر بر ثانیه)	سرعت متوسط ورودی ۲ (متر بر ثانیه)	حجم منطقه مرده حداقل سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه (مترمکعب)	نسبت کاهش منطقه مرده نسبت به شرایط مبنا (درصد)	شرایط مبنا
۷/۹۰	۵/۶۰	۱۲۶۸	-	افزایش ۲۰ درصدی سرعت هوا
۸/۷۹	۶/۳۴	۱۲۴۶	-۱/۷۹	افزایش ۴۰ درصدی سرعت هوا
۱۰/۲۵	۷/۲۷	۱۲۱۳	-۴/۳۶	افزایش ۶۰ درصدی سرعت هوا
۱۱/۶۹	۸/۳۳	۱۲۰۲	-۵/۳۱	

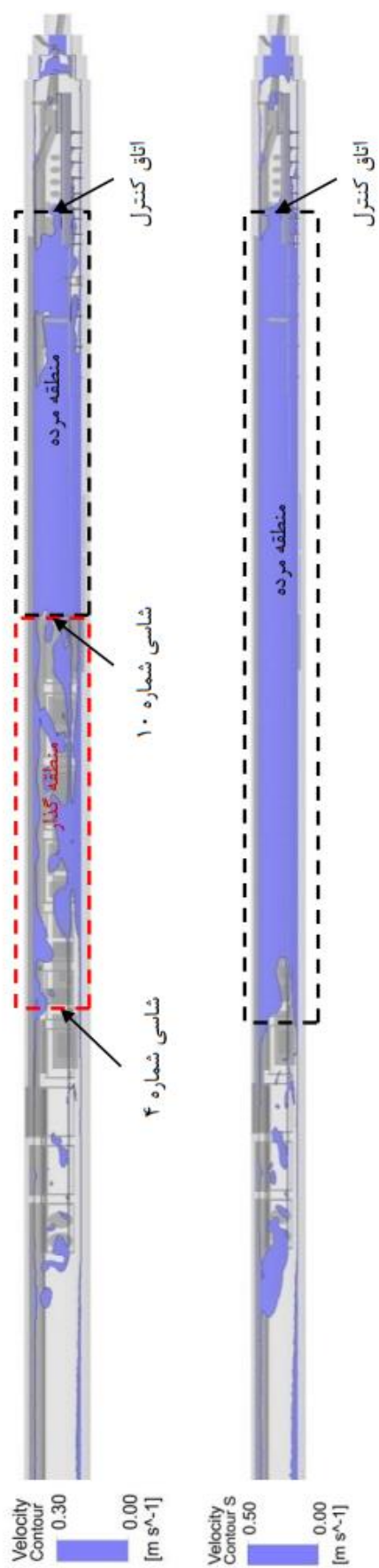
۲-۳-۴- خاموش شدن بادبزن مکشی کمکی

بادبزن مکشی کمکی در سامانه تهویه ماشین حفاری تمام مقطع، وظیفه تهویه موضعی و انتقال آلودگی‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو به خارج از ماشین حفاری را بر عهده دارد. در این بخش، تاثیر خاموش شدن بادبزن مکشی بر حجم منطقه مرده در ماشین حفاری تمام مقطع مطالعه شده است. مطابق جدول ۲-۴، نتایج نشان می‌دهد در صورت خاموش شدن بادبزن مکشی، حجم منطقه مرده با حداقل سرعت هوا ۰/۳ متر بر ثانیه برابر ۹۱۶ مترمکعب و با حداقل سرعت هوا برابر ۰/۵ متر بر ثانیه برابر ۱۲۴۹ مترمکعب خواهد بود. بنابراین خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی می‌تواند تا حدود ۱/۵ درصد حجم منطقه مرده را نسبت به شرایط مبنا کاهش دهد. شکل ۴-۷، نمایی از منطقه مرده در مقطع طولی ماشین حفاری و محل تردد کارکنان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-۷ مشخص شده است، فاصله بین شاسی شماره ۴ تا شاسی شماره ۱۰ سرعت هوا بین ۰/۳ تا ۰/۵ متر بر ثانیه است. این منطقه را می‌توان به‌عنوان منطقه گذار^۱ نام‌گذاری نمود. منطقه گذار امکان تغییر از منطقه مرده به منطقه سالم و بالعکس را در صورت تغییر در شرایط هوای ورودی خواهد داشت.

جدول ۲-۴- حجم منطقه مرده در صورت خاموش شدن بادبزن مکشی

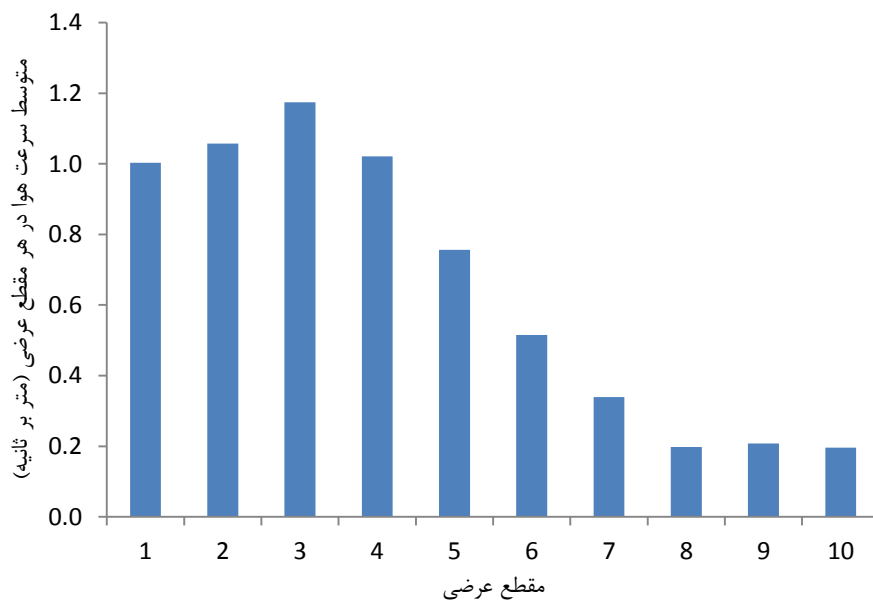
حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه)	حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۳ متر بر ثانیه)	
۱۲۶۸	۸۶۴	شرایط مبنا
۱۲۴۹	۹۱۶	شرایط جدید

¹ Transition Zone

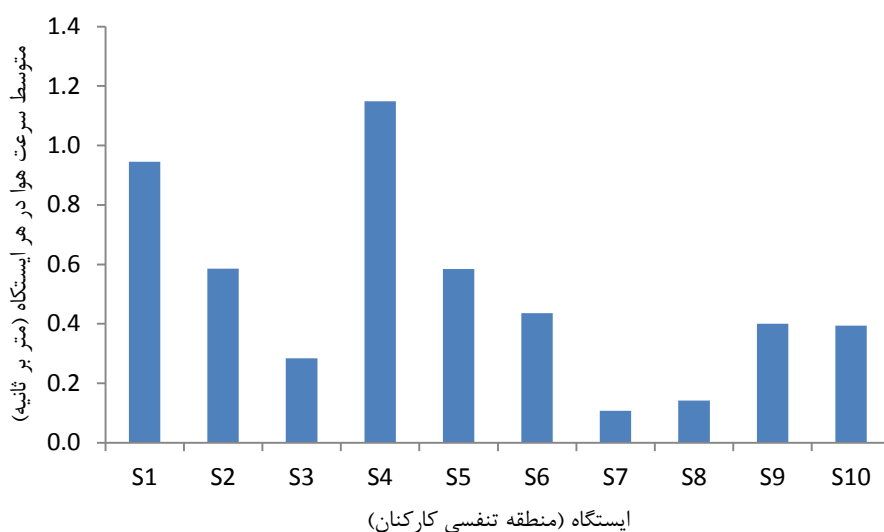


شکل ۴-۷- منطقه مرده در مقطع طولی از محل حضور و تردد کارکنان در صورت خاموش شدن بادبزنی مکشی

متوسط سرعت هوا در هر مقطع عرضی و مقدار سرعت هوا در هر ایستگاه (منطقه تنفسی کارکنان) در صورت خاموش شدن بادبزن مکشی به ترتیب در شکل ۸-۴ و شکل ۹-۴ ارایه شده است. شکل ۸-۴ نشان می‌دهد متوسط سرعت هوا در مقاطع عرضی ۷ تا ۱۰ کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه و در مقاطع عرضی ۱ تا ۶ بیشتر از ۰/۵ متر بر ثانیه است. لذا در مقاطع عرضی ۷ تا ۱۱ منطقه مرده وجود دارد. در صورتی که مطابق شکل ۹-۴، بررسی سرعت هوا در هر ایستگاه (منطقه تنفسی کارکنان) نشان داد میانگین سرعت هوا در مقاطع عرضی ۱، ۲، ۴ و ۵ بیشتر از ۰/۵ متر بر ثانیه است. و در سایر ایستگاه‌ها سرعت هوا کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه است. بررسی‌ها حاکی از آن است که شاخص میانگین سرعت هوا در مقاطع عرضی نمی‌تواند شاخص مناسبی برای بررسی وضعیت منطقه مرده در محل حضور و تردد کارکنان در ماشین حفاری تمام مقطع باشد. بنابراین برای بررسی وضعیت منطقه مرده بهتر است الگوهای توزیع جریان هوا در منطقه تنفسی کارکنان مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۸-۴- متوسط سرعت هوا در هر مقطع عرضی برحسب متربرثانیه در صورت خاموش بودن بادبزن مکشی کمکی



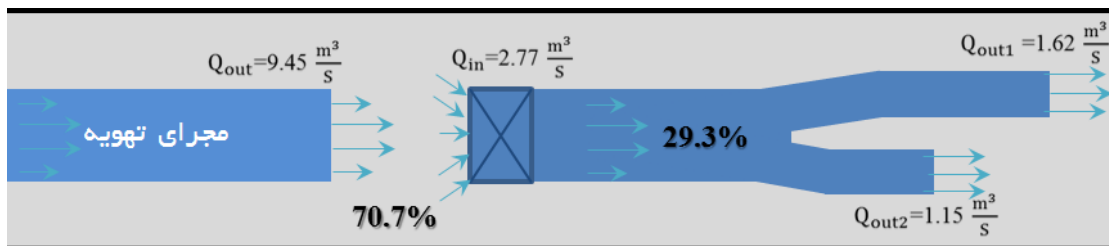
شکل ۴-۹- سرعت هوا در هر ایستگاه برحسب متر بر ثانیه در صورت خاموش بودن بادبزن مکشی کمکی

۴-۳-۳- نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین

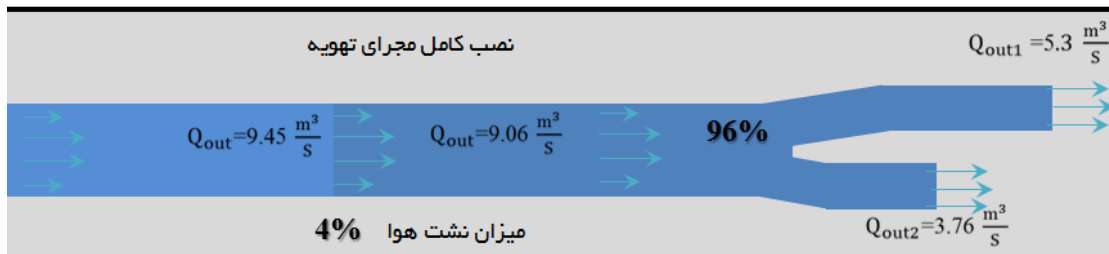
همان‌طور که در شرایط مبنا توضیح داده شد، میزان شدت جریان هوا در انتهای مجرای تهویه ورودی به قسمت پشتیبان ماشین برابر ۹/۴۵ مترمکعب بر ثانیه است. بادبزن دهشی کمکی در قسمت پشتیبان ماشین حفاری مقدار ۲/۷۷ مترمکعب بر ثانیه هوا را به قسمت قاب اصلی ماشین ارسال می‌کند و ۶/۶۸ مترمکعب بر ثانیه هوای تمیز در قسمت پشتیبان ماشین آزاد می‌شود (شکل ۴-۱۰-الف). نتایج مدل‌سازی نشان داد روش مبنا امکان ارسال هوای کافی به‌منظور حذف مناطق مرده را ندارد. لذا الگوهای توزیع جریان هوا و منطقه مرده در حالت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قسمت قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع مورد بررسی قرار گرفته است.

تعیین شدت جریان هوای خارج‌شده از انتهای مجرای تهویه در صورت نصب کامل مجرای تهویه کاری بسیار مشکل و تحقیق جامع دیگری را نیاز دارد. تعیین میزان نشت هوا تابعی از جنس مجرای تهویه، شرایط نصب، قطر و طول مجرای تهویه، شدت جریان هوا، فشار هوای تولیدی بادبزن و فشار هوای داخل ماشین حفاری تمام مقطع است که تعیین دقیق آن در حال حاضر امکان‌پذیر نیست [۸۲].

به‌طور کلی در ماشین‌های حفاری تمام مقطع از مجرای تهویه نوع S با ضریب اصطکاک ۰/۰۱۵ و ضریب نشت $5 \frac{mm^2}{m^2}$ به ازای هر ۱۰۰ متر استفاده می‌شود. با توجه به نصب مجراهای تهویه با ضریب نشت پایین در ماشین‌های حفاری تمام مقطع می‌توان با یک تقریب ساده میزان سرعت هوا را در انتهای مجرا برآورد نمود. بر این اساس فرض می‌شود با نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری به میزان ۴ درصد نشت هوا در طول مسیر اتفاق بیفتد. بنابراین، می‌توان انتظار داشت در این شرایط میزان سرعت هوا در ورودی‌های شماره ۱ و ۲ به ترتیب برابر ۲۹ و ۲۱ مترمکعب بر ثانیه باشد. شکل ۴-۱۰-ب، نمایی از حالت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین را نشان می‌دهد.



(الف) شرایط مبنا



(ب) نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری

شکل ۴-۱۰-ب مقایسه شرایط مبنا و نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری

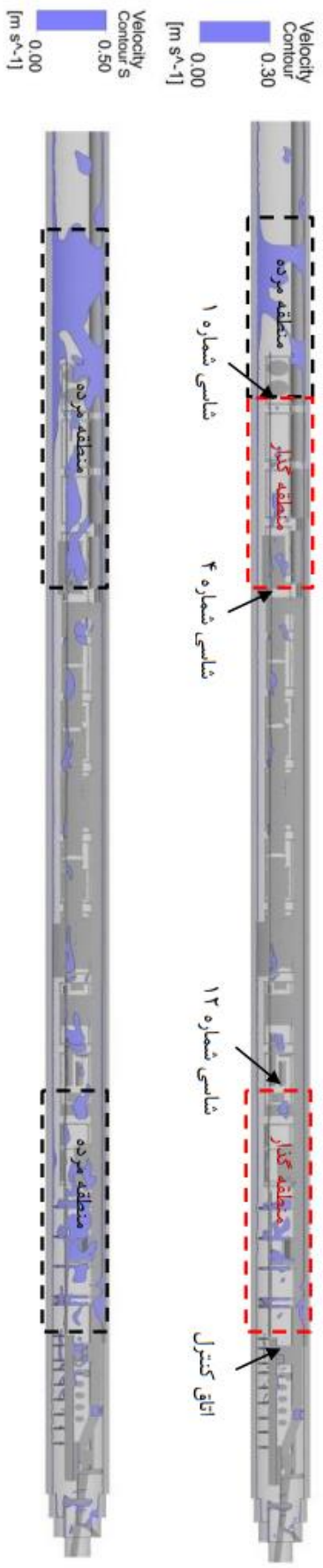
حجم منطقه مرده در صورت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری در جدول ۴-۳، ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد حجم منطقه مرده نسبت به شرایط مبنا به‌صورت چشمگیری کاهش یافته است. در این حالت منطقه مرده در قسمتی از پشت اتاق کنترل تا شاسی شماره ۱۲ و در انتهای ناحیه پشتیبان و شاسی شماره ۱ وجود دارد. منطقه گذار مطابق شکل

۱۱-۴ در فاصله بین اتاق کنترل تا شاسی شماره ۱۲ و در فاصله بین شاسی شماره ۴ تا شاسی شماره ۱ است.

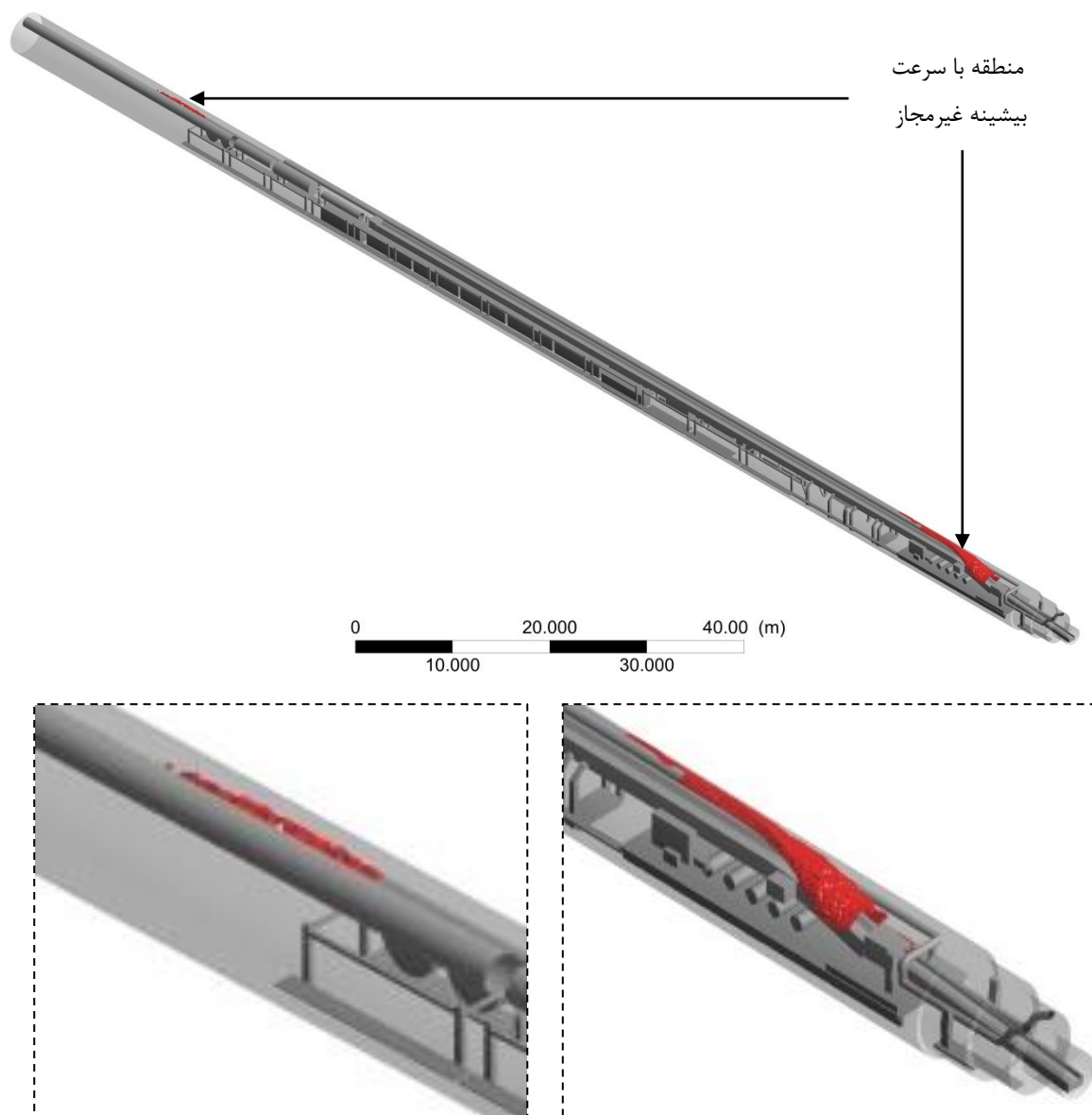
جدول ۳-۴- حجم منطقه مرده در صورت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین

حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه)	حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۳ متر بر ثانیه)	
۱۲۶۸	۸۶۴	شرایط مبنا
۴۷۰	۱۴۹	شرایط جدید

یکی از نگرانی‌های دیگر، بالاتر بودن سرعت جریان هوا از حداکثر سرعت تعیین شده توسط استانداردهای موجود است. بر اساس الزامات تهویه در فضاهای زیرزمینی، بیشینه سرعت جریان هوا در مسیر کارکنان نباید بیشتر از ۸ متر بر ثانیه باشد [۵۱]. مطابق شکل ۴-۱۲، نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد در صورت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری ۱۱/۳ مترمکعب از حجم ماشین دارای سرعت بیش از ۸ متر بر ثانیه است. شکل ۴-۱۲ نشان می‌دهد منطقه سرعت بیشینه در محل تردد کارکنان وجود ندارد و مشکلی از این نظر برای کارکنان ایجاد نمی‌شود.



شکل ۱-۴- منطقه مرده و منطقه گداز در مقطع طولی ماشین در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



شکل ۴-۱۲- حجم منطقه با سرعت بیشینه غیرمجاز در حالت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری

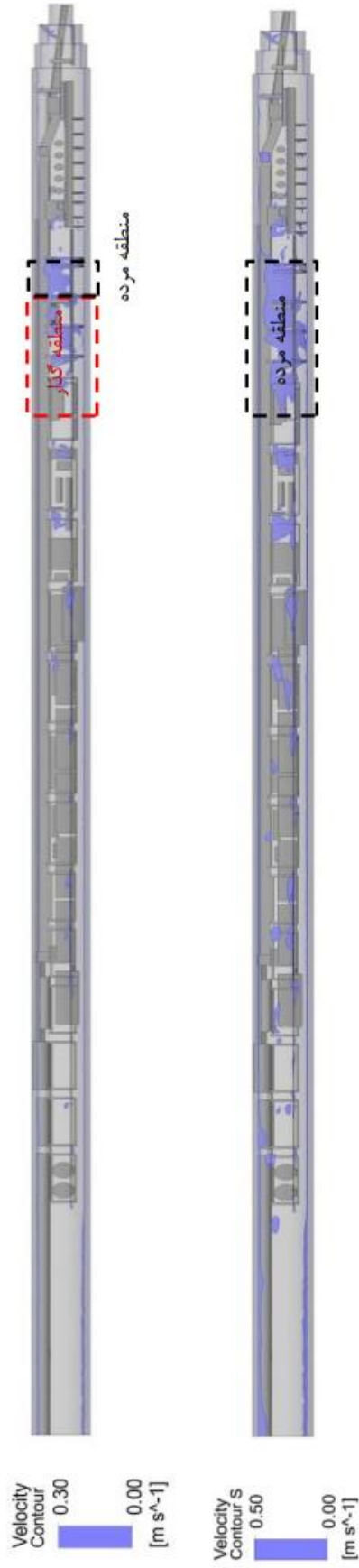
۴-۳-۴- نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی

با توجه به نتایج بسیار خوب در کاهش منطقه مرده در حالت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری و خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی به طور مجزا تاثیر همزمان این دو مورد در قالب یک حالت جدید بررسی شده است. نتایج مدل سازی مطابق جدول ۴-۴، نشان می دهد شرایط جدید می تواند حدود ۸۰ درصد از حجم منطقه مرده را کاهش دهد. شکل ۴-۱۳، الگوهای توزیع جریان هوا و منطقه مرده در مسیر تردد و حضور کارکنان را در شرایط استفاده همزمان از نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری و خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی را نشان می دهد.

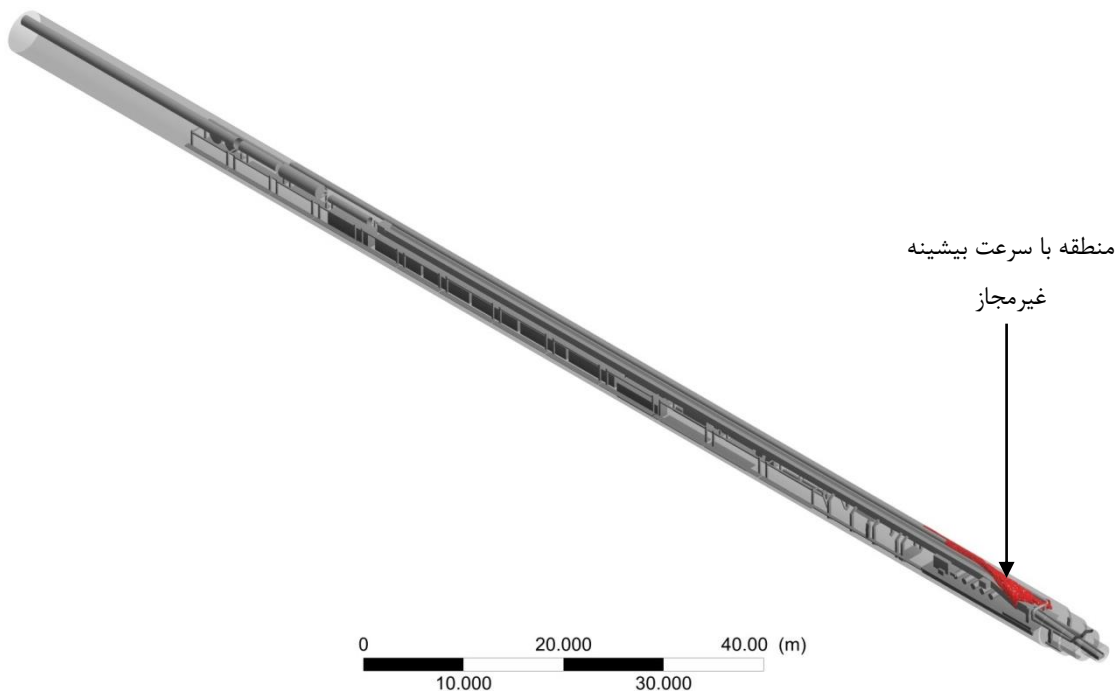
جدول ۴-۴- حجم منطقه مرده در صورت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی

سرعت متوسط ورودی ۱ (متربرثانیه)	سرعت متوسط ورودی ۲ (متربرثانیه)	حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۳ متربرثانیه)	حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۵ متربرثانیه)
۷/۹	۵/۶	۸۶۴	۱۲۶۸
۲۹/۲۸	۲۰/۷۸	۶۸	۲۵۲

نتایج مدل سازی نشان می دهد در صورت نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی، ۱۰ مترمکعب از حجم ماشین دارای سرعت بیشینه غیرمجاز است. مطابق شکل ۴-۱۴، منطقه سرعت بیشینه غیرمجاز در محل تردد کارکنان وجود ندارد و مشکلی برای کارکنان در استفاده از این راهبرد ایجاد نمی شود.



شکل ۴-۱۳ - منطقه مرده و منطقه گذار در مقطع طولی در شرایط توانان نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



شکل ۴-۱۴- حجم منطقه با سرعت بیش از حد مجاز در شرایط نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی

۴-۳-۵- کاهش فاصله مجرای تهویه تا سپر ماشین

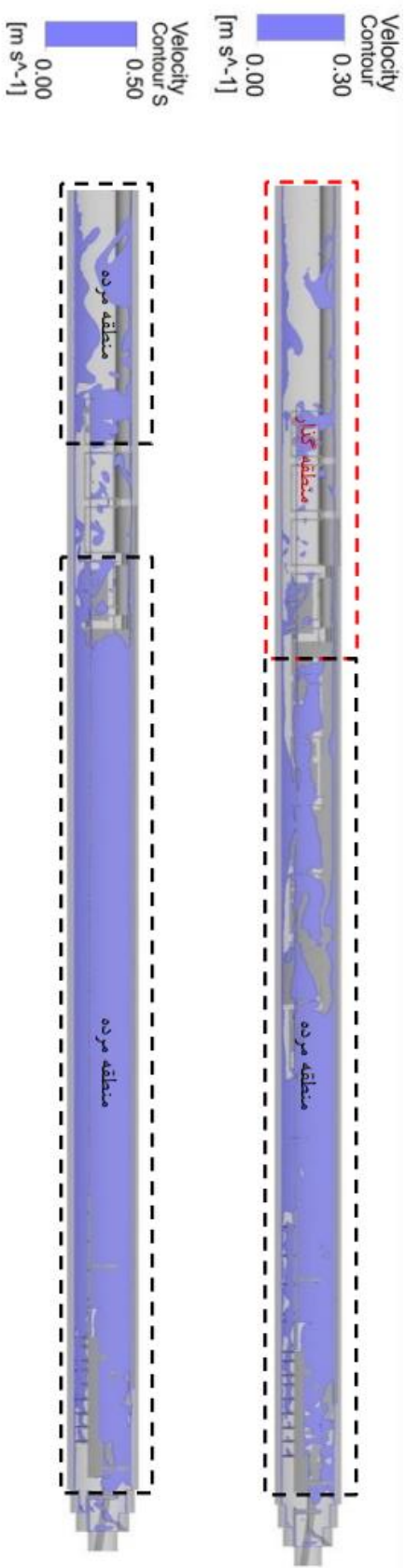
یکی از شاخص‌های کلیدی برای بررسی جریان هوای کافی در جبهه‌کارهای تونلی فاصله انتهای مجرای تهویه تا جبهه‌کار^۱ است. فاصله مناسب انتهای مجرای تهویه تا جبهه‌کارهای تونلی می‌تواند جریان هوای تازه را به صورت مستقیم به جبهه‌کار و مناطق آلودگی برساند و پس از تغییر مسیر، هوای آلوده را به سمت خارج از فضای زیرزمینی هدایت کند [۳۳].

در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر نیز تغییر ساختمان ماشین در نتیجه تغییر فاصله انتهای مجرای تهویه تا جبهه‌کار و تاثیر آن بر حجم منطقه مرده بررسی شده است. کاهش فاصله مجرای تهویه در ورودی‌های ۱ و ۲ با فرض ثابت بودن شرایط مرزی و تنها افزایش طول مجرای تهویه به میزان ۵ و ۱۰ متر در این بخش مطالعه شده است. حجم مناطق مرده در نتیجه اضافه کردن ۵ و ۱۰ متر به انتهای مجرای تهویه ۱ و ۲ در جدول ۴-۵، ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد با تغییر ساختمان ماشین و کاهش فاصله انتهای مجرای تهویه تا سپر ماشین، حجم منطقه مرده نسبت به شرایط مبنا افزایش یافته است. شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶، نمایی از منطقه مرده و منطقه گذار در مقطع طولی ماشین و محل تردد کارکنان را در شرایط افزایش طول مجرای تهویه به میزان ۵ و ۱۰ متر نشان می‌دهد.

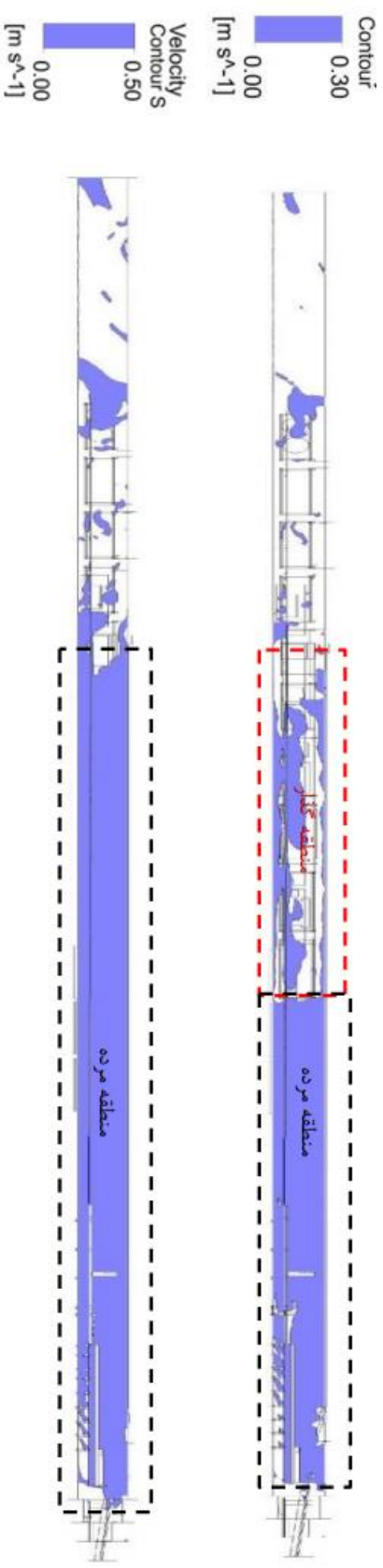
جدول ۴-۵- حجم منطقه مرده در صورت افزایش طول مجرای تهویه

حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه)	حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۳ متر بر ثانیه)	شرایط مبنا
۱۲۶۸	۸۶۴	شرایط مبنا
۱۳۴۳	۹۰۰	افزایش طول مجرای تهویه به میزان ۵ متر
۱۳۴۴	۱۰۳۲	افزایش طول مجرای تهویه به میزان ۱۰ متر

¹ Setback distance



شکل ۴-۱۵ - منطقه مرده و منطقه گذار در مقطع طولی ماشین و محل تردد کارکنان در شرایط افزایش طول جرای تهویه به میزان ۵ متر

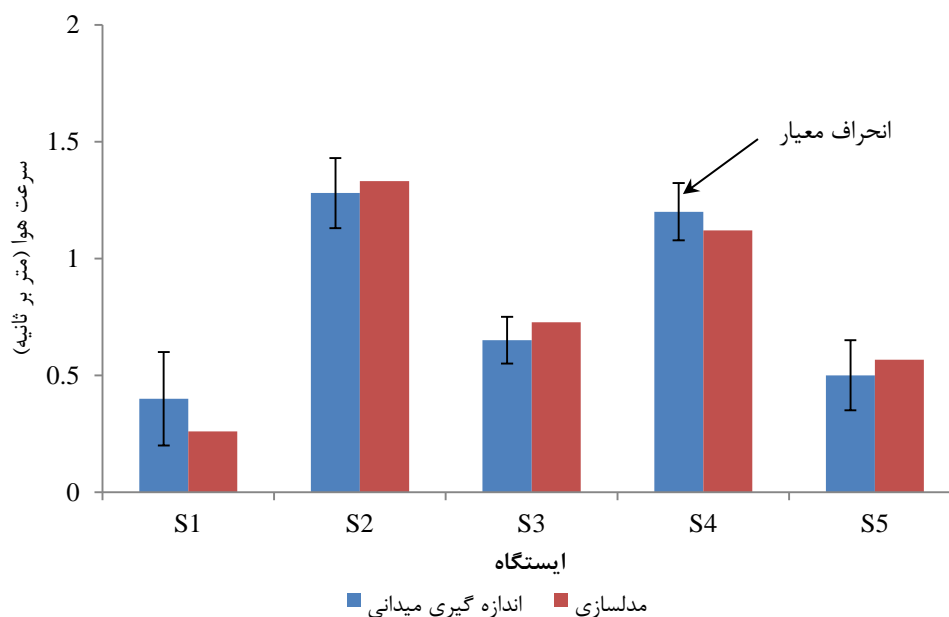


شکل ۴-۱۶ - منطقه مرده و منطقه گذار در مقطع طولی ماشین و محل تردد کارکنان در شرایط افزایش طول جرای تهویه به میزان ۱۰ متر

۴-۴- اعتبارسنجی مدل

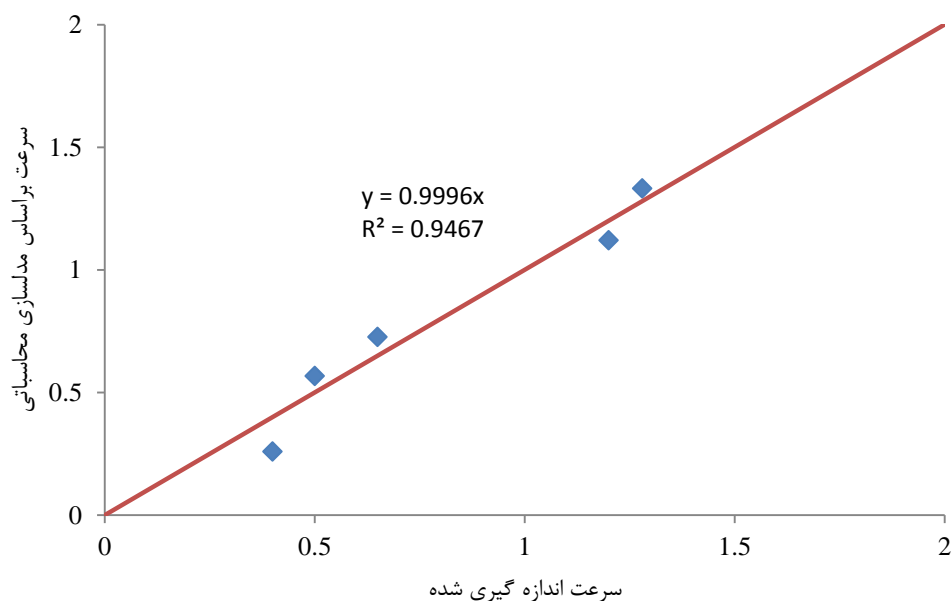
مدل‌سازی جریان سیالات با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نسبت به رویکردهای تجربی از مزایایی چون هزینه پایین، سرعت بالا و انعطاف پذیری در شرایط واقعی و ایده‌آل است. با این حال، به‌عنوان یک روش حل عددی برای هندسه‌ها و شرایط پیچیده، دینامیک سیالات محاسباتی نمی‌تواند از ساده‌سازی‌های مهندسی و تقریب‌های ریاضی موردنیاز برای انجام پروژه مستثنا باشد [۸]. اعتبارسنجی ابزار اصلی برای ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان در شبیه‌سازی‌های محاسباتی مانند دینامیک سیالات محاسباتی است و به‌طور معمول با مقایسه دقت نتایج محاسبات با داده‌های اندازه‌گیری میدانی انجام می‌شود.

در این پژوهش به‌منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی شده از اندازه‌گیری میدانی سرعت جریان هوا و اطلاعات جدول ۲-۴، استفاده شده است. شاخص‌های آماری اندازه‌گیری میدانی سرعت هوا نظیر میانگین و انحراف معیار در شکل ۴-۱۷، ارایه و با نتایج مدل‌سازی شده در شرایط مبنای در تعدادی از ایستگاه‌های داخل ماشین مقایسه شده است.



شکل ۴-۱۷- مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده سرعت هوا با نتایج مدل‌سازی

شکل ۴-۱۷، نشان می‌دهد در تمام ایستگاه‌ها روند تغییرات سرعت در نتایج اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی مشابه است و نتایج مدل‌سازی در فاصله انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده قرار دارد. برای مشخص شدن اعتبار نتایج مدل‌سازی از ضریب نیکویی برازش (R^2) بین سرعت مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی، استفاده شده است. شکل ۴-۱۸، نمودار رگرسیون بین نتایج مدل‌سازی و اندازه‌گیری میدانی سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد و شاخص ضریب نیکویی برازش برابر 0.9467 محاسبه شده است. ضریب نیکویی برازش بین صفر تا ۱ تغییر می‌کند که مقادیر بالاتر نشانه خطای واریانس کمتر است. مقادیر بیشتر از 0.7 برای مدل‌سازی عددی قابل قبول است [۸۳]. [۸۴]. لذا مدل‌سازی انجام شده از دقت خوبی برخوردار بوده و نتایج به دست آمده قابل قبول است. علت اختلاف در نتایج را می‌توان ناشی از فرضیات و ساده‌سازی‌های صورت گرفته در هندسه مساله و خطاهای ناشی از اندازه‌گیری و وجود موقعیت نسبی در اندازه‌گیری‌ها دانست.



شکل ۴-۱۸- نمودار هم‌خوانی سرعت بین نتایج حاصل از مدل‌سازی و اندازه‌گیری میدانی

۴-۵- جمع‌بندی

در این بخش پس از مدل‌سازی و تحلیل چگونگی توزیع جریان هوا در داخل ماشین حفاری تمام مقطع، حالات مختلف به‌منظور کاهش منطقه مرده در ماشین حفاری تمام مقطع بررسی و به‌طور خلاصه در جدول ۴-۶، ارائه شده است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد استفاده از شرایط نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و خاموش کردن بادبزن مکشی به‌طور هم‌زمان می‌تواند به میزان حدود ۹۲ درصد از حجم منطقه مرده با سرعت کمتر از ۰/۳ متر بر ثانیه و حدود ۸۰ درصد از حجم منطقه مرده با سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه را نسبت به شرایط مبنا کاهش دهد. همچنین کاهش فاصله انتهای مجرای تهویه تا سپر ماشین نتیجه عکس داده و موجب افزایش حجم منطقه مرده نسبت به شرایط مبنا می‌شود.

جدول ۴-۶- حجم منطقه مرده در راهبردهای مختلف

حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه)	حجم منطقه مرده (سرعت کمتر از ۰/۳ متر بر ثانیه)	
۱۲۶۸	۸۶۴	شرایط مبنا
۱۲۴۵	۷۹۲	افزایش ۲۰ درصدی سرعت هوا در ورودی ۱ و ۲
۱۲۱۳	۷۶۶	افزایش ۴۰ درصدی سرعت هوا در ورودی ۱ و ۲
۱۲۰۲	۷۵۱	افزایش ۶۰ درصدی سرعت هوا در ورودی ۱ و ۲
۱۲۴۹	۹۱۶	خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی
۴۷۰	۱۴۹	نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا سپر ماشین
۲۵۲	۶۸	نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی
۱۳۴۳	۹۰۰	افزایش طول مجرای تهویه +۵ متر
۱۳۴۴	۱۰۳۲	افزایش طول مجرای تهویه +۱۰ متر

فصل پنجم

چگونگی توزیع آلودگی در ماشین

حصاری تمام مقطع

۵-۱-آشنایی

حضور لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع به دلیل انتقال مواد حفاری شده از جبهه کار و انتقال تجهیزات پشتیبانی و قطعات پیش‌ساخته بتنی به داخل ماشین حفاری ضروری است. کارکرد لوکوموتیو در فضاهای بسته و محصولات احتراق خروجی از اگزوز دیزل سبب آلودگی فضای داخل ماشین حفاری تمام مقطع می‌شود. گاز خروجی از اگزوز یک ترکیب شیمیایی پیچیده در سه فاز جامد، مایع و گاز است که از احتراق ناقص سوخت تولید می‌شود. مدل موتور، کیفیت سوخت، کیفیت روغن، و کارکرد از پارامترهای مهم در ترکیب خروجی از اگزوز دیزل است. قرار گرفتن در معرض خروجی اگزوز منجر به التهاب تنفسی و مشکلات قلبی و عروقی می‌شود. ورمالون^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۴ گزارش دادند که ۶ درصد از مرگ‌ومیر ناشی از سرطان ریه می‌تواند به خاطر مواجهه شغلی با گازهای خروجی از اگزوز باشد [۸۵].

اکسیدهای کربن (CO و CO₂)، اکسید نیتروژن (NO)، دی‌اکسید نیتروژن (NO₂)، دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، بخار آب، سولفور، هیدروکربن‌های با وزن مولکولی پایین (از جمله بنزن، ۱-۳ بوتادین)، اجزای اکسیدشده (نظیر آلدیدها) در ترکیب گازهای خروجی از اگزوز ممکن است وجود داشته باشد. در طول پروژه‌های ساخت فضاهای زیرزمینی به‌ویژه با ماشین حفاری تمام مقطع، نظارت بر حد مواجهه شغلی کارکنان با گازهای خطرناک در طول کار بسیار مهم است [۸۶].

۵-۲- مدل‌سازی توزیع گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو

میزان پراکنش و حجم منطقه آلوده ناشی از عملکرد لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چم‌شیر و تاثیر سامانه تهویه بر ترقیق و حذف آلاینده‌های محیطی، با مدل‌سازی چند فازی بررسی شده است. با توجه به هندسه پیچیده ماشین حفاری و تعداد بالای سلول‌های شبکه توری، مدل‌سازی حرکت لوکوموتیو در داخل ماشین حفاری امکان‌پذیر نبوده و عملکرد سامانه تهویه ۱۰

¹ Vermeulen

ثانیه پس از پایا شدن جریان هوا در داخل ماشین و به مدت ۱۲۰ ثانیه پس از روشن و در حال کار بودن لوکوموتیو بررسی شده است.

مقدار گام زمانی به اندازه‌ای کوچک در نظر گرفته شد تا تمامی ویژگی‌های وابسته به زمان جریان حل مشخص گردند. در مطالعه حاضر، اندازه گام زمانی بر مبنای شاخص عدد کورانت^۱ تعیین شده است. به‌طور معمول مقدار قابل قبول عدد کورانت از ۲ تا ۱۰ است اما در برخی حالات مقادیر بزرگ‌تر نیز قابل قبول است [۷۲]. به‌منظور حل دقیق ویژگی‌های جریان، محاسبات با سه گام زمانی مختلف ۰/۱ و ۰/۱ و ۱ ثانیه که به ترتیب متناظر با اعداد کورانت تقریبی ۰/۵، ۵ و ۵۰ هستند، انجام شده است. مشاهده می‌شود که با کاهش عدد کورانت به کمتر از ۵ بهبود قابل توجهی در نتایج حاصل نمی‌شود. در نتیجه گام زمانی ۰/۱ ثانیه در تمامی محاسبات انتخاب شده است.

موقعیت مکانی لوکوموتیو در نزدیک‌ترین حالت به قاب اصلی ماشین حفاری و در حالت بارگیری اولین واگن تحلیل شده است. پس از پایا شدن جریان هوا در ماشین حفاری، گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو وارد دامنه محاسباتی شده است. سیال گاز خروجی از اگزوز لوکوموتیو به‌صورت چندجزیی شامل CO، CO₂، NO و NO₂ است و غلظت گازها به‌صورت کسر جرمی در محاسبات منظور شده است. شرایط مرزی گاز خروجی از اگزوز لوکوموتیو مطابق با اندازه‌گیری‌های میدانی صورت گرفته سرعت، دما و غلظت گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو انتخاب شده است. نتایج اندازه‌گیری میدانی خصوصیات گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو در جدول ۵-۱ ارائه شده است. سایر شرایط مرزی نظیر ورودی و خروجی‌های سیال هوا مطابق با شرایط مبنا و جدول ۳-۵، منظور شده است.

حداکثر غلظت گاز در فضاهای زیرزمینی بر اساس استانداردهای مختلف و مدت‌زمان در تماس بودن کارکنان متفاوت است. در جدول ۵-۲، محدودیت غلظت آلاینده‌های محیطی CO، CO₂، NO و NO₂ از نظر استانداردهای مختلف ارائه شده است. با توجه به شرایط کارکرد لوکوموتیو در فضای

¹ Courant number

داخل ماشین حفاری تمام مقطع و مواجهه کوتاه مدت کارکنان با گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو حجم منطقه آلوده با غلظت بیش از حد مجاز بر اساس استاندارد موسسه طب کار بریتانیا^۱ در شکل ۱-۵ تا شکل ۴-۵ مشخص شده است. حجم منطقه آلوده و پراکنش آلودگی در داخل ماشین حفاری تمام مقطع به علت ترقیق آلاینده‌های گازی با هوا و مکش توسط بادبزن مکشی با توجه به زمان متغیر است.

پراکنش آلودگی‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو نسبت به زمان در شکل پ-۱ تا شکل پ-۴ پیوست ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد پراکنش گازهای با غلظت غیرمجاز NO₂ و NO نسبت به گازهای CO₂ و CO بیشتر است و منطقه بیشتری از ماشین حفاری تمام مقطع را آلوده می‌کند.

جدول ۱-۵- اندازه‌گیری‌های میدانی سرعت، دما و غلظت گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو

سرعت (m/s)	دما (°C)	غلظت CO (ppm)	غلظت CO ₂ (ppm)	غلظت NO (ppm)	غلظت NO ₂ (ppm)
۶/۱	۱۴۰	۴۰۰	۹۰۰۰۰	۵۵۰	۵۰

گاز خروجی از اگزوز لوکوموتیو

جدول ۲-۵- محدودیت غلظت آلاینده‌های CO، CO₂، NO₂ و NO طبق استانداردهای مختلف [۹۰-۸۷]

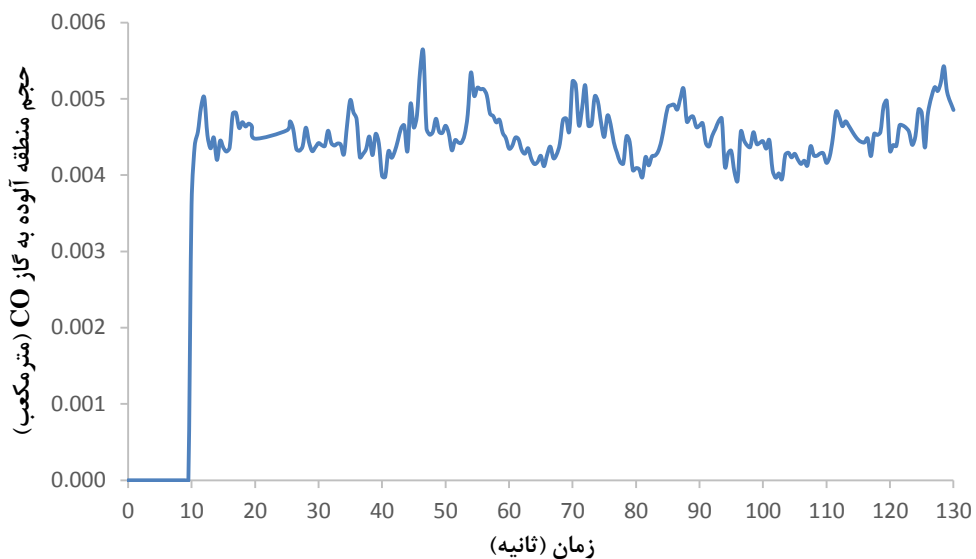
استاندارد	نوع محدودیت	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)
انجمن متخصصین بهداشت حرفه‌ای آمریکا ^۲	میانگین تراکم زمانی	۲۵	۵۰۰۰	۲۵	۳
	مواجهه کوتاه مدت	-	۳۰۰۰۰	-	۵
مدیریت ایمنی و بهداشت کار آمریکا ^۳	میانگین تراکم زمانی	۵۰	۵۰۰۰	۲۵	-
	مواجهه کوتاه مدت	-	-	-	۱
موسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا ^۴	میانگین تراکم زمانی	۳۵	۵۰۰۰	۲۵	-
	مواجهه کوتاه مدت	-	۳۰۰۰۰	-	۱
موسسه طب کار بریتانیا	میانگین تراکم زمانی	۳۰	۵۰۰۰	۲۵	۳
	مواجهه کوتاه مدت	۲۰۰	۳۰۰۰۰	۳۵	۵

¹ British Institute of occupational Medicine (BIM)

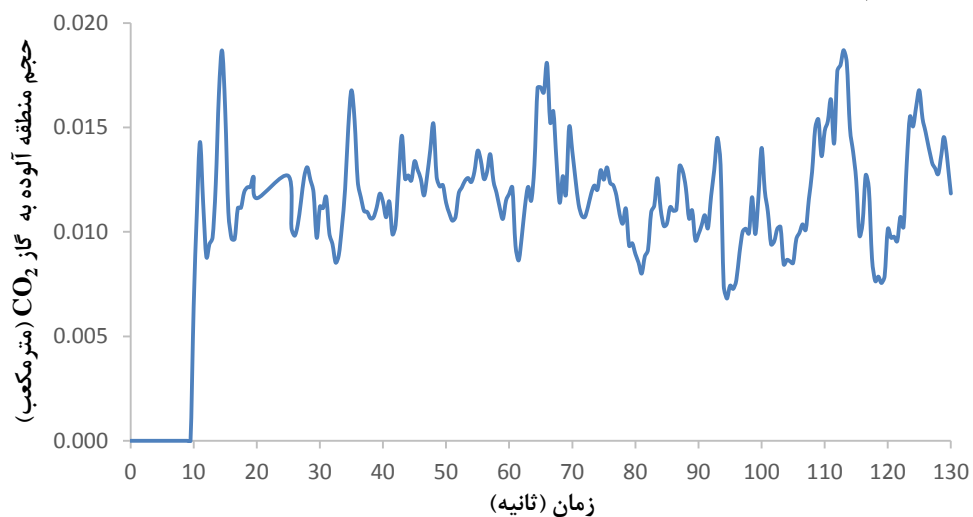
² American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)

³ Occupational Safety and Health Administration (OSHA)

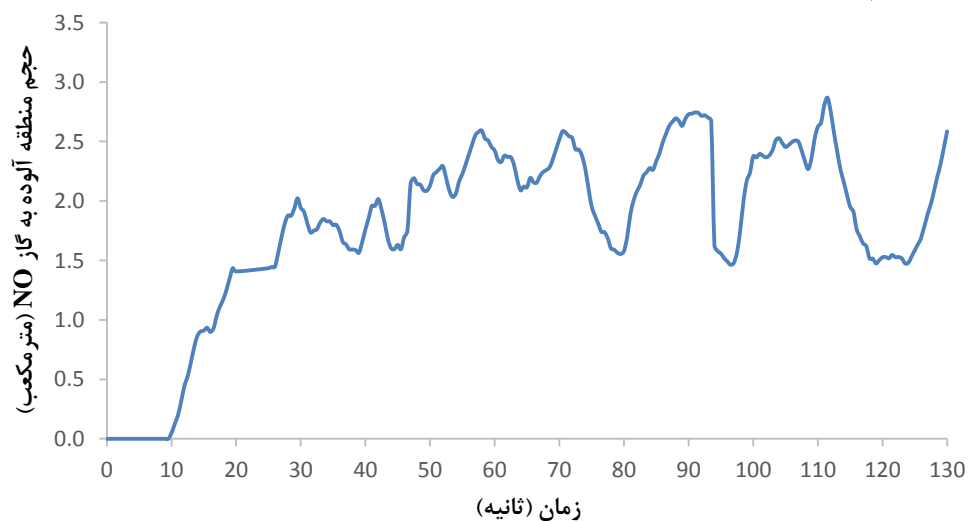
⁴ National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)



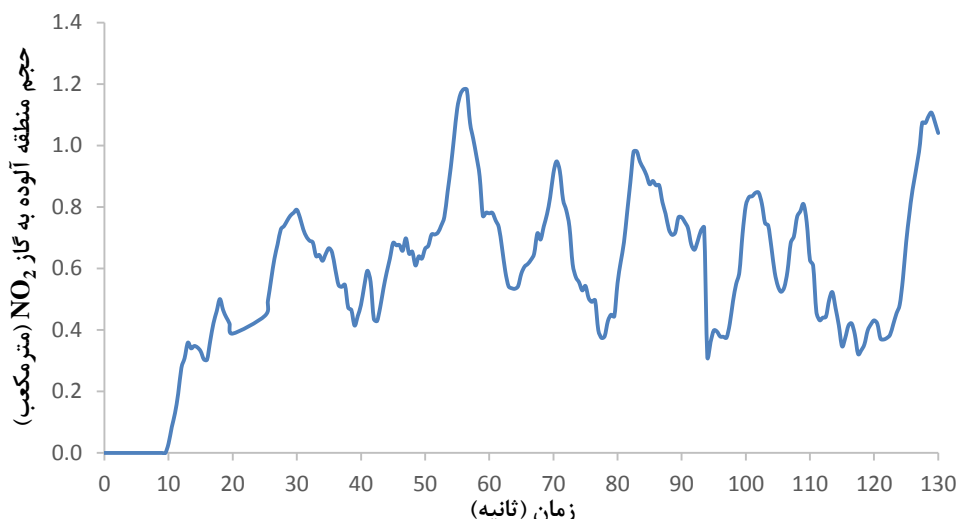
شکل ۵-۱- حجم منطقه آلوده به گاز CO بر اساس استاندارد موسسه طب کار بریتانیا در ماشین حفاری تمام مقطع



شکل ۵-۲- حجم منطقه آلوده به گاز CO₂ بر اساس استاندارد موسسه طب کار بریتانیا در ماشین حفاری تمام مقطع



شکل ۵-۳- حجم منطقه آلوده به گاز NO بر اساس استاندارد موسسه طب کار بریتانیا در ماشین حفاری تمام مقطع

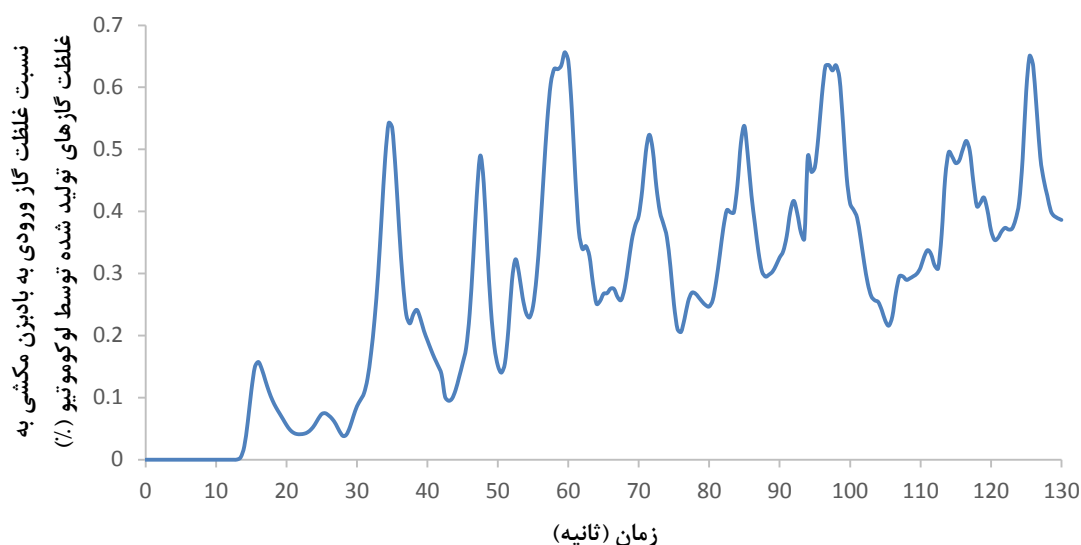


شکل ۵-۴- حجم منطقه آلوده به گاز NO_2 بر اساس استاندارد موسسه طب کار بریتانیا در ماشین حفاری تمام مقطع

۵-۲-۱- تاثیر عملکرد بادبزن مکشی کمکی بر توزیع آلودگی‌ها در شرایط مبنا

عملکرد بادبزن مکشی در کاهش آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو توسط نسبت غلظت گاز ورودی به بادبزن مکشی به غلظت گازهای تولیدشده توسط لوکوموتیو برحسب زمان محاسبه و در شکل ۵-۵ ارایه شده است.

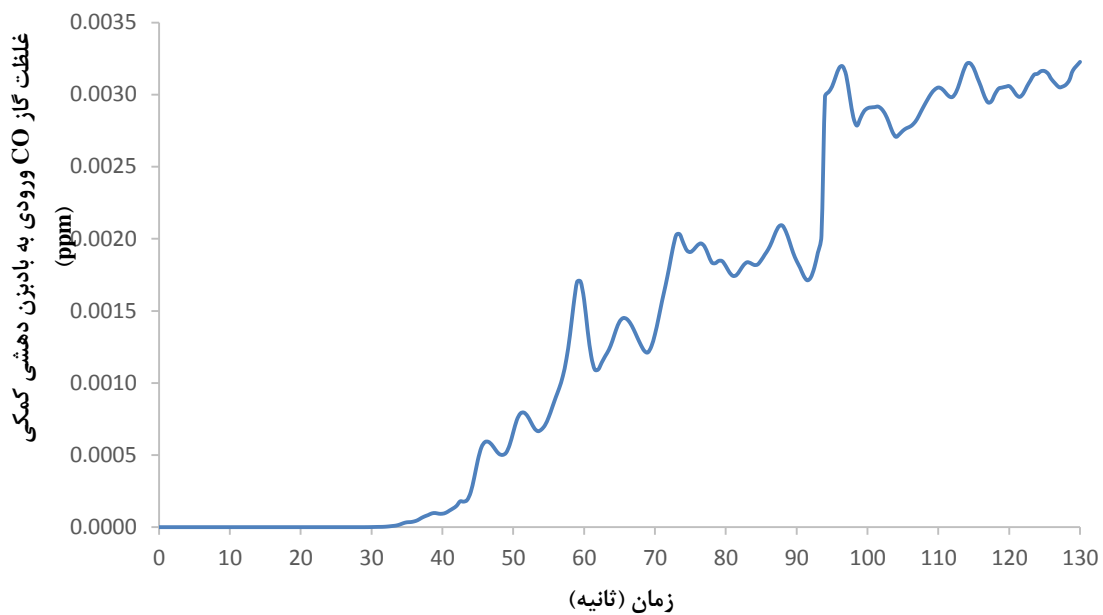
نمودار نسبت غلظت گازهای ورودی به بادبزن مکشی به غلظت گازهای تولید شده از اگزوز لوکوموتیو در طول زمان روندی صعودی نشان می‌دهد که این بیانگر کاهش میزان غلظت آلاینده‌های در طول زمان براثر کارکرد بادبزن مکشی است. هرچند این نسبت بسیار اندک و در بهترین حالت به حدود ۰/۶۶ درصد می‌رسد ولی حضور بادبزن مکشی در کاهش غلظت آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو مثبت است.



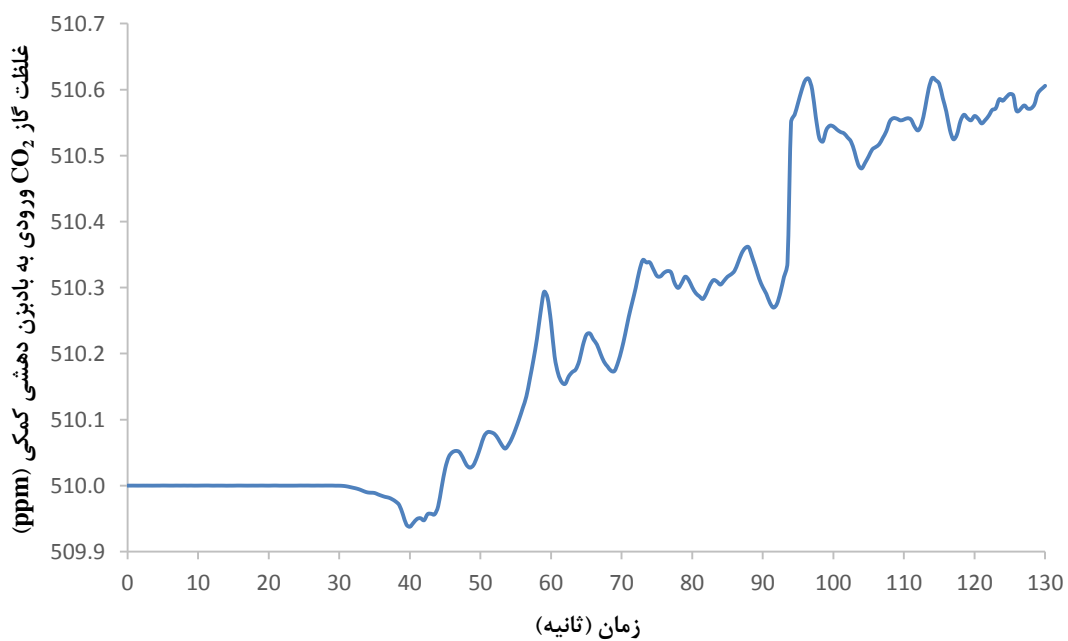
شکل ۵-۵- نسبت غلظت گازهای ورودی به بادبزنی مکشی به غلظت گازهای تولیدی توسط لوکوموتیو

۵-۲-۲- تاثیر عملکرد بادبزنی دهشی کمکی بر پراکنش آلودگی‌ها در شرایط مبنا

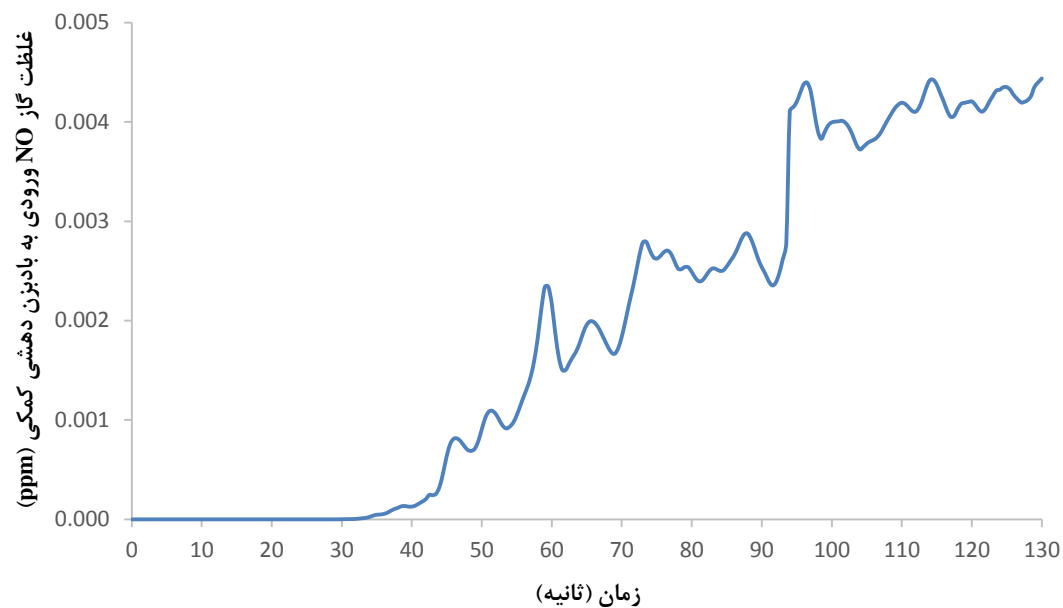
در شرایط مبنا، بادبزنی دهشی کمکی هوای تازه را از قسمت پشتیبان به محدوده قاب اصلی ماشین حفاری می‌رساند. با توجه به حضور لوکوموتیو و انتشار گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو در محدوده پشتیبان ماشین، عملکرد بادبزنی دهشی کمکی و ورود این آلاینده‌ها به داخل بادبزنی دهشی کمکی و انتقال آن‌ها به قسمت قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع در این قسمت بررسی شده است. غلظت گازهای ورودی به بادبزنی دهشی کمکی در شرایط مبنا برای گازهای مختلف در شکل ۵-۶ تا شکل ۵-۹ ارایه شده است.



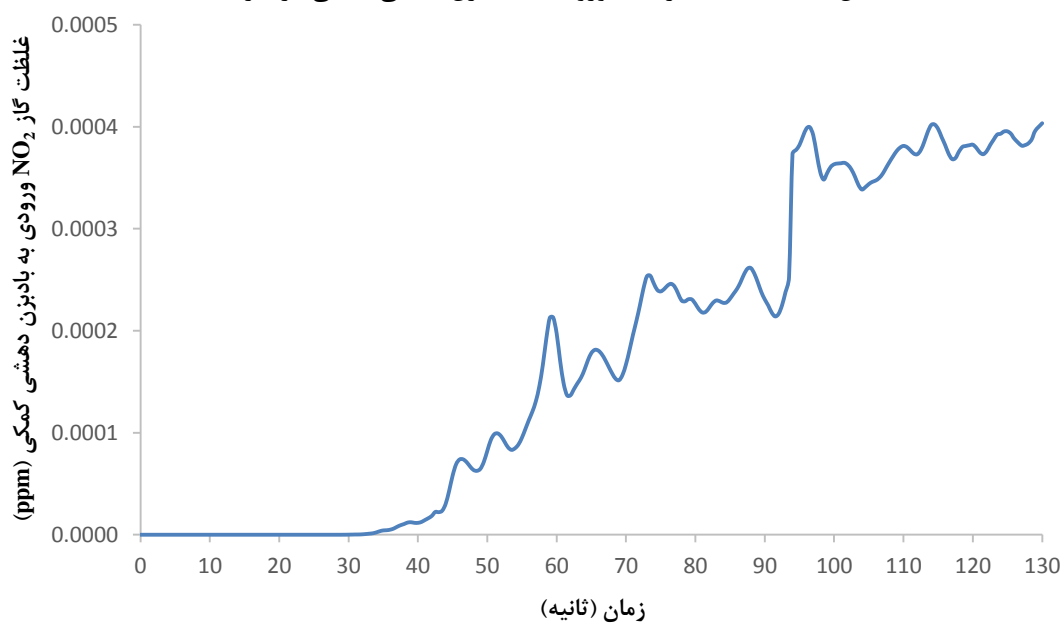
شکل ۵-۶- غلظت گاز CO ورودی به بادبزین دهشی کمکی در شرایط مبنا



شکل ۵-۷- غلظت گاز CO₂ ورودی به بادبزین دهشی کمکی در شرایط مبنا



شکل ۸-۵- غلظت گاز NO ورودی به بادبزن دهشی کمکی در شرایط مبنا



شکل ۹-۵- غلظت گاز NO₂ ورودی به بادبزن دهشی کمکی در شرایط مبنا

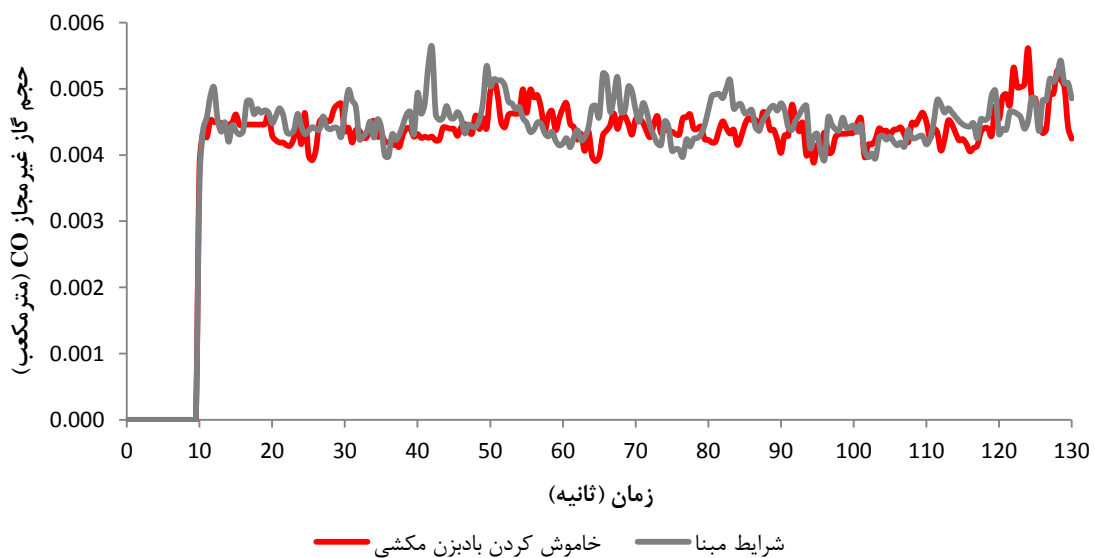
نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد، غلظت گازهای آلاینده ورودی به بادبزن دهشی کمکی در حال افزایش است و این گازها توسط بادبزن و لوله تهویه به قاب اصلی ماشین منتقل می‌شوند. این سامانه تهویه موجب پراکنش آلودگی‌ها و اختلاط هوای پاک با آلاینده‌ها گازی مورد نیاز کارکنان عملیاتی حاضر در قاب اصلی ماشین حفاری می‌شود.

۵-۳- تحلیل حساسیت

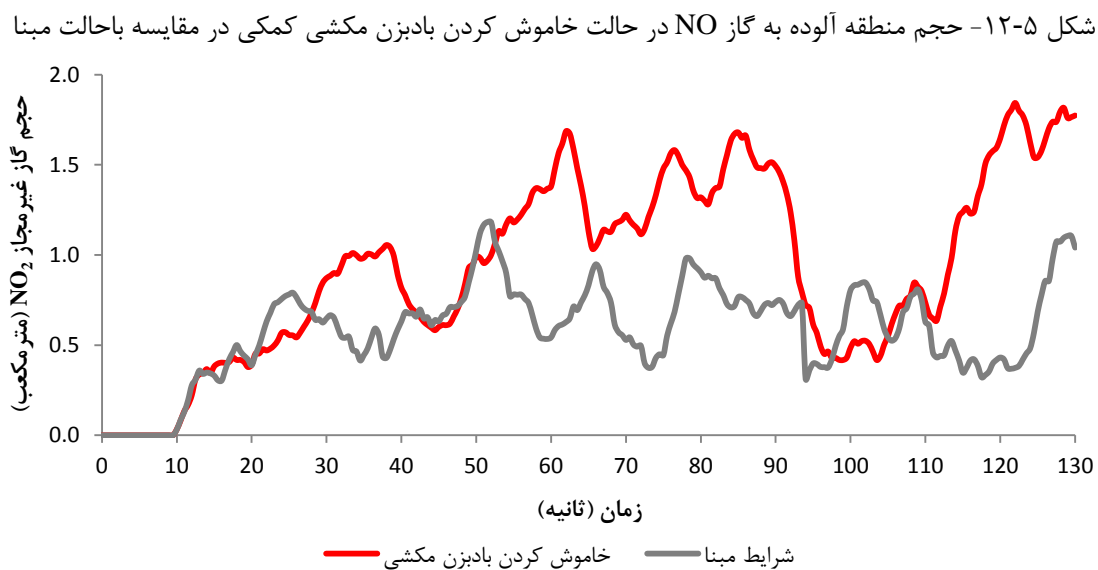
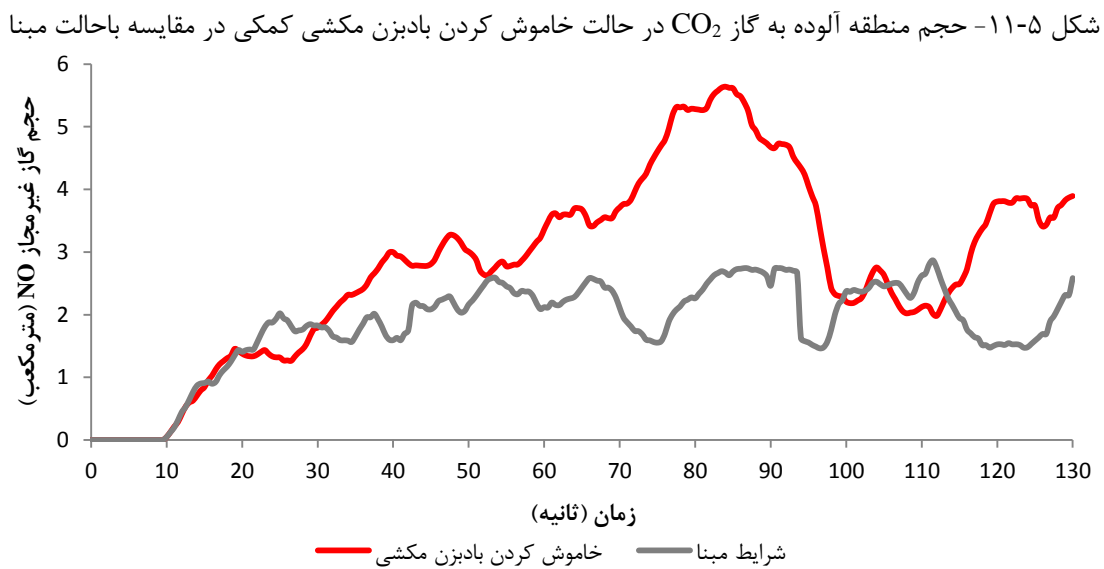
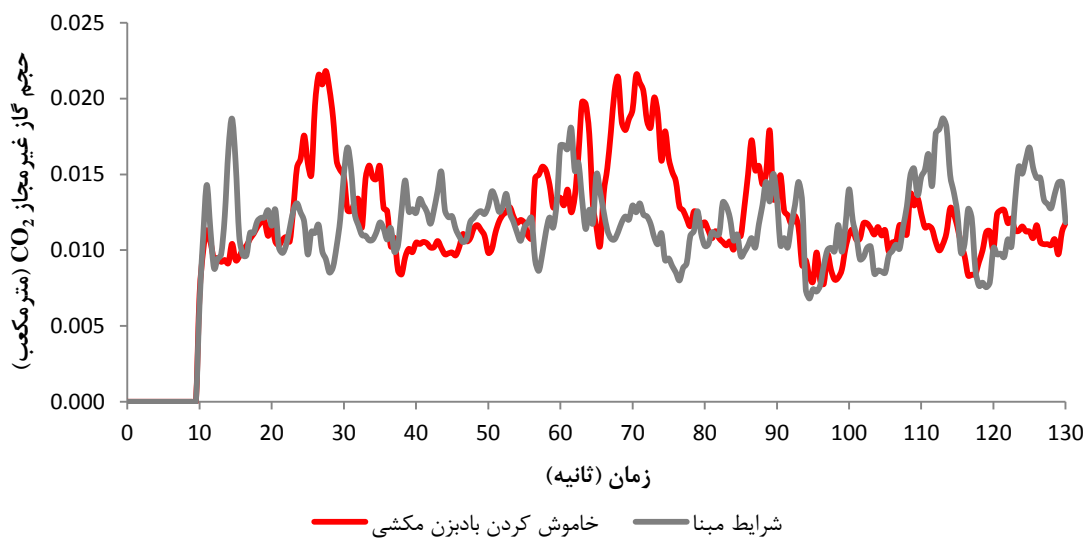
به منظور کاهش غلظت گازهای آلاینده خروجی از آگروز لوکوموتیو در محیط ماشین حفاری تمام مقطع و بهبود سامانه تهویه حالات مختلفی شامل خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی، نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و استفاده هم‌زمان نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و خاموش کردن بادبزن مکشی بررسی شده است. شاخص‌های حجم گازهای غیرمجاز و پراکنندگی آلاینده‌ها برای هر یک از حالت‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۵-۳-۱- خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی

خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی به‌عنوان یکی از راهبردهای موثر در توزیع جریان هوا و کاهش مناطق مرده در فصل قبل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در این بخش تاثیر خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی بر حجم منطقه آلوده و نحوه پراکنش آلاینده‌های خروجی از آگروز لوکوموتیو بررسی شده است. شکل ۵-۱۰ تا شکل ۵-۱۳ حجم منطقه آلوده را در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی و در مقایسه با حالت مبنا نشان می‌دهد.



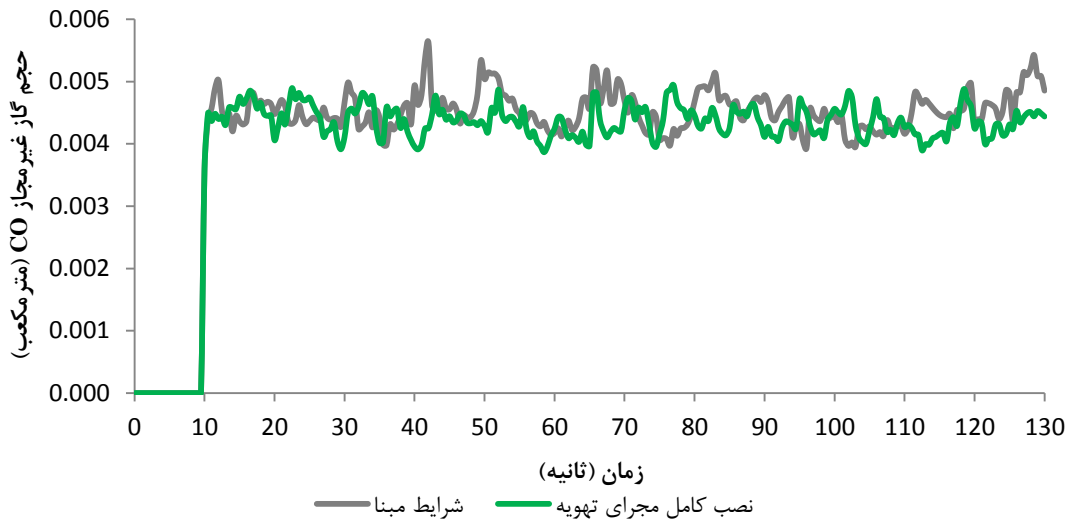
شکل ۵-۱۰- حجم منطقه آلوده به گاز CO در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی در مقایسه با حالت مبنا



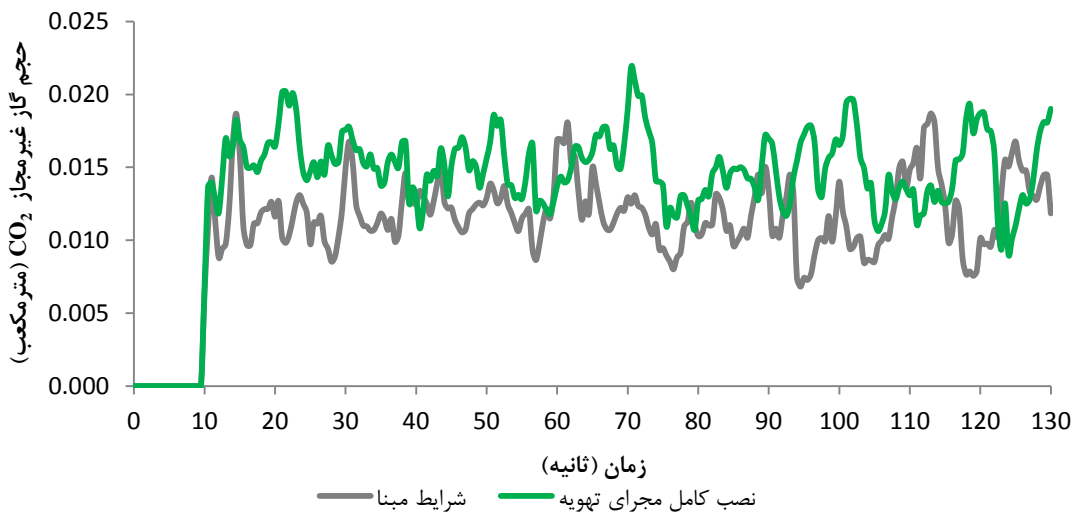
همان‌طور که در شکل ۵-۱۰ تا شکل ۵-۱۳ مشاهده می‌شود، با خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی حجم منطقه آلوده در ماشین حفاری نسبت به شرایط مبنا افزایش یافته است. این افزایش میزان گازهای غیرمجاز در مورد گازهای NO و NO₂ به‌وضوح مشخص است و در مورد گازهای CO و CO₂ تغییر چشمگیری دیده نمی‌شود. به‌طوری‌که در شرایط خاموش کردن بادبزن مکشی، متوسط حجم منطقه آلوده با گازهای NO و NO₂ در طول ۱۲۰ ثانیه کارکرد لوکوموتیو به ترتیب به میزان ۱/۰۴ و ۰/۳۸ مترمکعب بیشتر از شرایط مبنا است. خاموش کردن بادبزن مکشی باوجود کاهش منطقه مرده در ماشین و توزیع بهتر جریان هوا موجب افزایش میزان آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو می‌شود. نحوه پراکنش آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو در شرایط خاموش کردن بادبزن مکشی در شکل پ-۵ تا شکل پ-۸ پیوست نشان داده شده است.

۵-۳-۲- نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری

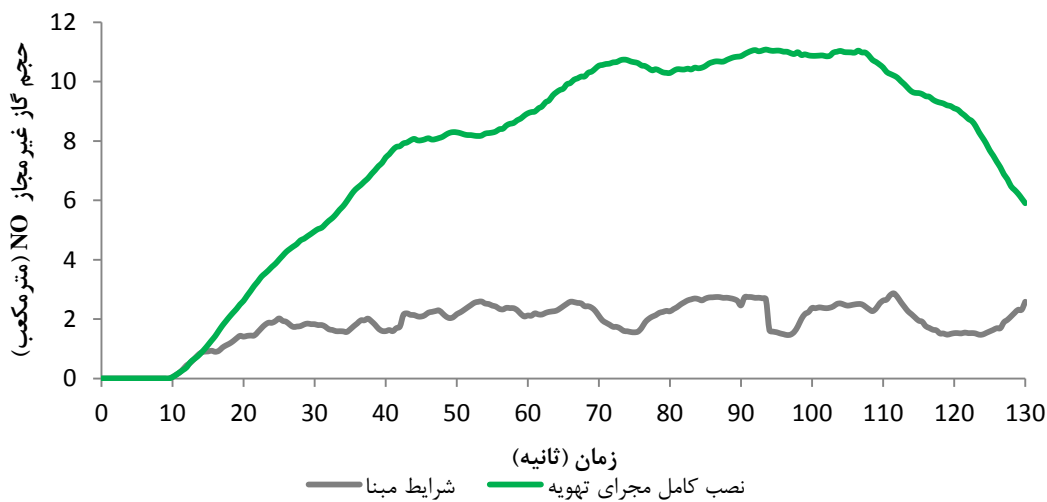
در بخش ۴-۴-۳ نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری به‌عنوان یکی از راهبردهای موثر در بهبود توزیع جریان هوا و کاهش مناطق مرده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این بخش تاثیر نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین بر حجم منطقه آلوده و نحوه پراکنش آلاینده‌های خروجی از اگزوز بررسی شده است. شکل ۵-۱۴ تا شکل ۵-۱۷، حجم منطقه آلوده را در حالت نصب مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری در مقایسه با حالت مبنا نشان می‌دهد.



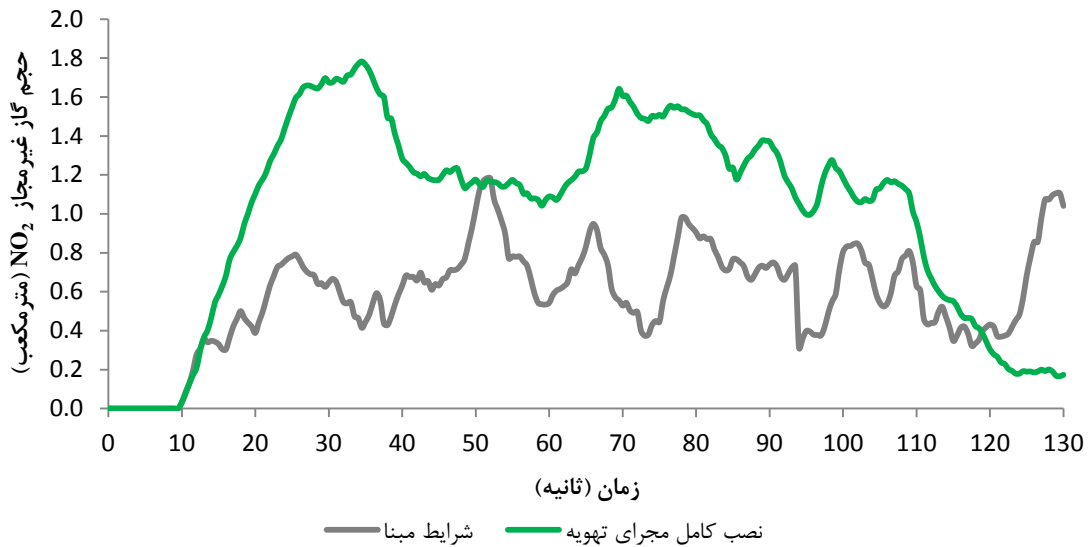
شکل ۵-۱۴- حجم منطقه آلوده به گاز CO در حالت نصب کامل مجرای تهویه در مقایسه با حالت مبنا



شکل ۵-۱۵- حجم منطقه آلوده به گاز CO₂ در حالت نصب کامل مجرای تهویه در مقایسه با حالت مبنا



شکل ۵-۱۶- حجم منطقه آلوده به گاز NO در حالت نصب کامل مجرای تهویه در مقایسه با حالت مبنا

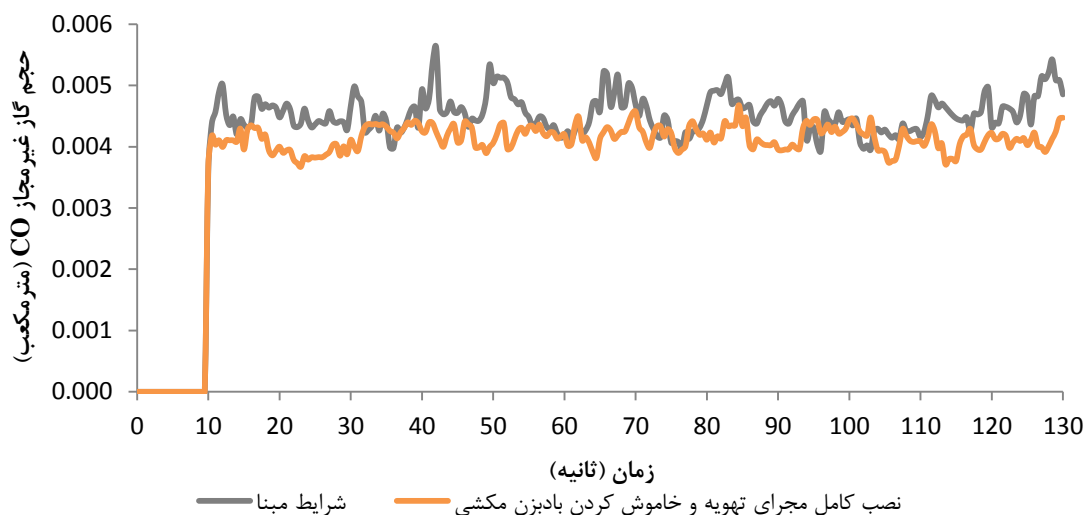


شکل ۵-۱۷- حجم منطقه آلوده به گاز NO₂ در حالت نصب کامل مجرای تهویه در مقایسه با حالت مبنا

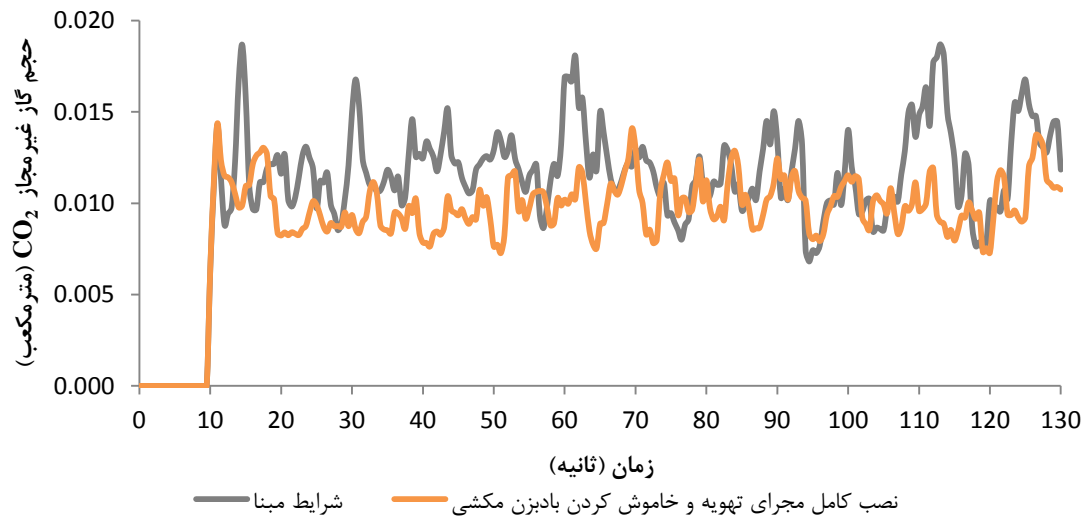
همان‌طور که در شکل ۵-۱۴ تا شکل ۵-۱۷ مشخص شده است، با نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حجم منطقه آلوده نسبت به شرایط مبنا به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. با نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین متوسط حجم منطقه آلوده با گاز NO₂ و NO در طول ۱۲۰ ثانیه کارکرد لوکوموتیو به ترتیب به میزان ۶/۱۳ و ۰/۴۶ مترمکعب بیشتر از شرایط مبنا است. نحوه پراکنش آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو در طول ماشین حفاری تمام مقطع در شکل پ-۹ تا شکل پ-۱۲ پیوست نشان داده شده است.

۵-۳-۳- نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی به‌صورت هم‌زمان

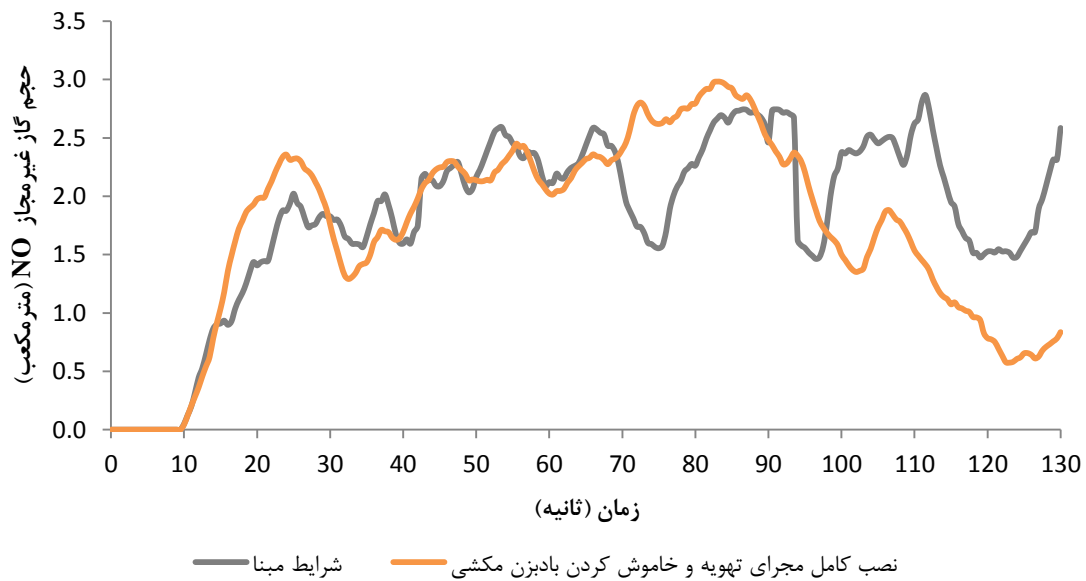
نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا سپر ماشین به همراه خاموش کردن بادبزن مکشی به‌عنوان موثرترین راهبرد بهبود توزیع جریان هوا و کاهش مناطق مرده مشخص شده است. در این بخش نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی بر حجم منطقه آلوده و نحوه پراکنش آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو بررسی شده است. شکل ۵-۱۸ تا شکل ۵-۲۱، حجم منطقه آلوده را در مقایسه راهبرد نصب مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین حفاری و خاموش کردن بادبزن مکشی به صورت هم‌زمان با شرایط مبنا نشان می‌دهد.



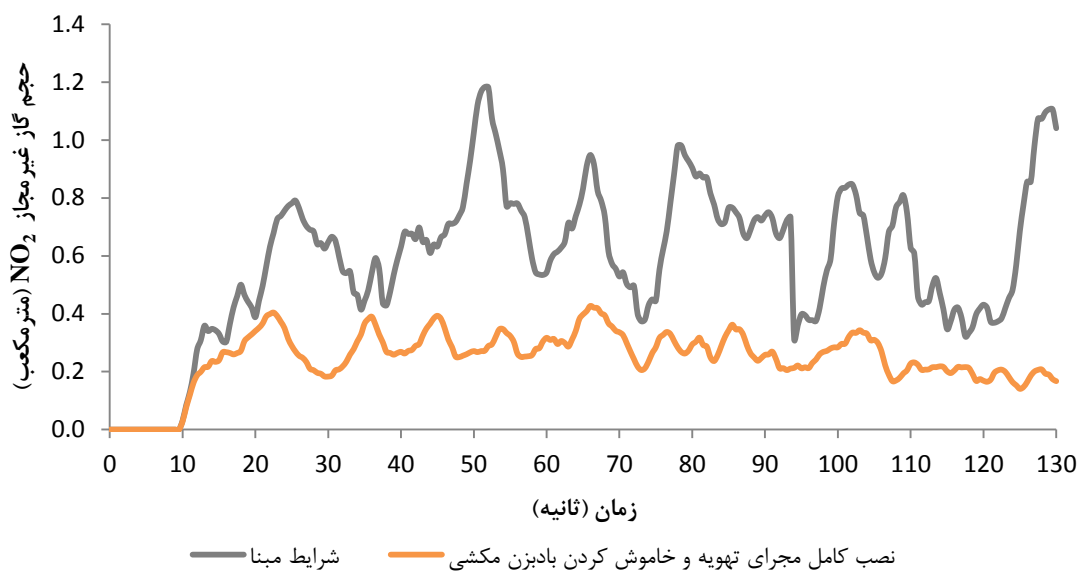
شکل ۵-۱۸- حجم منطقه آلوده به گاز CO در حالت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



شکل ۵-۱۹- حجم منطقه آلوده به گاز CO₂ در حالت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



شکل ۵-۲۰- حجم منطقه آلوده به گاز NO در حالت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



شکل ۵-۲۱- حجم منطقه آلوده به گاز NO₂ در حالت نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی

همان‌طور که در شکل ۵-۱۸ تا شکل ۵-۲۱، مشخص شده است، با نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و خاموش کردن بادبزن مکشی به‌طور هم‌زمان حجم منطقه آلوده نسبت به شرایط مبنا به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. با نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و خاموش کردن بادبزن مکشی به صورت هم‌زمان، متوسط حجم منطقه آلوده با گاز NO و NO₂ در طول ۱۲۰ ثانیه کارکرد لوکوموتیو به ترتیب به میزان ۰/۱۳ و ۰/۳۶ مترمکعب کمتر از شرایط مبنا است. نحوه پراکنش آلاینده‌های خروجی از آگزوز لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع در شکل پ-۱۳ تا شکل پ-۱۶ پیوست نشان داده شده است.

۴-۵- جمع‌بندی

راهبردهای مختلفی به منظور کاهش حجم منطقه آلوده با گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع بررسی و به‌طور خلاصه در جدول ۳-۵، ارائه شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داد، استفاده از راهبرد نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا سپر ماشین و خاموش کردن بادبزن مکشی به‌طور هم‌زمان می‌تواند به‌طور متوسط در طول زمان کارکرد لوکوموتیو حجم منطقه آلوده شده با گازهای CO، CO₂، NO و NO₂ را به ترتیب به میزان حدود ۹، ۱۶، ۷ و ۵۸ درصد نسبت به شرایط مینا کاهش دهد. بنابراین بهترین راهبرد برای کاهش حجم منطقه آلوده استفاده از نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی است.

جدول ۳-۵- حجم منطقه آلوده در حالت‌های مختلف

متوسط حجم منطقه آلوده به گاز (مترمکعب)				
NO ₂	NO	CO ₂	CO	
۰/۶۳۲۸	۱/۹۹۱۰	۰/۰۱۱۹	۰/۰۰۴۵	شرایط مینا
۱/۰۱۴۷	۳/۰۳۱۴	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۴۴	حالت ۱ (خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی)
۱/۰۹۸۲	۸/۱۲۳۵	۰/۰۱۵۰	۰/۰۰۴۴	حالت ۲ (نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا سپر ماشین)
۰/۲۶۸۰	۱/۸۵۷۰	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۴۱	حالت ۳ (نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی)

فصل هشتم

نتیجہ گیری و پیشہ ادا

۶-۱- نتیجه‌گیری

تهویه یکی از قسمت‌های اصلی و پرهزینه تونل‌سازی است. جریان هوای کافی در تونل‌ها برای ایجاد یک محیط امن برای کارکنان و تجهیزات درون تونل ضروری است. برای ایجاد یک محیط امن برای کارکنان و تجهیزات، کمیت و کیفیت جریان هوا در سامانه تهویه هوا باید کافی باشد تا گازها ترقیق شوند، گردوغبار از بین برود و دمای هوا کنترل شود. عدم پیش‌بینی و بررسی سامانه تهویه در ماشین حفاری تمام مقطع می‌تواند موجب بروز برخی بیماری‌های تنفسی، قلبی، ریوی و مشکلات بسیاری از جمله افزایش نارضایتی‌های شغلی، کاهش راندمان کارکنان عملیاتی و یا تلفات جانی و تعطیلی پروژه شود.

تحقیقات زیادی پیرامون مدل‌سازی توزیع جریان هوا و پراکنش گردوغبار، گاز و مشکلات آتش-سوزی در تونل‌ها و معادن انجام شده است. ولی در آن‌ها به توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها در ماشین حفاری تمام مقطع به دلیل هندسه پیچیده و بزرگ ماشین و حضور آلاینده‌های مختلف پرداخته نشده است. هرچند این پژوهش در مورد تونل چم‌شیر انجام شده است اما روش تحقیق و نتایج آن می‌تواند برای سایر تونل‌های حفرشده با ماشین حفاری تمام مقطع استفاده شود.

در این تحقیق، اندازه‌گیری میدانی سرعت و دمای هوا در منطقه تنفسی کارکنان نشان داد میانگین دمای هوا در محیط تنفسی کارکنان بالاتر از حد آسایش حرارتی برای کارکنان شاغل در ماشین حفاری است. همچنین از ناحیه اتاق کنترل تا محدوده قرارگیری بادبزن دهشی کمکی در ناحیه پشتیبان ماشین حفاری تمام مقطع جریان هوای کافی وجود ندارد.

به‌منظور درک بهتر الگوی توزیع جریان هوا و پراکنش گازهای خروجی از اگزوز لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع مدل‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است. مدل‌سازی توزیع جریان هوا و پراکنش آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع نشان داد با توجه به شرایط ورودی‌های جریان هوا در داخل ماشین حدود ۶۰ درصد از حجم سیال هوا در ماشین حفاری تمام مقطع دارای سرعتی کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه است و در مقطع ۶ تا

۱۱ که محل حضور و تردد کارکنان عملیاتی است، منطقه مرده وجود دارد. به منظور کاهش منطقه مرده در ماشین حفاری تمام مقطع یکی از راهکارها افزایش میزان شدت جریان هوای ورودی به قاب اصلی ماشین حفاری است که با تغییر دور بادبزن دهشی کمکی و یا تعویض بادبزن با بادبزن قوی تر امکان پذیر است. مطالعات نشان داد با افزایش ۶۰ درصد میزان سرعت ورودی هوا و یا به عبارتی استفاده از حداکثر توان تولیدی بادبزن های موجود حجم منطقه مرده به میزان ۵/۲۱ درصد کاهش می یابد.

مسیر اصلی جریان هوا پس از بازگشت از سپر ماشین در قسمت تغذیه کننده قطعات پیش ساخته بتنی قاب اصلی ماشین قرار دارد و افزایش سرعت جریان هوا در بادبزن دهشی کمکی تاثیر چشمگیری بر کاهش منطقه مرده در منطقه تنفسی کارکنان ندارد. لذا استفاده از بادبزن با سرعت های بالاتر و افزایش شدت جریان هوا تاثیری بر بهبود توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع نداشته و تنها هزینه های مصرف انرژی را افزایش خواهد داد.

راهبردهای دیگری نظیر خاموش کردن بادبزن مکشی، نصب کامل مجرای تهویه از قسمت پشتیبان تا قاب اصلی ماشین و تاثیر همزمان نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی به منظور کاهش منطقه مرده و بهینه سازی توزیع جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع مطالعه شده است. بررسی ها نشان داد استفاده از راهبرد همزمان نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی می تواند بهبود چشمگیری در توزیع جریان هوا و کاهش وسعت منطقه مرده و حجم آلودگی غیرمجاز گازهای خروجی از آگروز لوکوموتیو در ماشین حفاری تمام مقطع ایجاد کند.

اندازه گیری های میدانی سرعت جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع تونل چمشیر به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل سازی انجام شده است. شاخص ضریب نیکویی برازش برابر ۰/۹۴۶۷ نشان از دقت بالای نتایج مدل سازی با اندازه گیری های میدانی دارد.

۶-۲- پیشنهادها

در پایان این تحقیق می‌توان موارد و مسایل ذیل را به‌عنوان موضوعاتی پیشنهادی و همچنین نو در ادامه تحقیق در زمینه تهویه ماشین حفاری تمام مقطع که با موضوع تحقیق حاضر نیز مرتبط باشد، برای ادامه تحقیقات مولف در آینده و یا به‌عنوان موضوعاتی پیشنهادی برای علاقه‌مندان به فعالیت در این زمینه مطرح نمود.

✓ یکی از موضوعاتی را که می‌توان به‌عنوان تحقیق تکمیلی در کنار این تحقیق نیز

بیان کرد، بررسی پراکنش ذرات دیزلی خروجی از اگزوز لوکوموتیو است، که مستلزم

امکانات و وسایل آزمایشگاهی خاصی برای این تحقیق است.

✓ موضوع پیشنهادی دیگر، مدل‌سازی گازهای منتشرشده از واحدهای سنگی و

جانمایی حس‌گرهای گازی مرتبط در ماشین حفاری تمام مقطع به‌منظور افزایش

ضریب ایمنی در ماشین حفاری تمام مقطع است.

✓ مطالعه حرکت لوکوموتیو در داخل ماشین حفاری تمام مقطع و بررسی پراکنش

آلاینده‌های خروجی از اگزوز لوکوموتیو یکی از پیشنهادهای مولف برای انجام

تحقیقات آتی در این زمینه است.

- 1 United Nations. Economic Commission for Europe and Methane to Markets Partnership. (2010). "Best practice guidance for effective methane drainage and use in coal mines (No. 31)". United Nations Publications.
- 2 De Souza E. (2015). "Cost saving strategies in mine ventilation". In Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (CIM) 2015 Convention, Montreal (pp. 10-12).
- 3 Cory W. (2010) "*Fans and ventilation: a practical guide*" Elsevier.
- 4 مدنی ح، (۱۳۹۳) "تهویه در معادن" انتشارات مرکز نشر دانشگاهی.
- 5 Hartman H. L. Mutmansky J. M. Ramani R. V. and Wang Y. (2012). "Mine ventilation and air conditioning" John Wiley & Sons.
- 6 خسروتاش م، خسروتاش م و ترابی م (۱۳۹۰) "مدیریت شرایط اضطراری تهویه در حفاری با دستگاه تمام مقطع" نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، تهران.
- 7 غلامی م، رسوخی ح، (۱۳۹۲) "یافته های فنی و تجربیات حاصل از اورهال دستگاه حفاری TBM S323" قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا.
- 8 Maidl B. Schmid L. Ritz W. and Herrenknecht M. (2008). "**Hardrock tunnel boring machines**" John Wiley & Sons.
- 9 Maidl B. Thewes M. and Maidl U. (2013). "**Handbook of tunnel engineering**" Wiley Online Library.
- 10 نیکنام ب و مدنی ح، (۱۳۸۹) "تحلیل سه بعدی سیستم تهویه طولی با استفاده از بادبزنی سقفی (مطالعه موردی: گالری بهمن گیر امامزاده هاشم "نشریه انجمن تونل ایران".
- 11 الهی ا، (۱۳۹۳)، "اصول طراحی تهویه در معادن" انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- 12 Wala A. Jacob J. Brown J. and Huang G. (2003). "New approaches to mine-face ventilation" **Mining Engineering**, 55(3), 25-30.
- 13 Hargreaves D. and Lowndes I. (2007). "The computational modeling of the ventilation flows within a rapid development drive" **Tunnelling and underground space technology**, 22(2), 150-160.
- 14 Aminossadati S. and Hooman K. (2008). "Numerical Simulation of ventilation Air flow in underground mine working". Paper presented at the 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Reno, Nevada.
- 15 Zheng Y. and Tien J. (2008). "DPM dispersion study using CFD for underground metal/non-metal mines". Paper presented at the 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Reno, Nevada.
- 16 Diego I. Torno S. Torano J. Menendez M. and Gent M. (2011). "A practical use of CFD for ventilation of underground works". **Tunnelling and underground space technology**, 26(1), 189-200.
- 17 Wang X. Zhang Z. Zhou Z. and Chen H. (2011). "Numerical simulation of TBM construction ventilation in a long diversion tunnel". **Tunnelling and underground space technology**, 26(4), 560-572.
- 18 Sasmito A. P. Birgersson E. Ly H. C. and Mujumdar A. S. (2013). "Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment—A computational fluid dynamic study". **Tunnelling and underground space technology**, 34, 82-95.
- 19 Xu G. Luxbacher K. D. Ragab S. and Schafrik S. (2013). "Development of a remote analysis method for underground ventilation systems using tracer gas and CFD in a simplified laboratory apparatus". **Tunnelling and underground space technology**, 33, 1-11.
- 20 Xu G. Jong E. C. Luxbacher K. D. Ragab S. A. and Karmis M. E. (2015). "Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine". **Safety science**, 74, 140-149.

- 21 Li M. Aminossadati S. M. and Wu C. (2016). “Numerical simulation of air ventilation in super-large underground developments”. **Tunnelling and underground space technology**, 52, 38-43.
- 22 Parra M. Villafuella J. Castro F. and Mendez C. (2006). “Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines”. **Building and Environment**, 41(2), 87-93.
- 23 Luxbacher K. and Erdogan S. (2009). “Modeling methane emissions and ventilation needs by examination of mining induced permeability changes and related damage to ventilation controls”. Paper presented at the 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium.
- 24 Toraño J. Torno S. Menendez M. Gent M. and Velasco J. (2009). “Models of methane behaviour in auxiliary ventilation of underground coal mining”. **International Journal of Coal Geology**, 80(1), 35-43.
- 25 Rodríguez R. and Lombardía C. (2010). “Analysis of methane emissions in a tunnel excavated through Carboniferous strata based on underground coal mining experience”. **Tunnelling and underground space technology**, 25(4), 456-468.
- 26 Ren T. and Balusu R. (2010). “The use of CFD modelling as a tool for solving mining health and safety problems”.
- 27 Toraño J. Torno S. Menéndez M. AND Gent M. (2011). “Auxiliary ventilation in mining roadways driven with roadheaders: validated CFD modelling of dust behavior”. **Tunnelling and underground space technology**, 26(1), 201-210.
- 28 Torno S. Toraño J. Ulecia M. and Allende C. (2013). “Conventional and numerical models of blasting gas behaviour in auxiliary ventilation of mining headings”. **Tunnelling and underground space technology**, 34, 73-81.
- 29 Liu Z. Wang X. Cheng Z. Sun R. and Zhang A. (2014). “Simulation of construction ventilation in deep diversion tunnels using Euler–Lagrange method”. **Computers & Fluids**, 105, 28-38.
- 30 Kurnia J. C. Sasmito A. P. and Mujumdar A. S. (2014a). “CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces”. **Applied Mathematical Modelling**, 38(14), 3467-3484.
- 31 Kurnia J. C. Sasmito A. P. Wong W. Y. and Mujumdar A. S. (2014). “Prediction and innovative control strategies for oxygen and hazardous gases from diesel emission in underground mines”. **Science of the Total Environment**, 481, 317-334.
- 32 Kurnia J. C. Sasmito A. P. Hassani F. P. and Mujumdar A. S. (2015). “Introduction and evaluation of a novel hybrid brattice for improved dust control in underground mining faces: A computational study”. **International Journal of Mining Science and Technology**, 25(4), 537-543.
- 33 Zhou L. Pritchard C. and Zheng Y. (2015). “CFD modeling of methane distribution at a continuous miner face with various curtain setback distances”. **International Journal of Mining Science and Technology**, 25(4), 635-640.
- 34 Wang Y. Luo G. Geng F. Li Y. and Li Y. (2015). “Numerical study on dust movement and dust distribution for hybrid ventilation system in a laneway of coal mine”. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 36, 146-157.
- 35 Yuezhe L. Akhtar S. Sasmito A. P. and Kurnia J. C. (2017). “Prediction of air flow, methane, and coal dust dispersion in a room and pillar mining face”. **International Journal of Mining Science and Technology**, 27(4), 657-662.
- 36 Thiruvengadam M. Zheng Y. and Tien J. C. (2016). “DPM simulation in an underground entry: Comparison between particle and species models”. **International Journal of Mining Science and Technology**, 26(3), 487-494.
- 37 Hu S. Feng G. Ren X. Xu G. Chang P. Wang Z. Zhang Y. Li Z. and Gao Q. (2016). “Numerical study of gas–solid two-phase flow in a coal roadway after blasting”. **Advanced Powder Technology**, 27(4), 1607-1617.
- 38 Xia Y. Yang D. Hu C. Wu C. and Han J. (2016). “Numerical simulation of ventilation and dust suppression system for open-type TBM tunneling work area”. **Tunnelling and**

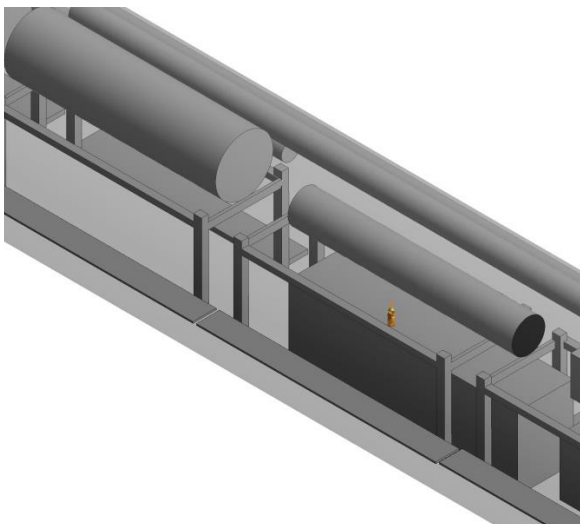
- underground space technology**, 56, 70-78.
- 39 Debia M. Couture C. Njanga P.E. Neesham-Grenon E. Lachapelle G. Coulombe H. Hallé S. and Aubin S. (2017). "Diesel engine exhaust exposures in two underground mines". **International Journal of Mining Science and Technology**, 27(4), 641-645.
- 40 Zheng Y. Lan H. Thiruvengadam M. Tien J. C. and Li Y. (2017). "Effect of single dead end entry inclination on DPM plume dispersion". **International Journal of Mining Science and Technology**, 27(3), 401-406.
- 41 Feroze T. and Genc B. (2017). "Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD". **International Journal of Mining Science and Technology**, 27(2), 253-259.
- 42 Geng F. Luo G. Zhou F. Zhao P. Ma L. Chai H. and Zhang T. (2017). "Numerical investigation of dust dispersion in a coal roadway with hybrid ventilation system". **Powder technology**, 313, 260-271.
- 43 Xu G. Chang P. Mullins B. Zhou F. and Hu S. (2018). "Numerical study of diesel particulate matter distribution in an underground mine isolated zone". **Powder technology**, 339, 947-957.
- 44 Hasheminasab F. Bagherpour R. and Aminossadati S. M. (2019). "Numerical simulation of methane distribution in development zones of underground coal mines equipped with auxiliary ventilation". **Tunnelling and underground space technology**, 89, 68-77.
- 45 Morla R. Karekal S. and Godbole A. (2019). "DPM flow pattern of LHD in underground mines with different ventilation conditions". **Journal of Mining and Environment**, 10(2), 315-326.
- 46 Chang P. Xu G. Zhou F. Mullins B. Abishek S. and Chalmers D. (2019). "Minimizing DPM pollution in an underground mine by optimizing auxiliary ventilation systems using CFD". **Tunnelling and underground space technology**, 87, 112-121.
- 47 Deer D. (1981). "Adverse geology and TBM tunneling problems". Paper presented at the Rapid excavation and tunneling conference, San Francisco, California
- 48 Satari G. Ajodani S. and Bathaie H. (2011). "Mechanized Tunneling in Water and Gas Crisis, Case Study of Zagros Tunnel". Paper presented at the First Asian and 9th Iranian tunneling symposium, Tehran, Iran .
- ۴۹ سعادت‌ای، زین‌العابدینی م، (۱۳۹۴) "اصول شبیه‌سازی مقدماتی و پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزارهای **Fluent** و **CFX**" شرکت خدمات مهندسی و آموزشی پرداد پترو دانش.
- ۵۰ شرکت سابیر، (۱۳۹۳) "مطالعات طراحی تفضیلی تونل انتقال آب چم‌شیر گزارش طرح تهویه حین اجرای تونل" گزارشات داخلی شرکت سابیر.
- ۵۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۸۵) "مقررات تهویه معدن نشریه شماره ۳۵۰".
- 52 Gangal M. (2012). "Summary of worldwide underground mine diesel regulations". Paper presented at the Proceedings of the 18th MDEC Conference, Toronto, Ontario.
- 53 Stinnette J. and De Souza E. (2013). "Establishing total airflow requirement for underground metal/non-metal mines with Tier IV Diesel Equipment". Paper presented at the 23rd World Mining Congress and Expo.
- 54 BSI. (2011). "Code of practice for health and safety in tunnelling in the construction industry". In Standard No. BS 6164: 2011. British Standard Institute.
- 55 ITA. (2008). "Guidelines for good occupational health and safety practice in tunnel construction". Avignon, France.
- 56 Zhang Y. (2004). "**Indoor air quality engineering**" CRC Press. Boca Raton, Florida
- 57 Caré I. Bonthoux F. and Fontaine J. R. (2014). "Measurement of air flow in duct by velocity measurements". In EPJ Web of Conferences (Vol. 77, p. 00010). EDP Sciences.
- 58 Lagus P. Butler P. and Fleming K. (2006). "A comparison of Tchebycheff, equal area and tracer gas air flow rate measurements". Paper presented at the Proceedings of the 29th NRC/DOE Nuclear Air Cleaning Conference.

- 59 BSI. (1983). "Method for measurement of particulate emission including grit and dust (simplified method)". In Standard No. BS 3405:1983. British Standard Institute.
- 60 سازمان ملی استاندارد ایران، (۱۳۹۴) "عملکرد حرارتی در محیط‌های انسان ساخت - تعیین دبی هوا در کاربردهای ساختمانی از طریق روش اندازه‌گیری میدانی".
- 61 McPherson M. J. (2012). "**Subsurface ventilation and environmental engineering**" Springer Science & Business Media.
- 62 Ower E. and Pankhurst R. C. (2014). "**The measurement of air flow**". Elsevier.
- 63 باکند ش، (۱۳۸۷) "روش‌های نمونه‌برداری از آلاینده‌های هوا" موسسه انتشاراتی اندیشه رفیع.
- 64 Cui W. Cao G. Park J. H. Ouyang Q. and Zhu Y. (2013). "Influence of indoor air temperature on human thermal comfort, motivation and performance". **Building and Environment**, 68, 114-122.
- 65 Goodfellow H. D. (2001). "**Industrial ventilation design guidebook**" Elsevier.
- 66 شهرخانی م، (۱۳۹۰) "مدلسازی در دینامیک سیالات محاسباتی" انتشارات یزدا.
- 67 پهلوان م، (۱۳۹۶) "مرجع کامل شبکه بندی ANSYS ICEM CFD" موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران.
- 68 Yeoh G .H. and Tu J. (2010). "**Computational techniques for multiphase flows**" Butterworth-Heinemann.
- 69 Malalasekera W. and Versteeg H. (2007). "**An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method**" Pearson education.
- 70 Schlichting H. and Gersten K. (2016). "**Boundary-layer theory**". Springer.
- 71 Ansys, I. (2010). "ANSYS meshing user's guide". Vol, 15317, 724-746 .
- 72 توحیدی ا و غفاری قهرودی ه، (۱۳۹۵) "راهنمای جامع ANSYS FLUENT (مقدماتی)" موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران.
- 73 Tu J. Yeoh G. H. and Liu C. (2018). "**Computational fluid dynamics: a practical approach**" Butterworth-Heinemann.
- 74 Cebeci T. (2013). "**Analysis of turbulent flows with computer programs**" Butterworth-Heinemann.
- 75 Kurnia J. C. Sasmito A. P. and Mujumdar A. S. (2014b). "Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines". **Tunnelling and underground space technology**, 42, 206-215 .
- 76 اسماعیل پور ک، رحیمی جونوش ا و توحیدی ا، (۱۳۹۳) "راهنمای جامع ANSYS CFX" موسسه فرهنگی هنری دیباگران تهران.
- 77 کاظمی لاری م، خواجه پور س، کیانی ف و اکبری م، (۱۳۹۱) "مدل‌سازی و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی با ANSYS CFX" انتشارات عابد.
- 78 Song Y. Cheng D. and Zhao L. (2018). "**Microfluidics: Fundamentals, Devices, and Applications**". John Wiley & Sons.
- 79 وزارت تعاون، کار و رفاه اجتماعی، (۱۳۹۱) "آیین نامه ایمنی در معادن".
- 80 Fang Y. Fan J. Kenneally B. and Mooney M. (2016). "Air flow behavior and gas dispersion in the recirculation ventilation system of a twin-tunnel construction". **Tunnelling and underground space technology**, 58, 30-39.
- 81 Papar R. Szady A. Huffer W. D. Martin V. and McKane A. (1999). "Increasing energy efficiency of mine ventilation systems".
- 82 Brake D. and Nixon T. (2008). "Correctly estimating primary airflow requirements for underground metalliferous mines". Paper presented at the Proceedings Tenth Underground Operators' Conference. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- 83 Legates DR M. G. (1999). "Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". **Water resources research**, 35(1), 233-

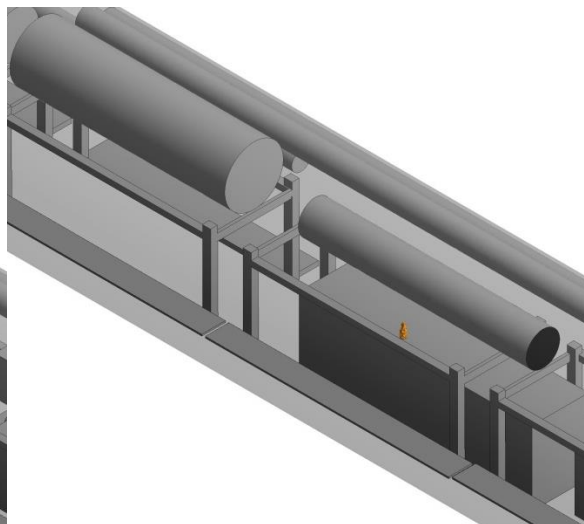
241 .

- 84 Moriasi D. N. Arnold J. G. Van Liew M. W. Bingner R. L. Harmel R. D. and Veith T. L. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". **Transactions of the ASABE**, 50(3), 885-900 .
- 85 Vermeulen R. Silverman D. Garshick E. Vlaanderen J. Portengen L. and Steenland K. (2014). "Exposure-response estimates for diesel engine exhaust and lung cancer mortality based on data from three occupational cohorts". **Environment Health Perspect**, 122-172.
- 86 Galea K. S. Mair C. Alexander C. de Vocht F. and van Tongeren M. (2015). "Occupational exposure to respirable dust, respirable crystalline silica and diesel engine exhaust emissions in the London tunnelling environment". **Annals Of Occupational Hygiene**, 60(2), 263-269 .
- 87 HSE (2005). EH40/2005 Workplace exposure limits. (also available online www.hse.gov.uk/pubns/priced/eh40.pdf)
- 88 OSHWiki (2013). Workplace exposure to dusts and aerosols diesel exhaust. URL: http://oshwiki.eu/wiki/Workplace_exposure_to_dusts_and_aerosols_-_diesel_exhaust. Last accessed 31st March 2015
- 89 NIOSH (2002). NIOSH hazard review: health effects of occupational exposure to respirable crystalline silica. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2002-129.
- 90 HSE (2013) EH40/2005 Workplace exposure limits Containing the list of workplace exposure limits for use with the Control of Substances Hazardous to Health Regulations (as amended) ISBN 978 0 7176 6446 7.

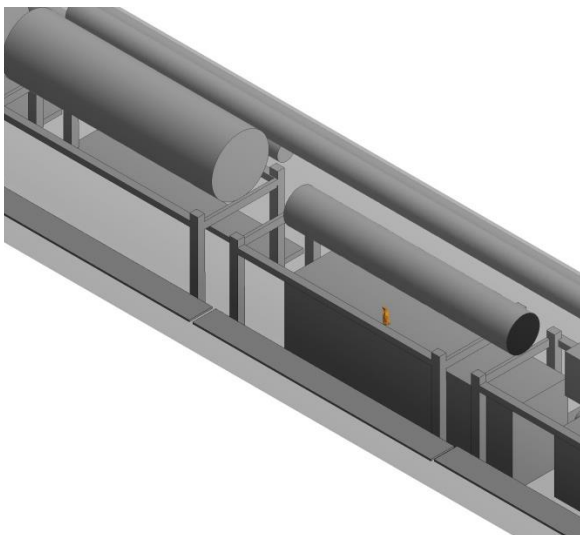
پوست



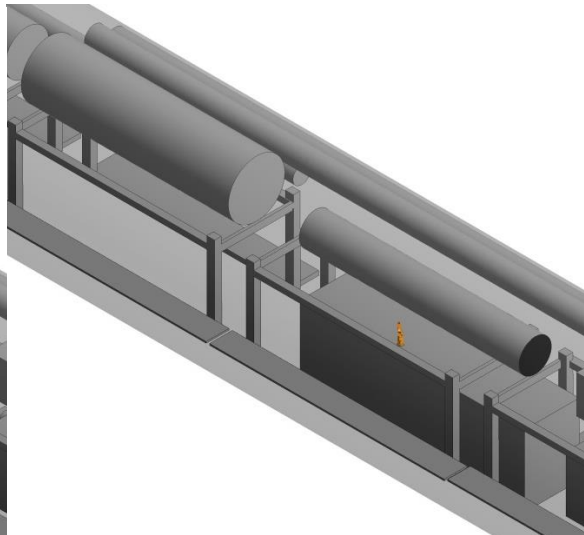
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۲۰ ثانیه



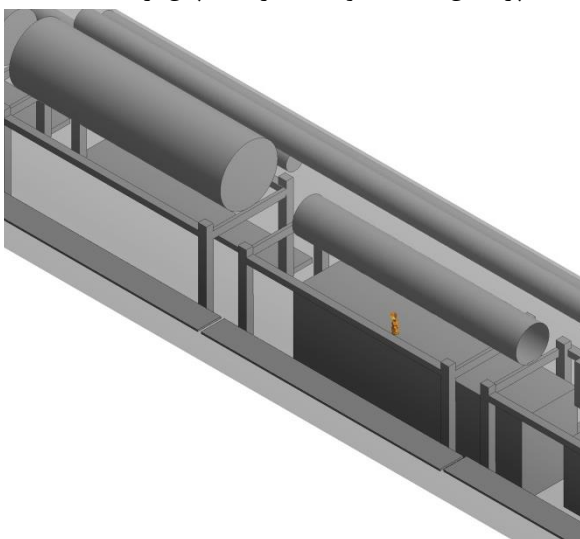
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۰ ثانیه



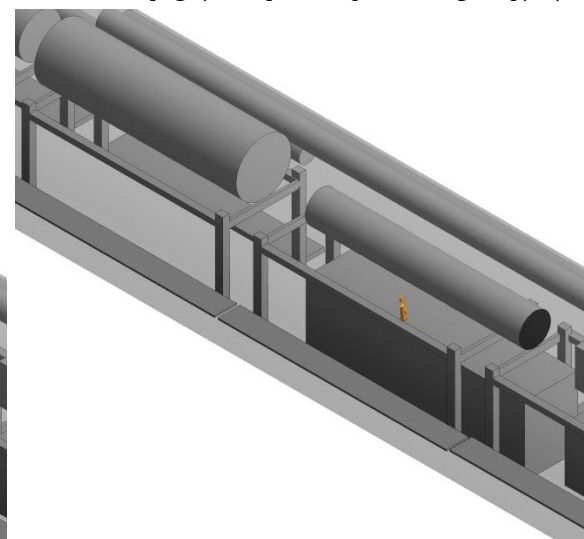
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۳۰ ثانیه

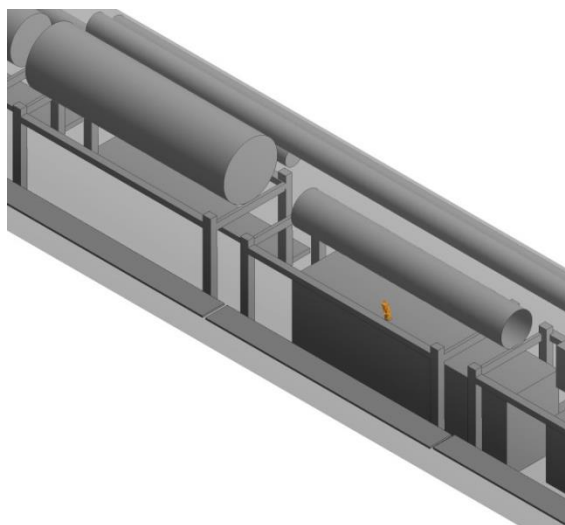


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۶۰ ثانیه

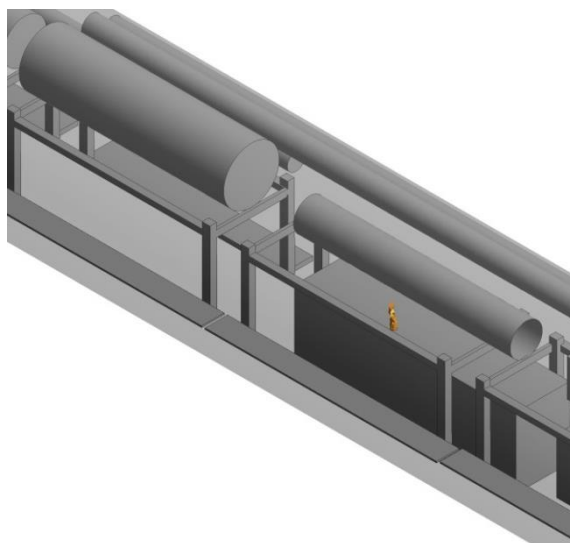


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۵۰ ثانیه

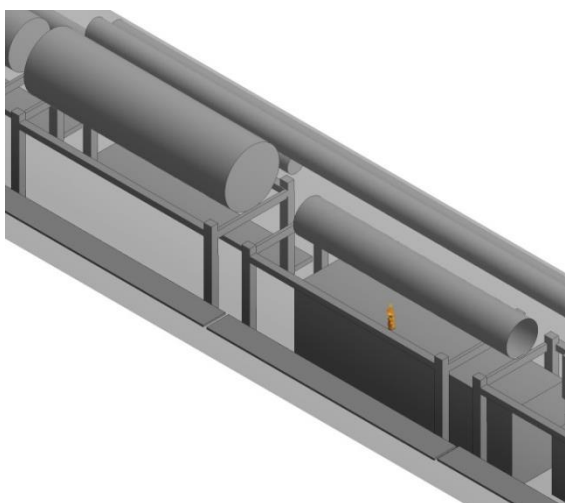
شکل پ - ۱ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO بر واحد زمان در شرایط مبنا



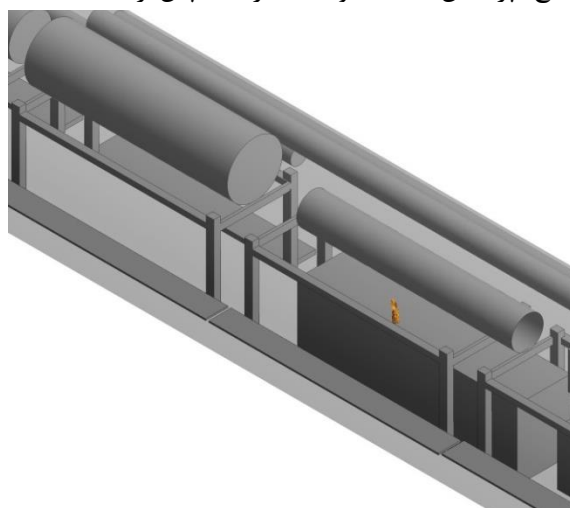
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۸۰ ثانیه



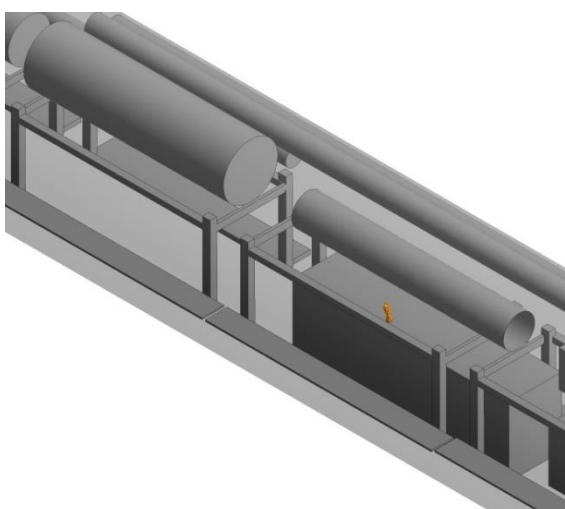
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۷۰ ثانیه



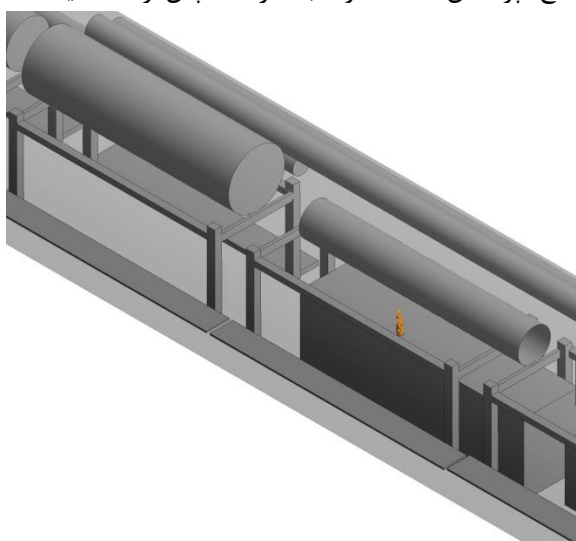
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۹۰ ثانیه

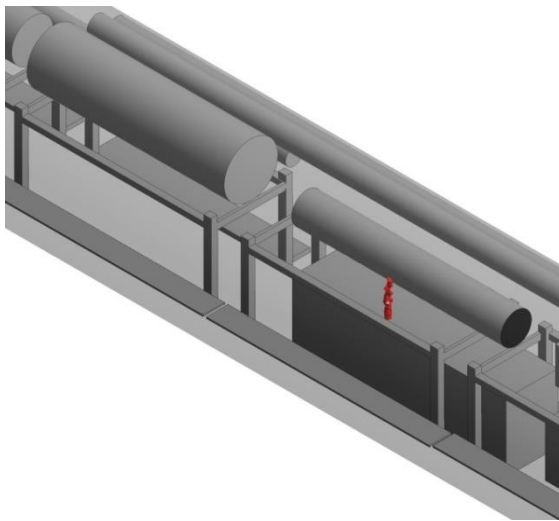


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۲۰ ثانیه

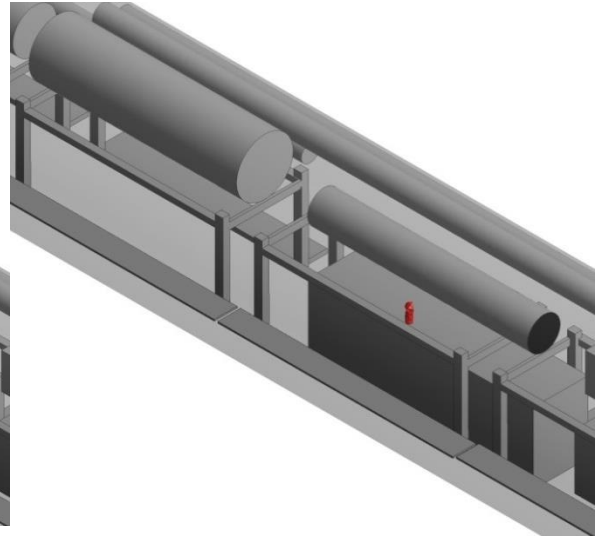


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۱۰ ثانیه

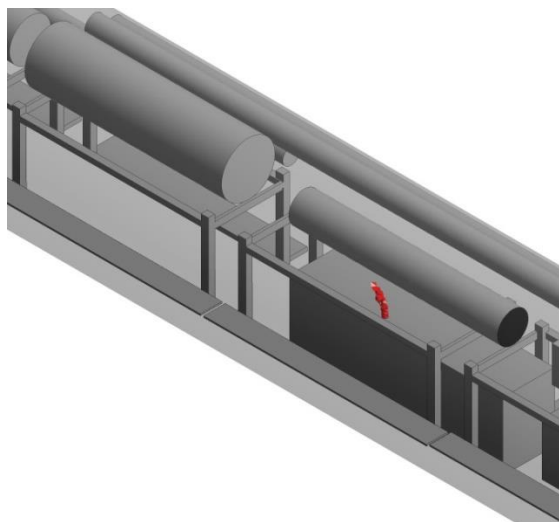
ادامه شکل پ - ۱ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO بر واحد زمان در شرایط مبنا



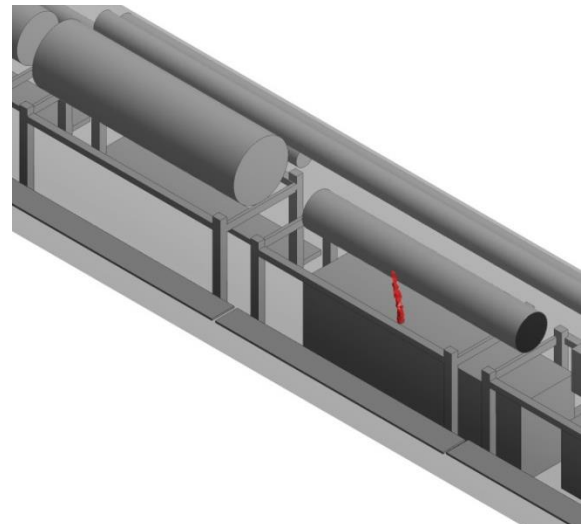
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۲۰ ثانیه



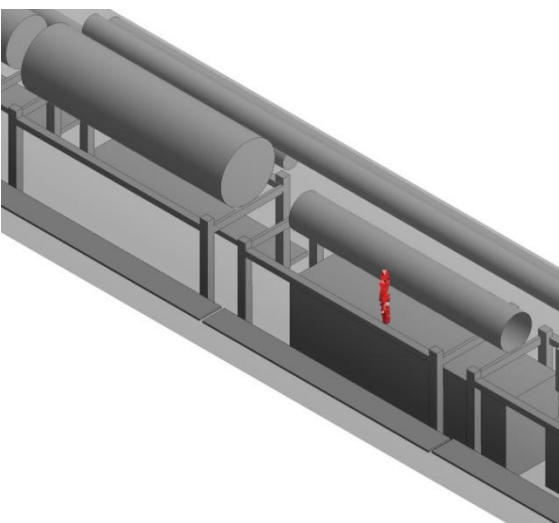
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۰ ثانیه



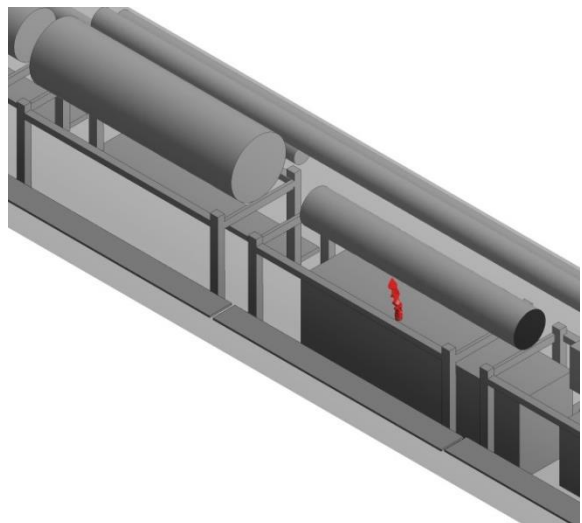
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۳۰ ثانیه

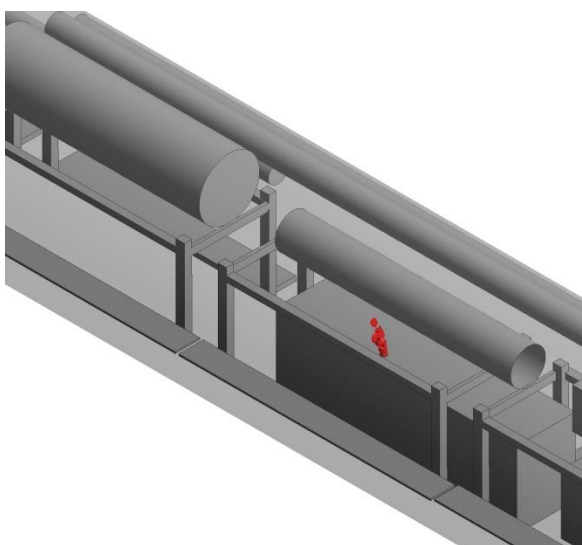


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۶۰ ثانیه

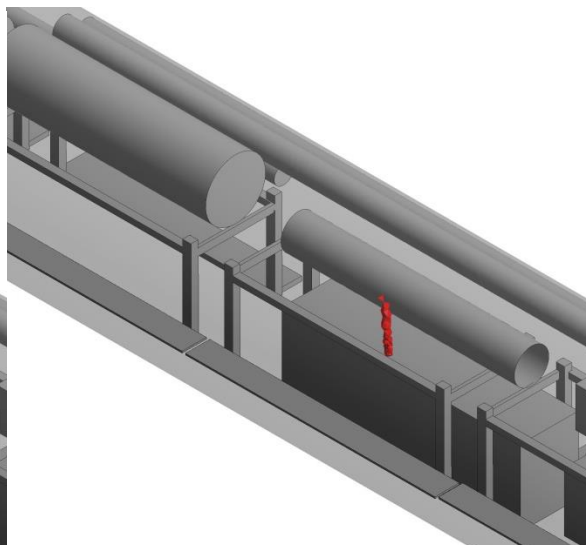


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۵۰ ثانیه

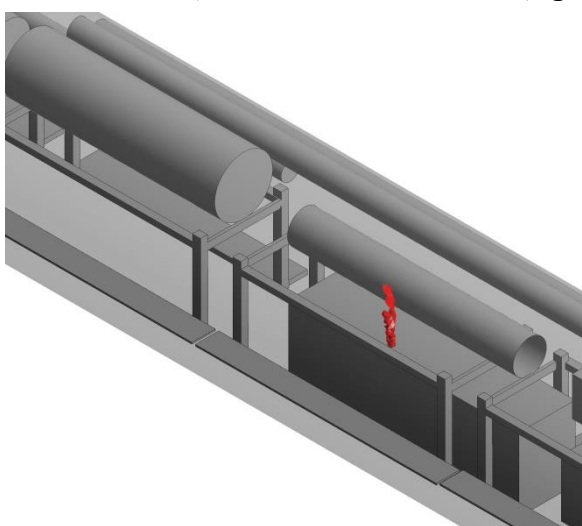
شکل پ - ۲ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ بر واحد زمان در شرایط مبنا



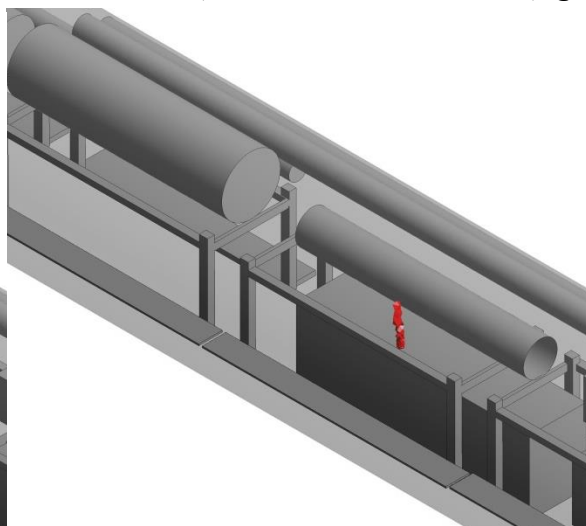
ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۸۰ ثانیه



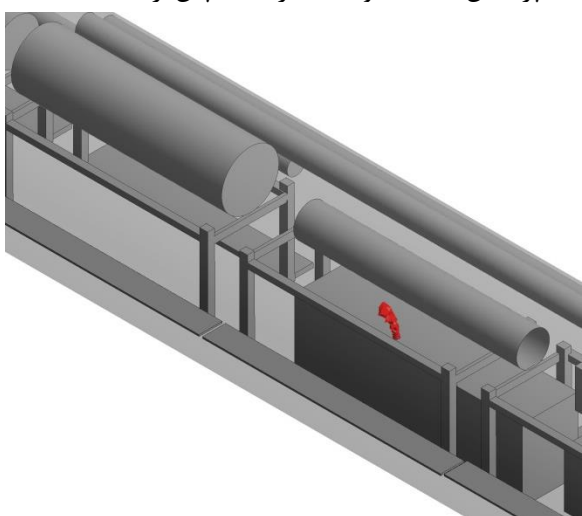
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۷۰ ثانیه



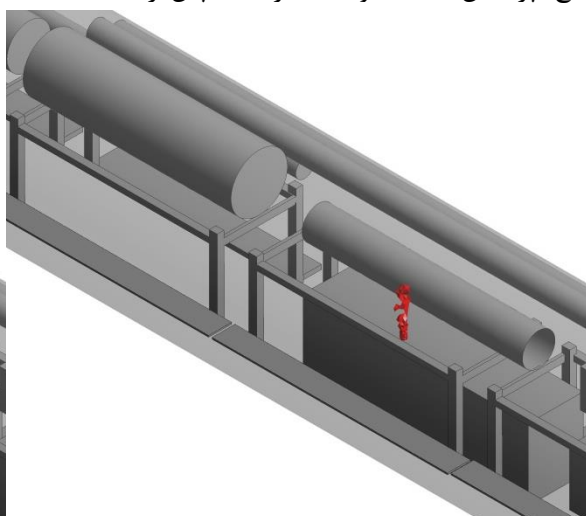
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۹۰ ثانیه

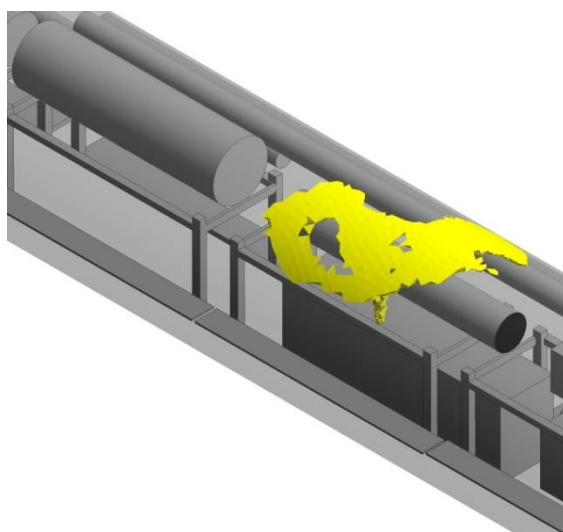


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۲۰ ثانیه

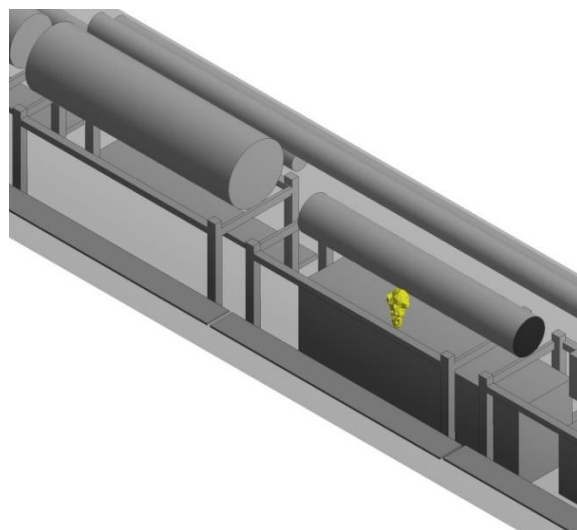


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۱۰ ثانیه

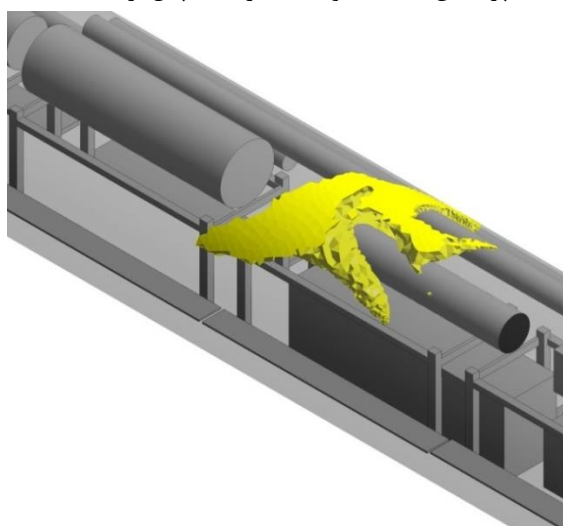
ادامه شکل پ - ۲ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ بر واحد زمان در شرایط مبنا



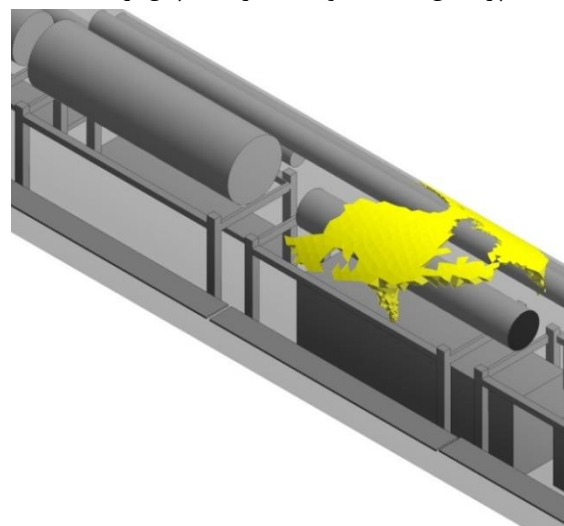
(ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۲۰ ثانیه



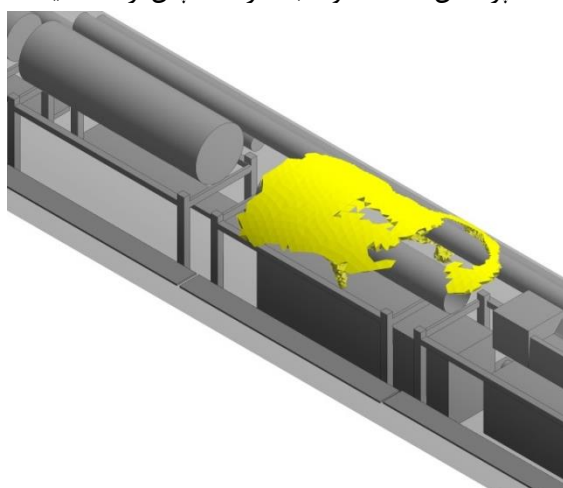
(الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۰ ثانیه



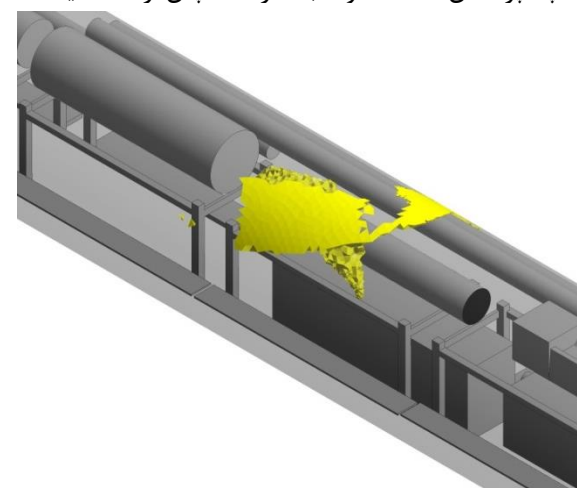
(ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۴۰ ثانیه



(پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۳۰ ثانیه

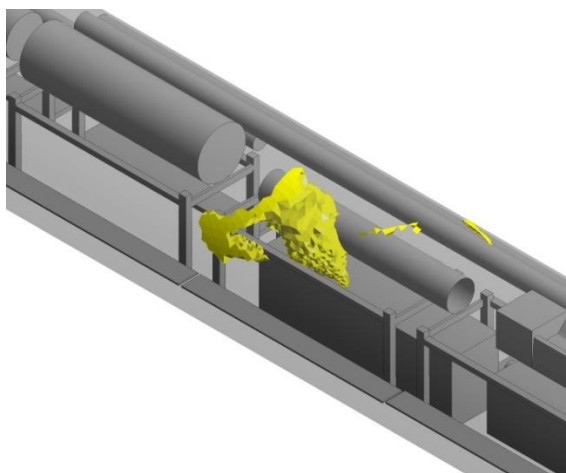


(ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۶۰ ثانیه

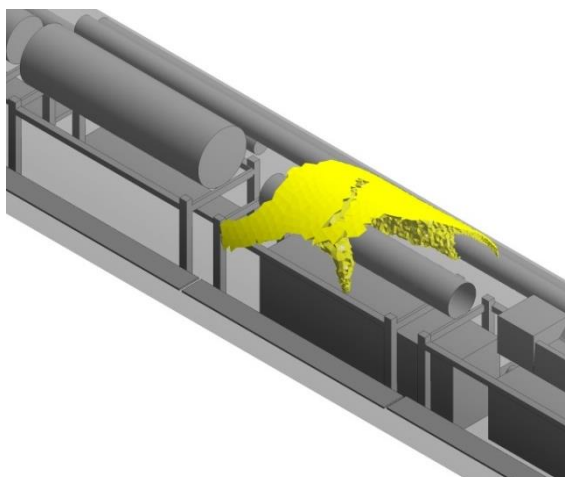


(ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۵۰ ثانیه

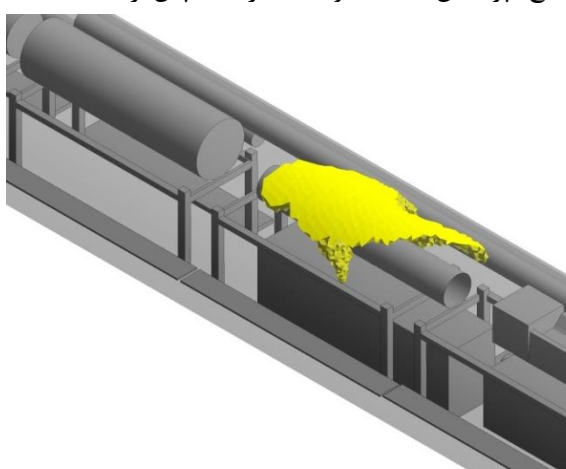
شکل پ - ۳ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO بر واحد زمان در شرایط مبنا



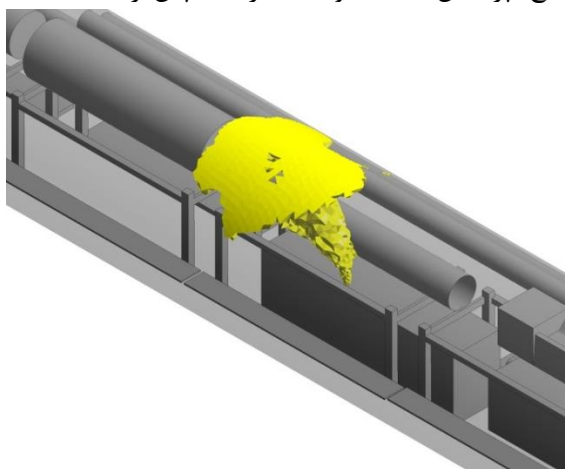
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۸۰ ثانیه



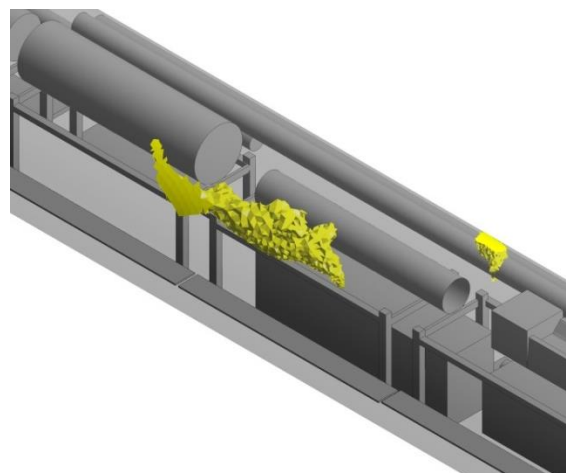
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۷۰ ثانیه



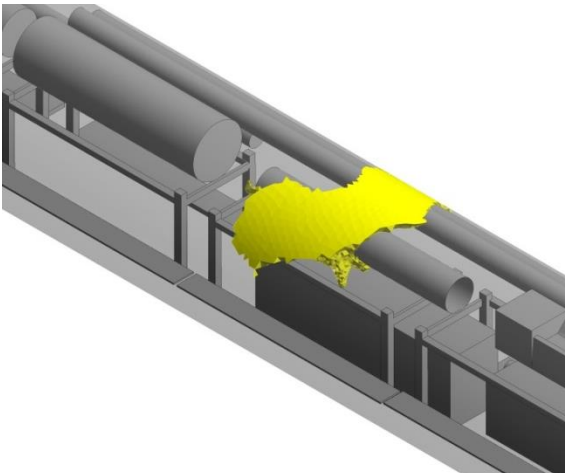
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۹۰ ثانیه

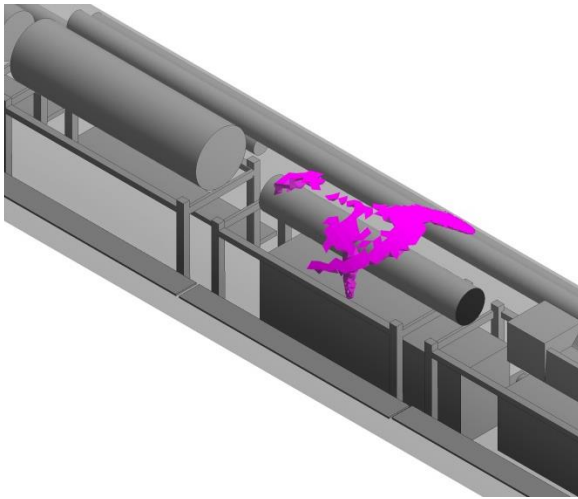


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۲۰ ثانیه

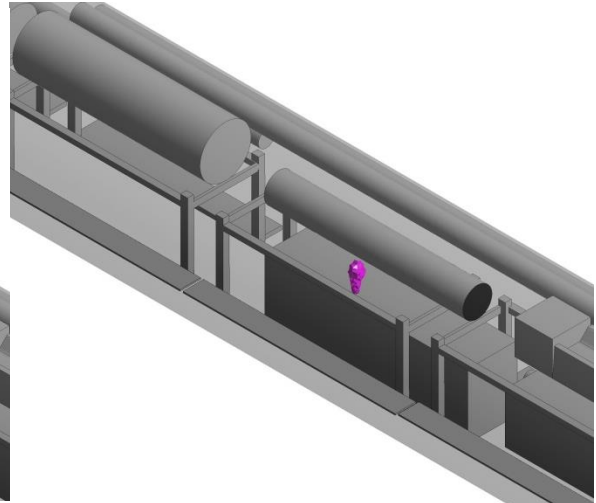


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۱۰ ثانیه

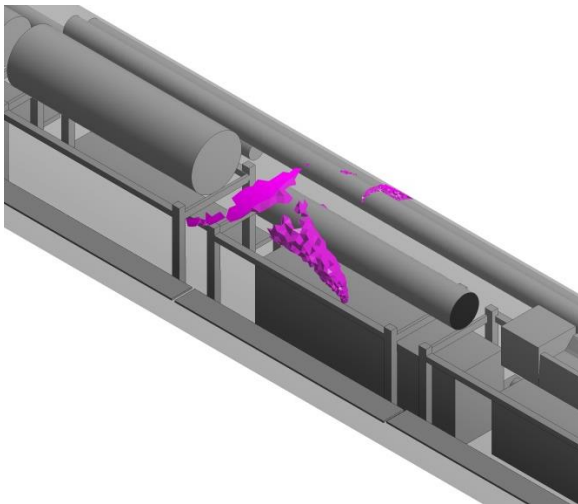
ادامه شکل پ - ۳ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO بر واحد زمان در شرایط مینا



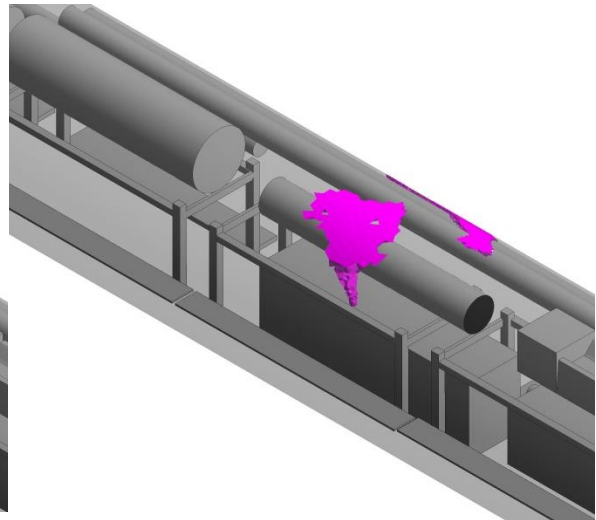
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۲۰ ثانیه



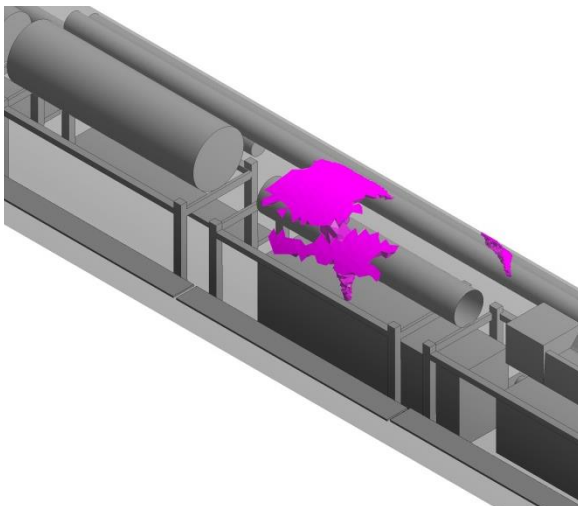
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۰ ثانیه



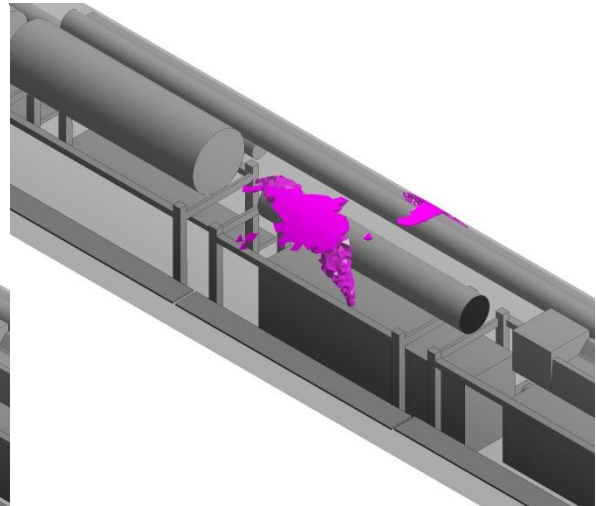
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۳۰ ثانیه

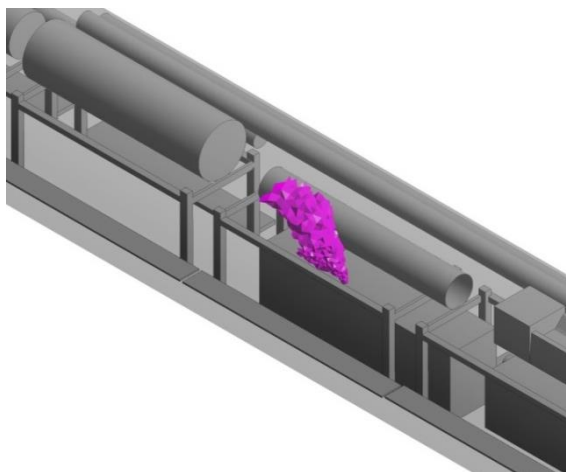


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۶۰ ثانیه

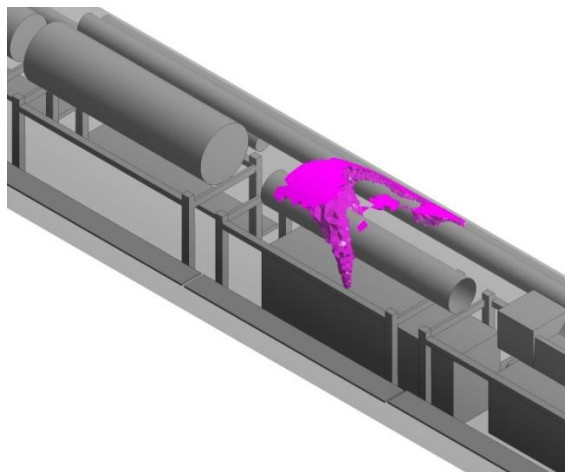


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۵۰ ثانیه

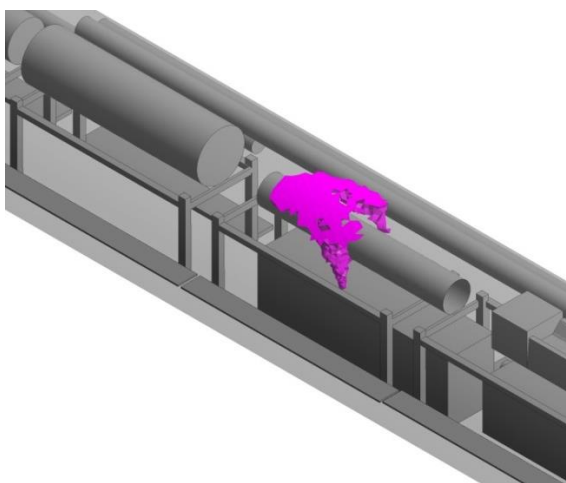
شکل پ - ۴ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 بر واحد زمان در شرایط مبنا



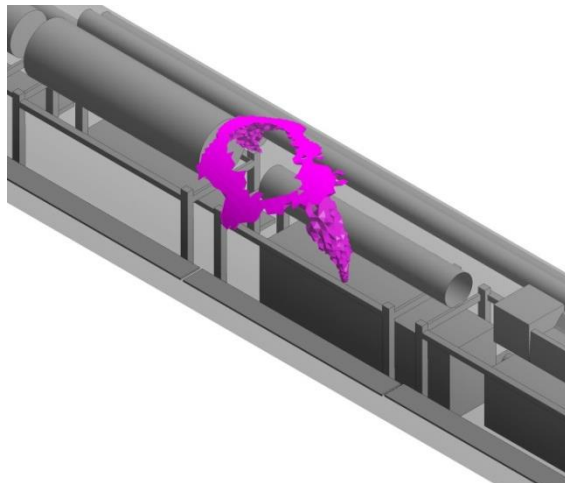
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۸۰ ثانیه



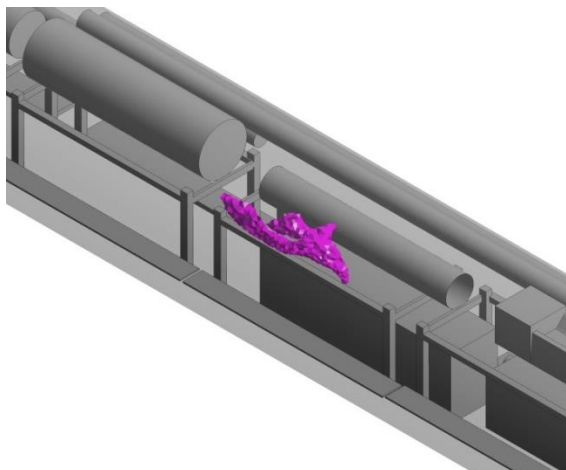
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۷۰ ثانیه



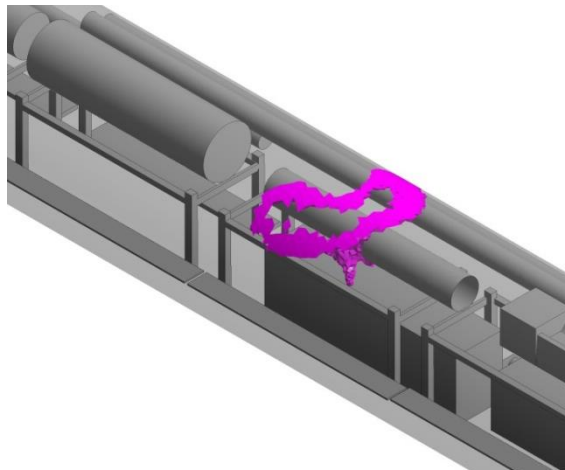
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۹۰ ثانیه

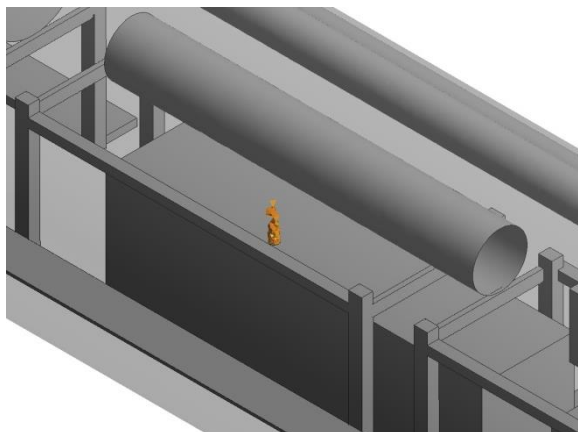


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۲۰ ثانیه

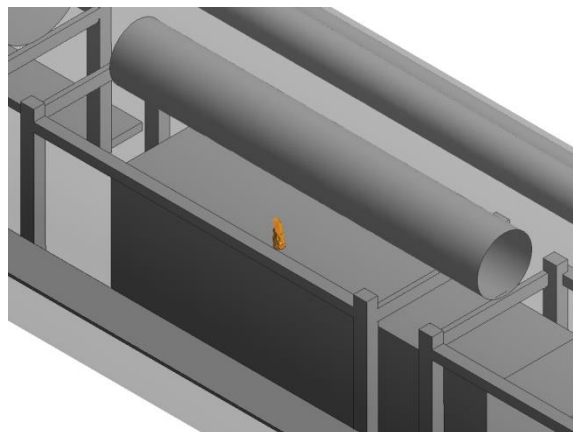


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۱۰ ثانیه

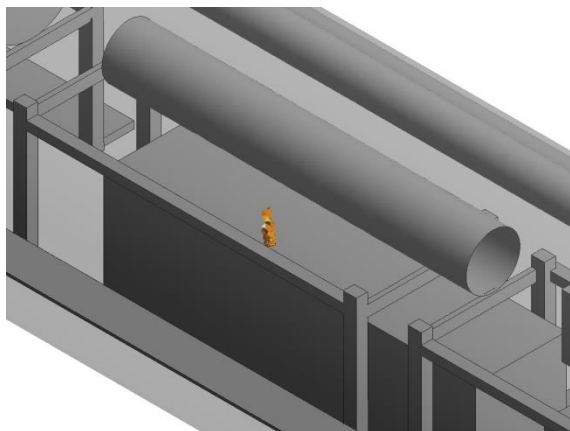
ادامه شکل پ - ۴ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 بر واحد زمان در شرایط مبنا



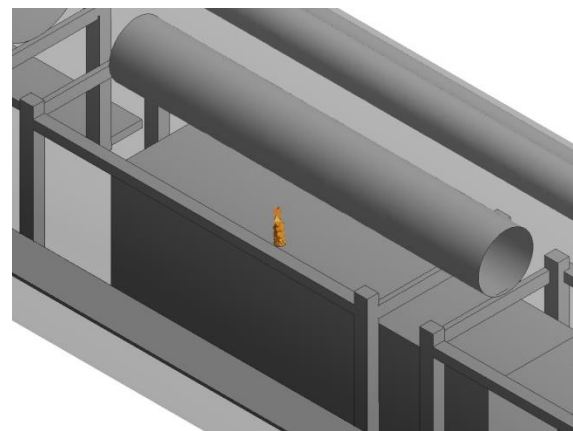
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۲۰ ثانیه



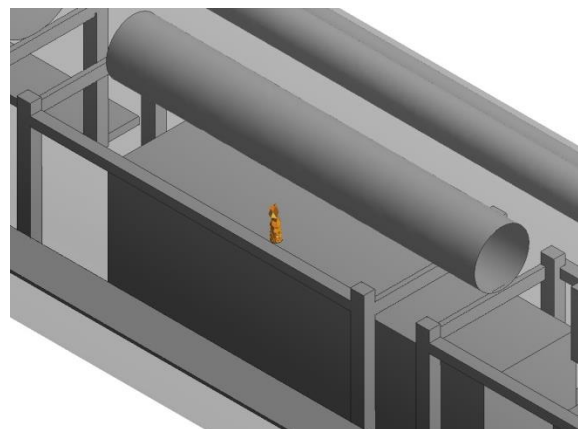
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۰ ثانیه



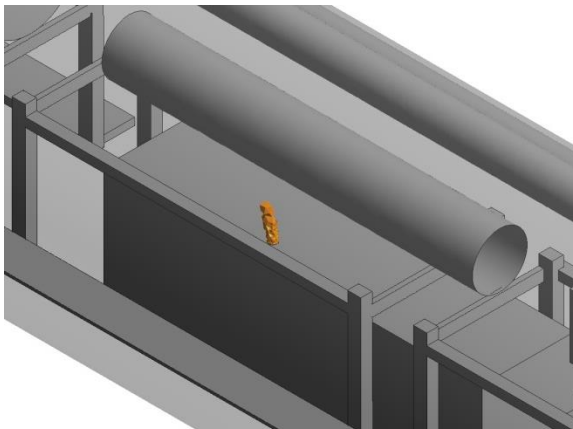
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۳۰ ثانیه

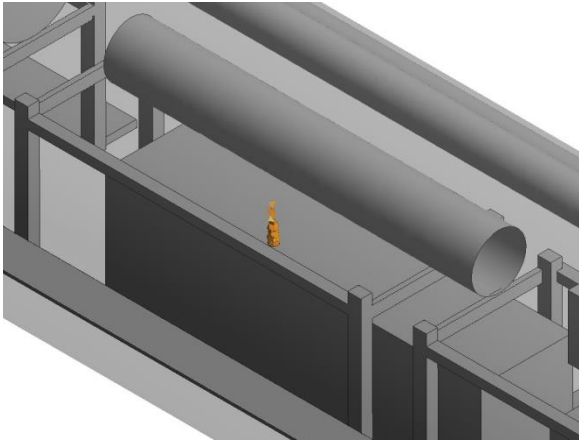


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۶۰ ثانیه

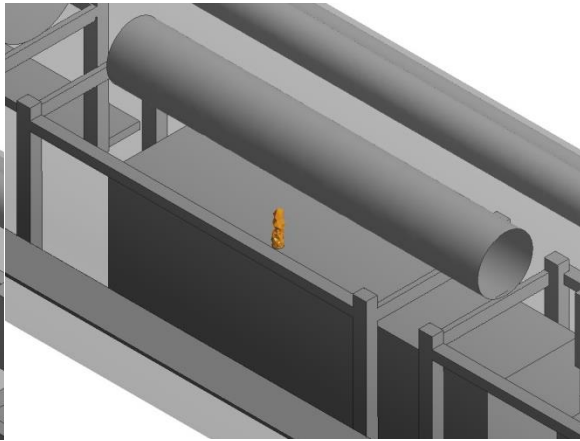


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۵۰ ثانیه

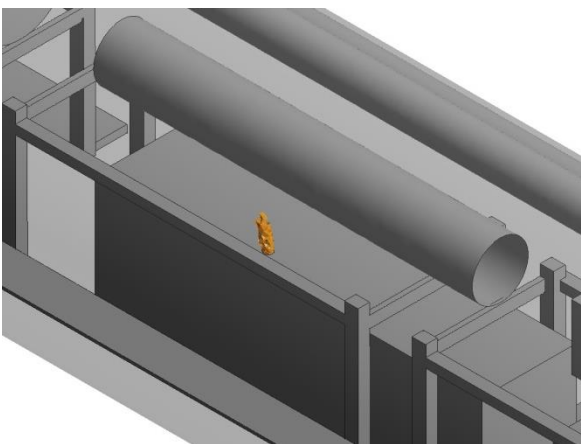
شکل پ - ۵- پراکنش منطقه آلوده به گاز CO بر واحد زمان در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی



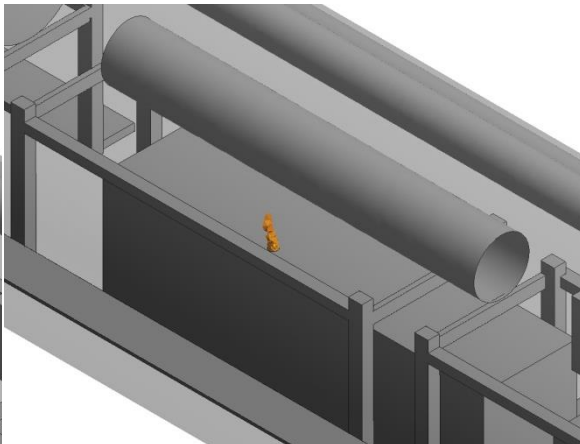
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۸۰ ثانیه



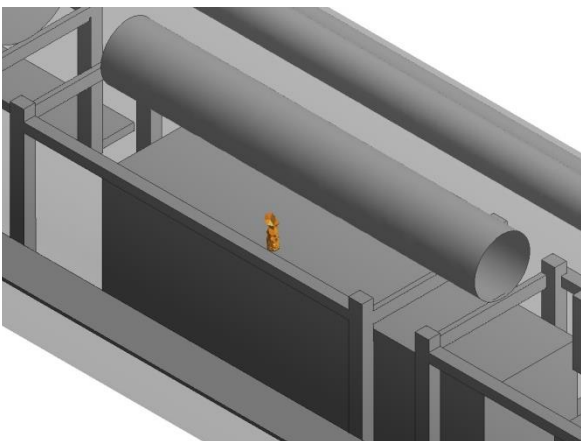
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۷۰ ثانیه



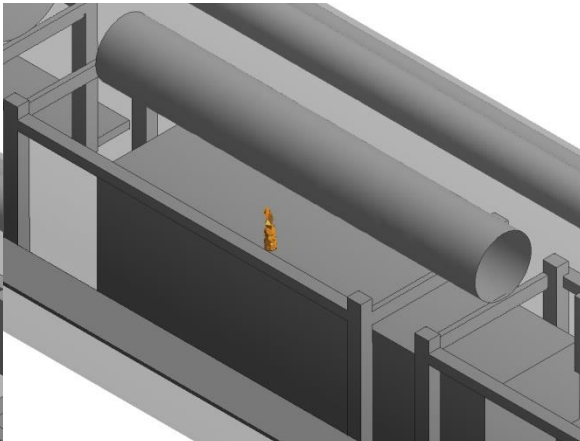
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۹۰ ثانیه

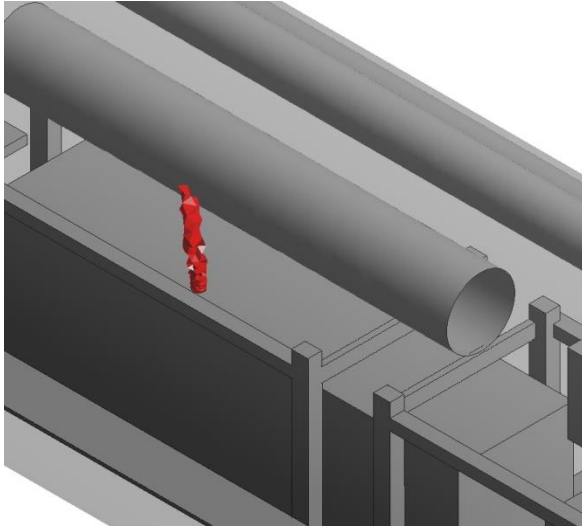


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۲۰ ثانیه

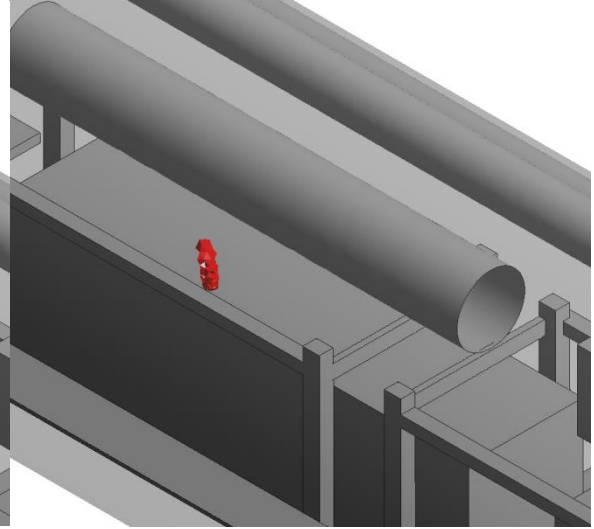


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۱۰ ثانیه

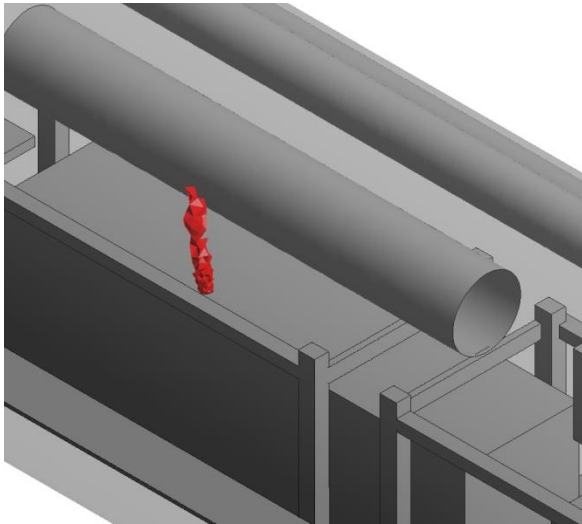
ادامه شکل پ - ۵ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO بر واحد زمان در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی



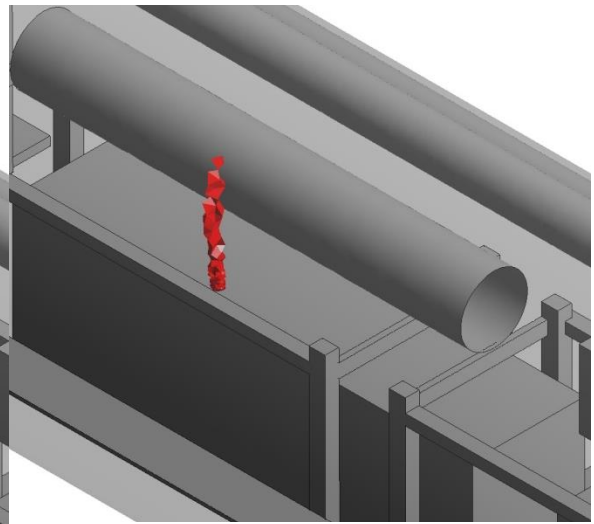
(ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۲۰ ثانیه



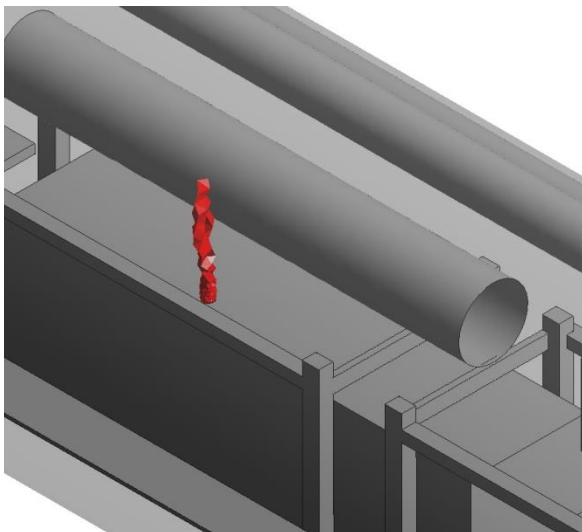
(الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۰ ثانیه



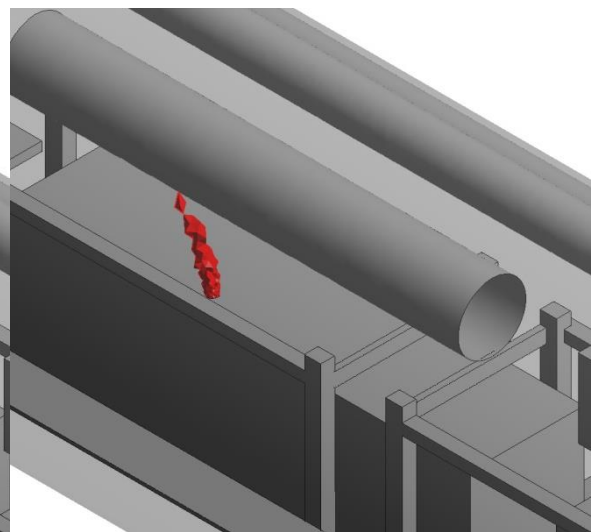
(ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۴۰ ثانیه



(پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۳۰ ثانیه

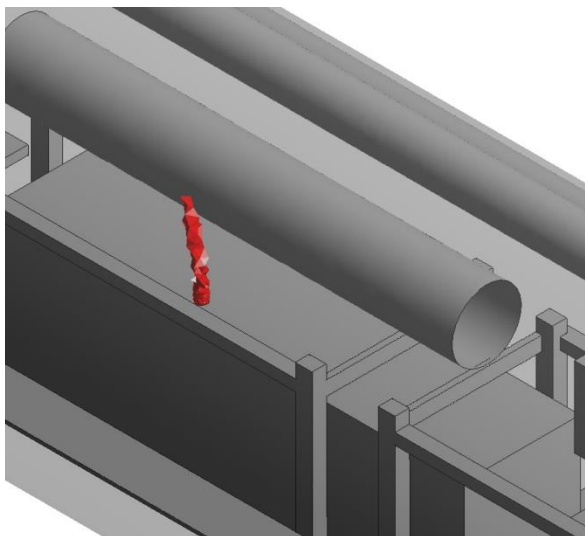


(ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۶۰ ثانیه

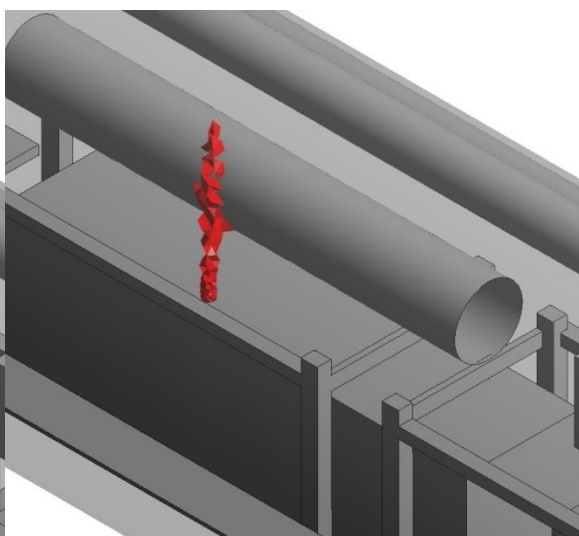


(ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۵۰ ثانیه

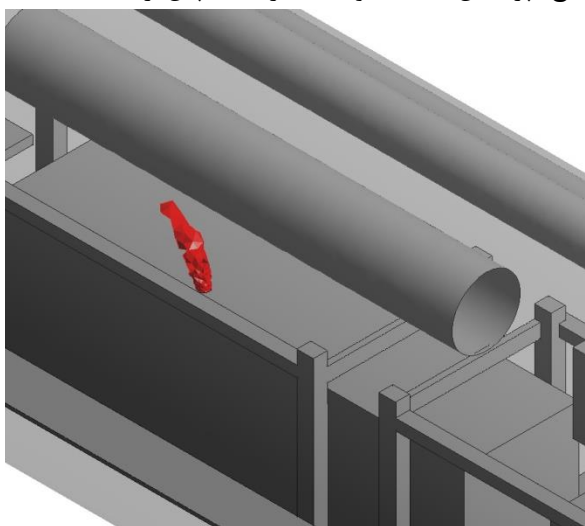
شکل پ - ۶ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ بر واحد زمان در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی



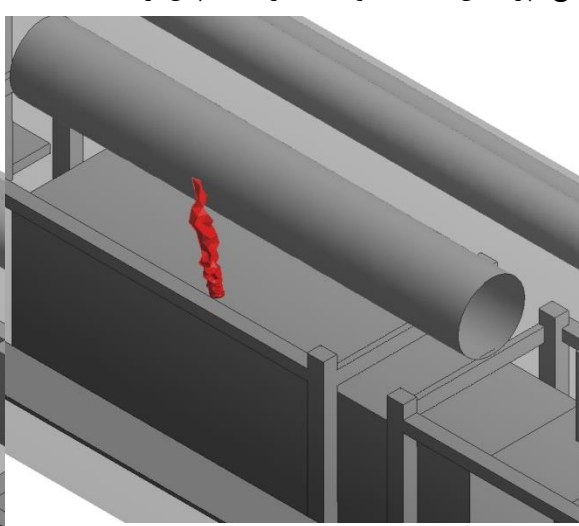
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۸۰ ثانیه



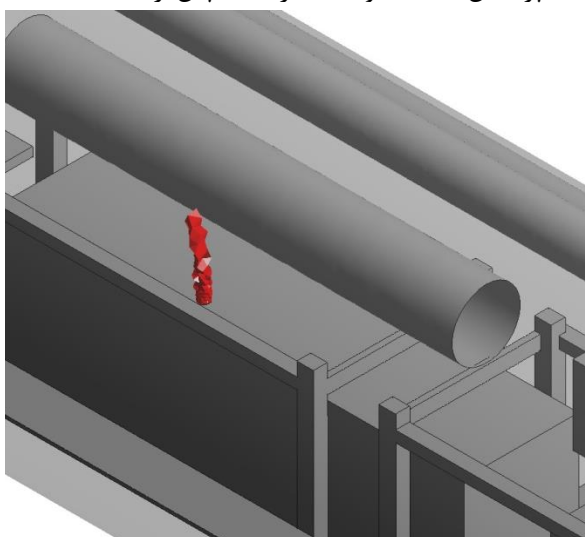
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۷۰ ثانیه



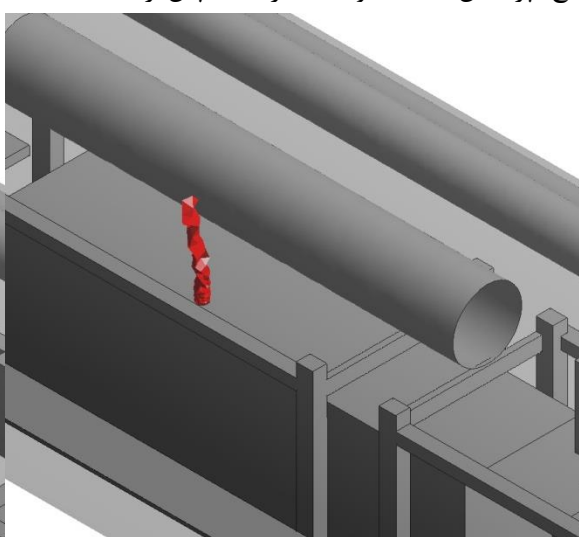
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۹۰ ثانیه

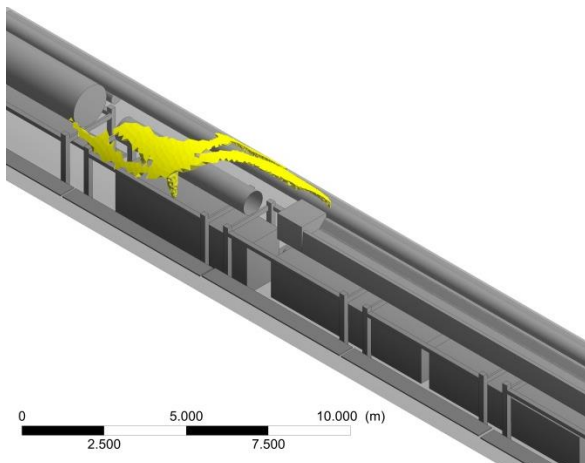


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۲۰ ثانیه

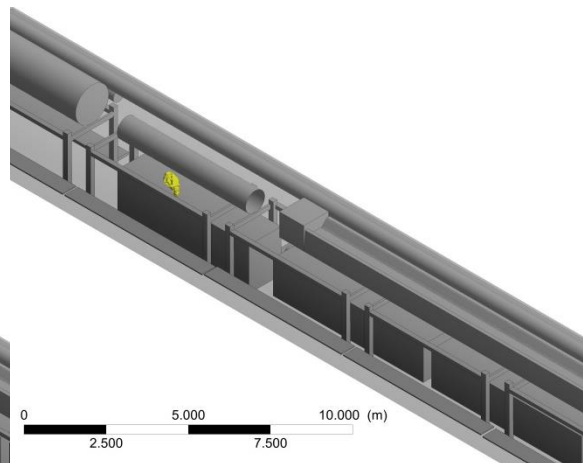


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۱۰ ثانیه

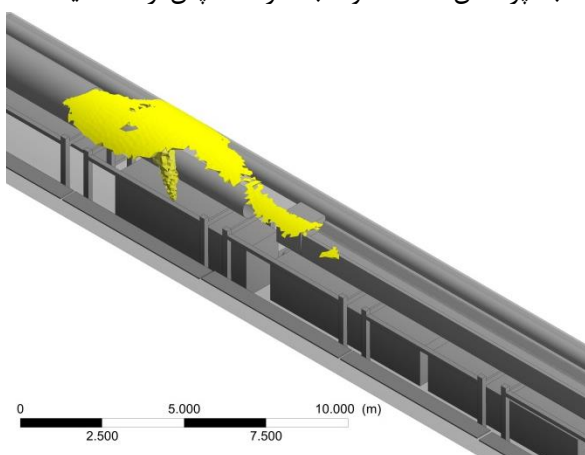
ادامه شکل پ - ۶- پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ بر واحد زمان در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی



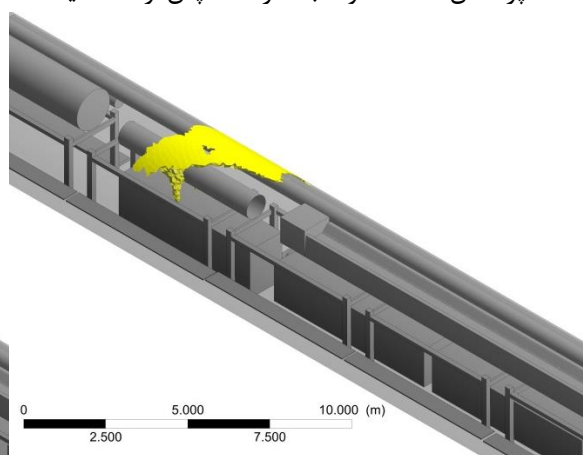
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۲۰ ثانیه



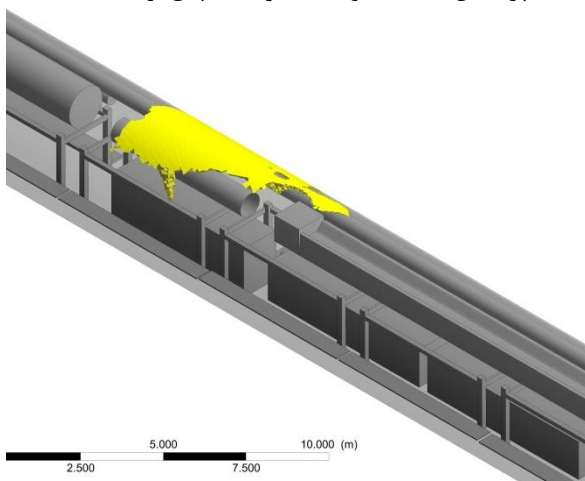
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۰ ثانیه



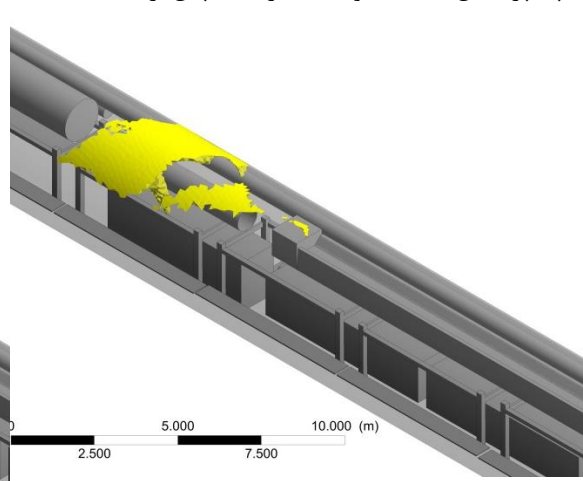
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۳۰ ثانیه

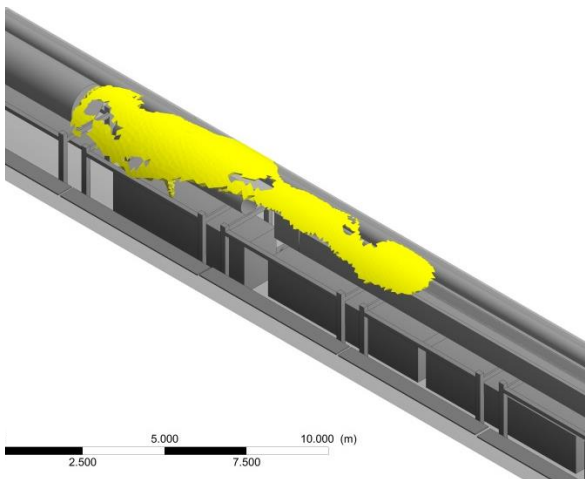


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۶۰ ثانیه

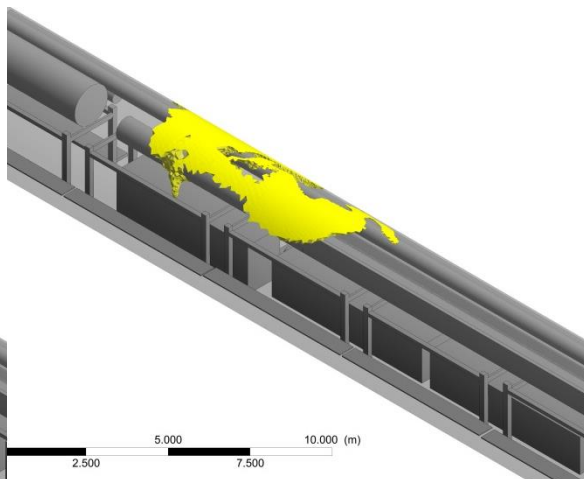


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۵۰ ثانیه

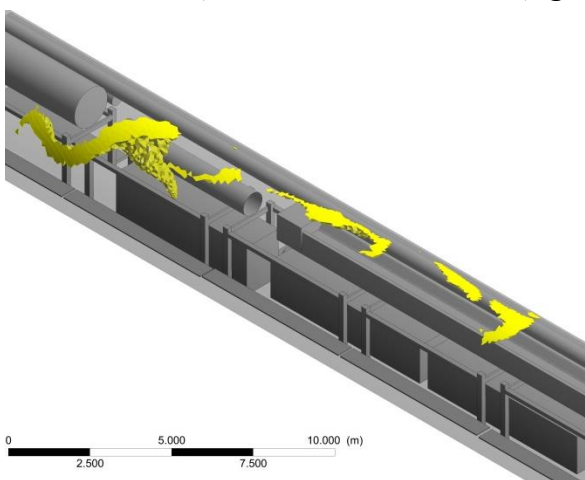
شکل پ - ۷ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO بر واحد زمان در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی



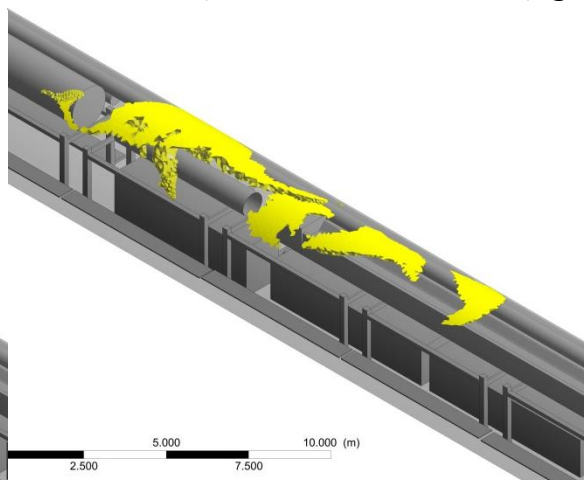
ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۸۰ ثانیه



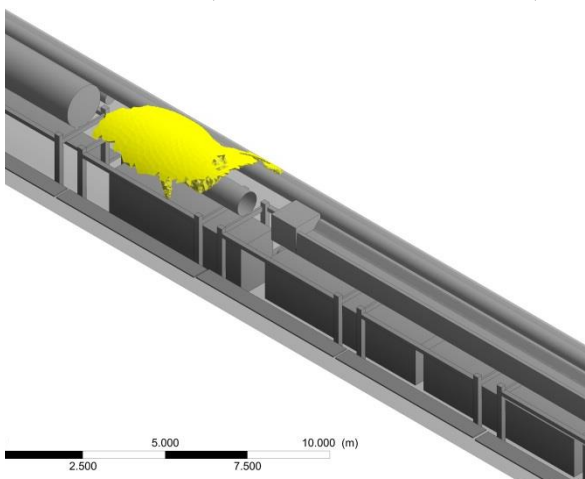
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۷۰ ثانیه



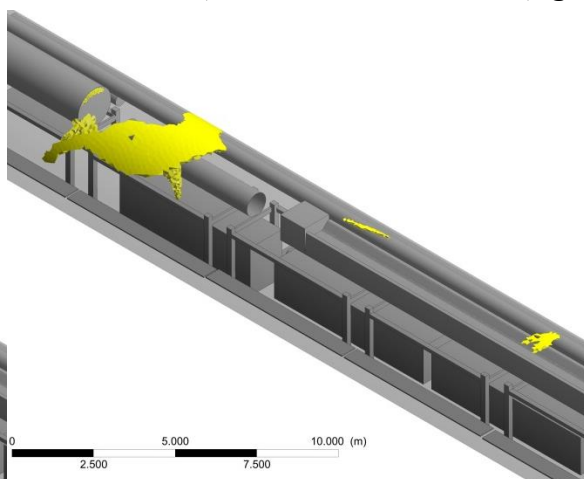
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۹۰ ثانیه

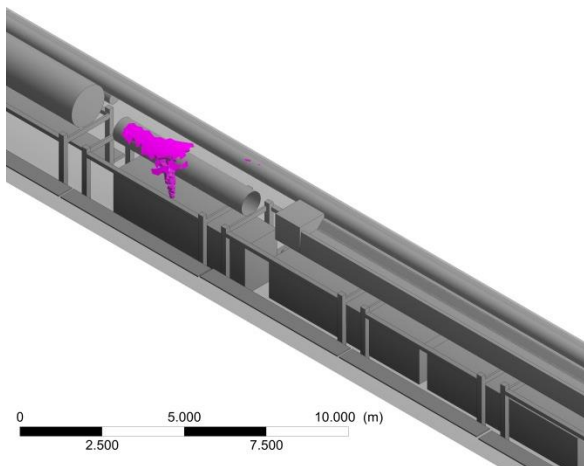


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۲۰ ثانیه

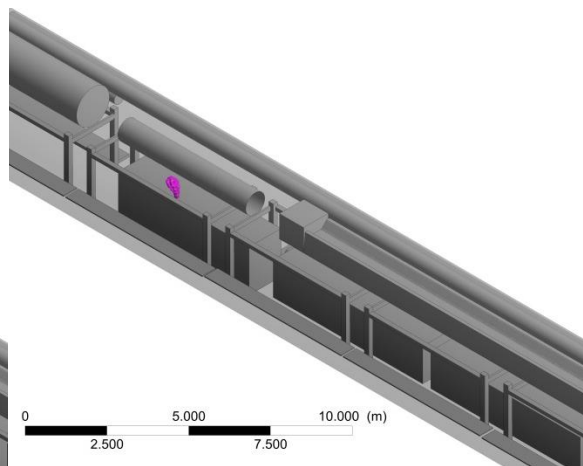


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۱۰ ثانیه

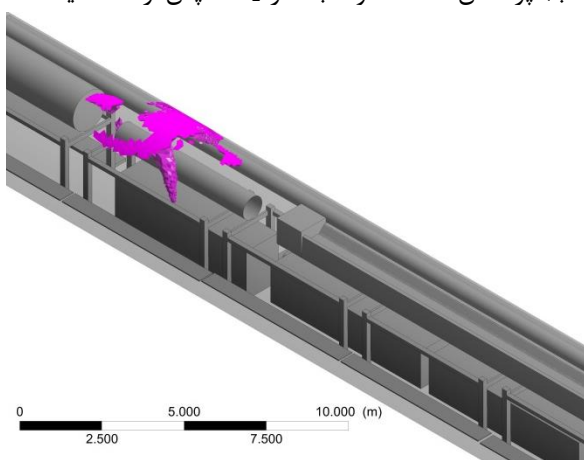
ادامه شکل پ - ۷ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO بر واحد زمان در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی



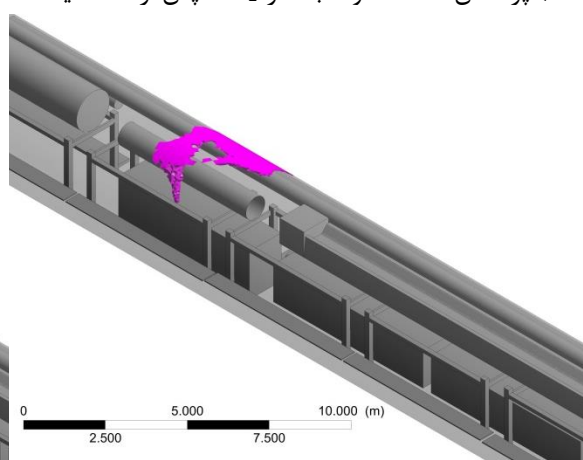
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۲۰ ثانیه



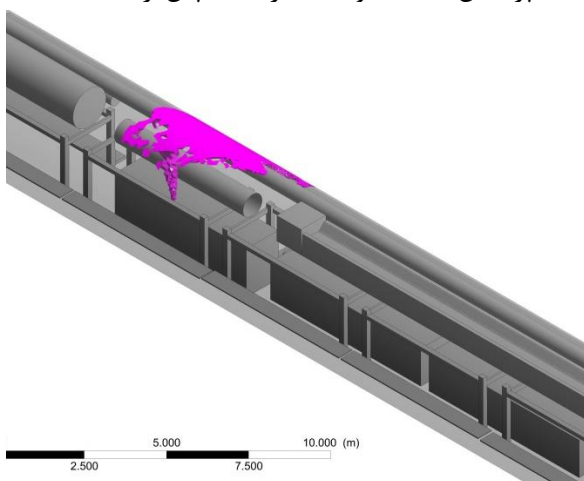
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۰ ثانیه



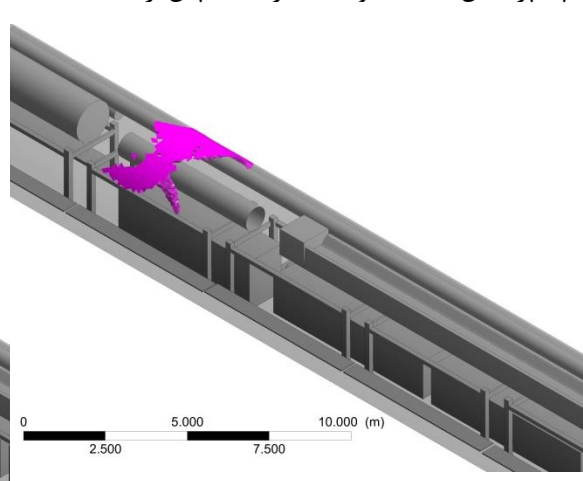
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۳۰ ثانیه

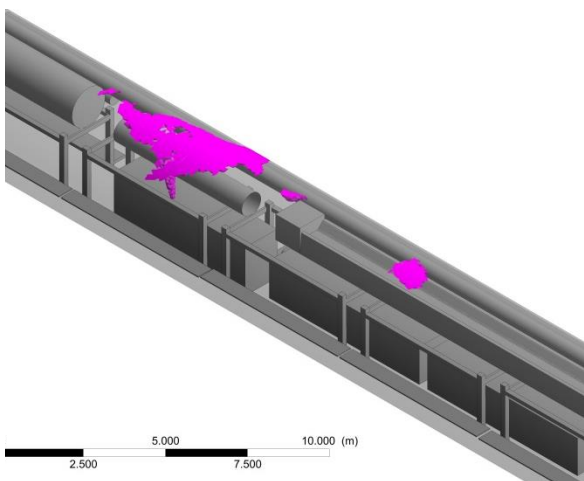


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۶۰ ثانیه

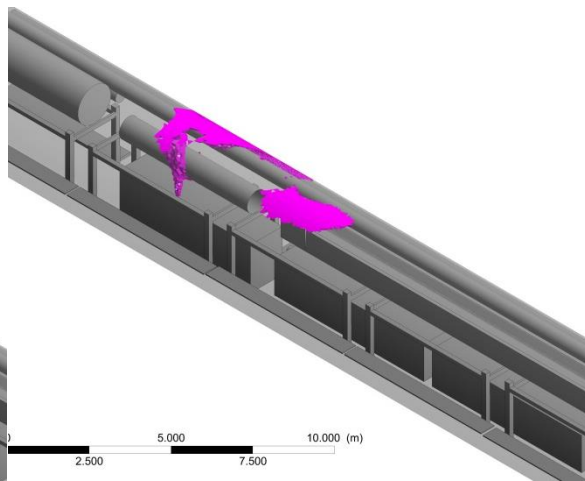


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۵۰ ثانیه

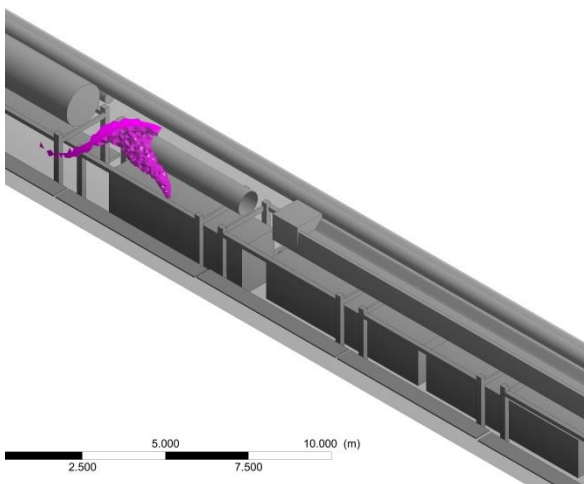
شکل پ - ۸ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 بر واحد زمان در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی



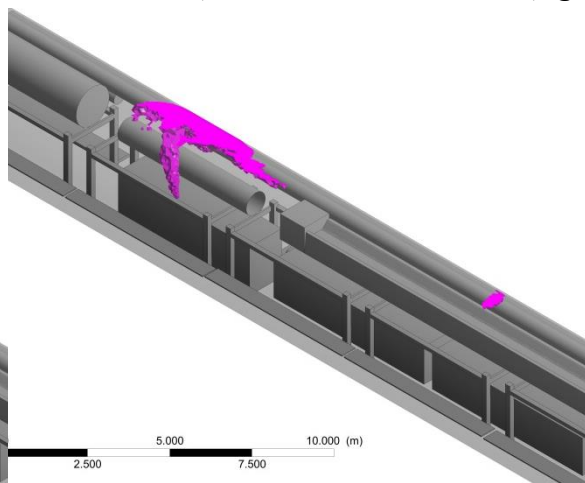
ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۸۰ ثانیه



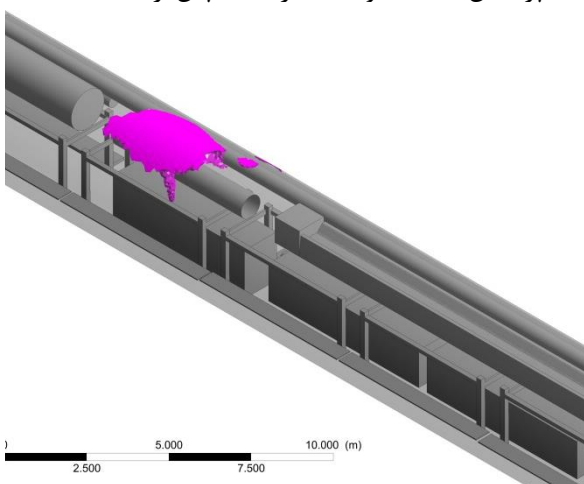
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۷۰ ثانیه



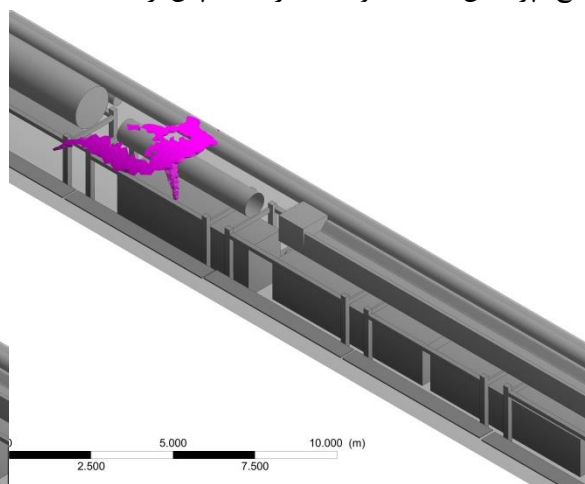
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۹۰ ثانیه

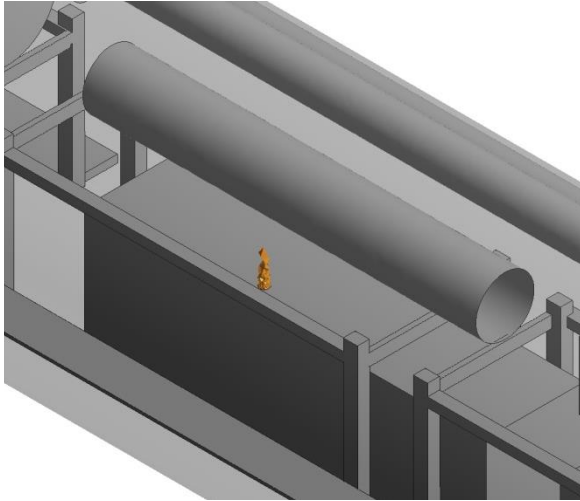


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۲۰ ثانیه

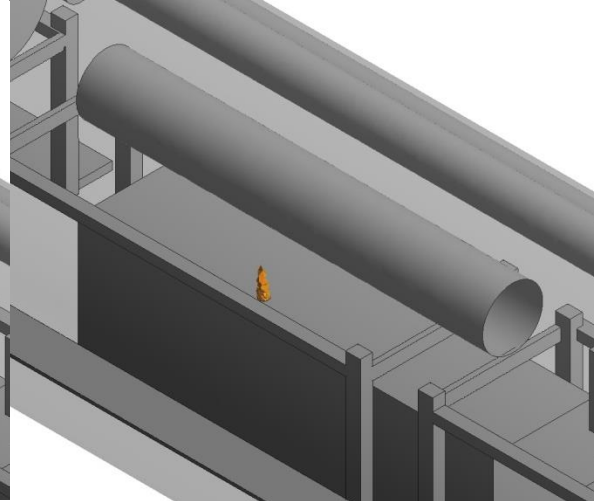


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۱۰ ثانیه

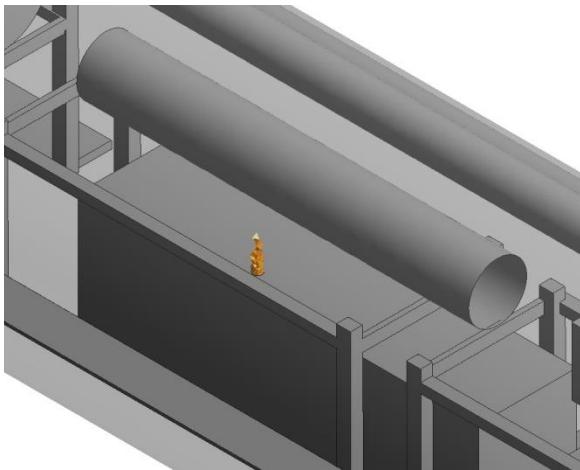
ادامه شکل پ - ۸ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 بر واحد زمان در حالت خاموش کردن بادبزن مکشی کمکی



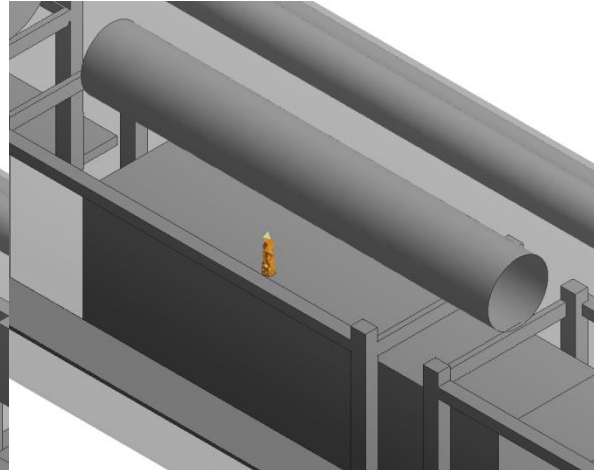
(ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۲۰ ثانیه



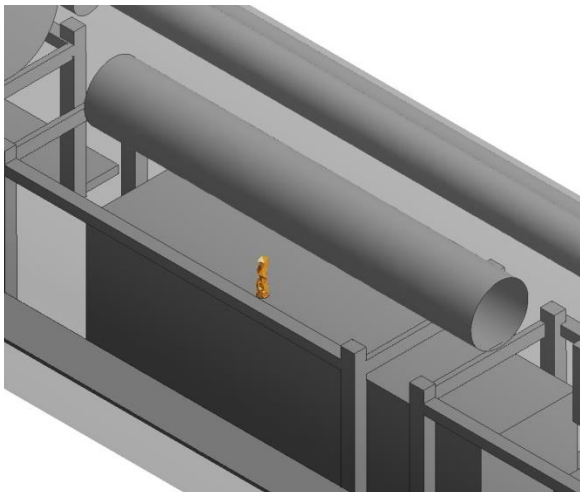
(الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۰ ثانیه



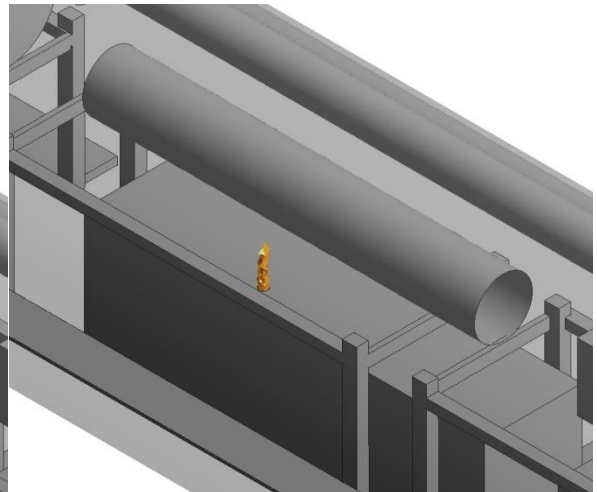
(ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۴۰ ثانیه



(پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۳۰ ثانیه

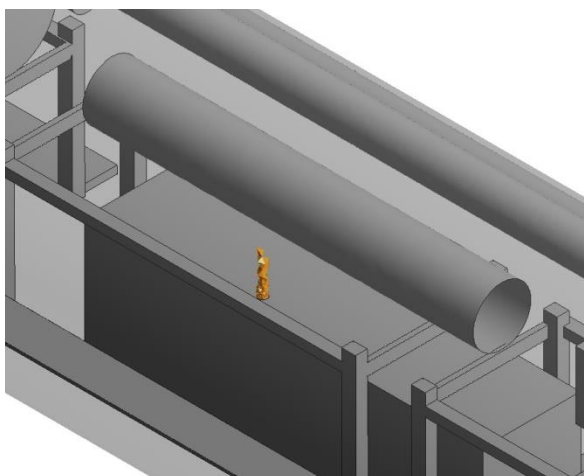


(ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۶۰ ثانیه

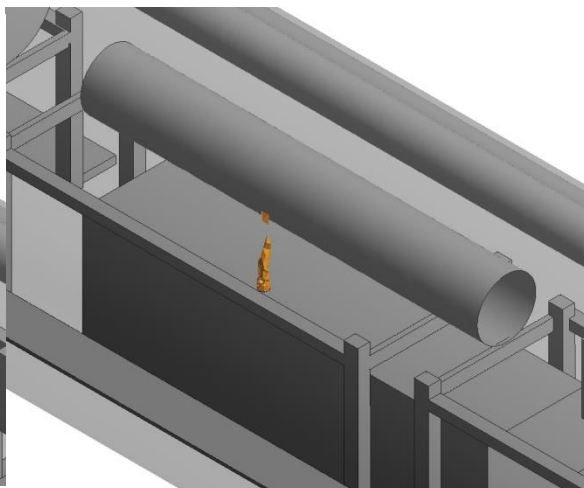


(ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۵۰ ثانیه

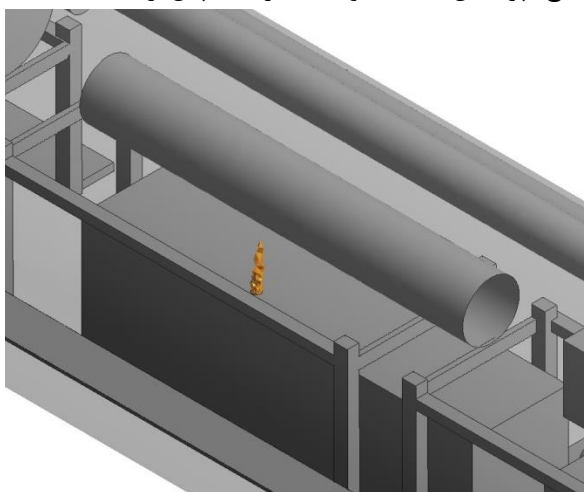
شکل پ - ۹ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO بر واحد زمان در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



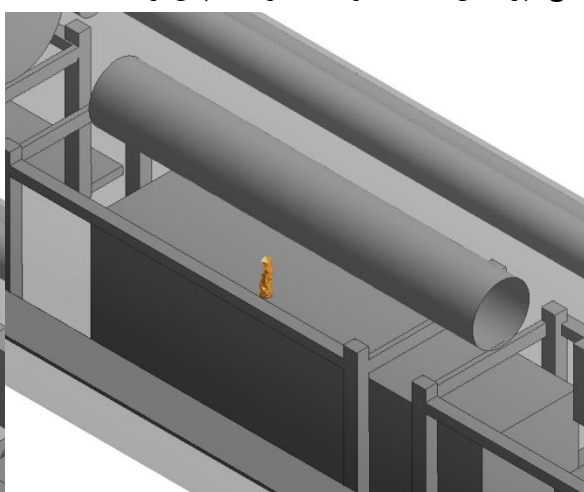
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۸۰ ثانیه



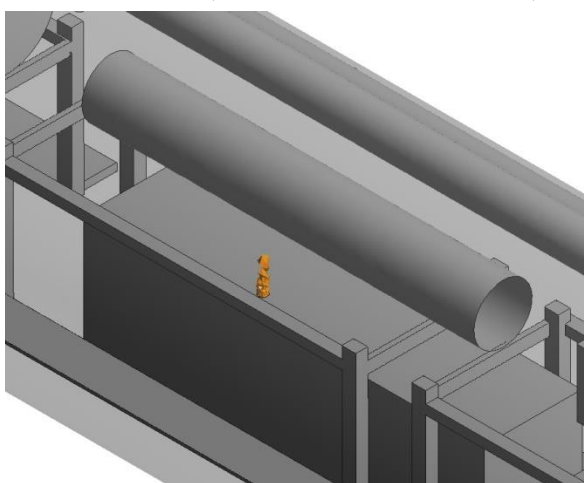
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۷۰ ثانیه



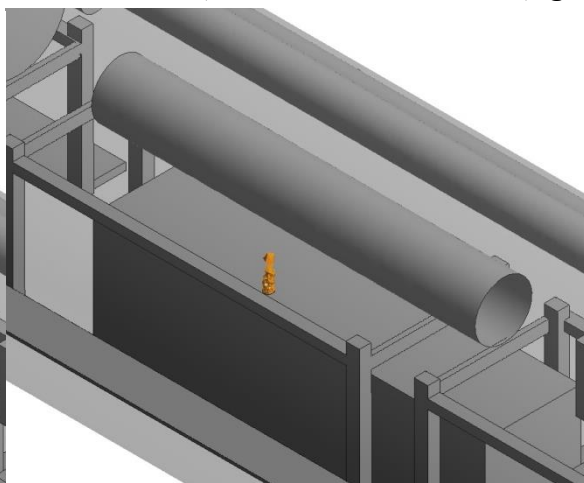
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۹۰ ثانیه

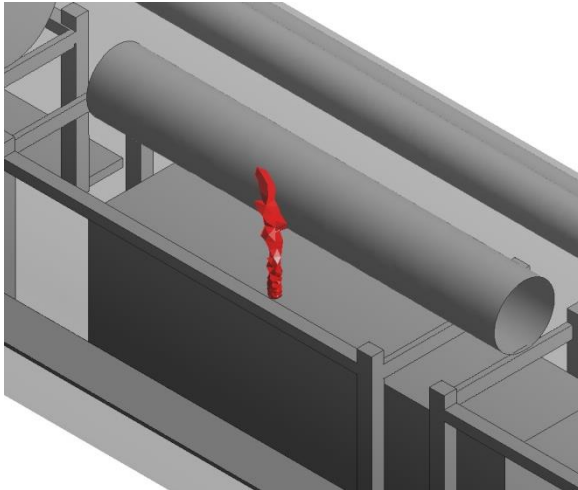


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۲۰ ثانیه

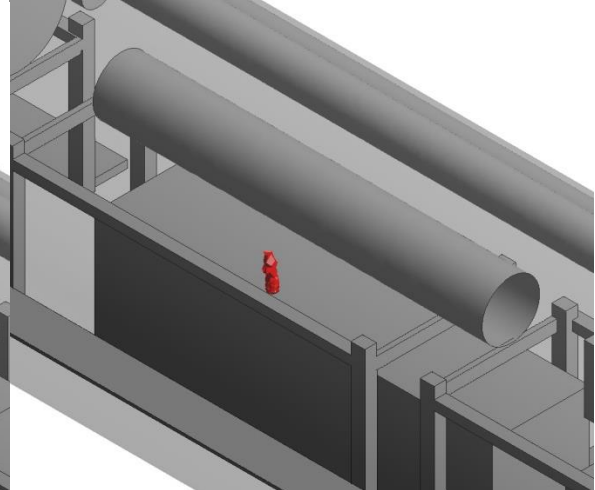


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۱۰ ثانیه

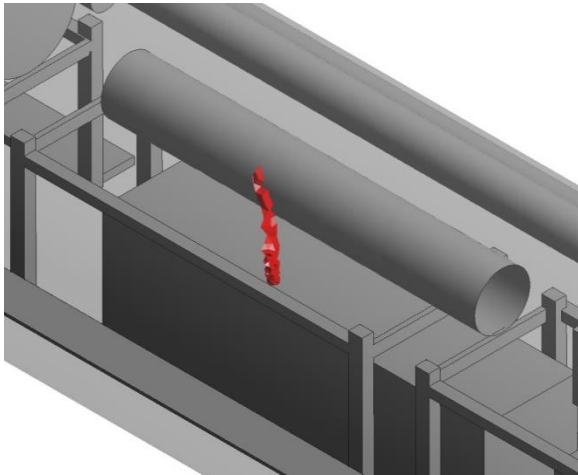
ادامه شکل پ - ۹ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO بر واحد زمان در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



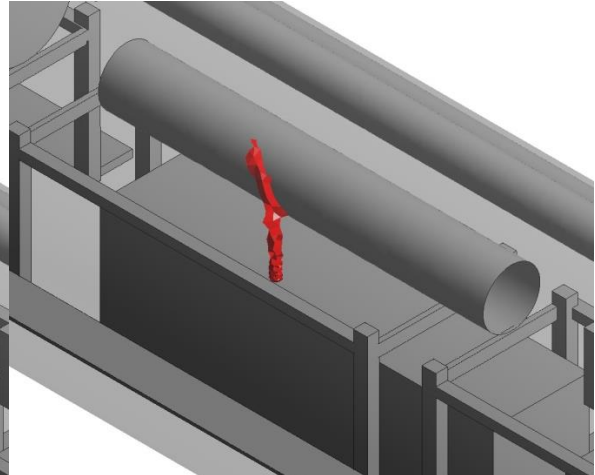
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۲۰ ثانیه



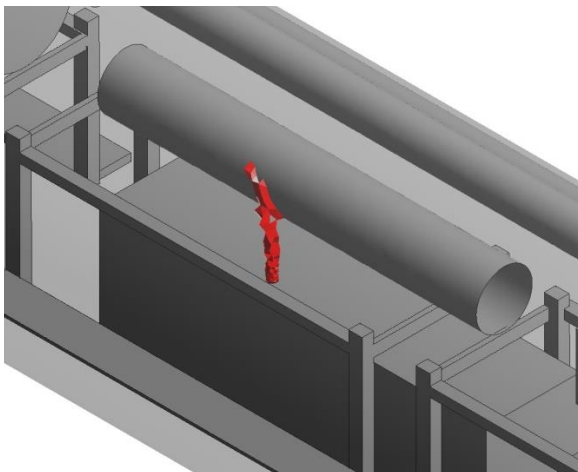
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۰ ثانیه



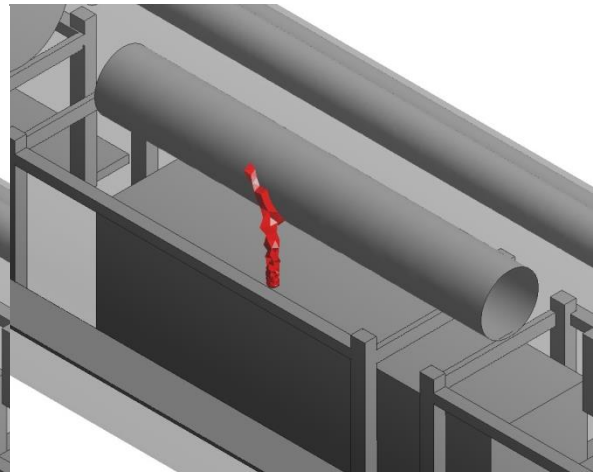
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۳۰ ثانیه

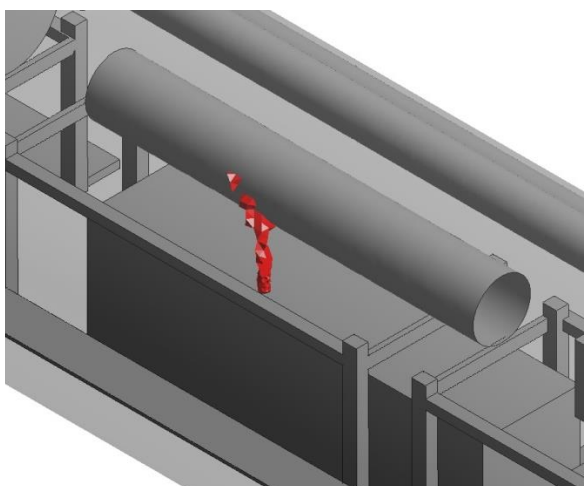


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۶۰ ثانیه

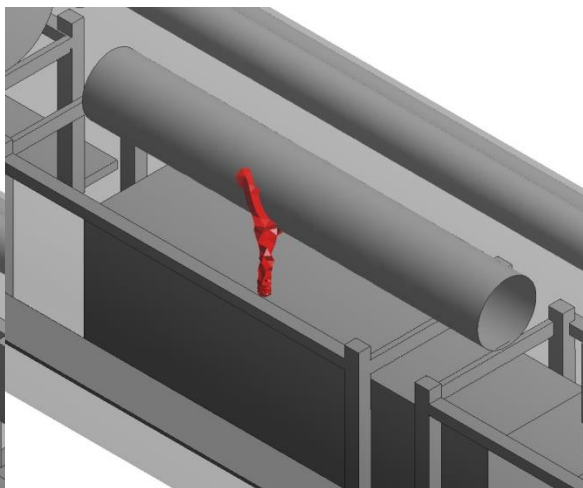


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۵۰ ثانیه

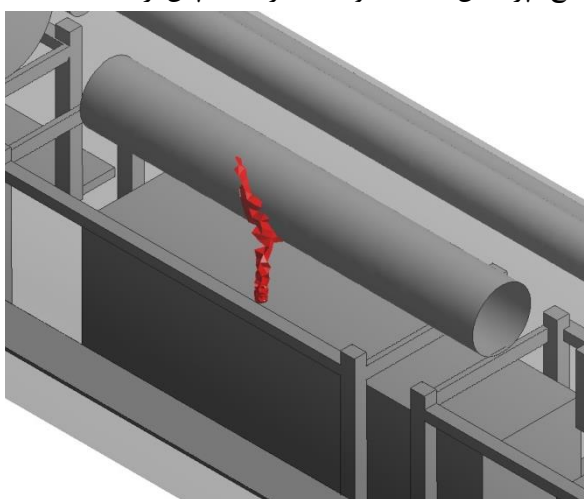
شکل پ - ۱۰ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ بر واحد زمان در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



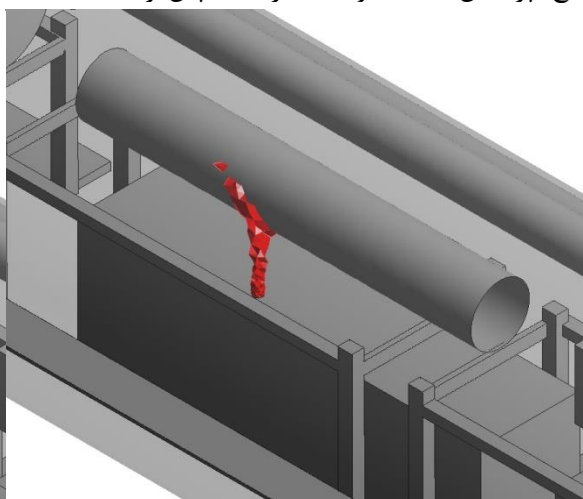
ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۸۰ ثانیه



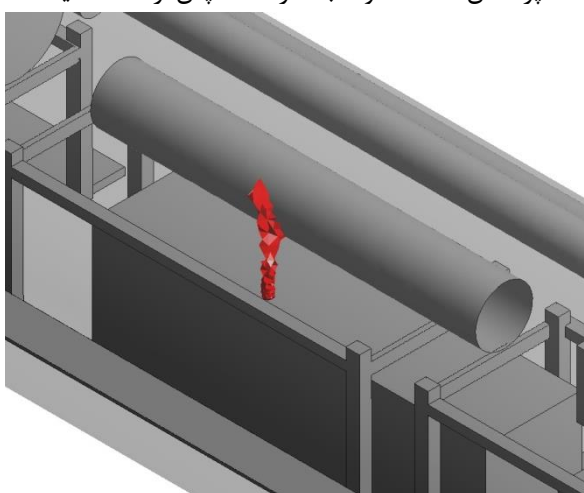
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۷۰ ثانیه



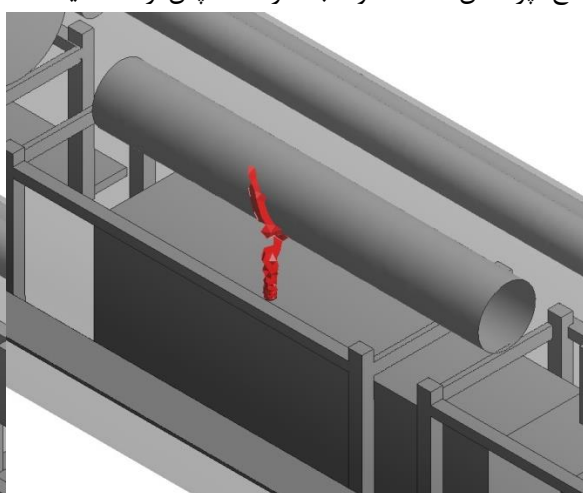
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۹۰ ثانیه

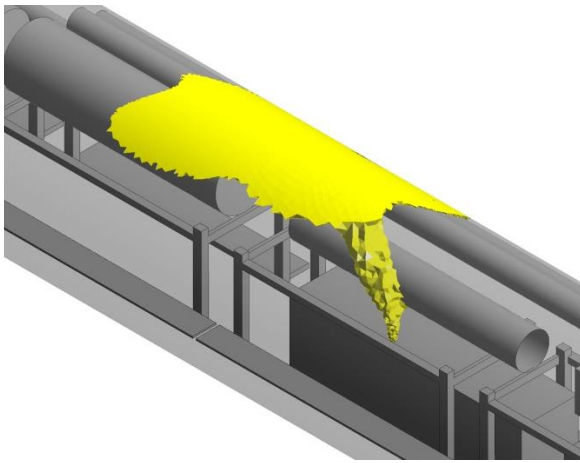


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۲۰ ثانیه

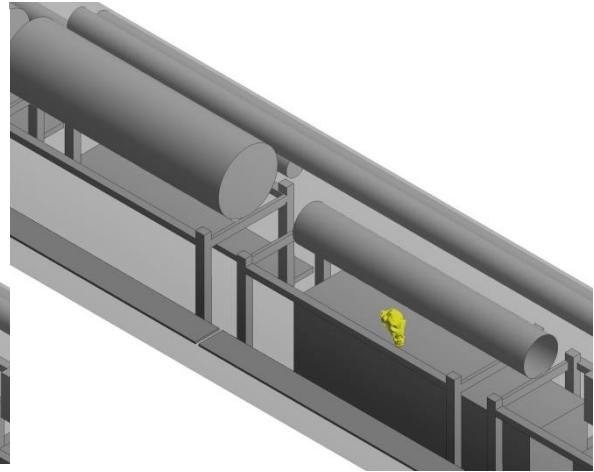


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۱۰ ثانیه

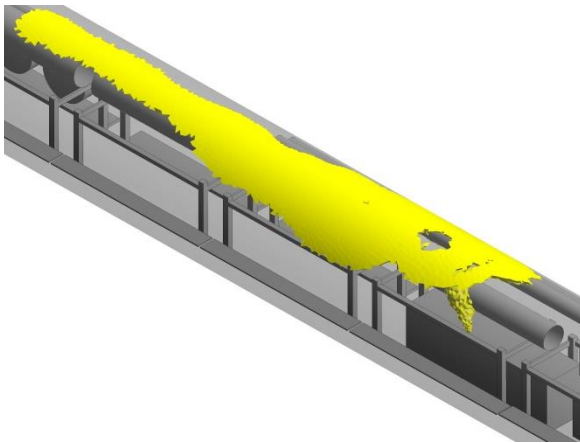
ادامه شکل پ - ۱۰ - پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ بر واحد زمان در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



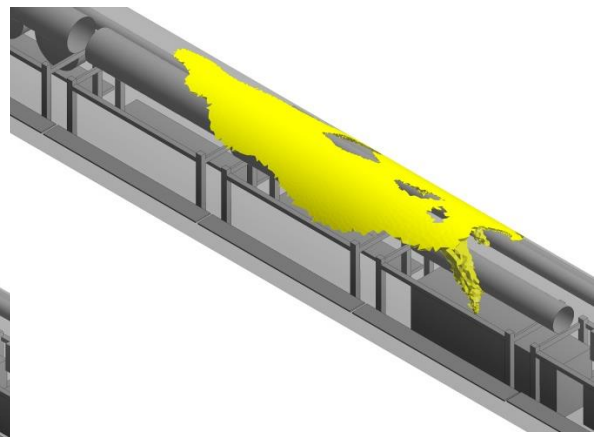
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۲۰ ثانیه



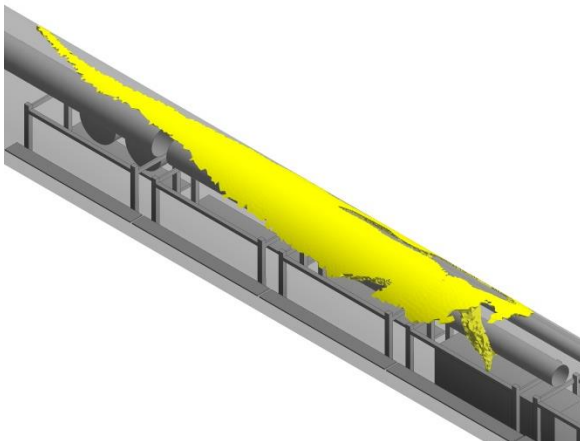
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۰ ثانیه



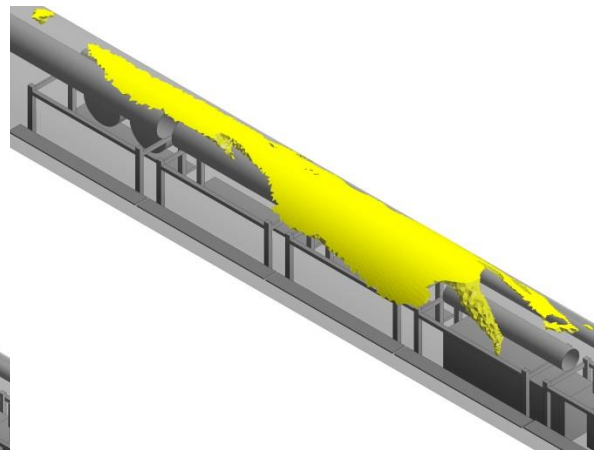
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۳۰ ثانیه

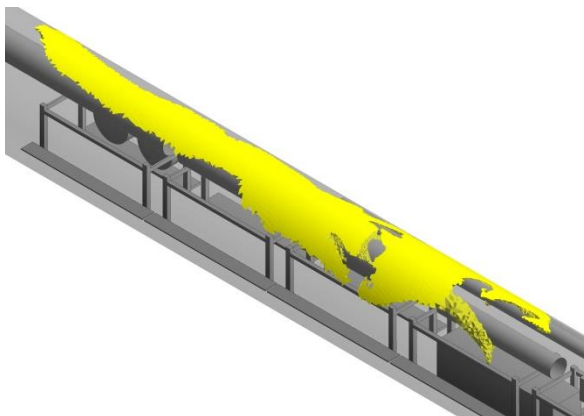


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۶۰ ثانیه

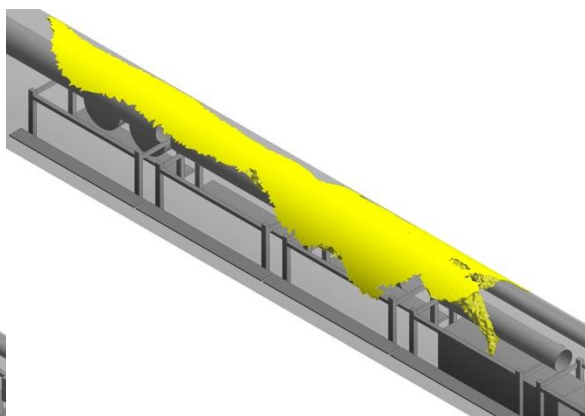


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۵۰ ثانیه

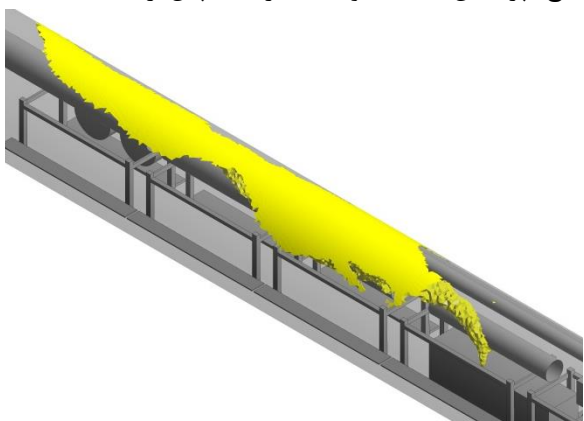
شکل پ - ۱۱ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO بر واحد زمان در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



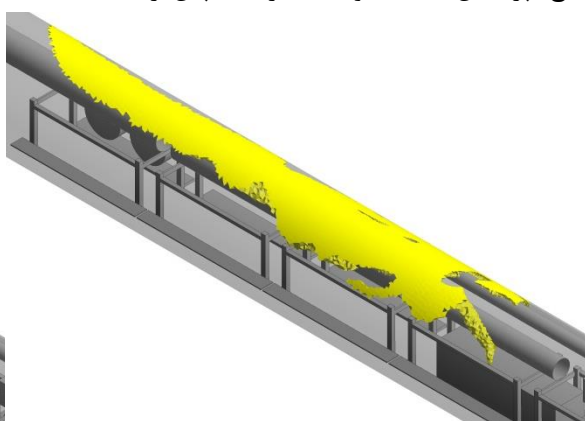
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۸۰ ثانیه



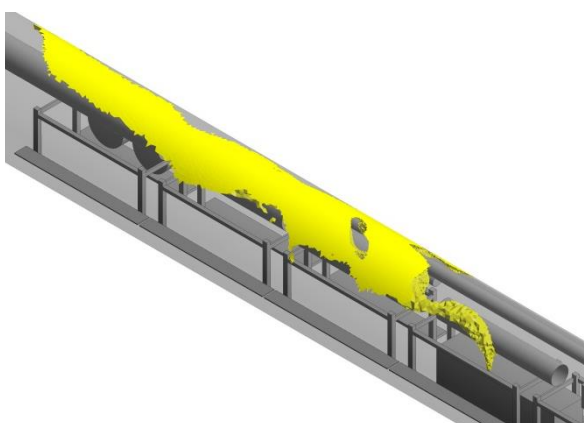
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۷۰ ثانیه



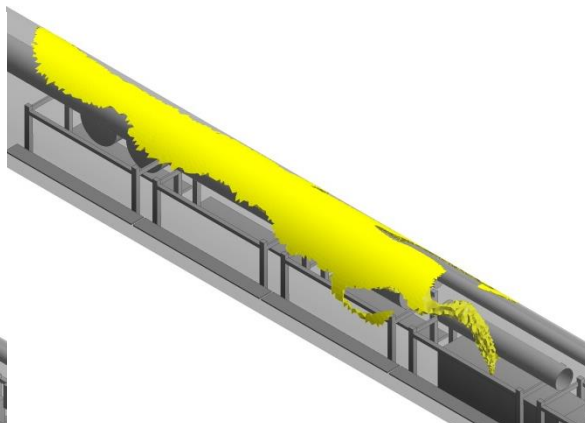
خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۰۰ ثانیه



ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۹۰ ثانیه

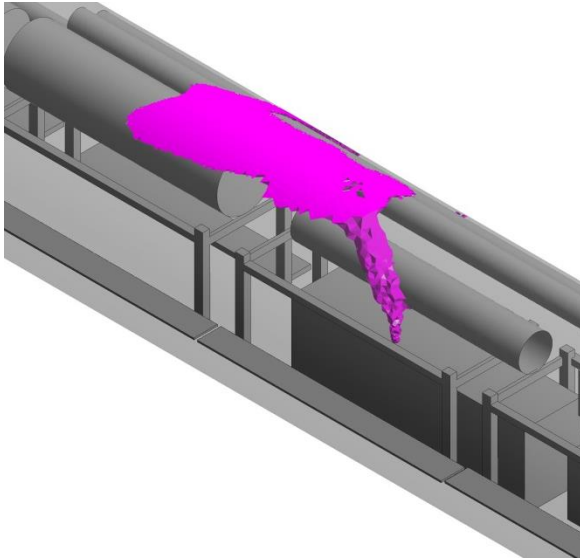


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۲۰ ثانیه

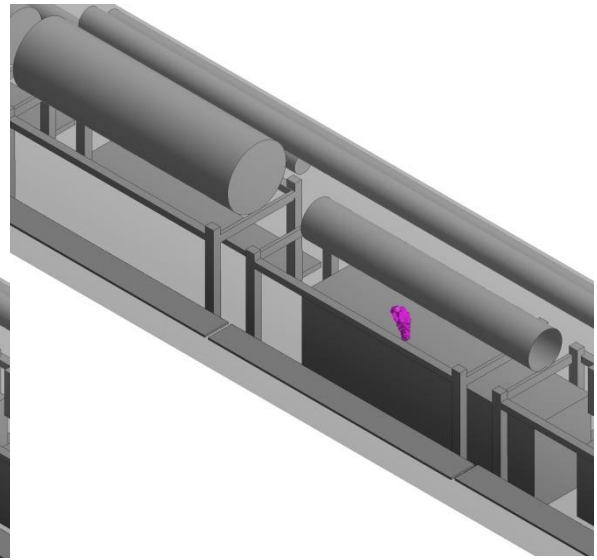


د) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۱۰ ثانیه

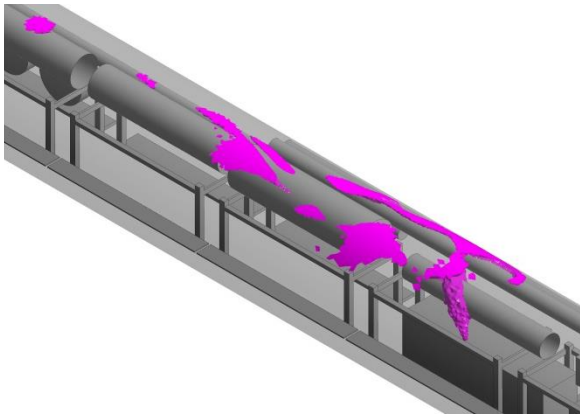
ادامه شکل پ - ۱۱ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO بر واحد زمان در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



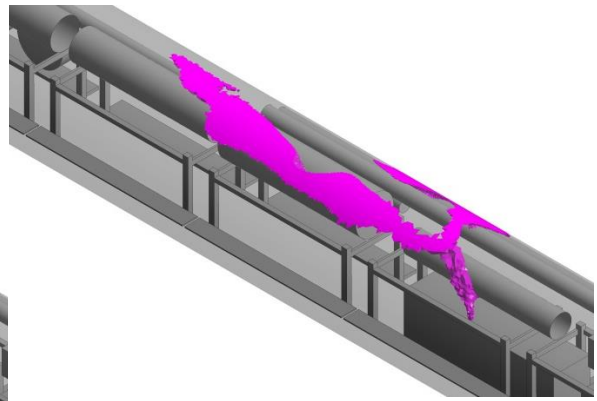
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۲۰ ثانیه



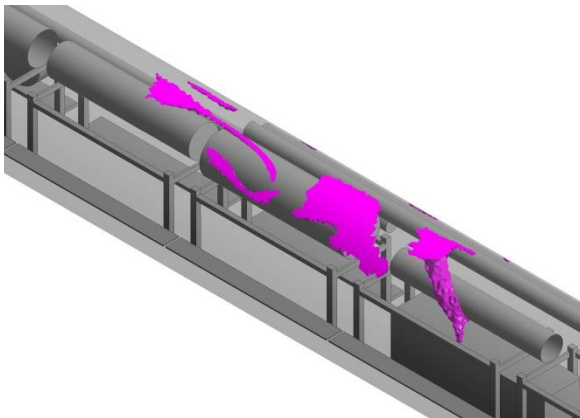
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۰ ثانیه



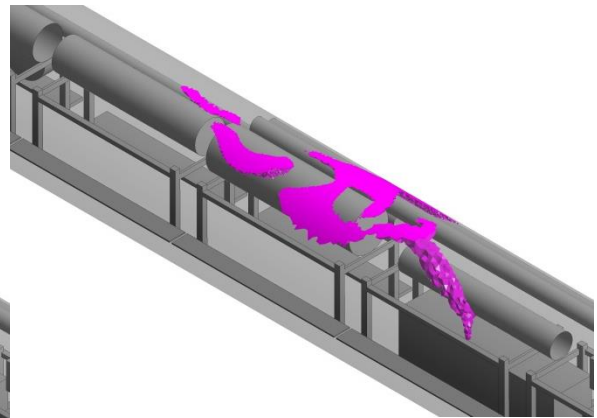
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۳۰ ثانیه

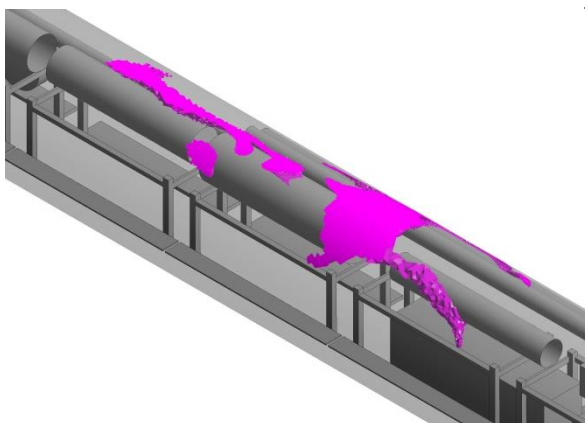


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۶۰ ثانیه

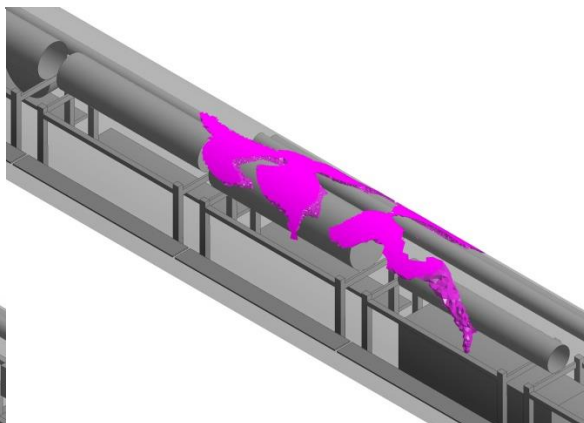


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۵۰ ثانیه

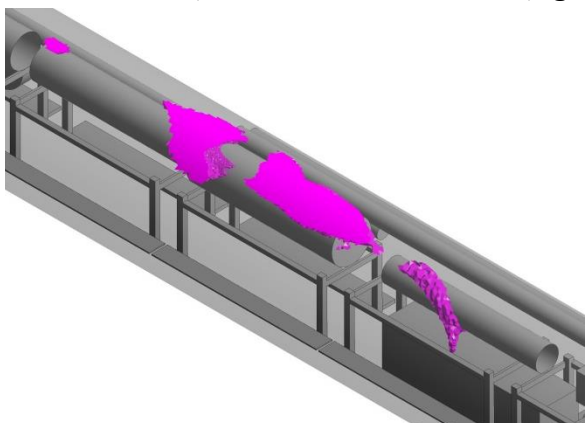
شکل پ - ۱۲ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 بر واحد زمان در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



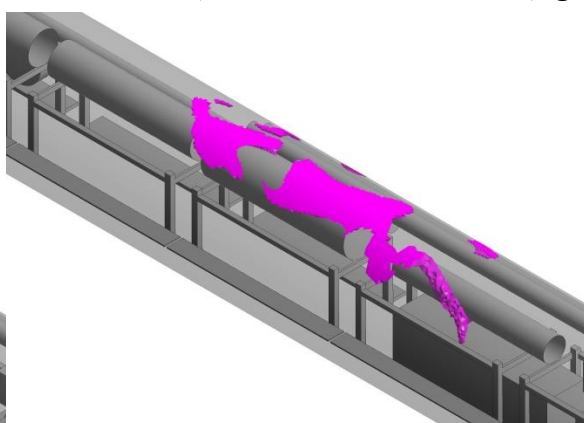
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۸۰ ثانیه



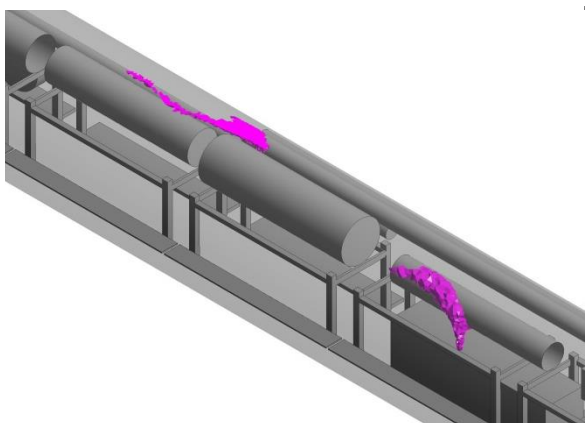
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۷۰ ثانیه



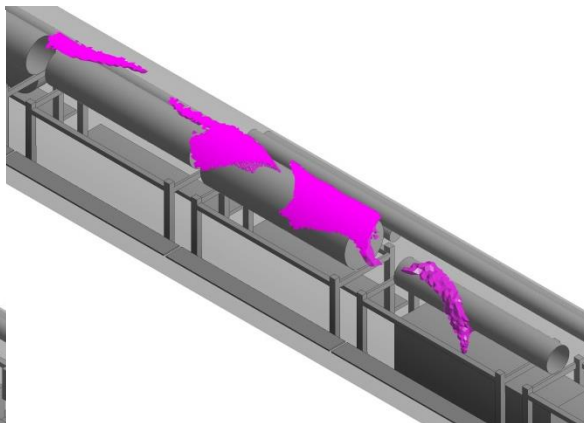
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۹۰ ثانیه

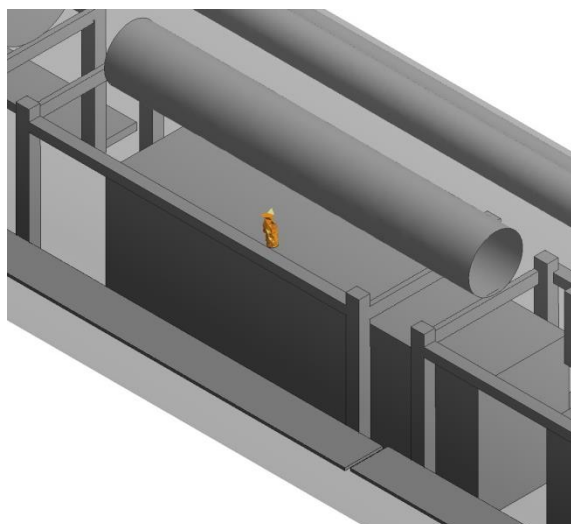


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۲۰ ثانیه

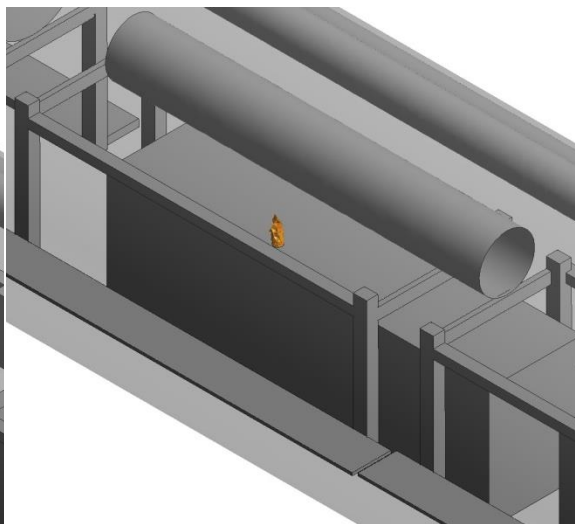


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۱۰ ثانیه

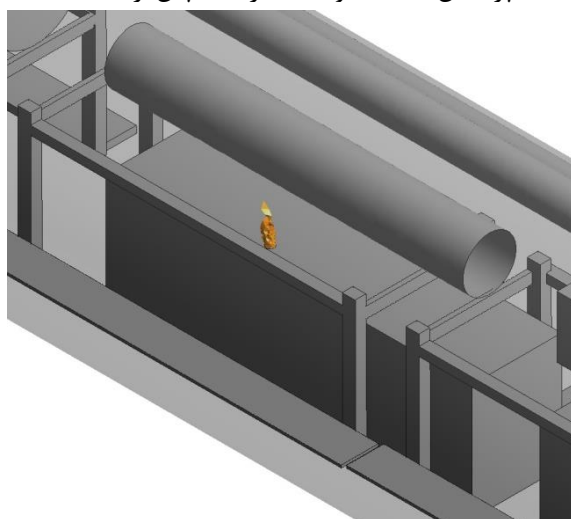
ادامه شکل پ - ۱۲ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 بر واحد زمان در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه



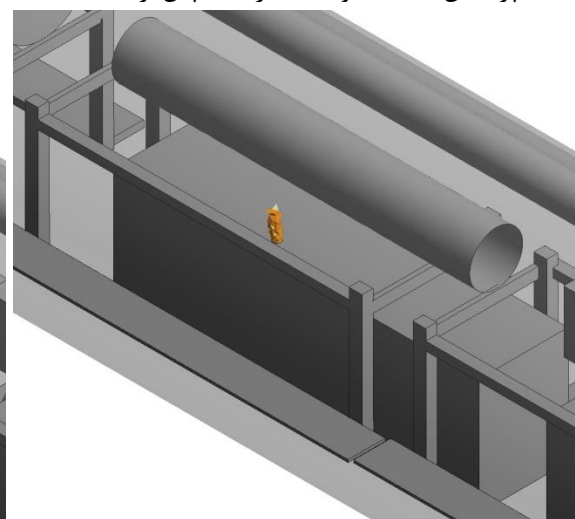
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۲۰ ثانیه



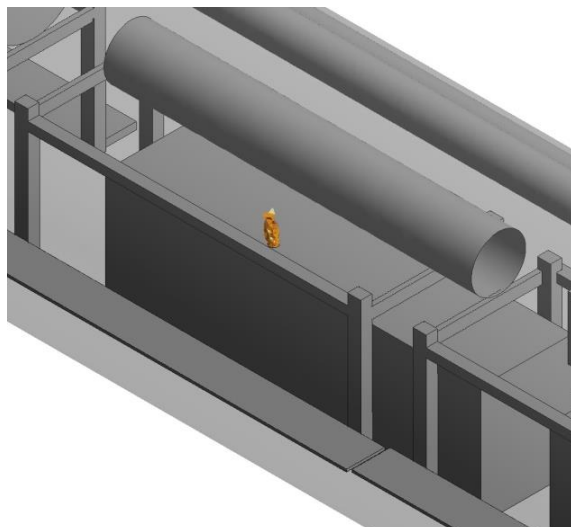
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۰ ثانیه



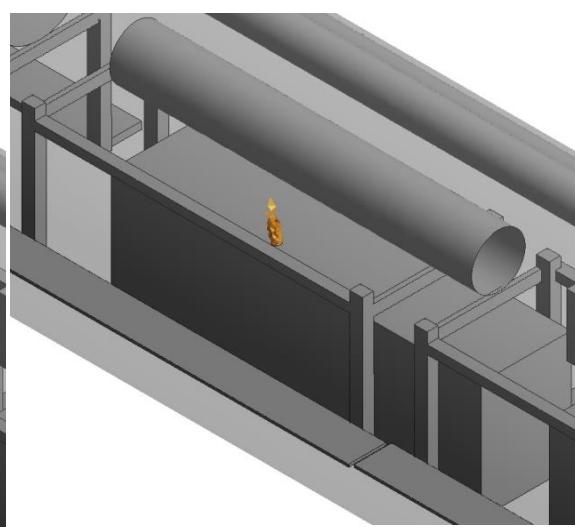
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۳۰ ثانیه

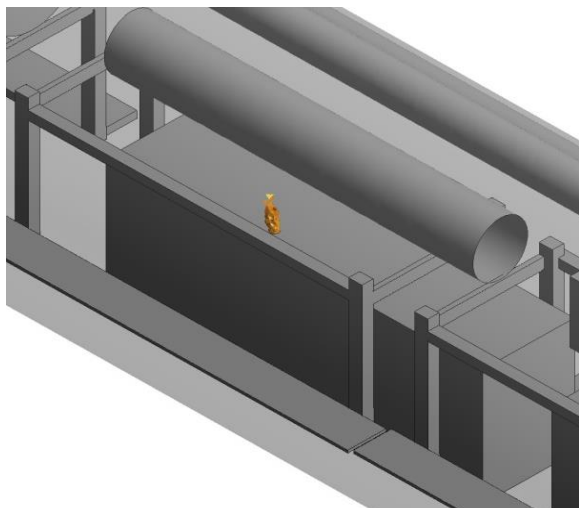


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۶۰ ثانیه

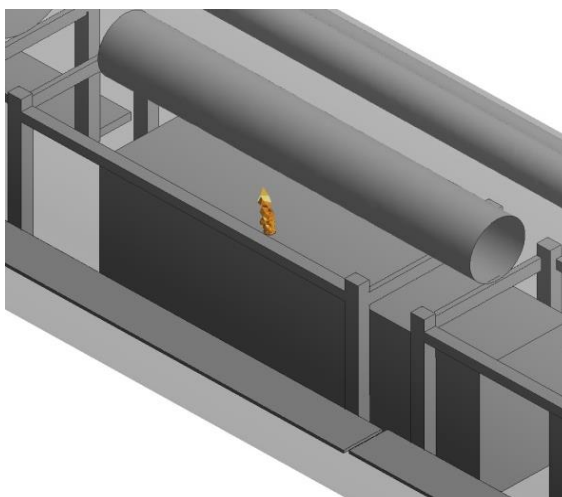


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۵۰ ثانیه

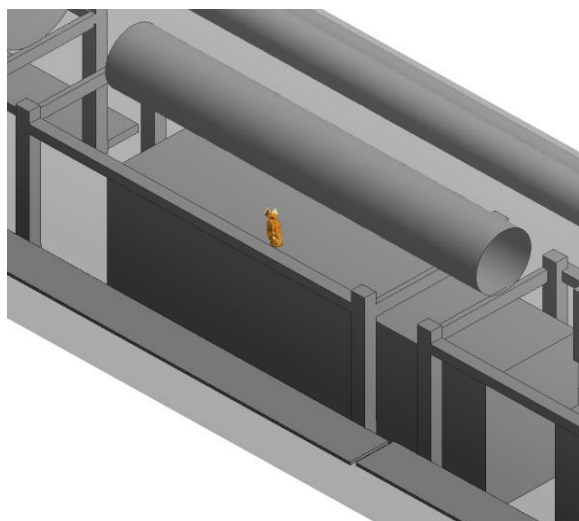
شکل پ - ۱۳- پراکنش منطقه آلوده به گاز CO در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



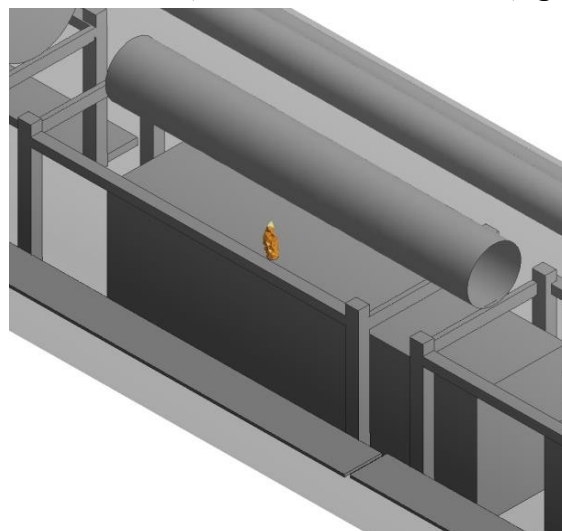
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۸۰ ثانیه



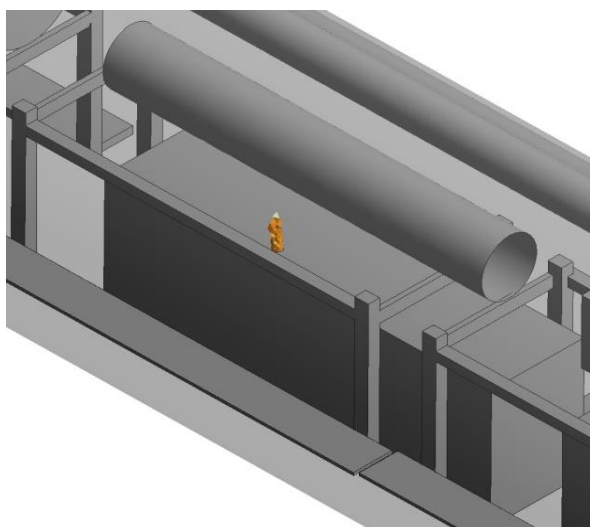
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۷۰ ثانیه



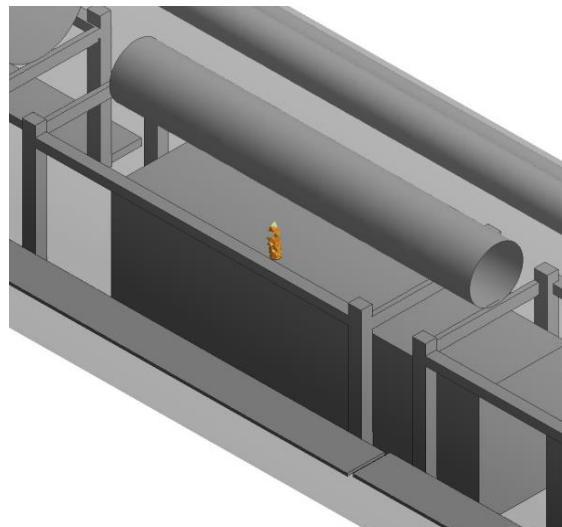
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۹۰ ثانیه

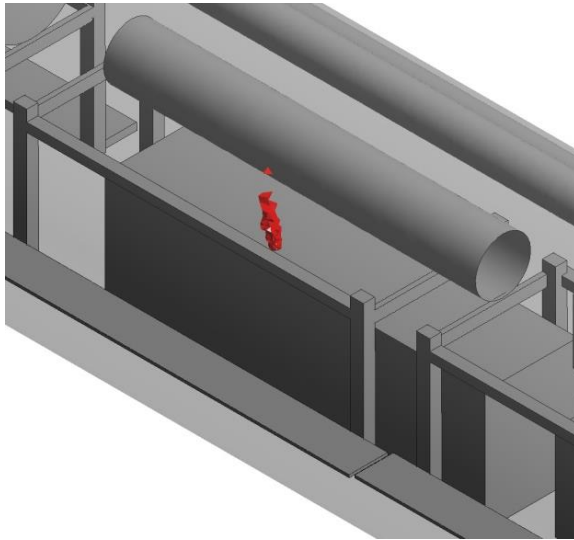


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۲۰ ثانیه

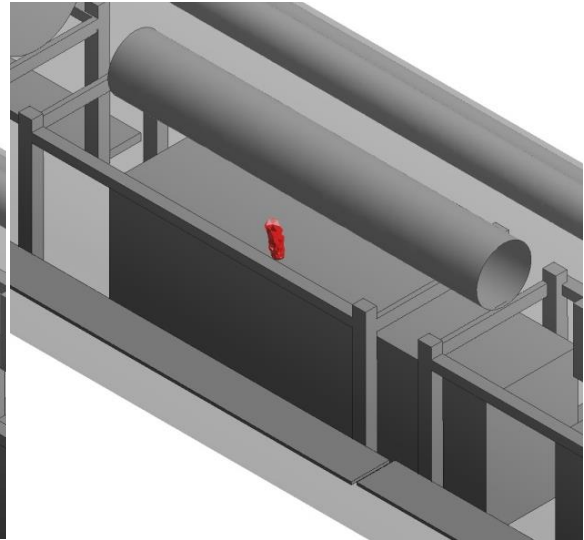


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO پس از ۱۱۰ ثانیه

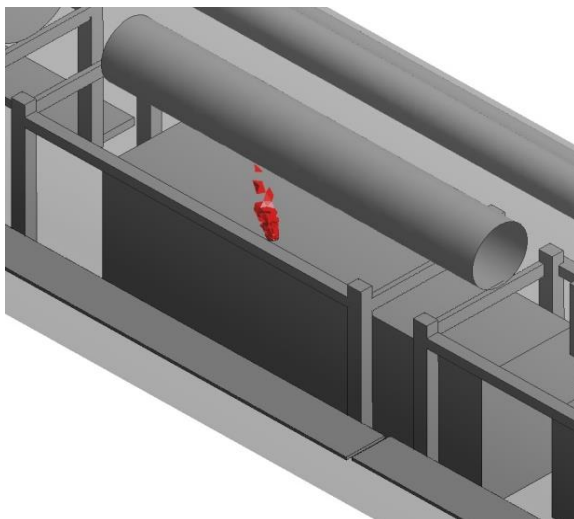
ادامه شکل پ - ۱۳- پراکنش منطقه آلوده به گاز CO در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



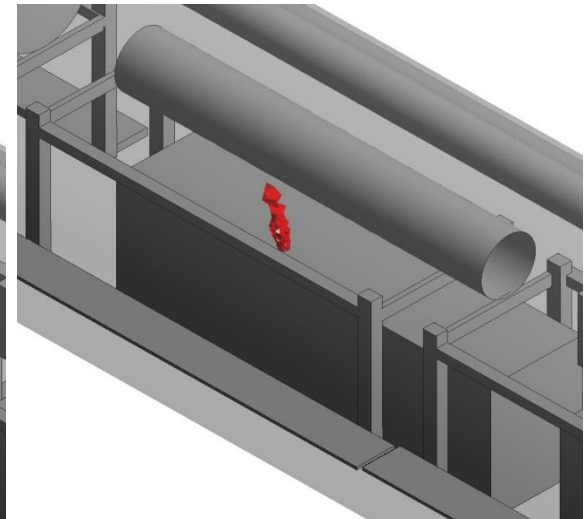
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۲۰ ثانیه



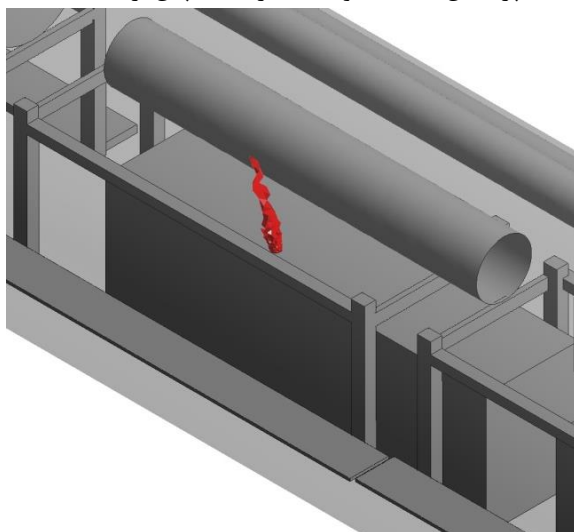
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۰ ثانیه



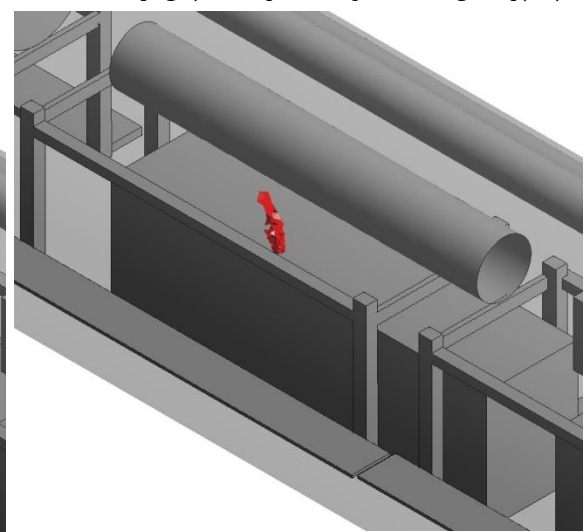
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۳۰ ثانیه

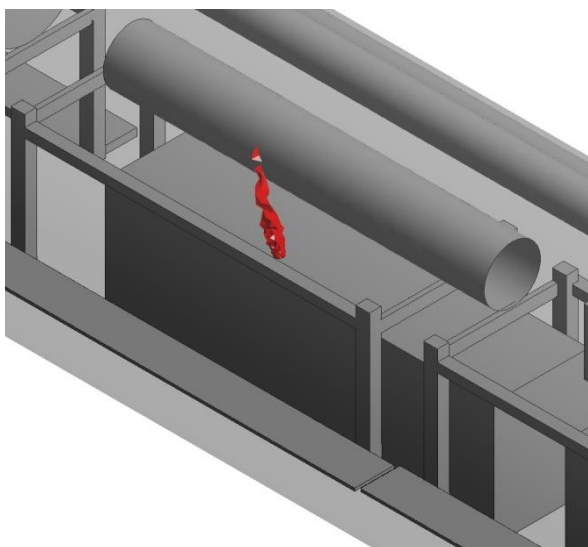


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۶۰ ثانیه

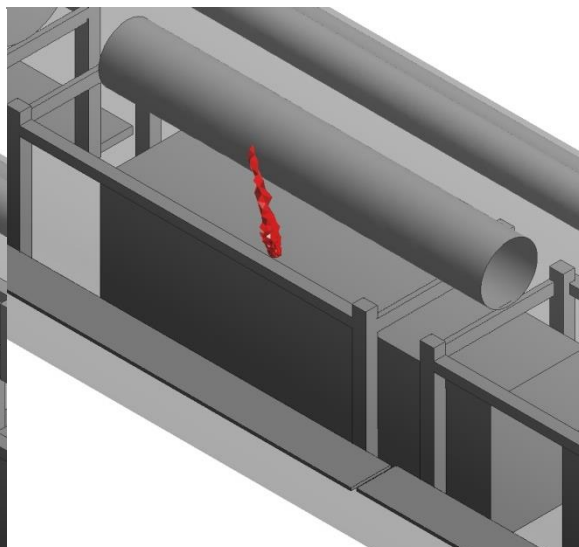


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۵۰ ثانیه

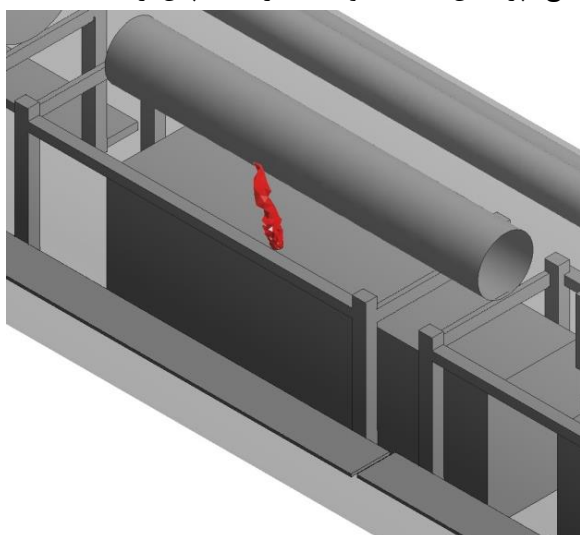
شکل پ - ۱۴- پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



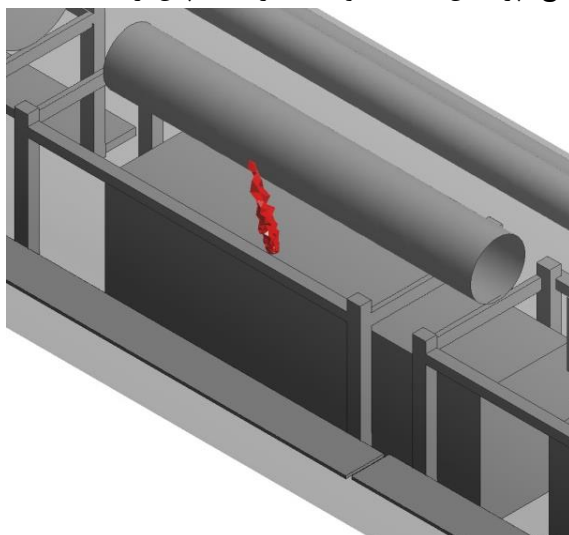
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۸۰ ثانیه



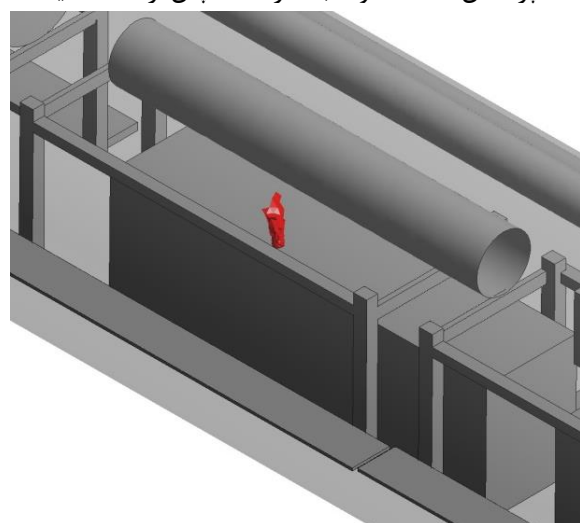
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۷۰ ثانیه



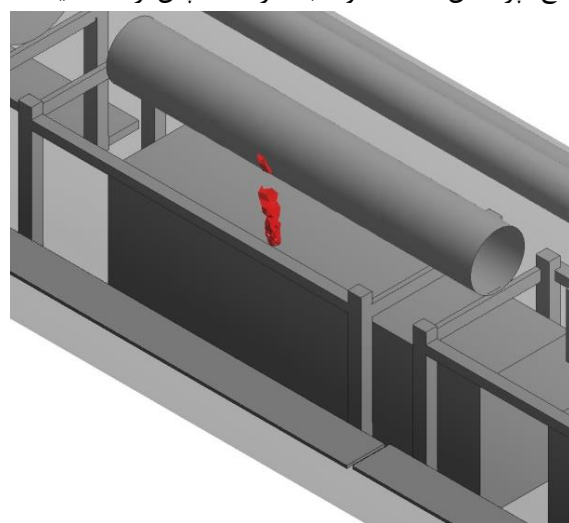
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۹۰ ثانیه

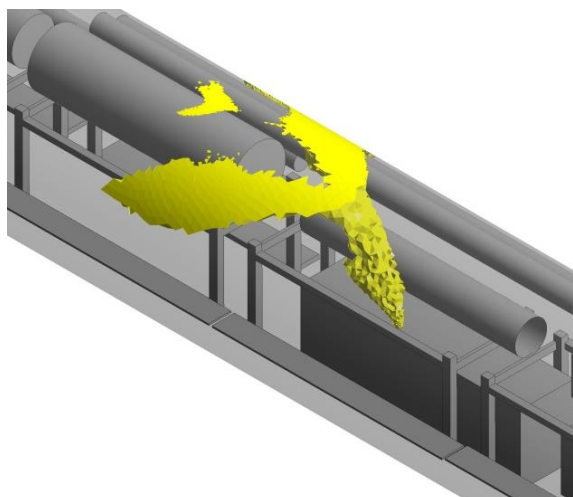


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۲۰ ثانیه

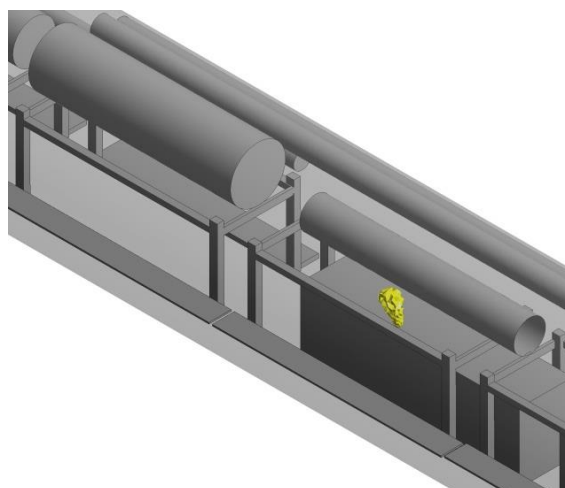


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ پس از ۱۱۰ ثانیه

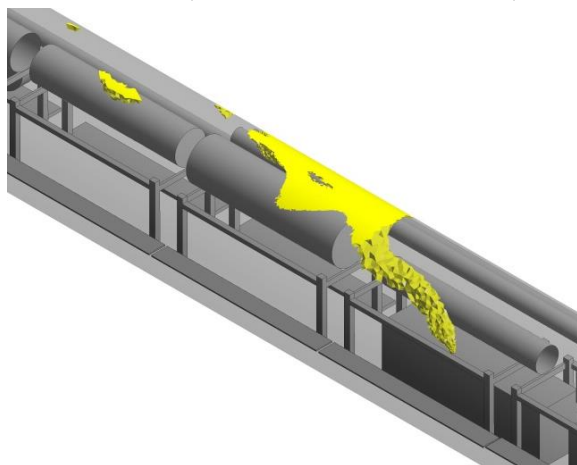
ادامه شکل پ - ۱۴- پراکنش منطقه آلوده به گاز CO₂ در نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



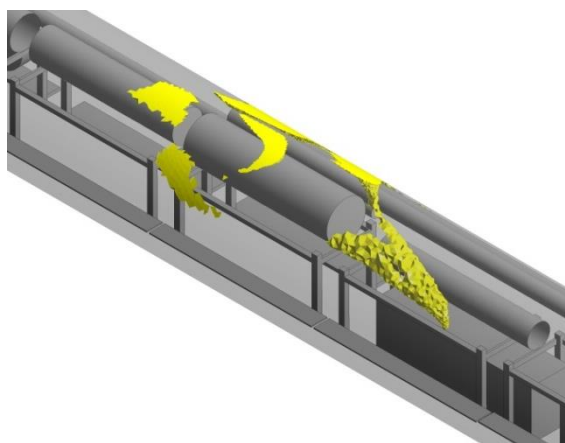
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۲۰ ثانیه



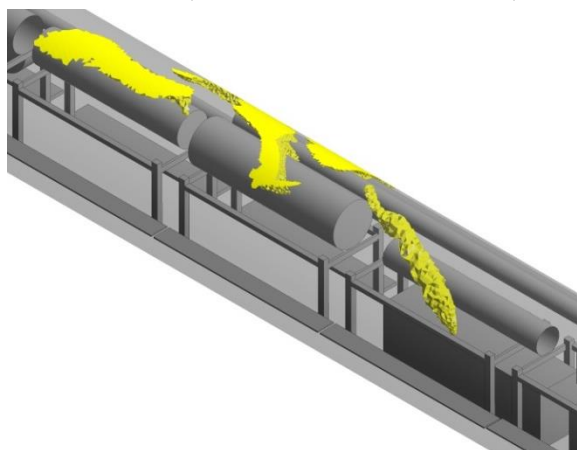
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۰ ثانیه



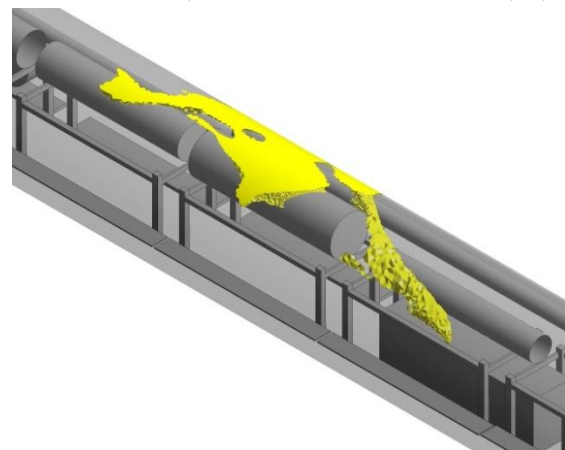
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۳۰ ثانیه

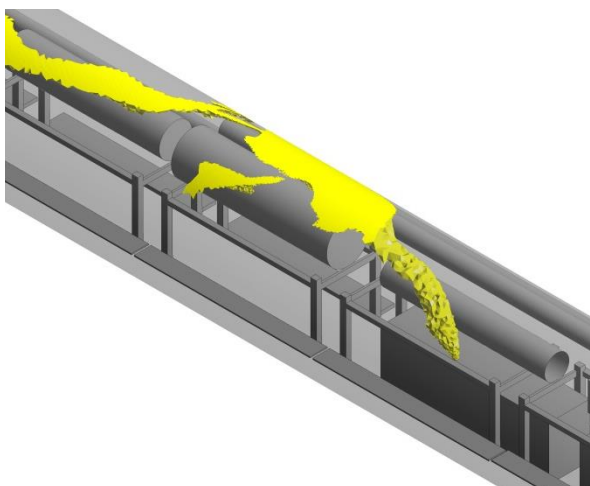


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۶۰ ثانیه

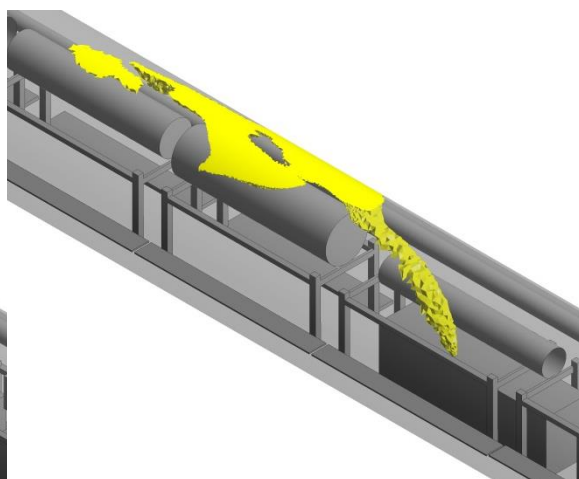


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۵۰ ثانیه

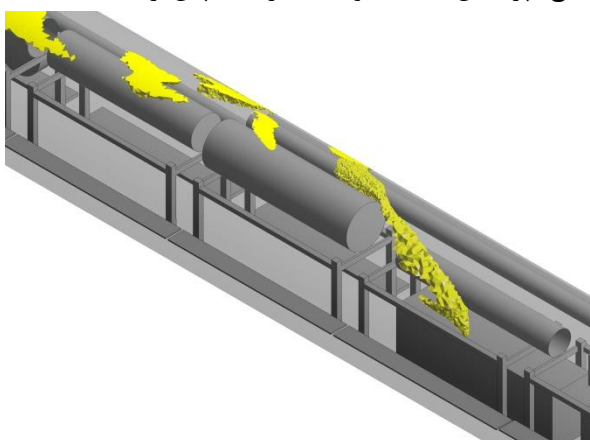
شکل پ - ۱۵ - پراکنش منطقه آلوده به گاز NO در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



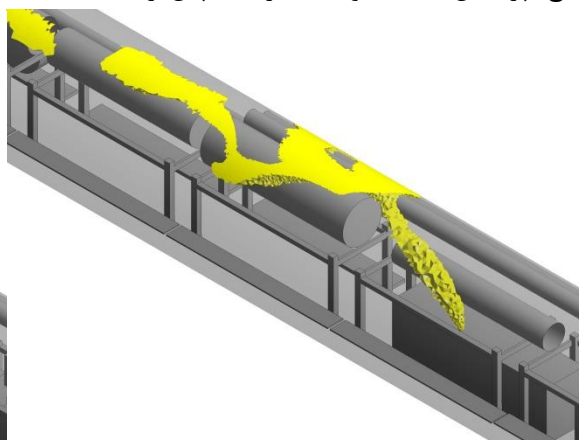
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۸۰ ثانیه



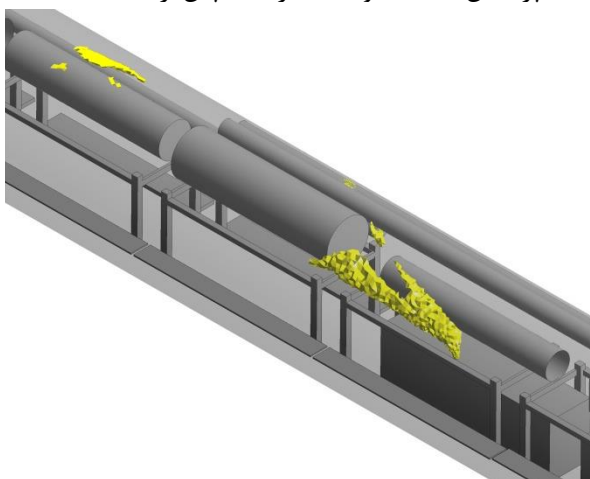
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۷۰ ثانیه



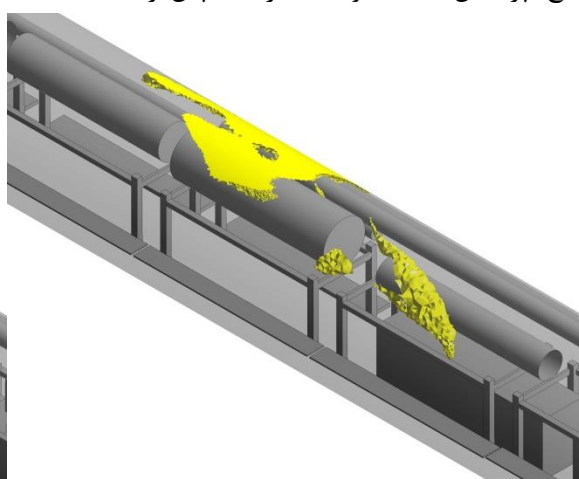
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۹۰ ثانیه

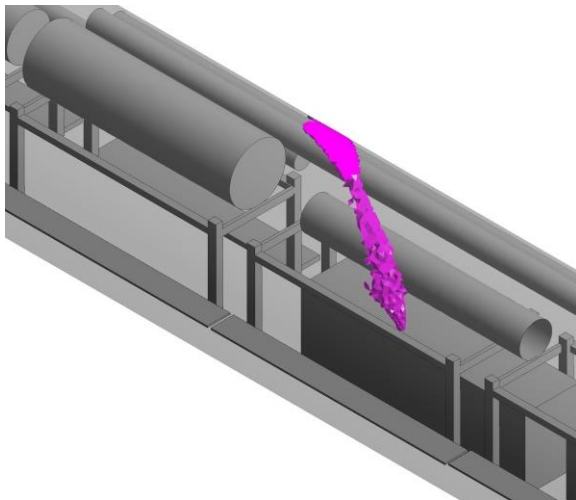


ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۲۰ ثانیه

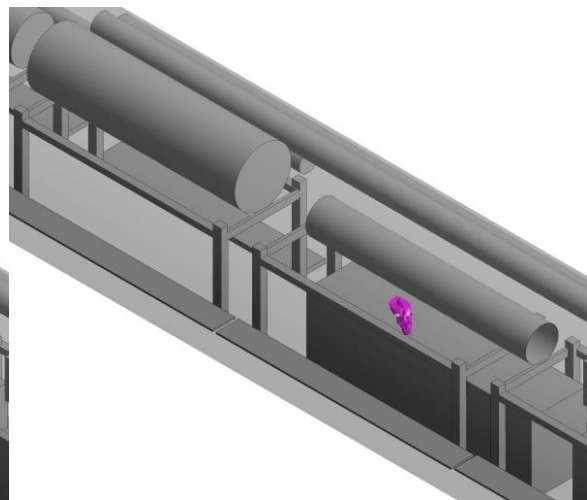


ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO پس از ۱۱۰ ثانیه

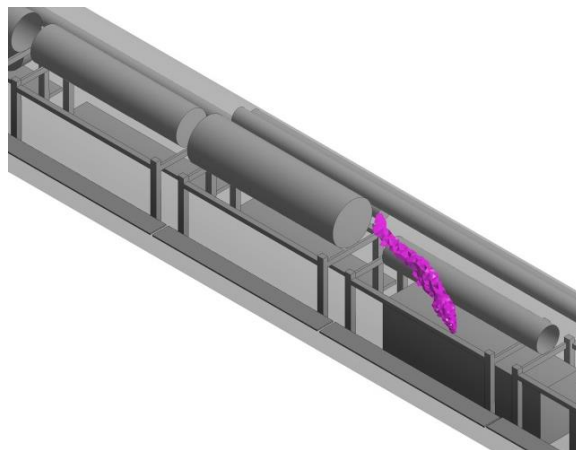
ادامه شکل پ - ۱۵- پراکنش منطقه آلوده به گاز NO در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



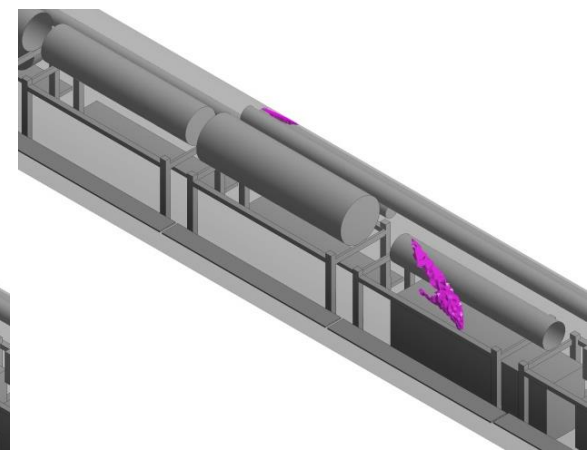
ب) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۲۰ ثانیه



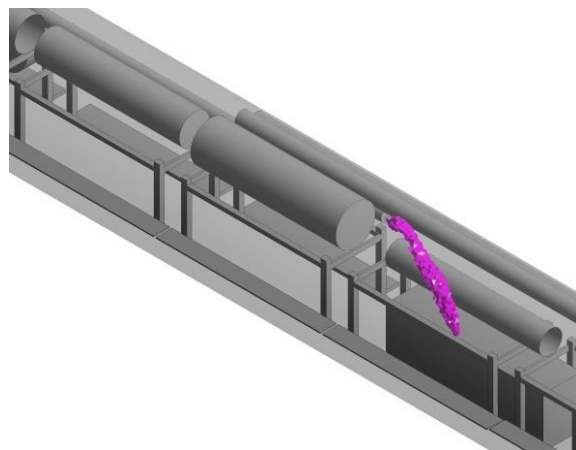
الف) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۰ ثانیه



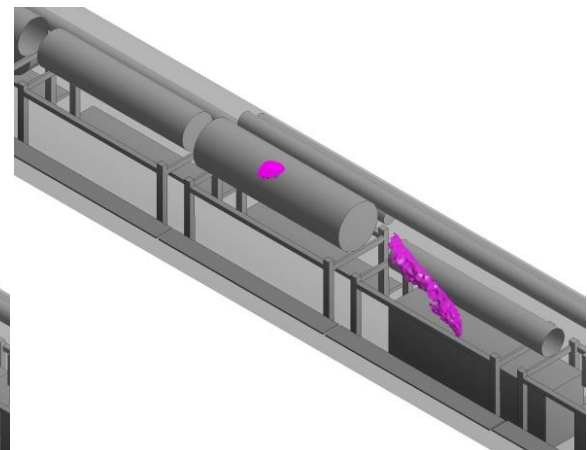
ت) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۴۰ ثانیه



پ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۳۰ ثانیه

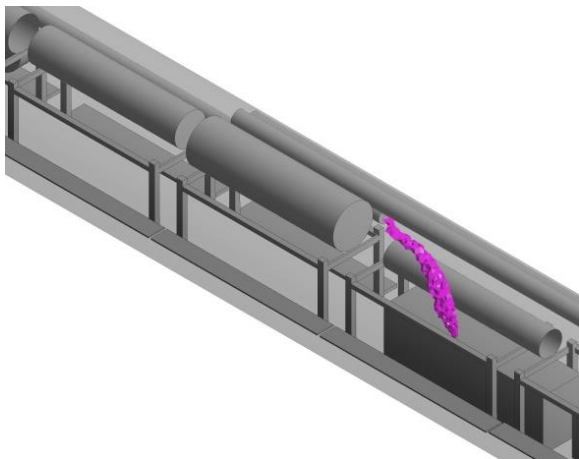


ج) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۶۰ ثانیه

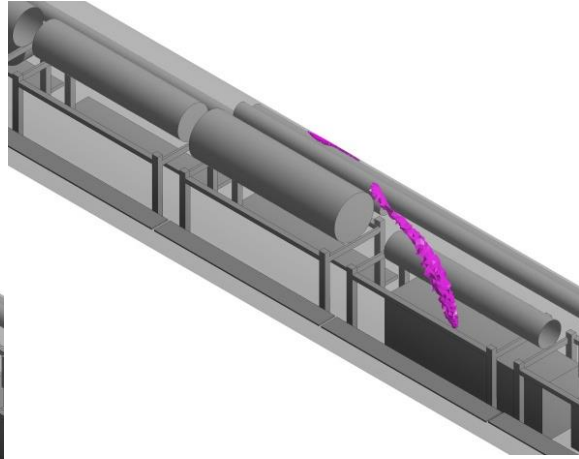


ث) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۵۰ ثانیه

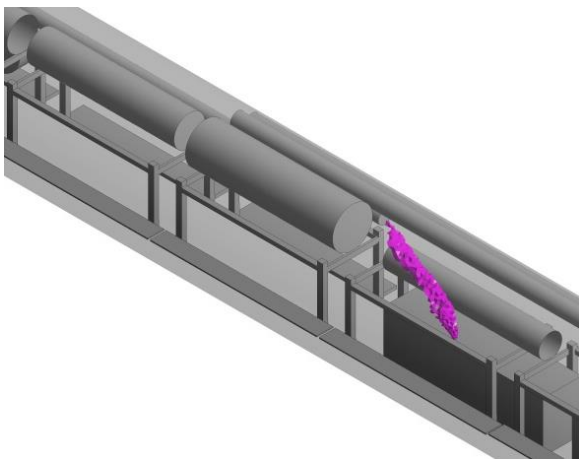
شکل پ - ۱۶- پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی



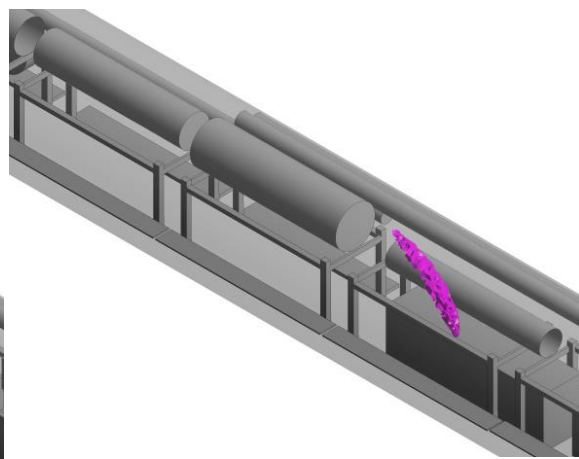
ح) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۸۰ ثانیه



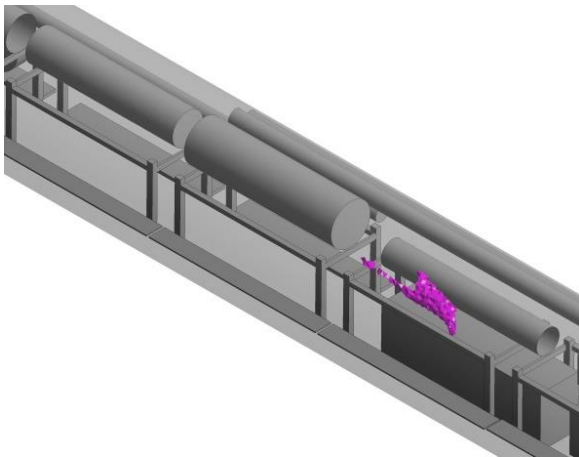
چ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۷۰ ثانیه



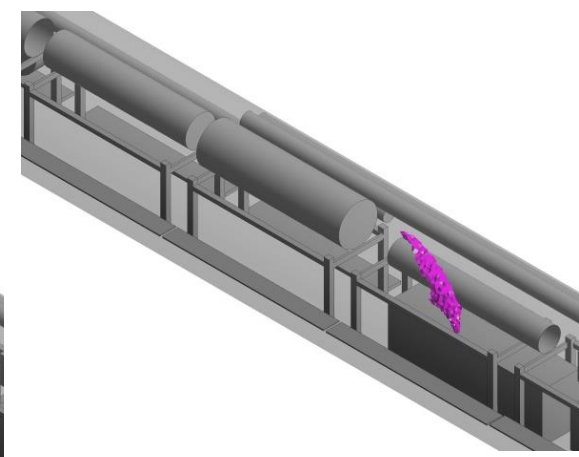
د) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۰۰ ثانیه



خ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۹۰ ثانیه



ر) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۲۰ ثانیه



ذ) پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 پس از ۱۱۰ ثانیه

ادامه شکل پ - ۱۶- پراکنش منطقه آلوده به گاز NO_2 در راهبرد نصب کامل مجرای تهویه و خاموش کردن بادبزن مکشی

Abstract

The Tunnel Boring Machines (TBMs) have revolutionized the tunneling industry to make the underground space safer, healthier, and more economical. To create a healthy work environment for people and equipment, the quality and quantity of airflow in TBMs should be sufficient to dilute gases, remove dust, and controlling the temperature. The numerical study of airflow distribution has mainly been concentrated on underground mines and road tunnels. Ventilation during the construction of long tunnels, especially the ventilation of the TBMs has received less attention. The two specific objectives of this research are first to study the airflow pattern and decreased dead zones in the TBM, and secondly, analysis of pollution concentrations from diesel locomotive and decreased pollutant volume to solve safety and health problems. The effect of increasing airflow quantity in the blowing fan to the dead zone volume and people breathing zone was studied. Several relevant scenarios such as switching off the exhausting fan, setting up complete duct from backup system to the mainframe area and the simultaneous effect of switching off the exhausting fan and setting up complete duct have been studied to decrease the number of dead zones and pollutant area. Modeling result shows that simultaneous use shutting down the exhaust fan and setting up complete duct can optimized airflow distribution and decrease dead zone and pollutant volume. The experimental measurements were carried out on the Chamshir tunnel to validate the results of a 3D numerical model.

Keywords: Modeling, Ventilation System, Tunnel Boring Machine, Computational Fluid Dynamics



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mining Engineering

**Modeling and analysis of airflow and
pollutant distribution in long tunnel is
being excavated by TBM
(Case study Chamshir Tunnel)**

By: Hamid Reza Nezarat

Supervisor:

Dr. Seyed Mohammad Esmail Jalali

Advisor:

Dr. Mohsen Nazari

September, 2019

