

## بررسی توزیع جریان هوا در قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع تونل با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه موردی: ماشین حفاری S124 شرکت هرنکنشت

حمیدرضا نظارت<sup>۱\*</sup>، سیدمحمداسماعیل جلالی<sup>۲</sup>، محسن نظری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشیار، دانشکده مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: دی ۱۳۹۶، پذیرش: تیر ۱۳۹۸)

### چکیده

آگاهی از الگوهای توزیع جریان هوا در داخل ماشین حفاری تمام مقطع تونل می‌تواند یک محیط ایمن برای پرسنل و ماشین آلات ایجاد کند. کمیت و کیفیت جریان هوا در فضاهای زیرزمینی بسیار مهم است به طوری که مقدار هوا در تهویه فضاهای زیرزمینی باید برای ترقیق گازها و گرد و غبار کافی باشد و دمای هوا را کنترل نماید. در این مقاله به منظور بررسی الگوهای توزیع جریان هوا در قسمت قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع S124 شرکت هرنکنشت از دینامیک سیالات محاسباتی و مطالعات میدانی استفاده شده است. به منظور بررسی استقلال شبکه، چهار مقدار مختلف از ابعاد شبکه اجرا شده و نتایج آن برای اطمینان از یک راه حل مستقل با سرعت محلی در یک نقطه مقایسه شده است. مدل‌سازی سیالاتی به روش حجم محدود مبتنی بر المان انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد جریان هوای کافی در ۸۹/۲ درصد از فضای ماشین وجود ندارد و از قسمت پشت اتاق کنترل تا انتهای قاب اصلی ماشین، منطقه مرده وجود دارد. این منطقه می‌تواند محل تجمع گازهای خطرناک، گرد و غبار و سایر آلاینده‌ها باشد. یکی از راهکارها برای کاهش مناطق مرده، افزایش دبی هوای ورودی است. افزایش میزان سرعت ورودی هوا و مطالعه توزیع جریان هوا انجام شد. مطالعات نشان داد در صورت استفاده از بیشینه ظرفیت جت فن‌ها، امکان کاهش مناطق مرده و ایجاد مناطق امن به صورت قابل قبولی وجود ندارد. لذا استفاده از جت فن با سرعت‌های بیشتر کمکی به بهبود توزیع جریان هوا نکرده و تنها هزینه‌های انرژی را افزایش خواهد داد.

### کلیدواژه‌ها

مدلسازی، جریان هوا، ماشین حفاری تمام مقطع تونل، دینامیک سیالات محاسباتی

\* عهده دار مکاتبات: hamidreza.nezarat@gmail.com

## -۱ مقدمه

حفاری پیوسته<sup>۳</sup> و رودهدر<sup>۴</sup> ارزیابی کردند [۳]. سربنیواسا و همکاران<sup>۵</sup> در سال ۱۹۹۳، بر روی سرعت هوا و تاثیر آن بر کنترل و تمرکز گرد و غبار در کارگاه استخراج جبهه کار طولانی مکانیزه مطالعه کرده‌اند [۴]. والا و همکاران<sup>۶</sup> در سال ۱۹۹۷ از دینامیک سیالات محاسباتی به منظور ارزیابی جریان‌های هوا در فضاهای زیرزمینی استفاده کردند [۵]. والا و همکاران در سال ۲۰۰۳ بر روی الگوهای جریان در اطراف فضای کاری ماشین حفاری پیوسته با طرح‌های مختلف کندن مطالعه کردند [۶]. پارا و همکاران در سال ۲۰۰۶ مطالعه عددی و تجربی سامانه‌های مختلف دهشی و مکشی و سامانه ترکیبی را در معادن عمیق انجام دادند [۷]. امین الساداتی و هومن در سال ۲۰۰۸؛ یک مدل دوبعدی را برای بررسی تاثیر طول پرده هوا بند بر رفتار جریان سیال در سرعت‌های مختلف جریان هوا مورد مطالعه قرار دادند [۸]. در همین سال ژنگ و تین<sup>۷</sup> با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری فلوئنت و گمبیت الگوی جریان هوا را در معادن زیرزمینی فلزی و غیرفلزی مطالعه کردند [۹]. تیلور و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۱۰) به منظور اندازه‌گیری مقدار و امتداد سرعت جریان هوا در اطراف ماشین حفاری پیوسته از سرعت‌سنج‌های اولتراسونیک استفاده کردند [۱۰]. استفنس و کالیزایا در سال ۲۰۱۰ نشت هوا را در معادن زغالسنگ مطالعه کردند [۱۱]. دینگو و همکاران (۲۰۱۱) کیفیت جریان هوا را در تونل‌های زیرزمینی در حال حفر بررسی کردند [۱۲]. ساسمیتو و همکاران<sup>۹</sup> در سال ۲۰۱۳ تهویه یک معدن زیرزمینی زغالسنگ شامل کارگاه‌های استخراج اطاق و پایه، تونل عمود بر لایه و تونل زیرزمینی با مقطع D را مدل‌سازی کردند [۱۳]. همچنین نیکنام و مدنی در سال ۱۳۸۹ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به تحلیل سه‌بعدی سیستم تهویه طولی گالری بهمین‌گیر امام‌زاده هاشم پرداخته‌اند [۱۴]. آنها در سال ۱۳۹۰ با هدف بهینه‌سازی سامانه تهویه موضعی و رقیق کردن گاز متان از نرم‌افزار فلوئنت استفاده کردند [۱۵]. اعرابیان و همکاران در سال ۱۳۹۱، سیستم تهویه طبیعی در تونل راه آهن زیرزمینی خط تهران- تبریز را با ساخت مدل فیزیکی سه‌بعدی و همچنین تحلیل عددی سیالاتی جریان مغشوش امکان‌سنجی نمودند [۱۶]. رفاهی و همکاران (۱۳۹۶)

تونل انتقال آب چمشیر به طول ۷۰۵۰ متر و قطر نهایی ۴/۶ متر در شرق استان بوشهر وظیفه انتقال آب از بند انحرافی به نیروگاه برق آبی را بر عهده دارد. این تونل به روش حفاری مکانیزه با استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع تک سپره<sup>۱</sup> S124 ساخت شرکت هرنکنشت در حال اجرا است. سامانه تهویه در این ماشین حفاری تمام مقطع به صورت دهشی است. به این ترتیب که هوای تازه از خارج تونل به کمک جت فن و از طریق لوله نصب شده در سقف تونل به داخل ماشین حفاری ارسال می‌شود. هوای ورودی به داخل تونل از طریق لوله تهویه پس از عبور از خشاب لوله تهویه و لوله‌های نصب شده بر روی دنباله دستگاه، با فشار به قسمت سینه کار تونل هدایت می‌شود و در برگشت، هوای آلوده را به همراه خود به خارج از تونل منتقل می‌کند.

بررسی توزیع جریان هوا و آلاینده‌ها در فضاهایی که میزان تولید آلاینده‌ها در آنها زیاد بوده یا دهانه‌های ارتباطی آن با هوای آزاد فاصله زیاد می‌گیرد، بسیار حایز اهمیت است. به طور کلی اگر به مسایل مربوط به تهویه در ابتدای طراحی و یا اجرا، توجه کافی نشود، قطعاً در هنگام انجام عملیات، راندمان کاری پرسنل عملیاتی و ماشین‌آلات بسیار پایین آمده و علاوه بر آن ممکن است زیان‌های عمده‌ای به ماشین‌آلات و سلامت نیروی انسانی وارد شود. به عنوان مثال عدم تهویه مناسب و انفجار گاز متان در تونل انتقال آب لس‌آنجلس موجب صدمه دیدن چهار کارگر و در تونل منطقه هیگاشیمورااما ژاپن نیز موجب کشته و زخمی شدن ۱۱ کارگر شد [۱]. در ماشین حفاری مکانیزه در تونل زاگرس نیز گاز سولفید هیدروژن، سیانید هیدروژن و متان در این تونل مشاهده شده، به طوری که غلظت گاز متان بالاتر از حد انفجار ثبت و منجر به تعطیلی عملیات به مدت چهار ماه گردید [۲].

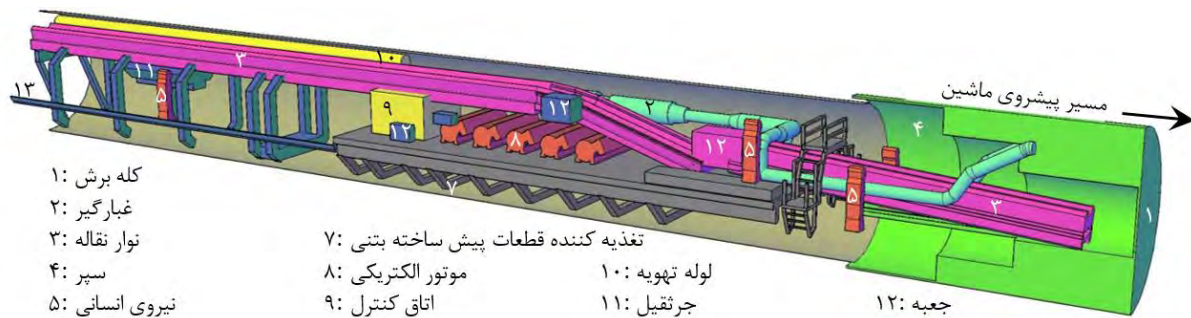
مطالعه و مدل‌سازی توزیع جریان هوا به کمک دینامیک سیالات محاسباتی در تمام قسمت‌های فعالیت‌های زیرزمینی معدنی و تونلسازی توسعه داده شده است. هردن و سولیوان<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۳ با به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی توزیع گرد و غبار و گاز متان را در اطراف ماشین

نقاله و الکتروموتور، به عنوان قاب اصلی ماشین در نظر گرفته شده است. باتوجه به شکل ۱ به دلیل پیچیدگی‌های هندسی مساله، ساده‌سازی‌هایی در هندسه ماشین صورت گرفت. در مدل‌سازی انجام شده سعی شده است ساده-سازی‌ها به گونه‌ای باشد که بر دقت نتایج حاصله اثرگذار نباشد و رفتار سیال درون مدل بسیار شبیه به رفتار آن در داخل فضای واقعی ماشین باشد. لذا ابتدا مدل هندسی مساله در محیط سه‌بعدی و با به کارگیری نرم‌افزار AutoCad3D ساخته و پس از ایجاد شبکه در پودمان<sup>۱۶</sup> سیالاتی، نرم‌افزار Ansys CFX وارد مرحله تحلیل عددی سیالاتی گردیده است. با تعریف پروژه در محیط این پودمان، قرار دادن شرایط مرزی بر روی مدل و تعریف کردن اهداف پروژه، محاسبات انجام شده است.

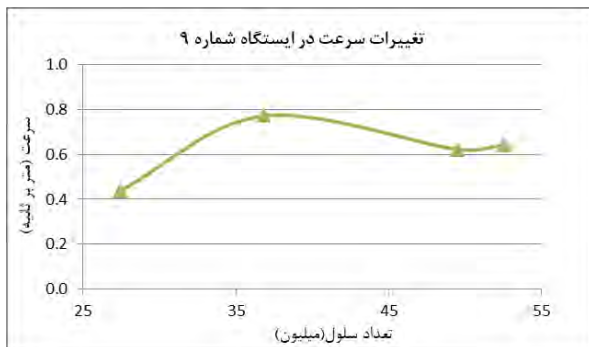
سامانه تهویه خط ۲ مترو مشهد را به کمک نرم‌افزار فلونت مدل‌سازی و با اطلاعات میدانی مقایسه کردند [۱۷]. به طور خلاصه، مدل‌سازی عددی جریان هوا به طور عمده در تونل‌های معدنی و کارگاه استخراج متمرکز شده و کمتر به تهویه در طول ساخت و ساز تونل‌های طولانی و به ویژه ماشین حفاری تمام مقطع توجه شده است. هدف اصلی این مقاله بررسی و بهینه‌سازی الگوهای جریان هوا و تهویه در قسمت قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع تونل است.

## ۲- روش و مراحل انجام تحقیق

محدوده مورد نظر برای مدل‌سازی، قاب اصلی<sup>۱۰</sup> ماشین حفاری تمام مقطع است. کل فضای بین کله برش<sup>۱۱</sup> و سامانه پشتیبان دستگاه<sup>۱۲</sup> که شامل سپر، بالابر<sup>۱۳</sup>، تغذیه کننده قطعات پیش ساخته بتنی<sup>۱۴</sup>، جرثقیل و راهرو<sup>۱۵</sup>، نوار



شکل ۱: مدل هندسی ماشین حفاری تمام مقطع S124 شرکت هرنکنشت



شکل ۲: تحلیل شبکه مش با استفاده از تعداد شبکه‌های مختلف و مقدار سرعت محلی در ایستگاه شماره ۹

محیط محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS ICEM CFD ایجاد و شبکه‌بندی شده است. چهار مقدار مختلف از ابعاد شبکه به منظور بررسی استقلال شبکه اجرا شده و نتایج آن با سرعت محلی در یک نقطه مقایسه شده است. مطابق شکل ۲، مقایسه بین تعداد سلول‌های شبکه با سرعت هوا در ایستگاه شماره ۹ نشان می‌دهد تغییرات سرعت در ایستگاه شماره ۹ با ابعاد شبکه ۴۹ میلیون سلول در مقایسه با ۵۲ میلیون سلول کمتر از ۳ درصد اختلاف دارد در حالی که نتایج ابعاد شبکه با ۳۶ میلیون بیش از ۲۰ درصد در مقایسه با مقدار ۴۹ میلیون سلول انحراف دارد.

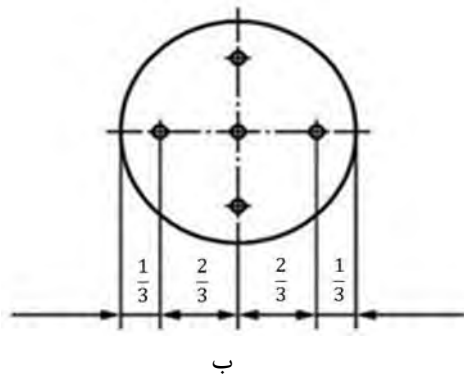
لذا ابعاد شبکه با ۴۹ میلیون سلول برای مدل‌سازی در این مرحله کافی است. پارامترهای آماری کیفیت شبکه در مدل با ۴۹ میلیون سلول از نظر معیارهای کیفیت سلول<sup>۱۷</sup>، نسبت عرضی<sup>۱۸</sup>، چولگی<sup>۱۹</sup> و کیفیت تعامد<sup>۲۰</sup> در جدول ۱

مرکز کل و در کل پنج نقطه، به عنوان نقاط نمونه‌برداری انتخاب و میانگین حسابی سرعت هوا در این پنج نقطه، به عنوان سرعت هوا در این مقطع به منظور تعیین شرایط مرزی مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۳-ب؛ نمایی از محل نقاط نمونه‌برداری به روش چند نقطه‌ای را نشان می‌دهد. جدول ۲ میانگین سرعت جریان هوا و دما را برای هریک از لوله‌های ورودی ۱ و ۲ نشان می‌دهد. در این مساله شرایط مرزی خروجی جریان بر روی فشار یک اتمسفر تنظیم و شرایط مرزی سطوح دیوار به صورت شرط مرزی لغزش یا عدم لغزش اعمال شده است.

ارائه شده است. پارامترهای مذکور نشان می‌دهند شبکه ایجاد شده از کیفیت بالایی برخوردار است. به منظور تعیین شرایط مرزی، نمونه‌برداری از سرعت جریان هوا در خروجی لوله‌های تهویه به روش چند نقطه‌ای انجام شده است. باتوجه به سرعت بالای هوا در این قسمت امکان استفاده از بادسنج‌های حرارتی سیم داغ<sup>۲۱</sup> وجود نداشته، لذا به منظور بهینه‌سازی و استفاده از تجهیزات با سطح مقطع کوچک‌تر از بادسنج مینی‌پره‌ای مدل EM-9000 استفاده شده است. در نمونه‌برداری به روش چند نقطه‌ای، سطح مقطع اندازه‌گیری به چهار قسمت مساوی تقسیم شده است (شکل ۳-الف). چهار مرکز و

جدول ۱: پارامترهای آماری کیفیت شبکه توری

پارامتر	کیفیت شبکه	چولگی	کیفیت تعامد	نسبت عرضی
میانگین	۰/۷۴	۲ ۰/۵	۰/۷۵	۲/۵۶
انحراف معیار	۰/۲	۱ ۰/۵	۰/۱۵	۵/۹۲



ب



الف

شکل ۳: الف) نمایی از نمونه برداری جریان هوا توسط دستگاه بادسنج مینی پره‌ای (ب) محل نقاط نمونه برداری به روش چند نقطه‌ای

جدول ۲: میانگین سرعت هوا و دما در ورودی لوله شماره ۱ و ۲

پارامتر آماری	ورودی لوله شماره ۱ جریان هوا		ورودی لوله شماره ۲ جریان هوا	
	سرعت (متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)	سرعت (متر بر ثانیه)	دما (درجه سلسیوس)
میانگین	۷/۹	۳۱/۳	۵/۶	۳۱/۴۸
انحراف معیار	۰/۰۷	۰	۰/۰۸	۰/۰۴

جریان هوای مدلسازی شده سه‌بعدی، غیرمتراکم، لزج، نیوتنی، پایدار و آشسته در نظر گرفته شده است. از حرارت ایجاد شده به واسطه کار سیال لزج در تونل چشم‌پوشی شده و دیوارها عایق و تهویه به صورت هم‌دما انجام شده است. از انتقال حرارت تشعشعی و تاثیر شیب تونل بر تهویه

چشم‌پوشی شده است. بر اساس فرضیات بیان شده جریان هوا در فضای کاری در ماشین با معادلات جریان ناویر استوکس که شامل معادلات بقای جرم و ممنتوم است قابل حل است (رابطه‌های (۱) و (۲)).

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

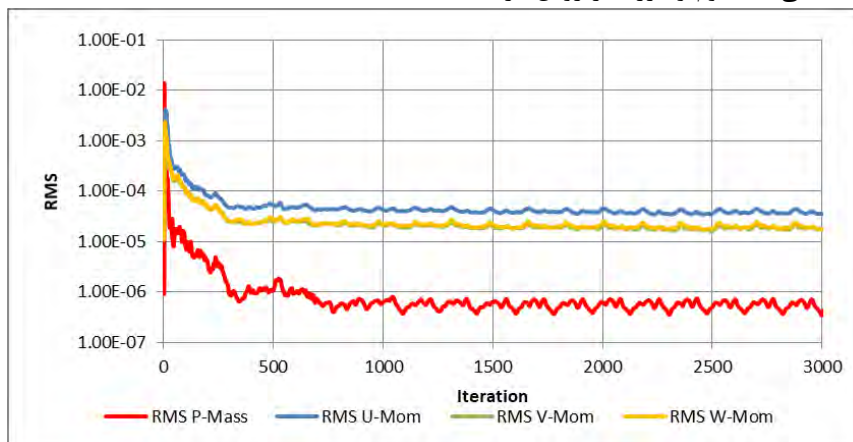
دوم<sup>۲۲</sup> گسسته‌سازی شده است. برای کوپل سرعت و فشار نیز از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است.

معیار همگرایی برای معادلات جرم، ممنتوم، آشفتگی کمتر از  $10^{-4}$  در نظر گرفته شده است. برای همگرا شدن مساله از یک دستگاه رایانه با ۲۴ پردازنده و ۶۰ گیگابایت حافظه داخلی استفاده شد که برای تعداد ۳۰۰۰ تکرار حدود ۹۸ ساعت زمان محاسبات به طول انجامید. شکل ۴ نمودار مقادیر باقیمانده را برای معادلات پیوستگی و ممنتوم نشان می‌دهد. به منظور بررسی همگرایی مساله عدم توازن شار جرمی و ممنتوم در راستاهای مختلف کمتر از یک درصد در نظر گرفته شد. همچنین تغییرات سرعت در ایستگاه شماره ۷ بررسی شد که نتایج مطابق مطابق شکل ۵ نشان می‌دهد مساله پس از ۵۶۰ مرحله تکرار همگرا شده است. پس از همگرایی مساله به منظور بررسی توزیع جریان هوا نمودار تغییرات سرعت هوا در مقاطع عرضی از قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع ترسیم شد (شکل ۶).

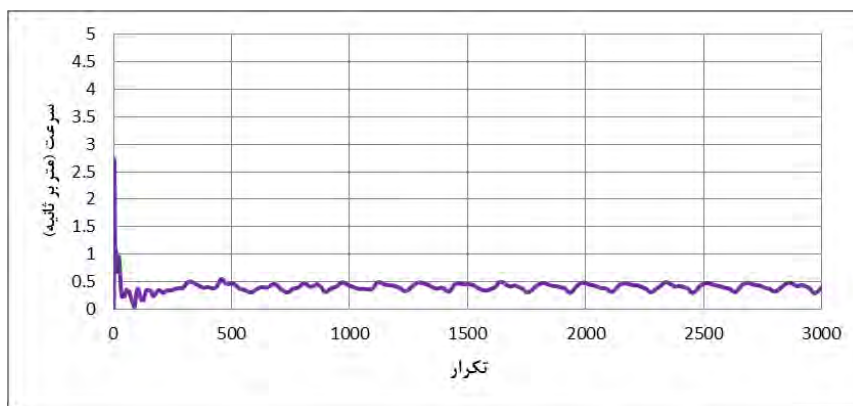
$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_e \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_i \quad (2)$$

که در آن  $\rho$  چگالی سیال،  $u$  سرعت اجزای هوا در امتداد  $x_j$ ، فشار  $p$ ، ضریب معادل چگالی دینامیک،  $\mu_e = \mu + \mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$ ، ضریب چگالی دینامیک جریان آشفته،  $\mu$  ضریب چگالی دینامیک و  $g_i$  شتاب جاذبه اجزا در امتداد  $x_i$  است.

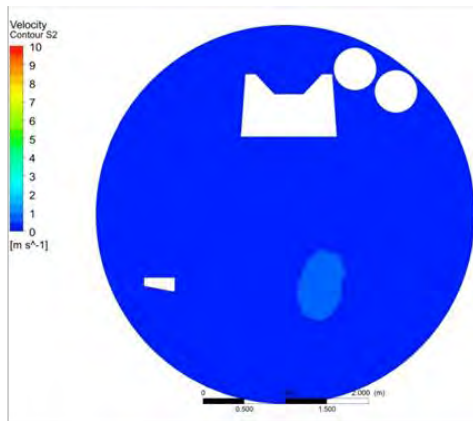
پژوهشگران مختلفی نظیر نورتن و همکاران (۲۰۰۷)، سورنسن و نیلسن (۲۰۰۳)، مولونی و همکاران (۱۹۹۹) و مولونی و لوندز (۱۹۹۹) به همبستگی خوبی بین نتایج اندازه‌گیری و تخمین زده شده با استفاده از مدل‌سازی آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد در تونل و تونل‌های جاده‌ای دست پیدا کردند. علاوه بر این تورانو و همکاران در سال ۲۰۰۹ پیشنهاد دادند که مدل  $k-\epsilon$  استاندارد نتایج بهتری را در مقایسه با مدل‌های Spalart Allmares،  $k-\omega$  و SST ارائه می‌دهد [۱۸ تا ۲۲]. لذا در این پژوهش از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شده است. به منظور بهبود دقت مدل‌سازی معادلات آشفتگی، ممنتوم و انرژی از روش مرتبه



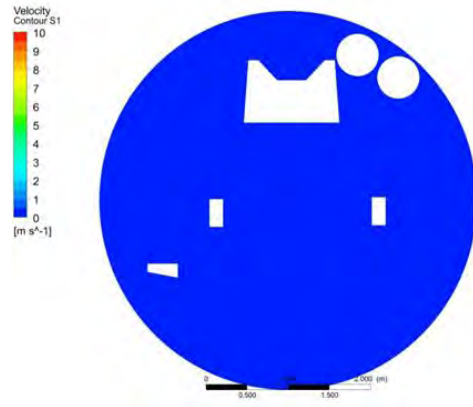
شکل ۴: مقادیر باقیمانده معادلات پیوستگی و ممنتوم برای ۳۰۰۰ مرحله تکرار



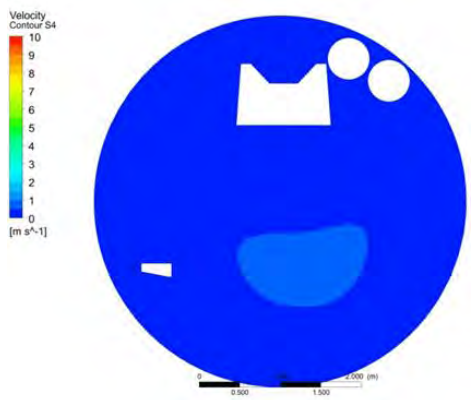
شکل ۵: تغییرات سرعت در ایستگاه شماره ۷ براساس تعداد تکرار



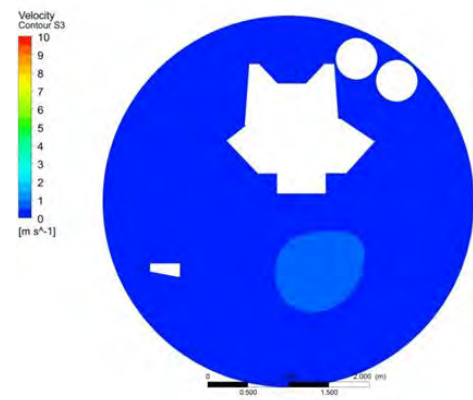
الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۲



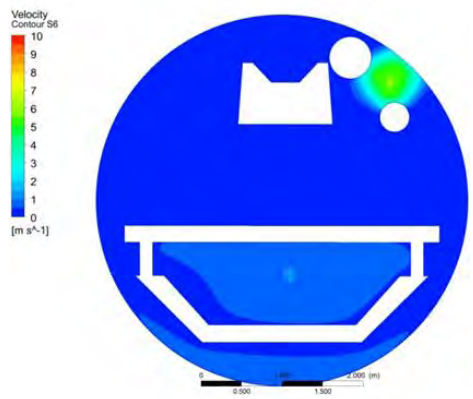
الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۱



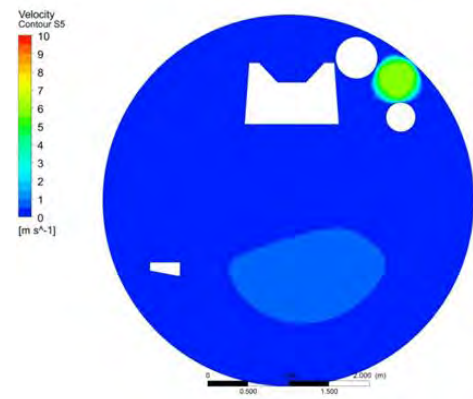
الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۴



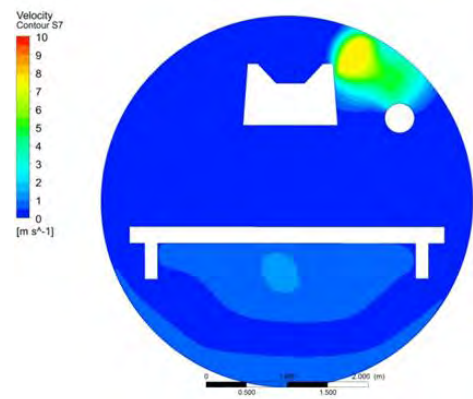
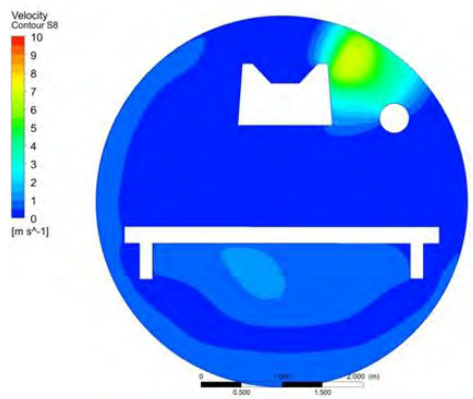
الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۳



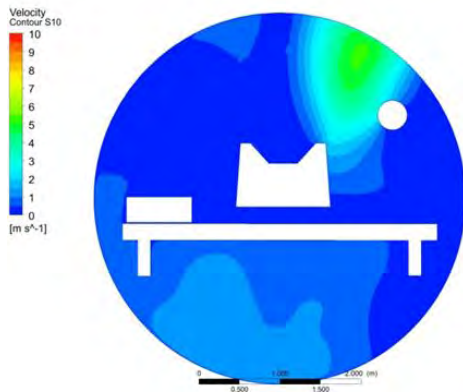
الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۶



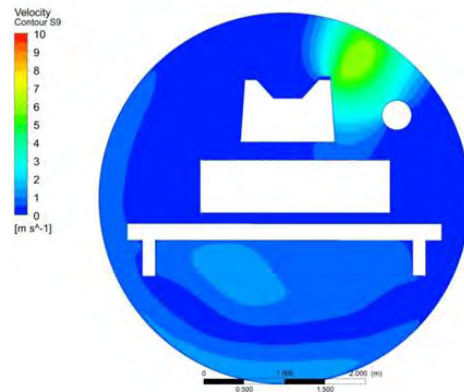
الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۵



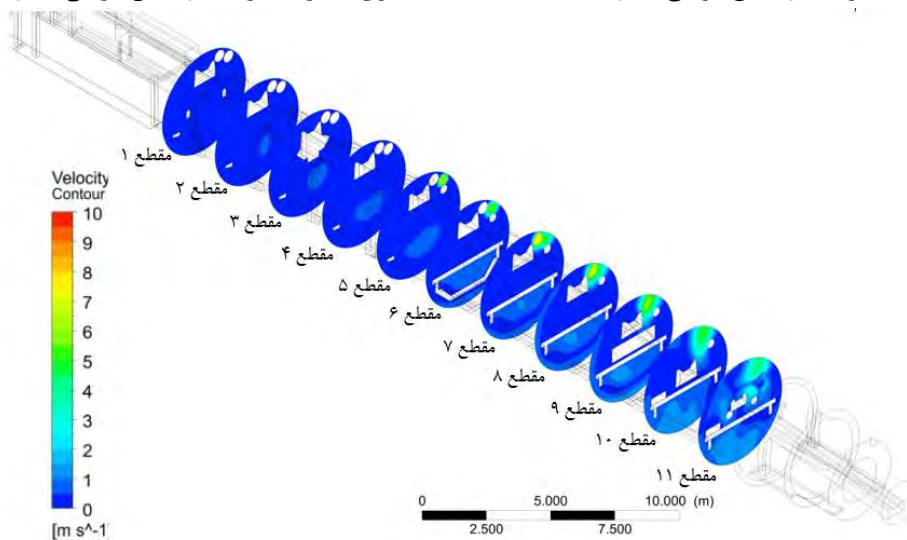
الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۸



الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۷



الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۱۰



الگوی تغییرات سرعت در مقطع عرضی شماره ۹

شکل ۶: الگوی تغییرات سرعت جریان هوا در مقاطع عرضی از قاب اصلی ماشین حفاری تمام مقطع تونل

در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی شده سرعت جریان هوا با استفاده از یک دستگاه بادسنج EM-9000 در فاصله ۱۷۰ سانتی‌متری از کف و در محل عبور پرسنل اندازه‌گیری در ۳ نقطه و ۵ بار تکرار اندازه‌گیری شد (شکل ۷). در مواردی که سرعت جریان هوا به میزان ۱۰ درصد و یا بیشتر انحراف داشت، نمونه باطل شده و در محاسبات قرار نگرفته است. پس از محاسبه میانگین و انحراف معیار سرعت در هر یک از ایستگاه‌ها، نتایج با مقادیر سرعت در مدل‌سازی شده مقایسه شد.

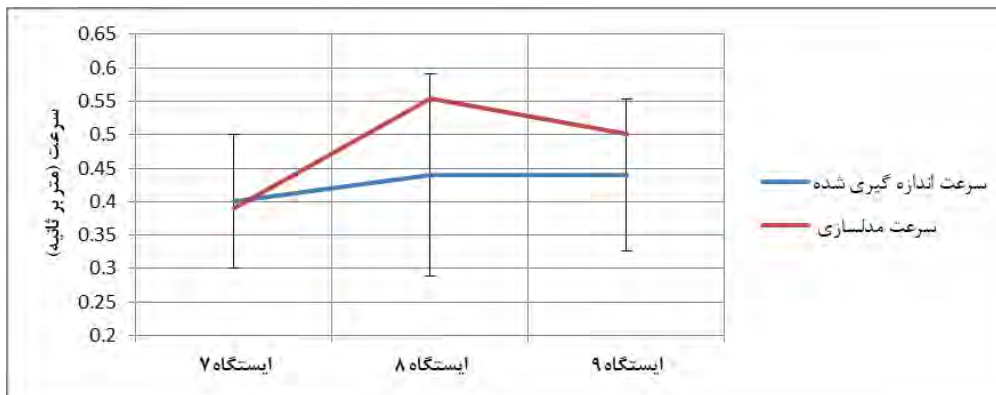
مدلسازی جریان سیالات با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نسبت به رویکردهای تجربی شامل هزینه پایین، سرعت بالا و قابلیت اندازه‌گیری شبیه‌سازی در شرایط واقعی و ایده‌آل است. با این حال، به عنوان یک روش حل عددی برای هندسه‌ها و شرایط پیچیده، دینامیک سیالات محاسباتی نمی‌تواند از ساده‌سازی‌های مهندسی و تقریب‌های ریاضی مورد نیاز برای انجام پروژه مستثنی باشد [۸]. اعتبارسنجی ابزار اصلی برای ارزیابی دقت و قابلیت اطمینان در شبیه‌سازی‌های محاسباتی مانند دینامیک سیالات محاسباتی است و با مقایسه دقت نتایج محاسبات با داده‌های آزمایشی انجام می‌شود.



شکل ۷: اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در مقاطع مختلف توسط بادسنج مینی پره‌ای

است [۲۳، ۲۴]. محاسبات در سه ایستگاه ۷ تا ۹ نشان داد مقدار ضریب نیکویی برازش برابر ۰/۸۹۹۷ است لذا مدل‌سازی انجام شده از دقت بسیار بالایی برخوردار است. علت اختلاف اندک در نتایج می‌تواند ناشی از فرضیات مدل‌سازی بر اساس فرضیات جریان پایا و ساده‌سازی‌های صورت گرفته در هندسه مساله باشد. در این مطالعه از تاثیر پارامترهای رطوبت و دما به دلیل تغییر اندک در زمان اندازه‌گیری، چشم‌پوشی شده است.

مطابق شکل ۸ در ایستگاه‌های شماره ۷ تا ۹ روند تغییرات سرعت در نتایج اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی مشابه است و نتایج مدل‌سازی در فاصله انحراف معیار اطلاعات اندازه‌گیری شده قرار دارد. برای مشخص شدن اعتبار مدل‌سازی از ضریب نیکویی برازش ( $R^2$ ) برای مقایسه نتایج سرعت‌های مدل‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری میدانی، استفاده شد. تغییرات ضریب نیکویی برازش بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده خطای واریانس کمتر است و مقادیر بیشتر از ۰/۵ برای مدل‌سازی قابل قبول

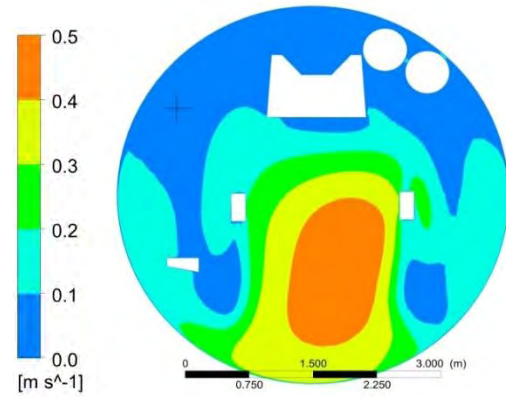
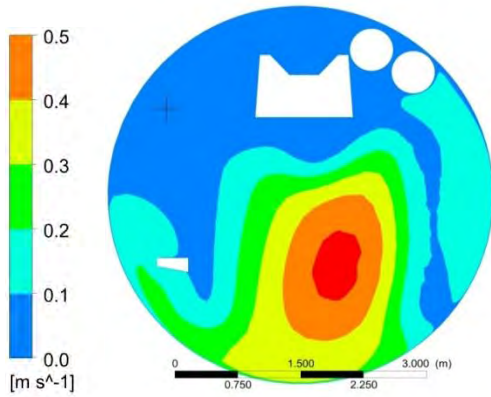


شکل ۸: مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده سرعت هوا با نتایج مدل‌سازی

جریان هوا تجمع یابد. بر این اساس مناطق مرده در مقاطع عرضی قاب اصلی ماشین حفاری مطابق شکل ۹ شناسایی و مشخص شده است. رنگ قرمز مناطق با سرعت بیشتر از ۰/۵ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد.

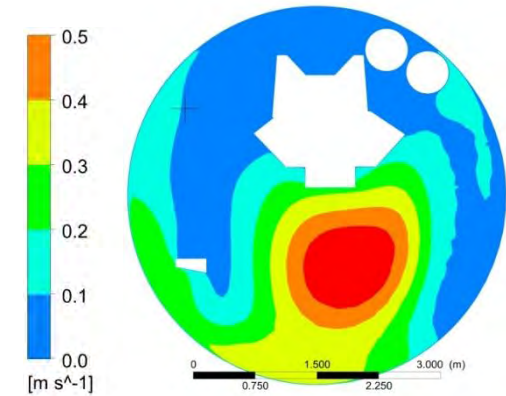
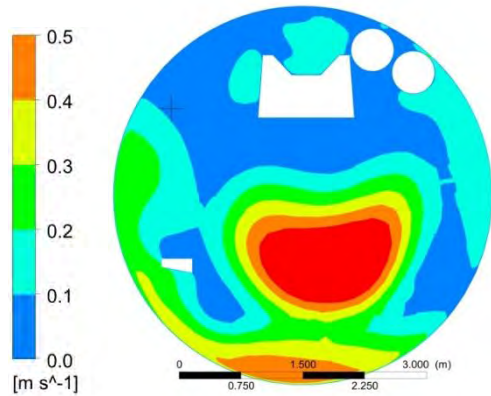
در داخل فضاهای زیرزمینی و مناطقی که سرعت جریان هوا از سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه کمتر باشد مطابق استاندارد SIA 196 کشور سوئیس، منطقه مرده<sup>۲۳</sup> نامیده می‌شود. در این مناطق ممکن است گازهای خطرناک و یا جریان گرد و غبار و سایر آلاینده‌ها به دلیل سرعت پایین





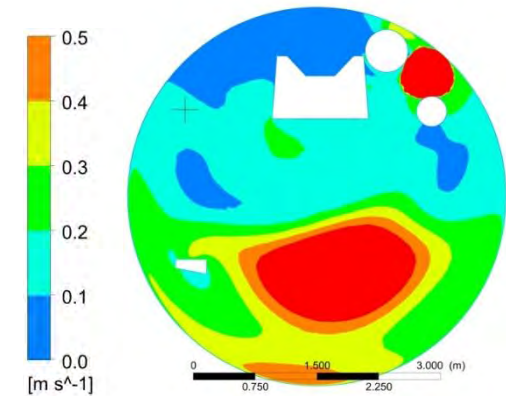
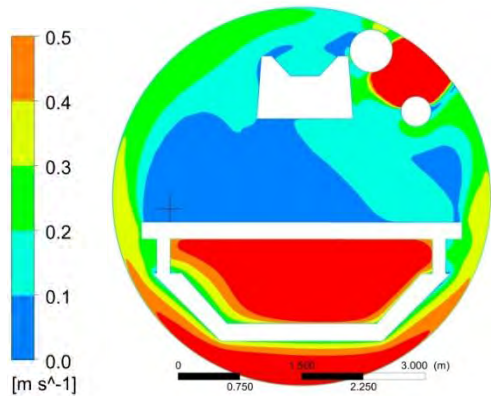
الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۲

الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۱



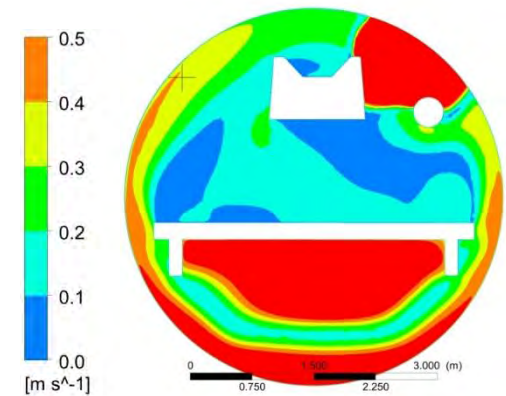
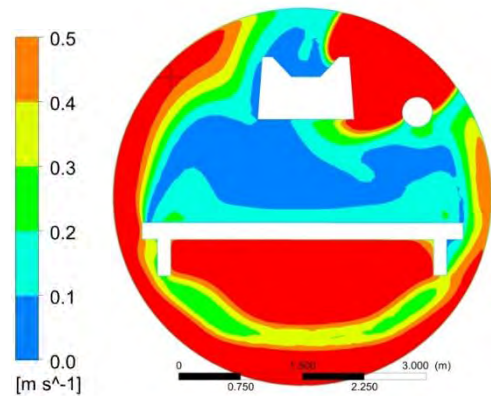
الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۴

الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۳



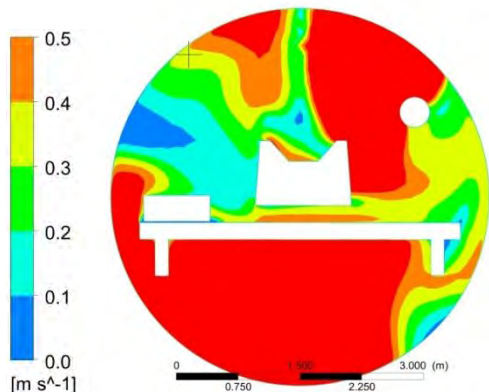
الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۶

الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۵

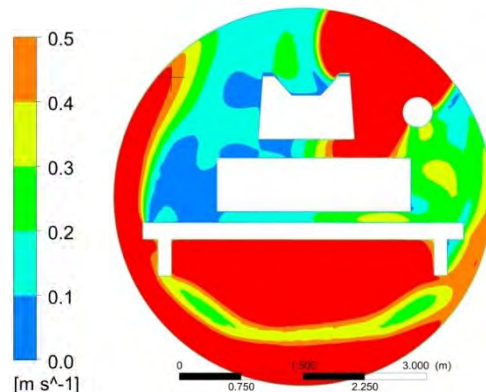


الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۸

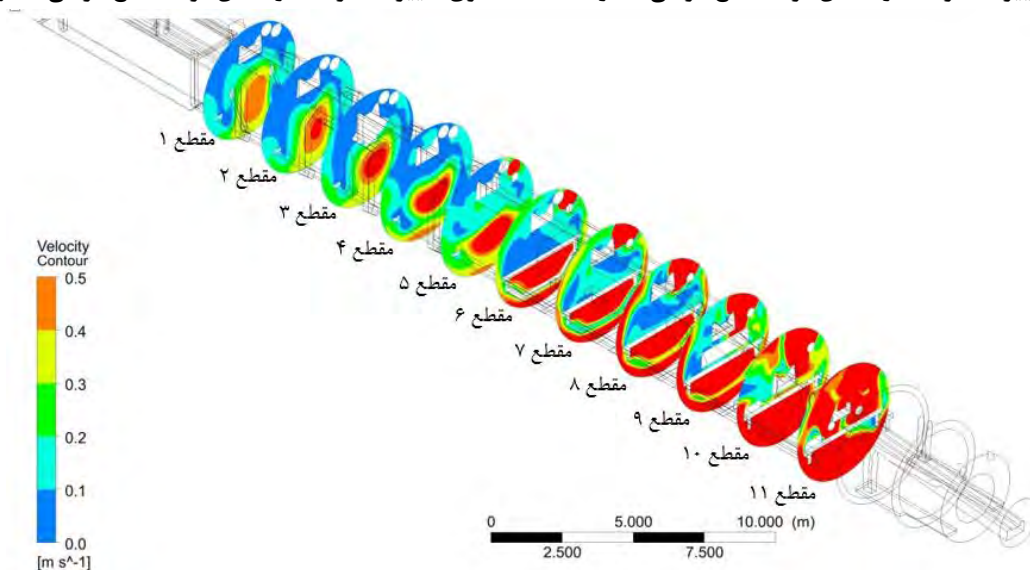
الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۷



الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۱۰



الگوی تغییرات سرعت در مناطق مرده مقطع عرضی شماره ۹

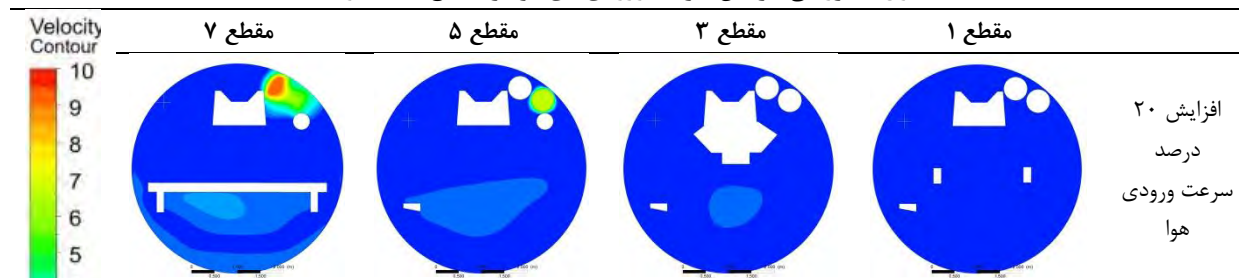


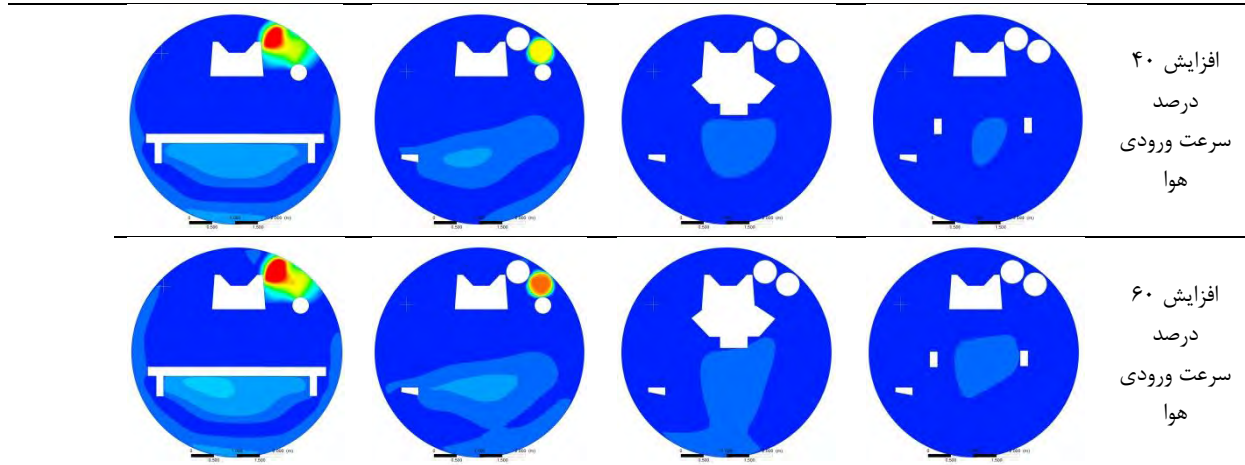
شکل ۹: مناطق مرده در مقاطع مختلف ماشین حفاری تمام مقطع تونل

منظور کاهش مناطق مرده، استراتژی افزایش سرعت ورودی هوا مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد، سرعت جریان هوا در ورودی‌ها افزایش و الگوهای تغییر سرعت در چهار ایستگاه مختلف ۱، ۳، ۵ و ۷ مطالعه شد (جدول ۳).

مطابق شکل ۹ در مکان‌های حضور و مسیر تردد پرسنل در مقاطع ۱ تا ۷ منطقه مرده وجود دارد و بیش از ۸۹/۲ درصد از حجم کل ماشین سرعتی کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه دارد. لذا با توجه به شرایط مرزی حاضر، میزان هوای ورودی به منظور تهویه این مقاطع کافی نیست. به

جدول ۳: بررسی افزایش سرعت ورودی‌های هوا بر مقاطع ۱، ۳، ۵ و ۷





استفاده از جت فن با سرعت‌های بیشتر کمکی به بهبود توزیع جریان هوا نکرده و تنها هزینه‌های انرژی را افزایش خواهد داد. پیشنهاد می‌شود به منظور بهبود توزیع جریان هوا در مقاطع ۱ تا ۷ از تهویه مکشی موضعی و یا تغییر در معماری ماشین استفاده شود.

### مراجع

- [1] Deere, D. (1981) "Adverse geology and TBM tunneling problems", rapid excavation and tunneling conference (RETC), pp. 574-585.
- [2] Satari, G. Ajodani, S. Bathaie, H. (2011). "Mechanized Tunneling in Water and Gas Crisis, Case Study of Zagros Tunnel." First Asian an 9<sup>th</sup> Iranian tunneling symposium (In Persian).
- [3] Heerden, J. Sullivan, P. (1993). "The application of CFD for evaluation of dust suppression and auxiliary ventilating system used with continuous miners", 6<sup>th</sup> US Mine Ventilation Symposium.
- [4] Srinivasa Rao, B., Baafi, E.Y., Aziz, N.I. and Singh, R.N. (1993), "Three Dimensional Numerical Modelling of Air Velocities and Dust Control Techniques in a Longwall face", Proc. of 6<sup>th</sup> U.S. Mine Ventilation Symposium, June 21 - 23, Salt. Lake City, Utah, S M E , Chapter 43, pp 287 - 292.
- [5] Wala, A., Jacob, J., Brown, J. and Huang, G., (2003). "New approaches to mine-face ventilation", mining Engineering, 55(3), 25-30 .
- [6] Wala, M.A., Vytla, S., Taylor, C.D., and Huang, P.G., (2007), "Mine Face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation," Mining Engineering, Vol 59, No 10..

باتوجه به نتایج به دست آمده مشخص شد با افزایش دبی به میزان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد، به ترتیب ۲/۳۲، ۵/۴۸ و ۱۳/۴۲ درصد از حجم مناطق مرده کل ماشین کاسته خواهد شد. لذا تغییرات سرعت جریان هوا در ورودی‌ها تاثیر چندانی بر افزایش سرعت در مکان‌های حضور و مسیر تردد پرسنل و کاهش مقادیر مرده ندارد. زیرا مسیر اصلی جریان هوا در مسیر برگشت از جبهه کار، در قسمت کف ماشین قرار دارد و افزایش سرعت جریان هوا تاثیری بر کاهش مناطق مرده در قسمت حضور پرسنل ندارد.

### ۳- نتیجه‌گیری

عدم پیش‌بینی و بررسی تغییرات الگوی سرعت جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع می‌تواند موجب بروز برخی بیماری‌های تنفسی، قلبی و ریوی و مشکلات بسیاری از جمله افزایش ناراضی‌های شغلی و کاهش راندمان پرسنل عملیاتی گردد. مدلسازی جریان هوا در ماشین حفاری تمام مقطع S124 شرکت هرنکشت نشان داد باتوجه به شرایط فعلی ورودی‌های جریان هوا در داخل ماشین؛ میزان ۸۹/۲ درصد از حجم فضای ماشین دارای سرعت کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه است و در مقطع ۱ تا ۷ که محل حضور و تردد پرسنل عملیاتی است منطقه مرده وجود دارد. به منظور کاهش این منطقه مرده یکی از راهکارها افزایش میزان دبی هوای ورودی است که با تغییر سرعت چرخش فن امکان پذیر است. مطالعات نشان داد با افزایش ۶۰ درصدی میزان سرعت ورودی هوا و یا به عبارتی استفاده از بیشینه توان تولیدی فن‌های موجود نیز امکان کاهش مناطق مرده در مقاطع ۱ تا ۷ وجود ندارد. لذا

- [18] Kurnia JC, Sasmito AP, Mujumdar AS., (2014). "CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces". *Appl Math Model*;38(14):3467–84.
- [19] Kurnia JC, Sasmito AP, Mujumdar AS., (2014). "Dust dispersion and management in underground mining faces". *Int J Min Sci Technol*;24(1):39–44.
- [20] Kurnia JC, Sasmito AP, Mujumdar AS.,(2014). "Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines". *Tunn Undergr Space Technol*;42(5):206–15.
- [21] Feroze T, Genc B., (2017). "Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD". *Int J Min Sci Technol*;27 (2):253–9.
- [22] Kurnia JC, Sasmito AP, Hassani FP, Mujumdar AS., (2015). "Introduction and evaluation of a novel hybrid brattice for improved dust control in underground mining faces: a computational study". *Int J Min Sci Technol*;25(4):537–43.
- [23] Legates DR, McCabe GJ.,(1999). "Evaluating the use of „goodness-of-fit“ measures in hydrologic and hydro climatic model validation". *Water Resour Res*;35(1):233–41.
- [24] Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL., (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". *Am Soc Agric Biol Eng* 50(3):885–900.
- [7] Parra, M.T, Villafruela, J.M, Castro, F, Mendez, C., (2006) "Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines", *Building and Environment* 41.
- [8] Aminossadati, S.M. Hooman, K., (2008) "Numerical Simulation of ventilation Air flow in underground mine working", 12th U.S./ North American Mine Ventilation Symposium.
- [9] Zheng, Y. Tien, J.C., (2008) "DPM dispersion study using CFD for underground metal/nonmetal mines", 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium.
- [10] Taylor, C.D., Chilton, J.E., Goodman, G.V.R, (2010) "Guidelines for the control and monitoring of methane gas on continuous mining operations", Department of Health and Human Services.
- [11] Stephens, M and Calizaya, F. (2010) "A Study of leakage flow in a laboratory model and using CFD". 13<sup>th</sup> U.S./North American Mine Ventilation Symposium.
- [12] Diego I, Torno S, Torano J, Menendez M, Gent M. (2011) "A practical use of CFD for ventilation of underground works", *Tunneling and Underground Space Technology*, 26 (1).
- [13] Sasmito, Agus P, Birgersson, E., Ly, H.C., Mujumdar A.S., (2013) "Some approaches to improve ventilation system in underground coal mines environment – A computational fluid dynamic study", *Tunneling and Underground Space Technology*, 34.
- [14] Niknam, B & Hassan Madani (2009)., "Three Dimensional Analysis of Longitudinal Ventilation System Using Ceiling Fan (Case Study: Emamzadeh Hashem Gallery)", *Iran Tunnel magazine (In Persian)*.
- [15] Niknam, B & Hassan Madani (2010)., "Modeling of methane gas distribution in the mine faces with computational fluid dynamics." 8<sup>th</sup> Student Conference on Mining Engineering (In Persian)..
- [16] Arabian, M., Azarfar, B., Osia, H., (2010)., "prefeasibility study in natural ventilation system in Tehran-Tabriz Underground railroads", *Third National Conference on Air Conditioning and Industrial Hygiene, Sharif university (In Persian)*.
- [17] Refahi, H., Sereshki, F., Abasnezhad, A., Dabagh Neishabori., A.,(2017). "Ventilation System Designing of the Mashhad Metro Line 2 Line 1 (Phase I) by using the CFD model." *Third Annual National Conference on Mechanical Engineering and Industrial Solutions, Mashhad (In Persian)*.

<sup>1</sup> Single Shield Tunnel Boring Machine

<sup>2</sup> Heerden and Sullivan

<sup>3</sup> Continuous Miner

<sup>4</sup> Road header

<sup>5</sup> Srinivasa et al

<sup>6</sup> Wala et al

<sup>7</sup> Zheng and Tien

<sup>8</sup> Taylor et al

<sup>9</sup> Sasmito et al

<sup>10</sup> Main Frame

<sup>11</sup> Cutter Head

<sup>12</sup> Back-up System

<sup>13</sup> Erector

<sup>14</sup> Segment Feeder

<sup>15</sup> Crane and Bridge

<sup>16</sup> Module

<sup>17</sup> Element quality

<sup>18</sup> Aspect ratio

<sup>19</sup> Skewness

<sup>20</sup> Orthogonal quality

<sup>21</sup> Hotwire Anemometer

<sup>22</sup> Second order upwind discretization

<sup>23</sup> Dead Zone