



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

بررسی سیستم تهویه معادن زغالسنگ با استفاده از مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی  
مطالعه موردی: تونل اصلی معدن زغالسنگ رزمجا غربی، شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی

نگارنده: کاظم نصیری دوغائی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر علی عباس نژاد

استاد مشاور

مهندس کرامت قنبری

بهمن ۱۳۹۵

شماره: ۹۵/۱۱۹۵  
 تاریخ: ۹۵/۱۱/۲۶  
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای کاظم نصیری دوغائی به شماره دانشجویی ۹۳۱۷۵۱۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان: بررسی سیستم تهویه معادن زغال سنگ با استفاده از مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه موردی: تونل اصلی معدن زغال سنگ رزم جا غربی، شرکت معادن زغال سنگ البرز شرقی که در تاریخ ۹۵/۱۱/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی - امتیاز ۱۹)  دفاع مجدد  مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

۱- عالی (۲۰-۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹-۱۸)

۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹-۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر فرهنگ سرشکی	۱- استاداراهنمای اول
	استادیار	دکتر علی عباس‌نژاد	۲- استاداراهنمای دوم
	مربی	مهندس کرامت قنبری	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر محمد جهانی چگنی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر محمد عطائی	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر محسن نظری	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری



تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:  
 ۹۵/۱۱/۲۶

## تقدیم به

پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی ایستادگی را تجربه کنم.  
ومادرم که وجودش دریای بی کران فداکاری و عشق است و وجودم برایش همه رنج بود و وجودش

برایم همه مهر.

## تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به هم‌نشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت. بدون شک جایگاه معلم اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم، اما از آنجایی که تجلیل از معلم سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند تضمین؛ برحسب وظیفه:

از زحمات اساتید گرانقدرم آقایان **دکتر فرهنگ سرشکی** و **دکتر علی عباس‌نژاد** که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را به عهده داشتند صمیمانه سپاس گزارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

همچنین از زحمات استاد مشاور خود **جناب مهندس قنبری** (مدیریت محترم واحد HSE شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی) و **جناب آقای مهندس اسدی** (سرپرست ایمنی شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی) و **جناب آقای مهندس سعدی** (سرپرست سیستم تهویه شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی) به خاطر همکاری بی‌دریغشان در این عرصه صمیمانه سپاس گزارم.

سپاس آخر را از مهربان‌ترین همراهان زندگی‌ام، پدر و مادرم دارم که حضورشان در فضای زندگی‌ام مصداق بی‌ریای سخاوت بوده است.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید

# تعهد نامه

اینجانب کاظم نصیری دوغائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی سیستم تهویه معادن زغالسنگ با استفاده از مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی مطالعه موردی: تونل اصلی معدن زغالسنگ رزم جا غربی، شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی تحت راهنمایی دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر علی عباس نژاد 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 موهود در پایان نامه بدو، ذکر مرجع محاسباتی، نام، شماره، باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

## چکیده

در طراحی شبکه تهویه سعی بر آن است که در تمام نقاط معدن هوای کافی جریان داشته باشد اما به هر حال نتایج واقعی با آنچه که در مرحله طراحی پیش‌بینی شده تا حدودی متفاوت است. و به همین خاطر پس از اجرای برنامه طراحی شده باید وضعیت تهویه معدن را بررسی و کنترل کرد و در موارد لزوم اشکالات را برطرف کرد. مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی یک روش سریع، دقیق، کم‌هزینه و قابل اعتماد برای بررسی رفتار یک سیال است که برای بررسی سیستم تهویه از آن استفاده شده است. در این مطالعه پس از بررسی دقیق سیستم تهویه معدن زغالسنگ رزمجا غربی بخشی از سیستم تهویه برای مدل‌سازی انتخاب شده است. بخش انتخاب شده به سه مدل تقسیم شد که شامل مدل مسیر جریان هوا تا کارگاه استخراج، مدل تهویه کمکی و مدل کارگاه استخراج است. پس از تهیه مدل دینامیک سیالات محاسباتی مناطق مورد نظر به کمک معیارهای شناسایی نواحی مرده، بررسی خطر انفجار، شناسایی نواحی مستعد خودسوزی زغالسنگ، شناسایی مناطق هدررفت هوای تازه و بررسی کیفیت هوای تازه به بررسی وضعیت حاکم بر سیستم تهویه پرداخته شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که در مسیر حرکت هوا به سمت کارگاه استخراج بدلیل خراب بودن در تهویه، ۵۲ درصد هوا به سمت خروجی هوای کثیف هدایت می‌شود. همچنین در بخش‌هایی از مسیر، سرعت هوا از حد مجاز پایین‌تر بوده که راه‌حلی برای حل مشکلات ا ارائه شده است. در بررسی مدل تهویه کمکی مشخص شد که با توجه به اینکه سرعت هوا از حد مجاز کمتر نیست ولی نتوانسته کیفیت لازم هوا را تامین کند و عیار گاز متان در محل ۴ برابر حد مجاز است. همچنین بازچرخش هوا در نزدیکی سینه کار شناسایی شد. بررسی مدل کارگاه استخراج نشان داد که شرایط حاکم در کارگاه استخراج به لحاظ تهویه‌ای مناسب کار است ولی در بخش تخریب شده از نقطه نظر تهویه‌ای بخش میانی برای خودسوزی مستعد است.

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، سیستم تهویه، کارگاه استخراج، تهویه کمکی

## مقالات مستخرج از پایان نامه

### مقاله کنفرانسی چاپ شده

نصیری ک، سرشکی ف، عباس نژاد ا، قنبری ک، (۱۳۹۳) " بررسی اتلاف هوا در سیستم تهویه معدن زغالسنگ البرز شرقی به کمک مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی " سومین کنگره ملی زغالسنگ،

صفحه ۵۵، دانشگاه صنعتی شاهرود



## فهرست مطالب

### فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۱-۲- تعریف مسئله ..... ۳
- ۱-۳- اهمیت تحقیق ..... ۵
- ۱-۴- ضرورت تحقیق ..... ۵
- ۱-۵- اهداف تحقیق ..... ۶
- ۱-۶- روش انجام تحقیق ..... ۶
- ۱-۷- سابقه علمی موضوع ..... ۷
- ۱-۸- ساختار پایان نامه ..... ۱۲

### فصل دوم: مفاهیم تحقیق

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۴
- ۲-۲- یک برنامه CFD چگونه کار می کند ..... ۱۴
- ۲-۲-۱- پیش پردازنده ..... ۱۵
- الف - تولید شبکه ..... ۱۶
- ب- نواحی سلولی و شرایط مرزی ..... ۲۰
- ج- جریان آرام و آشفته ..... ۲۱

۲۴	..... ۲-۲-۲- حل کننده
۲۵	..... ۳-۲-۲- پس پردازنده
۲۵	..... ۳-۲- معادله های حاکم بر جریان سیال
۲۶	..... ۱-۳-۲- معادله بقای جرم در حالت سه بعدی
۲۷	..... ۲-۳-۲- معادله اندازه ی حرکت در حالت سه بعدی
۲۸	..... ۳-۳-۲- معادله انرژی در حالت سه بعدی
۲۸	..... ۴-۳-۲- معادله های ناویر - استوکس
۲۹	..... ۵-۳-۲- مدل آشفتگی Standard k-ε
۳۰	..... ۴-۲- بررسی سیستم تهویه
۳۰	..... ۱-۴-۲- شناسایی نواحی مرده
۳۱	..... ۲-۴-۲- بررسی خطر انفجار
۳۳	..... ۳-۴-۲- شناسایی نواحی مستعد خودسوزی زغالسنگ
۳۳	..... الف - مکانیزم خودسوزی زغالسنگ
۳۵	..... ۴-۴-۲- مناطق هدر رفت هوای تازه
۳۵	..... ۵-۴-۲- کیفیت هوای تازه
۳۶	..... ۵-۲- جمع بندی

## فصل سوم: مدل سازی CFD سیستم تهویه

۳۸	..... ۱-۳- مقدمه
----	------------------

۴۳	۲-۳- مدل سازی CFD مسیر جریان هوا تا کارگاه استخراج.....
۴۹	۳-۳- مدل سازی CFD تهویه کمکی.....
۵۲	۴-۳- مدل سازی CFD کارگاه استخراج.....
۵۶	۵-۳- اعتبارسنجی.....
۶۰	۶-۳- جمع بندی.....

### فصل چهارم: بررسی سیستم تهویه

۶۲	۱-۴- مقدمه.....
۶۳	۲-۴- بررسی وضعیت حاکم بر سیستم تهویه از محل ورود هوای تازه تا ابتدای ورودی هوای کارگاه استخراج.....
۶۴	۱-۲-۴- شناسایی نواحی مرده.....
۶۶	۲-۲-۴- شناسایی مناطق هدر رفت هوای تازه.....
۶۸	۳-۴- بررسی روش های جلوگیری و یا کاهش برگشت هوا به خروجی هوای کثیف به کمک مدل سازی CFD.....
۷۱	۱-۳-۴- استفاده از پرده ی هوا.....
۷۲	۲-۳-۴- منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق های پایین تر از اوکلون وینچ.....
۷۳	۳-۳-۴- منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق های پایین تر از تونل تهویه.....
۷۴	۴-۳-۴- انحراف مسیر جریان هوا به سمت افق های پایین تر از اوکلون وینچ و تونل تهویه.....
۷۶	۴-۴- بررسی تهویه کمکی به وسیله مدل سازی CFD.....
۷۷	۱-۴-۴- شناسایی نواحی مرده.....
۷۹	۲-۴-۴- قابلیت انفجار.....

- ۳-۴-۴ - بررسی کیفیت هوای تازه..... ۸۰
- ۵-۴ - بررسی وضعیت سیستم تهویه در کارگاه استخراج..... ۸۰
- ۱-۵-۴ - شناسایی نواحی مرده..... ۸۱
- ۲-۵-۴ - شناسایی نواحی مستعد خودسوزی زغالسنگ..... ۸۲
- ۳-۵-۴ - قابلیت انفجار..... ۸۴
- ۴-۵-۴ - بررسی کیفیت هوای تازه..... ۸۴
- ۵-۵-۴ - شناسایی مناطق هدر رفت هوای تازه..... ۸۵
- ۶-۴ - جمع‌بندی..... ۸۵

#### فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۱-۵ - نتیجه‌گیری..... ۸۸
- ۱-۱-۵ - مدل مسیر ورود هوای تازه تا ورودی کارگاه استخراج..... ۸۹
- ۲-۱-۵ - مدل تهویه کمکی..... ۹۰
- ۳-۱-۵ - مدل کارگاه استخراج..... ۹۰
- ۲-۵ - پیشنهادها..... ۹۱
- منابع..... ۹۲

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) جریان آرام و آشفته ..... ۲۲
- شکل (۲-۲) قابلیت انفجار مخلوط متان و هوا ..... ۳۲
- شکل (۱-۳) کروکی بخش مدل سازی شده از سیستم تهویه ..... ۳۹
- شکل (۲-۳) دستگاه ABH-4225 وسیله اندازه گیری سرعت و فشار هوا ..... ۴۳
- شکل (۳-۳) ابعاد سطح مقطع بخش مدل سازی شده از تونل اصلی (الف) و تونل های عمود بر لایه (ب) ..... ۴۴
- شکل (۴-۳) محدوده ی مدل سازی شده با نمای دید از بالا ..... ۴۴
- شکل (۵-۳) تخمین پارامتر  $K_s$  به کمک ضریب اصطکاک کار معدنی ( $\alpha$ ) ..... ۴۷
- شکل (۶-۳) نمودار مقادیر باقیمانده های مدل CFD مسیر جریان هوا ..... ۴۸
- شکل (۷-۳) تغییرات شدت جریان طی فرایند حل ..... ۴۹
- شکل (۸-۳) هندسه مدل CFD تهویه کمکی ..... ۴۹
- شکل (۹-۳) سطح مقطع مدل CFD تهویه کمکی ..... ۵۰
- شکل (۱۰-۳) نمودار مقادیر باقیمانده های مدل CFD تهویه کمکی ..... ۵۱
- شکل (۱۱-۳) تغییرات شدت جریان طی فرایند حل ..... ۵۱
- شکل (۱۲-۳) نمای سه بعدی از بلوک استخراجی به همراه کارگاه استخراج ..... ۵۲
- شکل (۱۳-۳) تقسیم بندی ناحیه تخریب براساس نفوذ پذیری ..... ۵۳
- شکل (۱۴-۳) مدل سازی ناحیه تخریب به کمک داده های مطالعه لیمینگ یان و همکارانش ..... ۵۴
- شکل (۱۵-۳) نمودار مقادیر باقیمانده های مدل CFD کارگاه استخراج ..... ۵۵

- شکل (۳-۱۶) تغییرات شدت جریان طی فرایند حل ..... ۵۶
- شکل (۴-۱) مرزهای ورودی و خروجی جریان هوا در مدل CFD ..... ۶۴
- شکل (۴-۲) مقادیر سرعت هوا در بخش مدل‌سازی شده ..... ۶۵
- شکل (۴-۳) مقادیر سرعت هوا در بخش مدل‌سازی شده ..... ۶۵
- شکل (۴-۴) مقادیر سرعت هوا در ناحیه‌های بین خروجی Outlet\_2 تا Outlet\_3 ..... ۶۶
- شکل (۴-۵) جریان برگشتی هوای تازه به تونل اصلی ..... ۶۷
- شکل (۴-۶) تغییرات سرعت هوا در صورت بسته بودن خروجی Outlet\_1 و در تهویه ..... ۶۸
- شکل (۴-۷): تصویر دوبعدی محدوده مطالعاتی ..... ۶۹
- شکل (۴-۸) سطح مقطع تونل تهویه و تونل وینچ ..... ۶۹
- شکل (۴-۹) هندسه مدل CFD محدوده ..... ۷۰
- شکل (۴-۱۰) شرایط حاکم بر سیستم تهویه قبل از اعمال تغییرات ..... ۷۱
- شکل (۴-۱۱) مانع منحرف‌کننده هوا و محل قرارگیری آن ..... ۷۲
- شکل (۴-۱۲) بردارهای سرعت مربوط به حالت منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر  
از اوکلون وینچ ..... ۷۳
- شکل (۴-۱۳) بردارهای سرعت مربوط به حالت منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر  
از تونل تهویه ..... ۷۴
- شکل (۴-۱۴) بردارهای سرعت مربوط به حالت منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر  
از اوکلون وینچ و تونل تهویه ..... ۷۵

- شکل (۴-۱۵) شمایی از تهویه کمکی دهشی (a) و تهویه کمکی مکشی (b) ..... ۷۷
- شکل (۴-۱۶) فیلتر مقادیر سرعت هوا تا ۰/۲۵ متر بر ثانیه در مقطع افقی تونل ..... ۷۸
- شکل (۴-۱۷) فیلتر مقادیر سرعت هوا تا ۰/۲۵ متر بر ثانیه در مقطع قائم تونل ..... ۷۸
- شکل (۴-۱۸) بردارهای سرعت تا حداکثر سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه ..... ۷۹
- شکل (۴-۱۹) غلظت گاز متان در طول تونل ..... ۸۰
- شکل (۴-۲۰) سرعت هوا در کارگاه استخراج ..... ۸۱
- شکل (۴-۲۱) غلظت اکسیژن در بخش‌های مختلف کارگاه استخراج و ناحیه تخریب ..... ۸۳
- شکل (۴-۲۲) سرعت هوا در ناحیه تخریب ..... ۸۳
- شکل (۴-۲۳) وضعیت متان در جبهه کار استخراجی ..... ۸۴

## فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۱) تاریخچه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه در معدن ..... ۸
- ادامه جدول (۱-۱) تاریخچه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه معدن ..... ۹
- ادامه جدول (۱-۱) تاریخچه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه در معدن ..... ۱۰
- ادامه جدول (۱-۱) تاریخچه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه در معدن ..... ۱۱
- جدول (۱-۲) ارزیابی کیفیت شبکه به کمک معیار کیفیت تعامد ..... ۱۹
- جدول (۲-۲) ارزیابی کیفیت شبکه به کمک معیار کشیدگی ..... ۲۰
- جدول (۳-۲) طبقه‌بندی شرایط مرزی ..... ۲۱
- جدول (۴-۲) مدل‌های آشفتگی موجود در Ansys Fluent ..... ۲۲
- جدول (۵-۲) حد مجاز سرعت در قسمت‌های مختلف معدن براساس آئین‌نامه ایمنی معادن ایران ..... ۳۱
- جدول (۶-۲) عیار مجاز گازهای مختلف موجود در هوای معدن بر اساس مقررات کشور آمریکا ..... ۳۵
- ادامه جدول (۶-۲) عیار مجاز گازهای مختلف موجود در هوای معدن بر اساس مقررات کشور آمریکا ..... ۳۶
- جدول (۱-۳) مشخصات کروکی بخش مدل‌سازی شده از سیستم تهویه ..... ۴۰
- جدول (۲-۳) واحدهای اندازه‌گیری سرعت توسط دستگاه ABH-4225 ..... ۴۱
- جدول (۳-۳) واحدهای اندازه‌گیری فشار توسط دستگاه ABH-4225 ..... ۴۲
- جدول (۴-۳) تنظیمات شبکه‌بندی و حلگر Ansys Fluent برای مدل CFD مسیر جریان هوا ..... ۴۶
- جدول (۵-۳) تنظیمات شبکه‌بندی و حلگر Ansys Fluent برای مدل CFD تهویه کمکی ..... ۵۰
- جدول (۶-۳) تنظیمات شبکه‌بندی و حلگر Ansys Fluent برای مدل CFD بلوک استخراجی ..... ۵۴



۵۷	جدول (۷-۳) اعتبارسنجی مدل CFD مسیر جریان هوا
۵۸	ادامه جدول (۷-۳) اعتبارسنجی مدل CFD مسیر جریان هوا
۵۹	جدول (۸-۳) اعتبارسنجی مدل CFD تهویه کمکی
۵۹	جدول (۹-۳) اعتبارسنجی مدل CFD کارگاه استخراج
۷۶	جدول (۱-۴) الویت بندی سناریوهای بررسی شده

# فصل اول: کلیات تحقیق

## ۱-۱- مقدمه

پیشرفت‌هایی که در علوم مهندسی به وجود آمده است انسان را قادر ساخته تا فضاهاى بزرگ را به راحتی در اعماق زمین ایجاد کند. واضح است که چنین فضاهاى نیاز به یک سیستم تهویه مناسب دارند. برای طراحان سیستم‌های تهویه فضاهاى بزرگ زیرزمینی استفاده از ابزاری دقیق جهت طراحی و بررسی سیستم تهویه ضروری است. برای بررسی سیستم تهویه تونل‌های معادن زیرزمینی می‌توان از بررسی‌های تجربی، ساخت مدل فیزیکی و مدل‌سازی عددی استفاده کرد. از میان روش‌های مطرح‌شده نتایج مربوط به روش تجربی قابل‌اعتمادتر و کاربردی‌تر است. در واقع شرایط عملیاتی حاکم بر سیستم تهویه به‌طور دقیق در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. با این حال این روش احتیاج به صرف زمان، هزینه زیاد و تجهیزات دقیق و گران‌قیمت دارد. مدل‌سازی فیزیکی نیز نیاز به دقت فراوان و صرف زمان زیادی دارد. در مقابل استفاده از مدل‌سازی عددی موجب صرفه‌جویی در زمان و هزینه شده و به راحتی می‌تواند شرایط واقعی را شبیه‌سازی کند (Chin Ding Ang, 2016).

امروزه استفاده از روش‌های عددی در محاسبات کامپیوتری اهمیت زیادی پیدا کرده و علم دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> (CFD) به‌عنوان یک روش عددی برای تحلیل رفتار جریان سیال و انتقال حرارت در سیستم‌هایی با هندسه‌های گوناگون یک ابزار توانمند برای محققان و مهندسان است. از دهه ۱۹۸۰ حل مسائل جریان توسط روش CFD موضوع تحقیق بسیاری از محققان و متخصصان شبیه‌سازی قرار گرفته است و نرم‌افزارهای تجاری زیادی به وجود آمده‌اند. شرکت‌های موفق در زمینه نرم‌افزاری که بازار به‌طور عمده در اختیار آنها است عرضه‌کننده‌ی چهار نرم‌افزار Ansys Fluent ، PHOENICS ، STARCD و FLOW هستند که اساس کار همه آنها بر پایه روش حجم محدود است، دقت این نرم‌افزارها توسط محققان زیادی مورد تأیید قرار گرفته است. نرم‌افزارهایی که در حال حاضر در بازار موجود است ممکن است متنوع

---

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics

باشند با این حال استفاده از آنها نیازمند یک مهارت و درک بسیار بالا از سوی کاربر است تا نتایج قابل قبولی در حالت‌های پیچیده به دست آید. پیچیدگی معادله‌های حاکم بر مسئله و بالا بودن هزینه‌های مربوط به تجهیزات آزمایشگاهی، استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی را در مقایسه با روش‌های عددی محدود می‌کنند. مدل‌سازی CFD در طراحی سیستم‌های سیال چند مزیت عمده نسبت به روش‌های تجربی دارد که به شرح زیر است (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

- کاهش اساسی در زمان و هزینه
- توانایی مطالعه سیستم‌هایی که انجام آزمایش‌ها روی آنها مشکل و یا غیرممکن است (نظیر سیستم‌های خیلی بزرگ).
- توانایی مطالعه سیستم‌ها تحت شرایط بالاتر از حدود معمول آنها
- دقت بسیار زیاد در بیان جزئیات

با توجه به اهمیت سیستم تهویه و مزایای مدل‌های CFD، در این تحقیق به بررسی سیستم تهویه با استفاده از مدل‌سازی CFD پرداخته شده است. در ادامه تحقیق و در فصل‌های آینده به بیان جزئیات بیشتری از مدل‌سازی CFD سیستم تهویه پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲- تعریف مسئله

با توجه به اهمیت سیستم تهویه در ایمنی معدن، سلامت کارکنان و ارتقاء بازدهی تولید اجرای یک سیستم تهویه پیشرفته و مدرن در معادن ضرورت پیدا می‌کند. از طرفی گستردگی شبکه تهویه و تغییرات به وجود آمده در شبکه سیستم تهویه به دلیل پیشروی‌های صورت گرفته و عوامل متعدد دیگر می‌توانند مانع از دستیابی به اطلاعات کاملی از شرایط حاکم بر سیستم تهویه شوند. با توجه به موارد بیان شده این سؤال پیش می‌آید که چگونه می‌توان به سؤالات زیر پاسخ داد

- نحوه‌ی توزیع هوای تازه و سایر گازهای موجود در محیط معدن در زمان‌های مختلف چگونه است؟
- سرعت هوا در قسمت‌های مختلف (راهروها، کارگاه‌ها، و...) در شرایط مختلف تهویه‌ای (زمان حادثه یا شرایط عادی) چگونه است؟
- توزیع حرارت در بخش‌های مختلف چگونه است؟
- آیا می‌توان تغییرات به وجود آمده در مقادیر سرعت هوای بخش‌های مختلف سیستم تهویه را در صورت گسترش شبکه تهویه پیش‌بینی کرد؟

در سؤالات مطرح‌شده بهترین راه‌حل برای رسیدن به جواب استفاده از علم دینامیک سیالات است.

به‌طور کلی روش‌های پیشگویی یک پدیده فیزیکی به دو قسمت عمده تقسیم می‌شود:

- روش تجربی (آزمایشگاهی)

- روش تئوری

در روش‌های تئوری ابتدا با مشاهده پدیده فیزیکی به بیان معادله‌های دیفرانسیل مربوط پرداخته و پس از آن به معادله‌های جبری حاکم بر مسئله پرداخته می‌شود. مشکلی که وجود دارد این است که برخلاف پدیده‌هایی که برای آن‌ها مدل ریاضی مناسبی ارائه شده‌اند پدیده‌هایی نیز وجود دارند که هنوز مدل ریاضی مناسبی برای آن‌ها پیدا نشده است. در اینجاست که استفاده از روش‌های عددی به‌عنوان یک راه سوم برای حل مسائل و همین‌طور مسائل جریان سیال جای خود را باز می‌کند. بنابراین در یک تقسیم‌بندی دیگر می‌توان دینامیک سیالات را به سه بخش تقسیم کرد:

- دینامیک سیالات تجربی

- دینامیک سیالات تئوری

- دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به معنای به‌کارگیری کامپیوتر در حل مسئله‌هایی که هدف آن بررسی خواص جریان یک سیال است، به‌طوری‌که جریان این سیال ممکن است با انتقال حرارت و واکنش-های شیمیایی همراه باشد (شجاعی‌فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

در واقع مدل CFD این قابلیت را دارد که ویژگی‌های جریان را که در مقاطع دلخواه در اختیار محقق قرار دهد. همچنین می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی شرایط حاکم بر سیستم تهویه در صورت اعمال برخی تغییرات استفاده کرد.

### ۱-۳- اهمیت تحقیق

اهمیت انجام تهویه مناسب در معادن که یک امر مهم و حیاتی است کاملاً مشخص بوده و جای بحث ندارد. برخی بیماری‌ها و مشکلات برای کارکنان حاضر در محیط کار به دلیل قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض آلاینده‌ها به وجود می‌آید که تهویه ضعیف و یا نامناسب دلیل آن است. با توجه به این توضیحات اگر یک مدل CFD از معدن و یا بخش خاص که مدنظر است در دسترس باشد به راحتی می‌توان با وارد کردن مشخصات گازهای حاضر در محل، نحوه‌ی توزیع آن و بسیاری از خصوصیات مفید را در نواحی مختلف بررسی کرد. در نتیجه می‌توان آسیب‌های موجود را شناسایی و اقدامات پیشگیرانه لازم را انجام داد.

### ۱-۴- ضرورت تحقیق

همان‌طور که در بخش اهمیت تحقیق بیان شد سیستم تهویه به‌طور مستقیم با سلامت کارکنان در ارتباط است و از طرفی تلاش برای بهبود شرایط حاکم بر محیط کاری یکی از اولویت‌های مهم هر معدن زیرزمینی است که موجب ارتقای سطح سلامت کارکنان می‌شود. بنابراین استفاده از مزایای مدل‌سازی CFD سیستم تهویه می‌تواند کمک بزرگی برای بهینه‌سازی سیستم تهویه باشد که به دنبال آن آسیب‌های احتمالی ناشی

از حضور گازهای خطرناک موجود در محیط کاری حداقل خواهد شد. از این رو تهیه یک مدل CFD معتبر برای رسیدن به این هدف ضروری و کارآمد است.

## ۱-۵- اهداف تحقیق

این تحقیق به بررسی بخشی از سیستم تهویه معادن زغالسنگ با استفاده از مدل‌سازی CFD در معدن زغالسنگ رزم‌جاغربی از شرکت معادن زغالسنگ البرز شرقی پرداخته است. در این تحقیق فواید تهیه یک مدل CFD برای یک معدن زغالسنگ نشان داده خواهد شد و اهداف تهیه این مدل به شرح زیر است.

- تهیه مدل CFD سه‌بعدی برای بررسی سیستم تهویه
- بررسی سرعت هوا و توزیع آن
- بررسی معیارهای مهم در شبکه تهویه
- ۱. شناسایی نواحی مرده
- ۲. بررسی خطر انفجار
- ۳. شناسایی نواحی مستعد خودسوزی زغالسنگ
- ۴. شناسایی نواحی هدررفت هوای تازه
- ۵. بررسی کیفیت هوا

## ۱-۶- روش انجام تحقیق

مراحل حل یک مسئله CFD به‌اختصار به‌صورت زیر است (شجاعی‌فرد و نورپور، ۱۳۷۹):

- مدل‌سازی هندسه مسئله
- تولید شبکه مناسب برای حل
- انتخاب معادله‌های مناسب برای حل

- تعریف شرایط مرزی
- گسسته سازی معادله‌های حل
- اجرای برنامه کامپیوتری
- نتایج آماری و نموداری

تمامی مراحل بیان شده با رعایت ترتیب برای این تحقیق رعایت خواهد شد. در نهایت برای اعتبارسنجی مدل تهیه شده، با انجام آزمایش‌هایی در قسمت‌های مختلف بخش مدل‌سازی شده پارامتر سرعت هوا اندازه-گیری شده و مدل CFD تهیه شده اعتبارسنجی می‌شود و برای دستیابی به اهداف تعیین شده از آن استفاده می‌شود.

## ۱-۷- سابقه علمی موضوع

پیدایش و گسترش CFD را نمی‌توان جدای از تاریخ اختراع، رواج، و تکامل کامپیوترها نقل کرد. تا انتهای جنگ جهانی دوم بیشتر شیوه‌های مربوط به حل مسائل دینامیک سیالات از طبیعتی تحلیلی یا تجربی برخوردار بود ولی از سال ۱۹۸۰ استفاده از کامپیوتر در محاسبات به صورت گسترده رواج پیدا کرد. یکی از نخستین مدل‌سازی‌های CFD از سیستم تهویه توسط کریدی و کلارک<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۲ صورت گرفت که آن‌ها به کمک مدل‌سازی CFD به بررسی خطر تجمع گاز متان در تولید بالای زغال از جبهه‌کار پرداختند، و در انتها راه‌کارهای مناسبی جهت مقابله با این مشکل به کمک مدل‌سازی CFD ارائه دادند پس از آن‌ها در سال ۱۹۹۳ هردن و سالیوان<sup>۲</sup> به بررسی الگوی جریان هوا، متان و گردوغبار به وسیله مدل‌سازی CFD در جبهه‌کاری که ماشین حفار پیوسته در آن کار می‌کرد پرداختند و از نتایج آن برای

---

<sup>1</sup> Creedy and clarke

<sup>2</sup> Heerden and Sullivan



طراحی تهویه کمکی استفاده کردند. در همان سال توزیدو و همکاران<sup>1</sup> از مدل سازی CFD برای بررسی جریان گاز متان در نواحی تخریب شده استفاده کردند که نقاط خطرساز به لحاظ خودسوزی شناسایی شد. در جدول (۱-۱) خلاصه‌ای از تحقیقاتی که سیستم تهویه به کمک مدل سازی CFD مورد بررسی قرار گرفته به صورت خلاصه بیان شده است.

جدول (۱-۱) تاریخچه مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه در معدن

موضوع تحقیق	محقق (محققین)
در این مطالعه به بررسی چگونگی توزیع گردوغبار و سرعت هوا در جبهه کار زغال استخراجی به روش جبهه کاربلند با کمک مدل سازی CFD پرداخته شده است و پیشنهاد شده که در مطالعات بعدی تأثیرات شرایط حاکم بر سلامتی کارکنان بررسی شود.	Aziz et al. (1993)
در این مطالعه مدل سازی CFD آتش سوزی معدن انجام شده و پس از شناسایی نقاط خطر آفرین راه کارهایی جهت مهار دقیق آتش ارائه شده است.	Lee (1994)
در این مطالعه مدل سازی CFD بخشی از معدن زیرزمینی که پیشروی به کمک تهویه فرعی صورت می گیرد انجام شده و وضعیت شرایط حاکم به لحاظ ایمنی مورد بحث قرار گرفته است.	Uchino and Inoue (1997)
تهیه آنالیزهای کاربردی تر و بیشتری بر روی مدل سازی CFD و داده های تحقیقات Uchino and Inoue (1997) و بررسی توزیع متان در جبهه کار در حال پیشروی.	Moloney et al. (1998)
تهیه مدل CFD جهت بررسی جریان متان از میان لایه هایی با نفوذپذیری بالا در اطراف جبهه کار زغال که به روش جبهه کاربلند استخراج می شود.	Tomata et al. (1999)

<sup>1</sup> Tazuided et al

ادامه جدول (۱-۱) تاریخچه مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه معدن

محقق (محققین)	موضوع تحقیق
Hargreaves (2007)	به وسیله مدل سازی CFD به بررسی کارآمدی سیستم های تهویه کمکی به کار رفته در هنگام استفاده از ماشین حفار پیوسته پرداخته شده است. برای رسیدن به این هدف مجموعه ای از مدل های CFD برای تعیین الگوهای جریان هوا در ابتدا و انتهای بخش پیشروی در شرایط مختلف بولت گذاری و برش استفاده شده است. نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش هایی که در محل انجام شده است مقایسه شده و نتایج به دست آمده با استانداردهای مربوطه مقایسه شده است. و در انتها به عنوان یک پیشنهاد بیان شده است که مدل سازی CFD می تواند برای شناسایی ویژگی های سیستم های تهویه به کار گرفته شود.
(2008) Yuan and smith	در این مطالعه به بررسی مشکلات بهداشتی و ایمنی مرتبط با سیستم تهویه از قبیل تهویه جبهه کار، گردوغبار، گازهای ناحیه تخریب شده و... پرداخته شده است. و استراتژی هایی برای رفع این مشکلات به کمک مدل سازی CFD ارائه شده است و مدل سازی CFD به عنوان یک ابزار مناسب جهت رفع این مشکلات معرفی شده است.
Ren and Balusu (2010)	اهمیت بررسی سیستم تهویه حاکم مورد بحث قرار گرفته و همچنین سیستم تهویه ۱۳۸ تونل با مقطع دایره ای و با ویژگی های متفاوت، به وسیله روش های سنتی و مدل سازی CFD با یکدیگر مقایسه شده
Diego et al. (2011)	بررسی رفتار گردوغبار در تونلی که یک ماشین حفار پیوسته در آن مشغول کار است و از سیستم تهویه فرعی جهت انجام عملیات تهویه استفاده شده است. دقت مدل تهیه شده با بررسی سرعت جریان هوا و غلظت گردوغبار در شش نقطه از شش مقطع مدل، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مورد تأیید بوده است. نهایتاً از مدل برای پیش بینی وضعیت گردوغبار تولید شده از جبهه کار استفاده شده و از مدل CFD برای بهینه سازی سیستم تهویه استفاده شده است.

موضوع تحقیق	محقق (محققین)
<p>بیان اهمیت درک وضعیت حاکم بر سیستم تهویه پس از یک رخداد ناگوار در معدن و تأکید بر این نکته که انجام آزمایش گاز شاخص در یک مدل CFD می‌تواند در این شرایط یک ابزار مفید برای شناسایی و اولویت‌بندی نجات افراد باشد. در این پروژه‌ی تحقیقاتی در یک معدن فرضی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است و برای حالت‌های مختلف سیستم تهویه مدل‌هایی تهیه شده است. و نتایج به‌دست‌آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.</p>	<p>Domingo et al. (2011)</p>
<p>در این مقاله عملکرد یک سیستم تهویه طبیعی به کمک مدل‌سازی CFD و تونل بادی که به مقیاس ۱:۱۰ تهیه‌شده یا اختصاص مقادیر مختلف سرعت برای جریان هوا بررسی شده است.</p>	<p>Sasmito et al. (2013)</p>
<p>در این مطالعه که در یک معدن زغالسنگ که با روش اتاق‌وپایه استخراج صورت می‌گرفت روش‌هایی جهت بهبود سیستم تهویه حاکم بر معدن بر پایه مدل‌سازی CFD ارائه شده است. در این مطالعه ویژگی‌های مختلف مرتبط با سیستم تهویه مانند حذف آلاینده‌ها و سرعت هوا در نظر گرفته‌شده است. تمرکز مطالعه در دو تونل عمود بر لایه بوده است که پیشروی مناسب بوده و سناریوهای مختلف تهویه جهت حذف متان موردبررسی قرار گرفته است. مزایا و محدودیت‌های هر یک نه‌تنها از نظر کیفیت و کمیت، بلکه از نظر افت فشار کلی که نشان داده‌شده است و هزینه‌های مرتبط به سیستم تهویه مطبوع موردبحث و مقایسه قرار گرفته است.</p>	<p>Guang et al. (2013)</p>
<p>در این مطالعه مدل‌سازی CFD بخشی از سیستم تهویه انجام‌شده و رفتار گردوغبار در معادن زیرزمینی موردبررسی قرار گرفت است. هدف از انجام این مطالعه پیدا کردن روشی جهت بهتر کردن شرایط تنفسی کارکنان حاضر در محیط کار است. براساس نتایج مدل‌سازی دو راه‌حل ممکن برای کنترل گردوغبار پیشنهاد شد، یکی اصلاح سیستم تهویه برای رقیق کردن ذرات گردوغبار قابل استنشاق، و از سوی دیگر با استفاده از مه آب برای سرکوب ذرات گردوغبار پیشنهاد شد و در ادامه درباره روش‌های پیشنهادی بحث می‌شود.</p>	<p>Calautit and Richard (2014)</p>

موضوع تحقیق	محقق (محققین)
<p>بررسی نحوه ی توزیع متان و جریان هوا به کمک مدل سازی CFD در یک تونل معدنی که از نقاط متعدد و متفاوتی متان به داخل تونل نفوذ می کند. شرایط مختلفی که ممکن از اتفاق بیفتد شبیه سازی و بررسی شده است و در بخش نتیجه گیری بیان شده که توزیع و غلظت متان به تعداد و محل نقاطی که از آن ها متان وارد تونل می شود بستگی دارد.</p>	<p>Ren et al. (2014)</p>
<p>در پروژه های فوق العاده بزرگ زیرزمینی در چین برای پارامترهای سیستم تهویه از استانداردهای مربوط به فضاهای متوسط استفاده می شود. به همین دلیل در این تحقیق به کمک مدل سازی CFD به بررسی حداقل مقدار پارامترهای مربوط به سیستم تهویه در فضاهایی با سطح مقطع بیش از ۱۰۰ مترمربع پرداختند و پارامترهایی از قبیل غلظت گردوغبار، دود ، O<sub>2</sub> ، CO و درجه حرارت هوا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از استاندارد حداقل سرعت هوای مربوط به فضاهای متوسط زیرزمینی برای فضاهایی با این میزان سطح مقطع مشکلی به لحاظ غلظت گردوغبار، دود ، O<sub>2</sub> ، و درجه حرارت هوا ایجاد نمی کند ولی این میزان سرعت هوا برای کنترل میزان CO در حد استاندارد کافی نیست.</p>	<p>Ming et al. (2016)</p>

بررسی مطالعات انجام شده نشان می دهد که مدل سازی CFD می تواند به عنوان ابزاری سودمند برای بررسی وضعیت حاکم بر سیستم تهویه، بررسی رفتار گازهای موجود در فضای معدن، بررسی رفتار گردوغبار، ارزیابی استانداردهای مرتبط با پارامترهای مختلف سیستم تهویه، تلاش برای بهبود عملکرد سیستم تهویه و کاربردهای دیگر باشد. با توجه به اهمیت سیستم تهویه در یک عملیات زیرزمینی به خصوص استخراج زیرزمینی زغالسنگ این مطالعه با هدف بررسی سیستم تهویه به کمک مدل سازی CFD انجام شد. در فصل های آینده جزئیات بیشتری در ارتباط با نحوه مدل سازی و نتایج حاصل از آن ارائه خواهد شد.

## ۱-۸- ساختار پایان نامه

این پایان نامه شامل پنج فصل است که خلاصه هریک از آنها به صورت زیر است

فصل اول- کلیات: در این فصل به بیان اهمیت و ضرورت این مطالعه پرداخته می شود و همچنین اهداف تحقیق و تاریخچه مطالعات صورت گرفته ذکر شده است.

فصل دوم- مفاهیم تحقیق: در این فصل به بیان مفاهیم اولیه و بنیادی مطالعه پرداخته شده است. اینکه CFD چیست، یک برنامه CFD چگونه کار می کند و حل یک مسئله به وسیله مدل سازی CFD چگونه صورت می گیرد. و همچنین معیارهای بررسی سیستم تهویه معرفی شده و مورد بحث قرار گرفته است.

فصل سوم- مدل سازی سیستم تهویه: در این فصل گام به گام مراحل ساخت مدل CFD طی می شود و پس از اعتبارسنجی مدل خروجی های مدنظر به دست می آید.

فصل چهارم- بررسی سیستم تهویه: در این فصل خروجی های به دست آمده از مدل معتبر مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد و در انتها نتیجه گیری و پیشنهادها ارائه می شود.

فصل پنجم- نتیجه گیری و پیشنهادها

# فصل دوم : مفاهیم تحقیق

## ۲-۱- مقدمه

علم دینامیک سیالات محاسباتی به صورت گسترده‌ای در تهویه معادن کاربرد داد که از جمله آن‌ها می‌توان به کاربرد آن در کنترل میزان متان حاضر در محیط کار، کنترل آتش‌سوزی، مباحث مرتبط با انفجار، کنترل گردوغبار، خودسوزی زغالسنگ، فراوری مواد معدنی، بررسی ناحیه تخریب و بالا بردن کارایی سیستم تهویه اشاره کرد. درک اصول حاکم بر جریان سیال برای حل مشکلات مرتبط با آن‌ها بخصوص مسائل مربوط به ایمنی و سلامت افراد بسیار ارزشمند است. به دلیل پیچیدگی پدیده‌های مرتبط با جریان سیال حاضر در محیط معدن بخصوص معادن زیرزمینی، در سال‌های اخیر مدل‌سازی CFD به دلیل دقتی که در پیش‌بینی الگوی جریان سیال دارد به صورت گسترده‌ای به کار گرفته شده است. در مواقعی که انجام یک تجزیه و تحلیل جامع به کمک مدل‌سازی فیزیکی هزینه‌بر است و یا اینکه باید زمان زیادی صرف انجام مطالعات میدانی شود و یا اینکه باید الگوی جریان سیال مشخص باشد مدل‌سازی CFD می‌تواند به‌عنوان ابزار سودمند به کار گرفته شود (Guang Xu et al., 2015).

## ۲-۲- یک برنامه CFD چگونه کار می‌کند

ساختار برنامه‌های CFD روش عددی است و مسائل جریان سیال با استفاده از این روش قابل حل هستند. به منظور حل آن‌ها تمام بسته‌های نرم‌افزاری تجاری CFD شامل واسطه‌های کاربری پیچیده‌ای برای ورود پارامترهای مسائل و تحلیل نتایج هستند. از این رو تمام برنامه‌ها شامل سه جزء اصلی هستند:

- پیش پردازنده
- حل‌کننده
- پس پردازنده

در ادامه هریک از این اجزاء را در درون یک برنامه CFD مورد بررسی قرار می گیرند (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

## ۲-۲-۱- پیش پردازنده

پیش پردازنده بخش ورودی مسئله جریان به یک برنامه CFD است و سپس این ورودی به یک شکل مناسب برای استفاده توسط حل کننده است. وظایف کاربر در مرحله پیش پردازنده شامل موارد زیر تبدیل می شود (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

- تعریف هندسه ناحیه مورد نظر: میدان محاسباتی
- تولید شبکه یا تقسیم به بخش های کوچک
- انتخاب مجموعه پدیده های فیزیکی و شیمیایی که باید مدل شوند.
- تعریف خواص سیال
- تشخیص و تعریف شرایط مرزی لازم در سلول هایی که منطبق و یا در تماس با مرز محدوده می باشند.

در صنعت بیش از ۵۰٪ زمان صرف شده برای پروژه CFD صرف تعریف هندسه محدوده و تولید شبکه می شود. در حال حاضر برای به حداکثر رساندن بهره مندی کاربران CFD، اغلب برنامه های مهم شامل فصل مشترک با نرم افزارهایی واسطه نظیر CAD بوده و یا از امکاناتی برای ورود اطلاعات از سطح سازهای تخصصی و تولیدکننده های شبکه برخوردارند (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).



## الف - تولید شبکه

ANSYS Fluent قابلیت ورود شبکه‌های تولیدشده در نرم افزارهای Gambit، TGrid، GeoMesh، PreBFC، ANSYS، Mechanical، ARIES، PATRAN، I-deas، Ansys Meshing، NASTRAN، ICEM CFD و CFX و غیره را دارد (توحیدی، ۱۳۹۳). در این مطالعه از نرم‌افزار Ansys Meshing برای شبکه بندی هندسه مدل استفاده شده است.

فرایند شبکه بندی در ANSYS Meshing شامل ۵ مرحله زیر است (توحیدی، ۱۳۹۳).

۱. تنظیم فیزیک مسئله و روش شبکه بندی
۲. تعیین تنظیمات شبکه کلی<sup>۱</sup>: شامل حداقل و حداکثر اندازه شبکه‌ها، مشخص کردن نوع حلگر و..
۳. وارد کردن تنظیمات شبکه محلی<sup>۲</sup>: بعد از شبکه بندی یک هندسه تهیه شده می‌توان کنترل‌های بیشتری مانند سایزبندی محلی یا تورم در بخش‌هایی از هندسه اعمال کرد.
۴. پیش‌نمایش و ایجاد شبکه
۵. چک کردن کیفیت شبکه

برای هندسه‌های سه بعدی در Ansys Meshing شش روش شبکه بندی وجود دارد:

۱. Tetrahedron

A. Patch Conforming (TGrid based).

B. Patch Independent (ICEM CFD based).

۲. Sweep

۳. Multi Zone

۴. Hex Dominant

---

<sup>1</sup> Global

<sup>2</sup> Local

Automatic .۵

Sweep Mesh .A

Tetrahedral (Patch Conforming) .B

Cut Cell mesh .۶

برای هندسه‌های دوبعدی نیز چهار روش شبکه‌بندی در ANSYS Meshing وجود دارد:

Automatic Method (Quad Dominant) .۱

Triangles .۲

Uniform Quad /Tri .۳

Uniform Quad .۴

در این مطالعه از روش شبکه‌بندی Automatic بدلیل کاربری آسان آن برای شبکه‌بندی هندسه‌های تهیه‌شده استفاده شد و شبکه تولید شده به کمک معیارهای بررسی کیفیت شبکه‌بندی که در ادامه معرفی می‌شود مورد ارزیابی قرار گرفت که مشخص شد روش بکاربرده شده شبکه قابل قبول و با کیفیتی تولید می‌کند.

#### • روش شبکه‌بندی Tetrahedron

در این روش، المان‌های چهارضلعی ایجاد می‌شود. این روش برای ایجاد شبکه دارای دو الگوریتم است:

▪ Patch Conforming (TGrid)

▪ Patch Independent (ICEM CFD)

در روش شبکه‌بندی Patch Conforming از مرتبه هندسی پایین به بالا شروع می‌شود. بدین معنی که فرایند شبکه‌بندی از لبه شروع می‌شود سپس سطح و در انتها حجم شبکه‌بندی می‌شود. تمامی سطوح و مرزهای آن‌ها در نظر گرفته‌شده و شبکه‌بندی می‌شوند. در روش شبکه‌بندی Patch Independent از مرتبه

هندسی بالا به پایین انجام می‌شود بدین معنی که ابتدا شبکه حجم ایجاد می‌شود سپس شبکه ایجاد شده روی سطوح و لبه‌ها، تصویر شده تا شبکه‌بندی انجام شود (توحیدی، ۱۳۹۳).

### ● شبکه‌بندی Sweep

این نوع شبکه‌بندی، شبکه سطح را در جهت تعیین شده جاروب می‌کند و شبکه‌ای با المان‌های مثلثی و گوه‌ای می‌سازد. برای شبکه‌بندی Sweep حجم باید از نظر توپولوژی در ابتدا و انتها دارای سطوح مشخصی به‌عنوان سطح مبدأ و سطح هدف باشد. به سطح ابتدایی، سطح مبدأ<sup>۱</sup> و به سطح انتهایی، سطح هدف<sup>۲</sup> گفته می‌شود (توحیدی، ۱۳۹۳).

### ● شبکه‌بندی Automatic

تنظیمات روش شبکه‌بندی Automatic بسته به اینکه جسم، قابل جاروب شدن<sup>۳</sup> باشد یا نباشد بین دو گزینه Tetrahedral (Patch Conforming) و Sweep Meshing تغییر می‌کند. اگر جسم قابل جاروب شدن باشد از روش شبکه‌بندی Sweep و در غیر این صورت از روش شبکه‌بندی (Patch Conforming) Tetrahedral استفاده می‌شود (توحیدی، ۱۳۹۳).

### ● شبکه‌بندی مناسب

شبکه خوب در کاهش خطاهای حلگر که منجر به نتایج نادرست یا غیردقیق می‌شود نقش بسیار مهمی دارد. شبکه خوب دارای سه مؤلفه وضوح خوب، توزیع شبکه مناسب و کیفیت شبکه خوب است. دو مؤلفه اول بستگی به تمامی فرایندهای شبکه‌بندی (روش‌های شبکه‌بندی، سائز شبکه، بهبود محلی شبکه و ..) و استراتژی کاربر در شبکه‌بندی برای یک تحلیل ویژه دارد. ANSYS Meshing کیفیت شبکه را با استفاده

---

<sup>1</sup> Source

<sup>2</sup> Target

<sup>3</sup> sweep

از ابزارهای مختلف کمی می‌نماید که مهم‌ترین آن‌ها معیار کیفیت تعامد<sup>۱</sup> و معیار کشیدگی<sup>۲</sup> هستند. معیار کیفیت تعامد با استفاده از بردار نرمال سطح  $(A_i)$ ، بردار مرکز سلول به مرکز هریک از سلول‌های مجاور  $(f_i)$  و بردار مرکز سلول به هر وجه  $(C_i)$  برای یک سلول به صورت مقدار مینیمم  $\frac{A_i \cdot f_i}{|A_i| \cdot |f_i|}$  و  $\frac{A_i \cdot C_i}{|A_i| \cdot |C_i|}$  برای هر وجه  $i$  محاسبه می‌شود. بازه معیار کیفیت تعامد بین ۰ تا ۱ است که مقدار ۰ بیانگر بدترین و مقدار ۱ بیانگر بهترین کیفیت است. برای تعیین کیفیت شبکه‌بندی به کمک معیار کیفیت تعامد از جدول (۱-۲) استفاده می‌شود (توحیدی، ۱۳۹۳).

جدول (۱-۲) ارزیابی کیفیت شبکه به کمک معیار کیفیت تعامد (توحیدی، ۱۳۹۳)

توصیف کیفی کشیدگی	غیرقابل قبول	بد	قابل قبول	خوب	بسیار خوب	عالی
توصیف کمی کشیدگی	۰-۰/۰۰۱	۰/۰۰۱-۰/۱	۰/۱-۰/۲	۰/۲-۰/۷	۰/۷-۰/۹۵	۱-۰/۹۵

معیار کشیدگی تعیین می‌کند که یک شبکه‌بندی چقدر به ایده‌آل نزدیک است. کشیدگی سلول‌ها به صورت اختلاف بین شکل یک سلول و شکل متقارن معادل آن سلول است. معیار کشیدگی به کمک روش انحراف حجمی معادل با تقسیم عبارت (سایز سلول - سایز بهینه سلول) به سایز بهینه سلول محاسبه می‌شود. کشیدگی زیاد می‌تواند دقت و پایداری حل را تحت تأثیر قرار دهد. برای مثال در شبکه‌های چهارگوش زاویه نزدیک ۹۰ درجه و در شبکه‌های سه‌گوش زاویه نزدیک ۶۰ و کمتر از ۹۰ مناسب است. به صورت یک قانون کلی کشیدگی باید در شبکه‌های سه‌گوش و چهارگوش کمتر از ۰/۹۵ و به طور میانگین ۰/۳۳ باشد. بهترین حالت کشیدگی برای شبکه، نزدیک عدد ۰ و بدترین حالت، نزدیک عدد ۱ است برای تعیین کیفیت شبکه‌بندی به کمک معیار کشیدگی از جدول (۲-۲) استفاده می‌شود (توحیدی، ۱۳۹۳).

<sup>1</sup> Orthogonal Quality

<sup>2</sup> Skewness

جدول (۲-۲) ارزیابی کیفیت شبکه به کمک معیار کشیدگی (توحیدی، ۱۳۹۳).

توصیف کیفی کشیدگی	غیرقابل قبول	بد	قابل قبول	خوب	بسیار خوب	عالی
توصیف کمی کشیدگی	۰/۹۸ - ۱	۰/۹۷ - ۰/۹۵	۰/۹۴ - ۰/۸۱	۰/۸۰ - ۰/۵۱	۰/۵۰ - ۰/۲۶	۰/۲۵ - ۰

### • تبدیل شبکه چندوجهی<sup>۱</sup>

در محیط گرافیکی Ansys Fluent شبکه مثلثی و چهارضلعی را می‌توان به شبکه چندوجهی (البته نه در پیش‌پردازش) تبدیل نمود. این کار باعث می‌شود که کیفیت شبکه بهبود یابد. تعداد سلول‌ها کاهش یافته و امکان کنترل فرایند تبدیل برای کاربر ایجاد شود ولی بعد از تبدیل، دیگر نمی‌توان آن را مجدداً به شبکه قبلی تبدیل نمود. همچنین نمی‌توان از ابزارهایی مثل extrude, merge, sweep, smooth برای اصلاح استفاده نمود (توحیدی، ۱۳۹۳).

### ب- نواحی سلولی و شرایط مرزی

قبل از حل هر مسئله CFD، باید نواحی سلولی و شرایط مرزی تعیین شود. نواحی سلولی به وسط شبکه سلولی اشاره دارد و عموماً بیانگر این امر است که چه سیالی در آن سلول قرار دارد. برای تعیین شرایط مرزی باید جایی که سیال دامنه را ترک یا به آن وارد می‌شود، تعیین شود. در مرزهای ورودی باید مقادیر سرعت، فشار یا دما تعیین شود. در سایر مرزها مانند دیوارها باید نرمی و زبری، وجود انتقال حرارت تعیین شوند. همچنین ممکن است مرزهای تقارن، تناوب یا محوری در مدل وجود داشته باشد. داده‌های موردنیاز در یک مرز به نوع شرایط مرزی مدل‌های فیزیکی به‌کاررفته بستگی دارد. و اجزای بسیار مهم و تعیین‌کننده‌ای در نرم‌افزار Ansys Fluent هستند. شرایط مرزی در این نرم‌افزار به دو صورت زیر دسته‌بندی می‌شود (دهقانی، ۱۳۸۷):

<sup>1</sup> Polyhedral

- دیوار و مرزهای جفت و تناوبی: دیوار، مرز متقارن و محوری.
- نواحی و سلول‌های داخلی: سیال، جامد و متخلخل
- مرزهای صفحه‌های داخلی: فن، رادیاتور، مرز متخلخل، دیوار، ناحیه داخلی<sup>۱</sup>

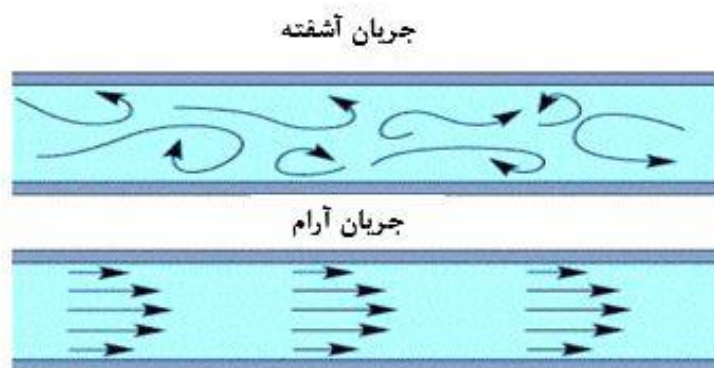
جدول (۲-۳) طبقه‌بندی شرایط مرزی (دهقانی، ۱۳۸۷)

دسته‌بندی	نوع شرط مرزی
سطح	axis, outflow, mass flow inlet, pressure far field, pressure inlet, pressure outlet, symmetry, velocity inlet, wall, inlet vent, intake fan, outlet vent, exhaust fan
سطوح دوطرفه	Fan, interior, porous jump, radiator, wall
تناوبی	Periodic
سلول‌ها	Fluid, solid, porous

### ج- جریان آرام و آشفته

جریان آرام جریانی است که در آن سیال به صورت منظم و تحت لایه‌ها و مسیرهای مشخص و منظم حرکت می‌کند. از همین رو جهت توصیف این نوع جریان از عبارت laminar به معنای طبقه طبقه شده برگرفته از کلمه laminate استفاده می‌شود. اما معمولاً در اغلب جریان‌های مهندسی وضع به همین منوال باقی نمی‌ماند و با حرکت به سمت پایین دست جریان و همزمان با بلوغ جریان و انباشته شدن اغتشاشات جریانی روی یکدیگر و پس از طی شدن مرحله میانی که اصطلاحاً مرحله گذار جریان نامیده می‌شود به یک جریان آشفته خواهیم رسید (توحیدی، ۱۳۹۳).

<sup>1</sup> Interior



شکل (۱-۲) جریان آرام و آشفته (توحیدی، ۱۳۹۳).

بیشتر جریان‌های مهندسی آشفته هستند. به زبان ساده جریان آشفته نوعی از جریان سیال است که در آن سیال تحت نوسانات جریانی<sup>۱</sup> و فرایندهای اختلاطی شدید قرار می‌گیرد مدل‌های آشفتگی موجود در Ansys Fluent به صورت جدول (۲-۴) هستند.

جدول (۲-۴) مدل‌های آشفتگی موجود در Ansys Fluent (توحیدی، ۱۳۹۳).

مدل‌های دو معادله‌ای	مدل‌های تک معادله‌ای
Standard k- $\epsilon$	Spalart-Allmaras
RNG K- $\epsilon$	
Realizable k- $\epsilon$	
Standard k- $\omega$	
SST k- $\omega$	
4-Equation v2f	
Reynolds Stress Model	
k-kl- $\omega$ Transition Model	
SST Transition Model	
Detached Eddy Simulation(DES)	
Large Eddy Simulation (LES)	

<sup>1</sup> Fluctuation

در جدول نشان داده شده از بالا به پایین هزینه، زمان محاسبات، دقت و کارایی افزایش پیدا می‌کند. متاسفانه مدل آشفتگی که بتواند برای تمام حالت‌ها و مسائل مختلف به کار رود وجود ندارد. و انتخاب مدل آشفتگی به ملاحظاتی مانند فیزیک جریان، تجربیات حاصل از شبیه‌سازی برای مسائل خاص، میزان دقت مورد نیاز قدرت منابع محاسباتی (قدرت کامپیوترها) و زمان موجود برای انجام محاسبات وابسته است. ساده‌ترین مدل‌های آشفتگی که نسبتاً کامل، مدل‌های دو معادله‌ای هستند. مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  یک مدل دو معادله‌ای است که به صورت گسترده‌ای در مطالعات مهندسی به کار گرفته می‌شود و تحقیقات انجام شده روی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که این مدل آشفتگی، مناسب‌ترین مدل آشفتگی برای مدل‌سازی CFD سیستم تهویه است (KARAASLAN et al, 2011). این مدل سه زیرمجموعه  $k-\epsilon$  Standard, RNG,  $K-\epsilon$  و Realizable  $K-\epsilon$  است. در مدل پایه دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  Standard معادله‌هایی برای محاسبه دو پارامتر  $k$  و  $\epsilon$  حل می‌شوند. این مدل، مدل  $k-\epsilon$  پیش‌فرض است. ثوابت موجود در این مدل به صورت تجربی به دست می‌آیند و تنها برای جریان‌های کاملاً متلاطم معتبر هستند. این مدل بسیار قوی است و با وجود محدودیت‌های شناخته شده از این مدل به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. RNG  $K-\epsilon$  یک نوع مدل مشتق شده از مدل  $k-\epsilon$  Standard است. معادله‌ها و ضرایب این مدل به صورت تحلیلی به دست آمده و تغییرات قابل توجهی در معادله  $\epsilon$  ایجاد شده است که توانایی این مدل را برای شبیه‌سازی جریان‌هایی که تحت کرنش شدیدی هستند بهبود می‌بخشد. گزینه‌های اضافی موجود در این مدل به پیش‌بینی جریان‌های چرخشی و رینولدز پایین کمک می‌نماید. این مدل برای جریان‌های برشی پیچیده که شامل کرنش سریع، حرکت چرخشی متوسط، گردابه‌ها و جریان‌های محلی گذار مناسب است Realizable  $K-\epsilon$  از نظر مزایا و کاربرد مشابه مدل RNG است ولی ممکن است نسبت به مدل RNG دقیق‌تر و آسان‌تر همگرا شود (توحیدی، ۱۳۹۳). در این مطالعه از مدل  $k-\epsilon$  Standard استفاده شده است.



## ۲-۲-۲- حل کننده

دو نوع حلگر در Ansys Fluent در دسترس هستند: حلگر مبتنی بر فشار<sup>۱</sup> و حلگر مبتنی بر چگالی<sup>۲</sup> هر دو نوع حلگر می‌تواند در دامنه وسیعی از جریان‌ها استفاده شود ولی در برخی از این موارد گونه‌ای از حلگرها می‌تواند بهتر جوابگو باشد. حلگر مبتنی بر فشار برای جریان‌های غیرقابل تراکم و نسبتاً قابل تراکم استفاده می‌شود. درحالی‌که حلگر مبتنی بر چگالی برای جریان‌های سرعت بالای قابل تراکم استفاده می‌شود. دو روش صریح<sup>۳</sup> و ضمنی<sup>۴</sup> برای حلگر مبتنی بر چگالی وجود دارد. روش ضمنی در مسائل حالت پایدار دارای همگرایی سریع‌تری نسبت به روش صریح است درحالی‌که روش ضمنی نیاز به حافظه بیشتری نیز دارد. گزینه ضمنی عموماً بر صریح اولویت دارد زیرا محدوده دقیق‌تری در بازه‌های زمانی دارد. دو الگوریتم منفک<sup>۵</sup> و کوپل<sup>۶</sup> برای حلگر مبتنی بر فشار وجود دارد. در الگوریتم منفک معادله‌های به صورت مجزا به ترتیب حل می‌شود ولی در الگوریتم کوپل معادله‌های مومنتوم و پیوستگی به صورت هم‌زمان باهم حل می‌شود. الگوریتم کوپل دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به روش منفک است ولی به حافظه بیشتری نیاز دارد. حلگر کوپل مبتنی بر فشار برای بیشتر جریان‌های تک فاز قابل اعمال بوده و عملکرد بهتری را نسبت به حلگر منفک مبتنی بر فشار از خود نشان می‌دهد ولی برای جریان‌های چند فازی (اویلری)، جریان جرمی متناوب و NITA<sup>۷</sup> قابل استفاده نیست و ۱/۵ الی ۲ برابر حافظه بیشتر، نسبت به حلگر منفک، نیاز دارد. (توحیدی، ۱۳۹۳). در این با توجه به اینکه جریان تراکم ناپذیر در نظر گرفته شد از حلگر مبتنی بر فشار استفاده شد.

---

<sup>1</sup> Pressure-based

<sup>2</sup> Density-based

<sup>3</sup> Explicit

<sup>4</sup> Implicit

<sup>5</sup> Segregated

<sup>6</sup> Coupled

<sup>7</sup> Non-iterative Transient Advancement

## ۲-۲-۳- پس پردازنده

مقدار زیادی از کار در محیط پس پردازنده صورت می‌گیرد. به دلیل افزایش تنوع نیازهای مهندسی، بسیاری از آن‌ها دارای توانایی ترسیمی بالایی هستند. بسته‌های CFD در حال حاضر با ابزارهای مجسم سازی مجهز شده‌اند که عبارت‌اند از:

- نمایش میدان هندسی و شبکه
- ترسیم بردار
- ترسیم خط و نمایش نواحی هم‌تراز
- ترسیم سطح دوبعدی و سه‌بعدی
- مسیر حرکت ذره
- خروجی نتایج به صورت رنگی

این وسایل همچنین شامل متحرک‌سازی و نمایش نتایج نیز هستند و علاوه بر ترسیم، خروجی را به صورت قابل فهم برای برنامه‌های دیگر ارائه می‌دهند (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

## ۲-۳- معادله‌های حاکم بر جریان سیال

معادله‌های حاکم بر جریان سیال، قوانین فیزیکی بقا را به صورت عبارات ریاضی بیان می‌کنند. برخی از این قوانین عبارتند از (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹):

- جرم سیال همواره ثابت است.
- نرخ تغییر اندازه حرکت با برابری نیروهای وارد بر ذره سیال برابر است (قانون دوم نیوتون).
- نرخ تغییر انرژی با مجموع نرخ افزایش حرارت سیستم و نرخ کار انجام شده روی ذره سیال برابر است (قانون اول ترمودینامیک).

برای توصیف خصوصیات سیال باید آن را بصورت پیوسته در نظر گرفت. برای بیان رفتار و توصیف سیال از عبارات بیان کننده خواص ماکروسکوپی مانند سرعت، فشار، چگالی، درجه حرارت و مشتقات زمانی و مکانی آن‌ها استفاده می‌شود. تمامی خواص سیال تابعی از فضا و زمان هستند به همین دلیل باید خواص ذکر شده سیال را به صورت  $u(x, y, z, t)$ ،  $p(x, y, z, t)$ ،  $\rho(x, y, z, t)$ ،  $T(x, y, z, t)$  در نظر گرفت (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹). در ادامه به بررسی چهار معادله بقای جرم، اندازه حرکت، انرژی و معادله حالت که برای بیان رفتار و توصیف سیال به کار می‌روند پرداخته می‌شود.

### ۲-۳-۱- معادله بقای جرم در حالت سه بعدی

اصل اساسی که از آن در مکانیک سیالات استفاده می‌شود اصل بقای جرم است. این اصل بیان می‌دارد که جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود و توسط معادله پیوستگی بیان می‌شود (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

برای جریان تراکم پذیر:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1-2)$$

برای سیالات تراکم ناپذیر:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-2)$$

که در این روابط:

$\rho$ : چگالی سیال

$u$ : مولفه سرعت در راستای محور X

$w$ : مولفه سرعت در راستای محور Z

$v$ : مولفه سرعت در راستای محور Y

## ۲-۳-۲- معادله اندازه‌ی حرکت در حالت سه بعدی

مکانیک سیالات تنها با داشتن معادله پیوستگی مشخص نمی‌شود بلکه باید اصل بقاء اندازه حرکت یا قانون دوم نیوتون را درباره آن بیان کرد. اندازه حرکت حاصل ضرب جرم در سرعت است. قانون دوم نیوتون بیان می‌کند که برآیند نیروهایی که بر یک جسم اثر می‌کند برابر است با تغییرات خالص مومنتوم. با فرض جریان غیرقابل تراکم و ضریب ویسکوزیته ثابت، شکل معادله ناویر-استوکس به صورت زیر است (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹):

• مولفه x معادله اندازه حرکت

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (۳-۲)$$

• مولفه y معادله اندازه حرکت

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (۴-۲)$$

• مولفه z معادله اندازه حرکت

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + S_{Mz} \quad (۵-۲)$$

که در این روابط:

$$\tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{zx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}, \tau_{zy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{zz}$$

$$\text{نرخ افزایش اندازه حرکت در جهت‌های سه‌گانه} = \rho \frac{Du}{Dt}, \rho \frac{Dw}{Dt}, \rho \frac{Dv}{Dt}$$

$$P = \text{فشار} \quad S_{Mx}, S_{My}, S_{Mz} = \text{عبارت‌های چشمه}$$

### ۲-۳-۳- معادله انرژی در حالت سه بعدی

معادله انرژی از قانون اول ترمودینامیک به دست می‌آید. که بیان می‌کند نرخ تغییر انرژی ذره سیال برابر با نرخ حرارت اضافه شده به ذره سیال به علاوه نرخ کار انجام شده بر روی ذره است. معادله انرژی در حالت سه بعدی به صورت زیر است (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹):

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(pu) + \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \\ \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (6-2)$$

که در این روابط:

$$k = \text{ضریب هدایت حرارت} \quad T = \text{دما}$$

$$S_E = \text{آهنگ حجمی تولید حرارت}$$

### ۲-۳-۴- معادله‌های ناویر - استوکس

معادله‌های ناویر-استوکس<sup>۱</sup> یک مدل ریاضی کامل برای سیال ارائه می‌دهند. به دلیل پیچیده بودن این معادله‌های در فرم کامل ناویر-استوکس حل تحلیلی غیرممکن است بنابراین روش‌های عددی به کمک رایانه بهترین گزینه برای حل از این معادله‌های است. پیشرفت سریع درزمینه فناوری رایانه در چند دهه

<sup>1</sup> Navier-Stokes

اخیر باعث استفاده گسترده دینامیک سیالات محاسباتی در حل عددی مسائل جریان سیال شده است. با توجه به اینکه تمامی حل‌کننده‌های معادله‌های ناویر-استوکس نیازمند زمان پردازش و حافظه زیادی هستند بنابراین مقداری ساده‌سازی در حل معادله‌های ناویر-استوکس برای کاهش منابع محاسباتی مورد احتیاج، لازم است. معادلات ناویر-استوکس به شکل ساده به صورت زیر است (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (9-2)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (10-2)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (11-2)$$

$\mu$  = ضریب لزجت

### ۲-۳-۵- مدل آشفتگی Standard k-ε

فرم دیفرانسیلی مدل آشفتگی Standard k-ε به صورت زیر است. این مدل شامل ۵ ثابت قابل تنظیم  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\partial_k$ ,  $C_\epsilon$  است. مدل استاندارد مقادیر زیر را برای ثابت‌هایی که در یک محدوده وسیع جریان‌های آشفته وارد می‌شوند به کار می‌برد (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\partial_k} \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon U) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\partial_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \partial_k = 1.00, \partial_\epsilon = 1.3$$

$\mu_t$  = لزجت ادی  $E_{ij}$  = مولفه متوسط نرخ تغییر شکل المان سیال

## ۲-۴- بررسی سیستم تهویه

استخراج مواد معدنی از معادن زیرزمینی یکی از خطرناک‌ترین اقدامات صورت گرفته توسط نسل بشر است. در معادن زغالسنگ خطر انفجار به دلیل حضور گاز متان و گرد زغال از یک سو و وجود آلاینده‌های موجود در هوای معدن و قرار گرفتن طولانی مدت در معرض این آلاینده‌ها از سوی دیگر سلامتی معدنکاران را تهدید می‌کند. در استخراج زغالسنگ دو دلیل عمده برای آلوده شدن هوا وجود دارد یکی آلاینده‌هایی هستند که از موتورهای دیزلی حاضر در محیط معدن وارد هوا می‌شوند و دیگری زغال و گازهایی مانند متان که از لایه‌های زغال متصاعد می‌شوند (Parra et al., 2006).

شرایط کاری مناسب و ایمنی کافی در محیط کار هر دو به توانایی سیستم تهویه به حذف آلاینده‌ها از محیط کار بستگی دارند. زمانی می‌توان عنوان کرد که یک سیستم تهویه کارآمد است که بتواند تضمین کند که در تمامی نواحی، سرعت متوسط تعیین شده در مقررات برای هوا تأمین شده است (Parra et al., 2006). با توجه به مطالب بیان شده برای اظهار نظر درباره‌ی کارآمدی یک سیستم تهویه مطالعه موردی معیارهای شناسایی نواحی مرده، بررسی خطر انفجار<sup>۱</sup>، شناسایی نواحی مستعد خودسوزی زغالسنگ، مناطق هدر رفت هوای تازه و کیفیت هوا بررسی شد.

## ۲-۴-۱- شناسایی نواحی مرده

سرعت هوا در قسمت‌های مختلف معدن نباید از حدود مشخصی کمتر یا بیشتر باشد. اگر سرعت هوا از حد مجاز تعیین شده کمتر باشد هوا قدرت خنک‌کنندگی لازم را نخواهد داشت و بنابراین راندمان کارکنان معدن کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر اگر سرعت هوا از حد معینی بیشتر باشد سبب تشدید گردوغبار در حفاریات مختلف شده و نیز ممکن است باعث سرماخوردگی کارکنان شود. واضح است که سرعت هوا

---

<sup>1</sup> Explosion Risk

درعین حال باید به گونه‌ای باشد که شدت جریان لازم از بخش‌های مختلف معدن عبور کند. حد مجاز سرعت هوا در قسمت‌های مختلف معادن بر اساس آئین‌نامه ایمنی معادن در جدول (۲-۴) آمده است (مقررات ایمنی در معادن، ۱۳۸۸).

جدول (۲-۵) حد مجاز سرعت در قسمت‌های مختلف معدن براساس آئین‌نامه ایمنی معادن ایران (مدنی، ۱۳۸۷)

ردیف	موقعیت	حداکثر سرعت - متر بر ثانیه	
		حداقل	حداکثر
۱	کلیه قسمت‌های معدن	۰,۲۵	-
۲	کارگاه استخراج	۰,۲۵	۴
۳	تونل‌های دنباله‌رو	۰,۲۵	۶
۴	تونل میان‌بر - چاه نفر رو - تونل مورب	۰,۲۵	۸
۵	چاه باربری	۰,۲۵	۱۰
۶	راه مخصوص بادبزن - چاه تهویه بزرگ با تجهیزات	۰,۲۵	۱۵

بخش‌هایی از معدن که حداقل سرعت هوای تعیین شده در آن‌ها جریان نداشته باشد نواحی مرده نامیده می‌شوند (Parra et al., 2006). برای شناسایی نواحی مرده از منحنی‌های هم‌تراز سرعت<sup>۱</sup> مدل CFD استفاده شد. شناسایی توزیع نواحی مرده در شبکه سیستم تهویه اولین اقدام بررسی سیستم تهویه است (Parra et al., 2006). پس از شناسایی نواحی مرده باید برای افزایش سرعت هوا در این نواحی اقدام شود.

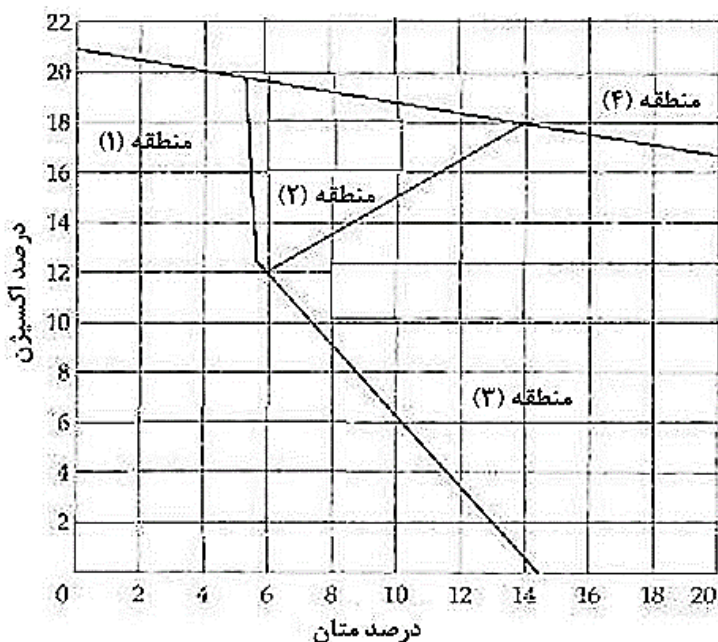
## ۲-۴-۲- بررسی خطر انفجار

قسمت اعظم گاز زغال را متان تشکیل می‌دهد و بنابراین شرایط انفجار آن، همان شرایط انفجار گاز متان است. بایستی توجه داشت که گاز متان خالص نه قابلیت اشتعال دارد و نه قابلیت انفجار و برای اشتعال و

<sup>1</sup> Velocity contour



انفجار حتماً بایستی با مقداری هوا مخلوط شود. اگر عیار متان در هوا کمتر از ۴/۵ درصد و گرد زغال در هوای معدن وجود نداشته باشد این مخلوط قابل اشتعال و انفجار نخواهد بود. اما اگر عیار آن بیشتر شود بدون وجود گرد زغال نیز قابل انفجار است و در اثر حرارت و یا شعله منفجر خواهد شد. به طور کلی در مواردی که درصد متان در هوای معدن بین ۵ تا ۱۲ الی ۱۶ درصد باشد مخلوط این دو قابل انفجار است و قدرت انفجار آن در ۹/۵ درصد حداکثر است. انفجار گاز مزبور در چنین شرایطی درجه حرارتی برابر ۱۸۵۰ تا ۲۶۵۰ درجه سانتی گراد تولید خواهد کرد. اگر عیار متان در هوا بیش از ۱۴ تا ۱۶ درصد شود مخلوط قابل انفجار نیست زیرا در این حالت اکسیژن موجود جهت انفجار کافی نیست. اما در چنین مواردی هوای معدن در برابر احتراق و انفجار ایمنی کامل را نخواهد داشت زیرا به محض ورود هوای تازه به این گونه محل‌ها عیار متان پایین می‌آید و مخلوط قابل انفجاری را تشکیل می‌دهد. شکل (۳-۵) خلاصه این مطالب را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲) قابلیت انفجار مخلوط متان و هوا (مدنی، ۱۳۸۷).

به طوری که در شکل دیده می شود برحسب درصد متان و اکسیژن مشخصات مخلوط حاصل به یکی از چهار منطقه ای که در شکل آمده اند مربوط خواهد بود.

منطقه (۱): در این منطقه مخلوط غیر قابل انفجار است.

منطقه (۲): مخلوط قابل انفجار است

منطقه (۳): مخلوط در این شرایط قابل انفجار نیست اما همان طور که بیان شد هرگاه هوای تازه به محل وارد شود مخلوط قابل انفجار خواهد شد.

منطقه (۴): در شرایط معمولی تشکیل چنین مخلوطی از متان و اکسیژن امکان پذیر نیست.

برای بررسی قابلیت انفجار مخلوط گاز متان و هوای موجود باید مشخص شود که چند درصد آن را متان تشکیل داده است.

## ۲-۴-۳- شناسایی نواحی مستعد خودسوزی زغالسنگ

خودسوزی در معادن زغالسنگ یکی از مهم ترین مشکلات عمده در تمامی کشورهای تولیدکننده زغالسنگ است. اکثر آتش سوزی های زغالی در یک ناحیه کوچک بر اثر گرمایش خود به خودی شروع می شوند و به تدریج ناحیه وسیعی را در برمی گیرند که نتایج آن باعث از دست رفتن میلیون ها تن زغالسنگ، مرگ پرسنل، خسارت و نابودی تجهیزات در داخل معدن، افزایش دمای داخل معدن، ایجاد مشکل در سیستم تهویه و غیره می شود. ناحیه تخریب کارگاه استخراج زغالسنگ یکی از مستعدترین نواحی برای خودسوزی زغالسنگ است که در ادامه این مطالعه به شناسایی بخش های مستعد پرداخته می شود.

## الف - مکانیزم خودسوزی زغالسنگ

فرآیند خودسوزی زغال را می توان به طور خلاصه براساس ۷ مرحله زیر بیان کرد (Grewer, 1994):

۱. جذب اکسیژن توسط زغال و تشکیل ترکیب اکسیژن بعلاوه زغال و ایجاد فرآیند اکسیداسیون بدون

تشکیل کربن مونواکسید

۲. شروع فرآیند اکسیداسیون و تولید گرما.
۳. همچنان که دما تا حدود ۳۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد گازهای مونواکسید کربن<sup>۱</sup> و دی‌اکسید کربن<sup>۲</sup> تولید می‌شوند.
۴. با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون افزایش یافته و مقدار تولید گازهای مونواکسید کربن، دی‌اکسید کربن و سایر گازها افزایش می‌یابد.
۵. اگر گرمای تولیدشده از فرآیند اکسایش زغالسنگ توسط سنگ‌های اطراف جذب شود و یا توسط هوای تهویه پراکنده شود دمای زغال افزایش نمی‌یابد و اکسایش با دمای کم صورت می‌گیرد که به این پدیده « اکسیداسیون با دمای پایین » گفته می‌شود. در چنین شرایطی حتی اگر زغال به نقطه اشتعال هم نرسد اما تحت تأثیر هوازدهی قرار گرفته است و زغال‌های هوازده دارای میزان انرژی حرارتی ضعیفی هستند.
۶. اگر گرمای تولیدشده توسط اکسیداسیون پراکنده نشود و از محیط اکسیداسیون خارج نشود، این گرما توسط ظرفیت گرمایی زغال جذب‌شده و دمای زغال افزایش می‌یابد و باعث می‌شود تا اکسایش سریع‌تر اتفاق بیفتد و با افزایش دما سرعت اکسیداسیون به صورت نمایی افزایش می‌یابد به طوری که به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دما سرعت اکسیداسیون تقریباً ۲ برابر می‌شود.
۷. سرانجام پس از واکنش اکسیژن با زغال دمای زغال سنگ افزایش می‌یابد و بعد از گذشت مدت‌زمان معین و در یک دمای بحرانی زغال به مرحله اشتعال می‌رسد و خودسوزی زغال صورت می‌گیرد. با توجه به توضیحات بیان‌شده بخش‌های مستعد خودسوزی هستند که به زغالسنگ آن ناحیه اکسیژن برسد و جریان هوا به اندازه‌ای نباشد که افزایش دمای ناشی از اکسیداسیون زغالسنگ را کاهش دهد.

---

<sup>1</sup> CO<sub>2</sub>

<sup>2</sup> CO

## ۲-۴-۴- مناطق هدر رفت هوای تازه

مناطق هدر رفت هوای تازه به بخش‌هایی از سیستم تهویه نسبت داده می‌شود که هوای تازه تزریق شده به شبکه تهویه به‌جای حرکت به سمت کارگاه‌های استخراج و بخش‌های موردنیاز به سمت خروجی هوای کثیف هدایت می‌شود. دلیل وجود چنین مناطقی می‌تواند عدم طراحی مناسب سیستم تهویه، خراب شدن درهای تهویه و یا گسترش نادرست شبکه تهویه و به وجود آمدن اتصال کوتاه باشد.

## ۲-۴-۵- کیفیت هوای تازه

هوایی که به داخل سیستم تهویه تزریق می‌شود ترکیب خاص و ثابتی دارد اما در بخش‌های مختلف معدن با توجه به فعالیتی که در آن بخش صورت می‌گیرد و تجهیزاتی که در محل حضور دارند ترکیب هوا تغییر می‌کند. اما استانداردهایی وجود دارد که با توجه به میزان خطر حضور گازهای متفاوت نباید میزان حضور آن‌ها در ترکیب هوا از مقدار مشخصی بیشتر باشد. جدول (۲-۵) جزییات بیشتری از نوع گاز، خواص فیزیکی، درجه سمی بودن و مهم‌تر درصد عیار مجاز و عیار کشنده بیان می‌کند.

جدول (۲-۶) عیار مجاز گازهای مختلف موجود در هوای معدن بر اساس مقررات کشور آمریکا (مدنی، ۱۳۸۷).

گاز	فرمول شیمیایی	آثار مضر	حداکثر عیار مجاز (درصد)	عیار کشنده (درصد)
اکسیژن	O <sub>2</sub>	غیر سمی	۱۹/۵ (حداقل)	۶
دی‌اکسید کربن	CO <sub>2</sub>	خفه‌کننده	۰/۵	۱۸
متان	CH <sub>4</sub>	قابل انفجار خفه‌کننده	۱	۵ تا ۱۵ (انفجار)
آلدئیدها	H <sub>X</sub> C <sub>Y</sub> O <sub>2</sub>	سمی	۰/۰۰۰۵ - ۰/۰۰۱	-
منواکسید کربن	Co	سمی قابل انفجار	۰/۰۱	۰/۰۳ در عیار ۱۲ تا ۷۴ درصد قابل انفجار است

ادامه جدول (۲-۶) عیار مجاز گازهای مختلف موجود در هوای معدن بر اساس مقررات کشور آمریکا (مدنی، ۱۳۸۷).

گاز	فرمول شیمیایی	آثار مضر	حداکثر عیار مجاز (درصد)	عیار کشنده (درصد)
رادن	R <sub>n</sub>	راديواكتيو	-	-
اکسیدهای ازت	NO	سمی	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵
	NO <sub>2</sub>			
	N <sub>2</sub> O			
انیدرید سولفور	SO <sub>2</sub>	سمی	۰/۰۰۰۵	۰/۱
هیدروژن سولفور	SH <sub>2</sub>	سمی	۰/۰۰۲	در عیار ۴ تا ۶۴ درصد قابل انفجار است
		قابل انفجار		
هیدروژن	H <sub>2</sub>	قابل انفجار سمی	-	در عیار ۴ تا ۷۴ درصد قابل انفجار است

## ۲-۵- جمع بندی

با بهبود سخت افزارهای کامپیوترها پیشرفت های قابل توجهی در تمامی شاخه های علم به وجود آمد که علم دینامیک سیالات نیز شامل آن می شود. استفاده از نرم افزارهای CFD باعث کاهش هزینه ها و زمان در طراحی هایی که از دینامیک سیالات بهره گرفته شده است شد. در این فصل به بیان مفاهیم مربوط به دینامیک سیالات و تهویه پرداخته شد و در فصل آینده به بیان اساس کار نرم افزار FLUENT پرداخته خواهد شد و در ادامه مدل سازی CFD مورد مطالعاتی تهیه خواهد شد.

فصل سوم:

مدل سازی CFD سیستم تهویه

بسیاری از مسائل مهندسی سیستم تهویه معدن مانند چگونگی توزیع و رفتار گازهای حاضر در هوای معدن و گردوغبار نیاز به تحلیل سه‌بعدی جریان هوای معدن دارند. استفاده از مدل‌های تجربی که از بررسی‌های میدانی و یا مطالعات آزمایشگاهی حاصل شده‌اند و در نتیجه دارای تقریب زیادی هستند و یا تهیه مدل‌های فیزیکی که هزینه زیادی دارند و یا انجام آزمایش‌های میدانی با توجه به زمان بر بودن و هزینه بالای تجهیزات، استفاده از این روش‌ها را با محدودیت روبرو می‌سازد. با توجه به پیشرفت روزافزون قدرت رایانه‌ها و توسعه مدل‌های عددی توانمند که قادر به شبیه‌سازی جریان سیال به صورت سه‌بعدی در هندسه‌های پیچیده هستند استفاده از این مدل‌های عددی برای مهندسين امری اجتناب‌ناپذیر است. مجموعه نرم‌افزار ANSYS یکی از توانمندترین نرم‌افزارها در زمینه حل عددی مسائل مهندسی است که مسائل سیالاتی را با روش حجم محدود حل می‌کند. اولین نگارش مجموعه نرم‌افزار ANSYS توسط شرکت آمریکایی Swanson در سال ۱۹۷۱ عرضه شد و از آن زمان تاکنون نگارش‌های متعددی از آن منتشر شده و هرروز بر قدرت آن افزوده شده است. مجموعه نرم‌افزار ANSYS توانایی حل مسائل مکانیک جامدات، سیالات، عمران، انتقال حرارت، فیزیک و ... را داراست و یک نرم‌افزار چندمنظوره به شمار می‌رود. اگرچه مجموعه نرم‌افزار ANSYS نرم‌افزار مدل ساز هندسی<sup>۱</sup> محسوب نمی‌شود، اما مدل‌سازی معمولی و تا حدی پیچیده نیز در آن امکان‌پذیر است و می‌تواند مدل هندسی را از نرم‌افزارهای توانمند مدل‌سازی Catia، AutoCAD، Mechanical، Unigraphics و Solid works دریافت کند که از مزایای مجموعه نرم‌افزار ANSYS محسوب می‌شود. در این مجموعه نرم‌افزار برای طراحی هندسه از نرم‌افزار Ansys DesignModeler و برای شبکه‌بندی از نرم‌افزار Ansys Meshing استفاده می‌شود. Ansys Fluent یکی از نرم‌افزارهای مجموعه نرم‌افزار ANSYS است

---

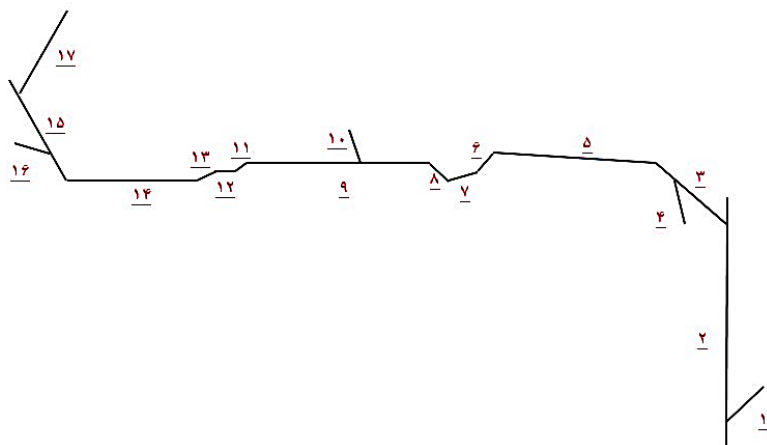
<sup>1</sup> CAD

که از سه قسمت پیش‌پردازش، حلگر و پس‌پردازش تشکیل شده است. در این مطالعه از نرم‌افزار Ansys Fluent برای مدل‌سازی CFD سیستم تهویه استفاده شده است.

شبیه‌سازی انجام شده با فرضیات زیر همراه بوده است (Ren et al., 2014):

۱. هوای معدن تراکم ناپذیر است.
۲. دما در ناحیه مدل‌سازی مسیر جریان هوا تا کارگاه استخراج ثابت فرض شده و معادله انرژی حل نمی‌شود. در مدل تهویه کمکی و کارگاه استخراج فقط دمای دیوارها ثابت است و در میدان حل معادله انرژی حل می‌شود.
۳. دمای هوای محیط شبیه‌سازی شده ثابت فرض شده است.
۴. جریان در کل دامنه پایدار و کاملاً آشغته است.

برای بررسی سیستم تهویه مدل CFD تونل اصلی به طول ۴۵۰ متر به همراه ۱۸۱۰ متر از مسیر شبکه تهویه، یک مورد تهویه کمکی مربوط به تونلی به طول ۵۰ متر و بلوک استخراجی شامل کارگاه استخراج زغالسنگ به ابعاد  $۱۲۰ \times ۵۰ \times ۱$  متر مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل به نحوه تهیه مدل‌های CFD مناطق یاد شده پرداخته می‌شود. کروکی بخش مدل‌سازی شده از سیستم تهویه به شکل زیر است.



شکل (۱-۳) کروکی بخش مدل‌سازی شده از سیستم تهویه



طول تونل‌های شماره‌گذاری شده و زوایای داخلی آن‌ها با تونلی که به آن متصل هستند به شرح زیر

جدول (۱-۳) است:

جدول (۱-۳) مشخصات کروکی بخش مدل‌سازی شده از سیستم تهویه

شماره تونل	زاویه داخلی با تونل متصل‌کننده به شبکه تهویه (درجه)	فاصله از ابتدای تونل متصل‌کننده (متر)
۱	۵۳/۵۰	۱۰/۰۰
۲	تونل مادر	۴۴۹/۰۰
۳	۵۰/۵۵	۸۳/۸۲
۴	۵۹/۵۵	۱۰/۰۰
۵	۵۳/۵۰	۳۸۹/۵۰
۶	۳۰/۵۵	۲۷/۹۷
۷	۲۱/۲۰	۴۸/۸۵
۸	۴۳/۶۰	۴۱/۷۳
۹	۱۶/۰۰	۱۳۰/۰۰
۱۰	۱۵/۰۰	۴۰/۰۰
۱۱	۳۰/۸۱	۴/۲۵
۱۲	۲۱/۰۰	۲۹/۸۲
۱۳	۲۶/۶۰	۱۷/۵۰
۱۴	۳۳/۷۰	۲۹۰/۰۰
۱۵	۴۱/۶۰	۱۶۷/۴۲
۱۶	۴۸/۰۰	۴۰/۰۰
۱۷	۴۵/۰۰	۳۰/۰۰

پس از بررسی همگرایی، اعتبارسنجی تمامی مدل‌ها با اندازه‌گیری سرعت و فشار هوا به کمک دستگاه ABH-4225 در معدن و مقایسه با نتایج مدل تهیه‌شده صورت گرفته است. این دستگاه امکانات زیر را داراست:

۱. فشارسنج، سرعت‌سنج، رطوبت‌سنج و دماسنج

۲. اندازه‌گیری سرعت

واحدهای اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری، میزان خطا و بازه اندازه‌گیری هر یک از واحدهای سرعت توسط دستگاه ABH-4225 در جدول (۲-۳) بیان شده است.

جدول (۲-۳) واحدهای اندازه‌گیری سرعت توسط دستگاه ABH-4225

خطا	بازه اندازه‌گیری	دقت	واحد اندازه‌گیری
متر بر ثانیه $\leq 20$	۰/۱ - ۳۰	۰/۱	متر بر ثانیه <sup>۱</sup>
۳ درصد	۱/۴ - ۱۰۸	۰/۱	کیلومتر بر ساعت <sup>۲</sup>
متر بر ثانیه $> 20$	۸۰ - ۵۹۱۰	۱	فوت بر دقیقه <sup>۳</sup>
۴ درصد	۰/۹ - ۶۷	۰/۱	مایل بر ساعت <sup>۴</sup>
	۰/۸ - ۵۸/۳	۰/۱	گره دریایی <sup>۵</sup>

<sup>1</sup> m/s

<sup>2</sup> Km/h

<sup>3</sup> fpm

<sup>4</sup> mpf

<sup>5</sup> knot

### ۳. اندازه‌گیری فشار

واحدهای اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری، میزان خطا و بازه اندازه‌گیری هریک از واحدهای فشار توسط دستگاه ABH-4225 در جدول (۳-۳) بیان شده است.

جدول (۳-۳) واحدهای اندازه‌گیری فشار توسط دستگاه ABH-4225

خطا	بازه اندازه‌گیری	دقت	واحد اندازه‌گیری
± ۱/۵ هکتو پاسکال	۱۰ - ۹/۹۹۹	۰/۱	هکتو پاسکال <sup>۱</sup>
± ۲ هکتو پاسکال	۱۰۰۰ - ۱۱۰۰	۱	
± ۱/۲ میلی‌متر جیوه	۷/۵ - ۸۲۵	۰/۱	میلی‌متر جیوه <sup>۲</sup>
± ۱/۲ اینچ جیوه	۰/۲۹ - ۳۲/۴۸	۰/۰۱	اینچ جیوه <sup>۳</sup>

۴. اندازه‌گیری رطوبت هوا تا ۸۰٪

۵. دمای عملیاتی ۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد

۶. واحدهای اندازه‌گیری دما: C, F

۷. نمایشگر پارامترها را به‌صورت دوتایی و در شش حالت زیر نمایش می‌دهد:

- رطوبت/ دما
- رطوبت/ نقطه شبنم
- سرعت/ دما
- فشار/ دما

<sup>1</sup> hpa  
<sup>2</sup> mmHg  
<sup>3</sup> inHg

- فشار/رطوبت

- فشار/سرعت

۸. ثبت مقادیر ماکزیمم و مینیمم برای بازخوانی داده‌ها

شکل (۲-۳) تصویری از این دستگاه را نشان می‌دهد.

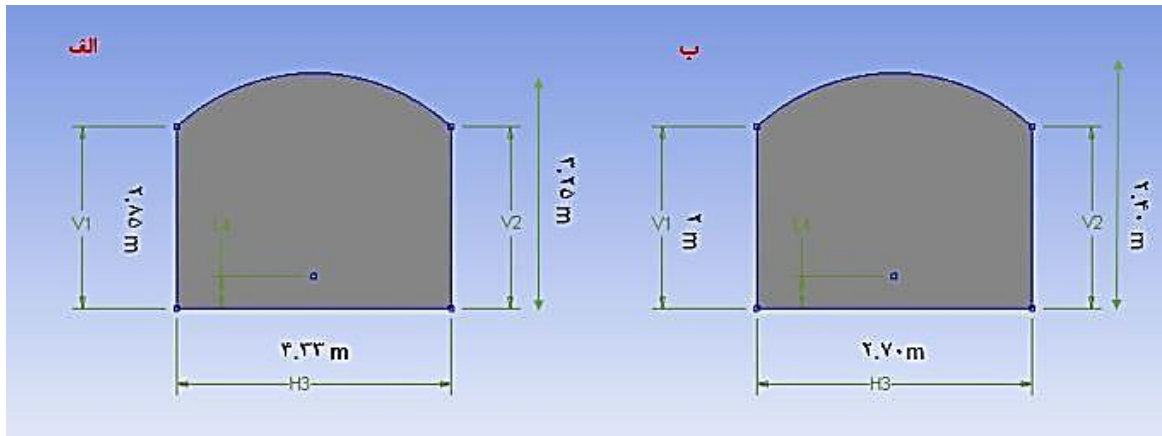


شکل (۲-۳) دستگاه ABH-4225 وسیله اندازه‌گیری سرعت و فشار هوا

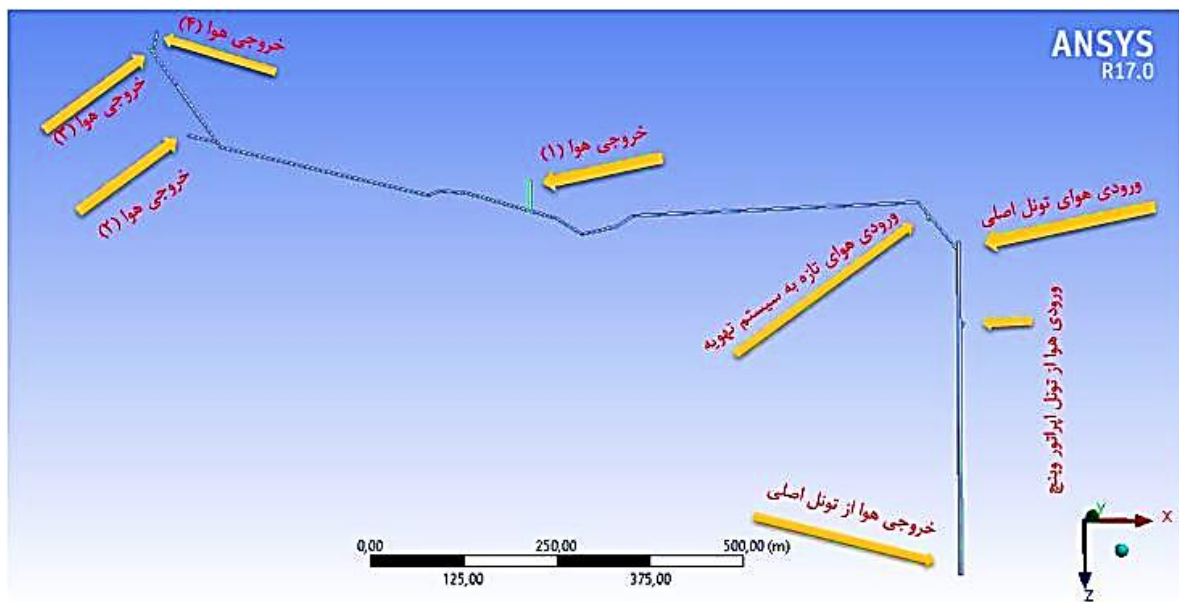
### ۲-۳- مدل‌سازی CFD مسیر جریان هوا تا کارگاه استخراج

اولین قدم برای تهیه یک مدل CFD طراحی هندسه آن است. این بخش شامل ۱۸۱۰ متر تونل با دو سطح مقطع متفاوت که شامل ۳ ورودی و ۵ خروجی جریان هوا به مدل است که در شکل (۳-۳) و شکل (۴-۳) نشان داده شده است. همچنین یک افزایش ناگهانی سطح مقطع بین خروجی هوای (۲) و خروجی هوای (۳) به طول ۵۷ متر وجود دارد که در نظر گرفته شده است. برای ساخت هندسه یک مدل CFD باید بخش‌های اساسی که بر جریان سیال تأثیرگذار هستند در نظر گرفته شود و همچنین ساده‌سازی موردنیاز صورت گیرد (Ren et al., 2014). در همین راستا با توجه به نسبت کوچک سطح مقطع لوله‌های هوای فشرده

به سطح مقطع تونل‌ها و عدم تأثیرگذاری مؤثر آن‌ها بر جریان هوا، لوله‌های هوای فشرده در هندسه مدل CFD مسیر جریان هوا در نظر گرفته نشدند.



شکل (۳-۳) ابعاد سطح مقطع بخش مدل‌سازی شده از تونل اصلی (الف) و تونل‌های عمود بر لایه (ب)



شکل (۴-۳) محدوده‌ی مدل‌سازی شده با نمای دید از بالا

در شکل (۳-۴) مرزهای هندسه طراحی شده برای مدل CFD مشخص شده‌اند که با نام‌های زیر در نرم‌افزار Ansys Fluent به کار رفته‌اند.

- خروجی هوا از تونل اصلی (Main\_tunnel\_outlet)
- ورودی هوا از تونل اپراتور وینچ (Winch\_tunnel\_inlet)
- ورودی هوا به تونل اصلی (Main\_tunnel\_inlet)
- ورودی هوای تازه به سیستم تهویه (Main\_inlet)
- خروجی هوای (۱) (outlet\_1)
- خروجی هوای (۲) (outlet\_2)
- خروجی هوای (۳) (outlet\_3)
- خروجی هوای (۴) (outlet-4)
- مابقی مرزها به‌عنوان دیوار (wall)

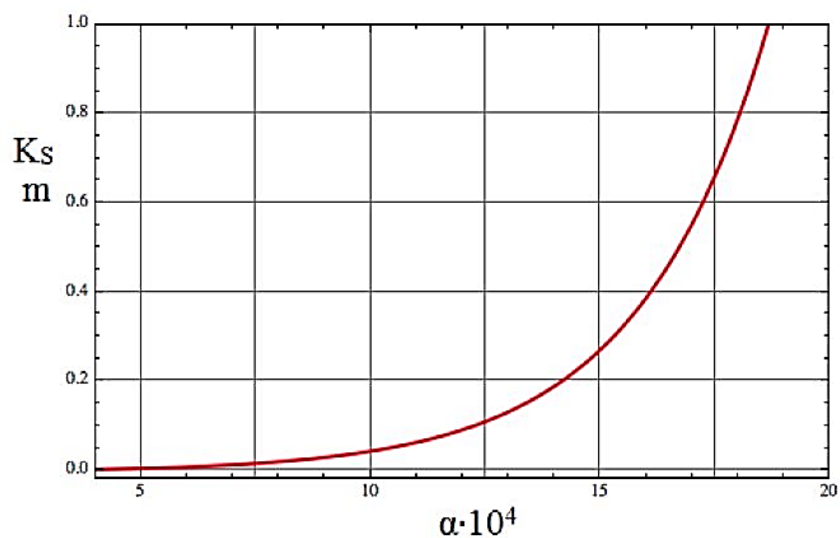
در طول مسیر، در ۳۰ متری سمت راست ورودی هوای تازه به سیستم تهویه، یک در تهویه وجود دارد که خراب است و همچنین در انتهای هر خروجی، یک کارگاه استخراج وجود دارد که غیر از کارگاه استخراج منتهی به خروجی (۲) همگی غیرفعال هستند. بخش مدل‌سازی شده در افق اول معدن قرار دارد هوای کثیف از انتهای هر کارگاه به جو وارد می‌شود. در ادامه مدل‌سازی CFD سیستم تهویه با شبکه‌بندی هندسه طراحی شده و بررسی کیفیت شبکه‌بندی به وسیله معیارهای کیفیت تعامد و کشیدگی، ورودی موردنیاز حلگر Ansys Fluent ایجاد می‌شود. جزییات مرتبط با شبکه‌بندی و تنظیمات حلگر با توجه به توضیحات عنوان شده در فصل دوم جدول (۳-۴) انتخاب شده است.

جدول (۳-۴) تنظیمات شبکه‌بندی و حلگر Ansys Fluent برای مدل CFD مسیر جریان هوا

اتوماتیک	روش مش بندی
۰/۹۶	میانگین معیار کیفیت تعامد
۰/۱۳	میانگین معیار کشیدگی
Standard k-ε	مدل آشفتگی
Velocity inlet	شرط مرزی ورودی جریان
Pressure outlet	شرط مرزی خروجی جریان
Pressure based	نوع حلگر

افت انرژی در هوای معدن به صورت افت فشار مشاهده می‌شود. افت انرژی را می‌توان مرکب از سه مؤلفه کلی افت فشار اصطکاکی، افت فشار ناشی از وجود مانع در مسیر جریان هوا و افت فشار موضعی یا محلی دانست. در حالت کلی افت فشار هوا در داخل کار معدنی متناسب با زبری سطوح کار معدنی، مشخصات هوا، سرعت جریان، طول مسیر، محیط و سطح مقطع کار معدنی است (مدنی، ۱۳۸۷). در مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار Ansys Fluent برای احتساب زبری سطح از پارامتر  $K_s$  (ارتفاع زبری<sup>۱</sup>) استفاده می‌شود و در صورت عدم وجود تغییر مسیرهایی با زوایای زیاد عمده افت فشار معدن ناشی از افت فشار اصطکاکی است به کمک ضریب اصطکاک کار معدنی ( $\alpha$ ) و نمودار شکل (۳-۵) می‌توان این پارامتر را تخمین زد (Levin et al., 2014).

<sup>۱</sup> Roughness height



شکل (۳-۵) تخمین پارامتر  $K_s$  به کمک ضریب اصطکاک کار معدنی ( $\alpha$ ) (Levin et al., 2014).

برای محاسبه ضریب اصطکاک کار معدنی از رابطه زیر استفاده شد

$$\Delta P = RQ^2 \quad (۱-۳)$$

$$R = \alpha \frac{LP}{S^3} \quad (۲-۳)$$

$\Delta P$  = افت فشار                       $R$  = مقاومت اصطکاکی کار معدنی                       $P$  = محیط کار معدنی

$Q$  = شدت جریان هوا                       $S$  = مساحت سطح مقطع کار معدنی                       $L$  = طول مسیر

$\alpha$  = ضریب اصطکاک کار معدنی

به کمک دستگاه ABH-422 در یک فاصله ۳۰۰ متری بین وردی هوای تازه و خروجی (۱) افت فشار

هوا اندازه‌گیری شد. به کمک اطلاعات زیر ضریب اصطکاک کار معدنی تعیین شد.



$$P = 9/6 \text{ متر}$$

$$R = 0/195$$

$$\Delta P = 30 \text{ پاسکال}$$

$$L = 300 \text{ متر}$$

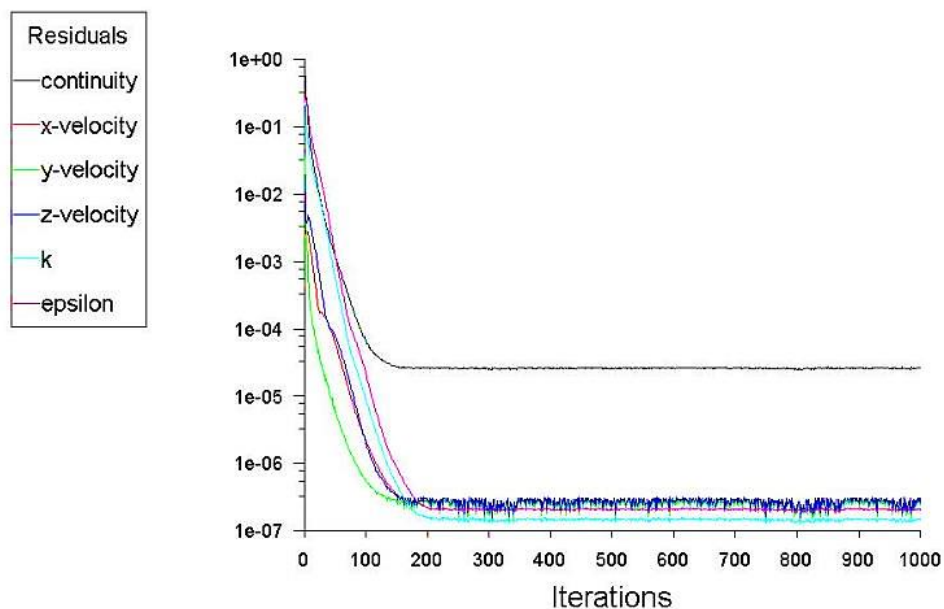
$$S = 6/26 \text{ مترمربع}$$

$$Q = 12/4 \text{ مترمکعب}$$

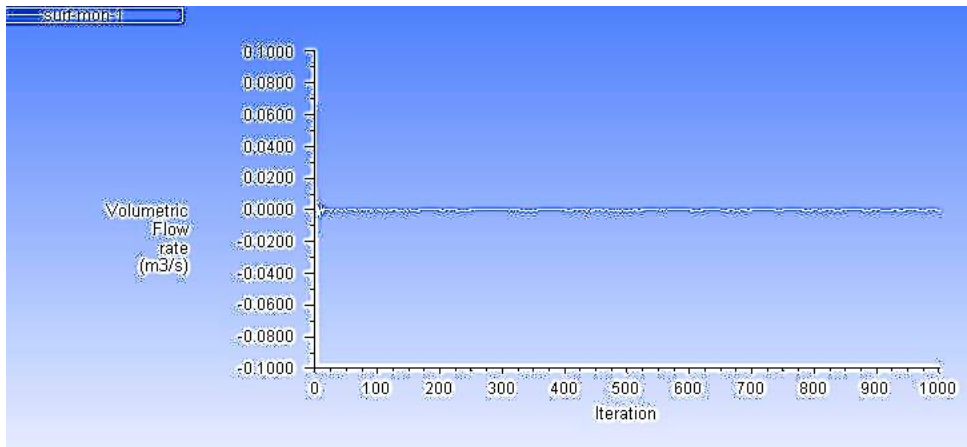
$$0/0166 = \alpha$$

با توجه به شکل (۳-۵) ضریب اصطکاک‌های بالای  $0/0019$  حداکثر مقدار پارامتر  $K_s$  را به خود اختصاص می‌دهند. در نتیجه به پارامتر  $K_s$  مقدار ۱ اختصاص داده شد.

شکل (۳-۶) نشان می‌دهد که بعد از ۲۵۰ تکرار حل همگرا شده است. همگرایی حل به این معنی است که پس از تکرار ۲۵۰ ام با ادامه حل، اختلاف باقیمانده‌ها تغییری نکرده است و شکل (۳-۷) نیز بیان کننده این موضوع است که شدت جریان در طی فرایند حل به تعادل رسیده است و تایید دیگری بر همگرا شدن حل مسئله است. همگرا شدن حل بیان می‌کند که مساله حل شده است و خروجی‌های مدل پس از اعتبارسنجی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نهایتاً پس از همگرایی حل مستقل از شبکه بودن جواب نهایی بررسی شد.



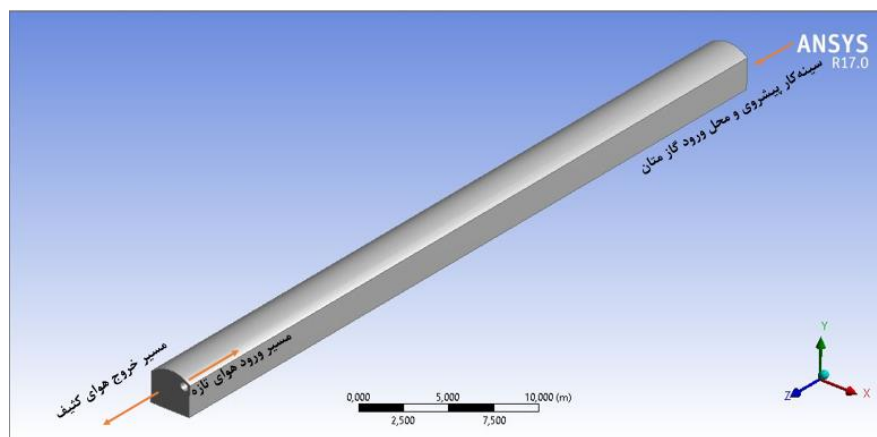
شکل (۳-۶) نمودار مقادیر باقیمانده‌های مدل CFD مسیر جریان هوا



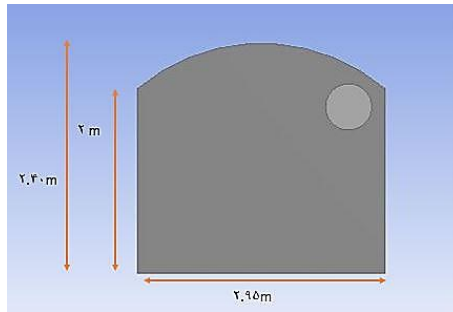
شکل (۷-۳) تغییرات شدت جریان طی فرایند حل

### ۳-۳- مدل سازی CFD تهویه کمکی

هندسۀ این مدل شامل ۵۰ متر تونل عمود بر لایه است که به وسیله یک دمنده هوا که با هوای فشرده کار می کند و لوله های پارچه ای برزنتی با مقطع دایره ای شکل و قطر ۰/۵ متر که تا ۱۰ متری سینه کار ادامه دارد تهویه می شود و حجم هوای وارد شده به سینه کار ۱/۵ مترمکعب بر ثانیه است. طبق اطلاعات ثبت شده در بخش ایمنی معدن گاز متان متصاعد شده از سینه کار به میزان ۰/۷۶ مترمکعب بر دقیقه است. مرزهای تعریف شده برای مدل مطابق شکل (۸-۳) و ابعاد سطح مقطع تونل مطابق شکل (۹-۳) است.



شکل (۸-۳) هندسه مدل CFD تهویه کمکی



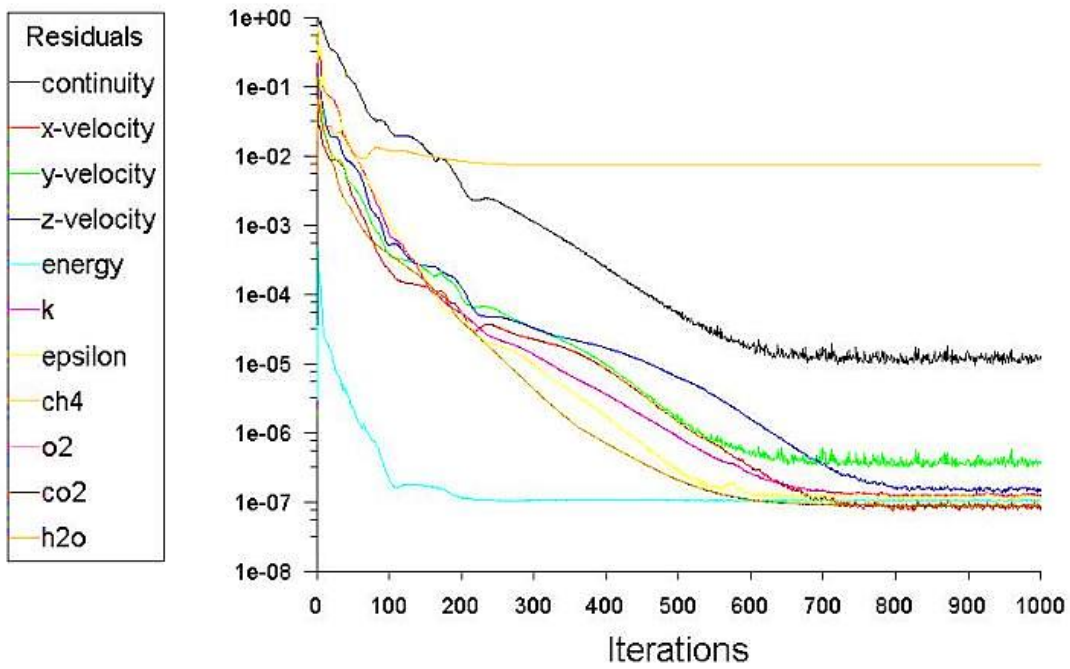
شکل (۳-۹) سطح مقطع مدل CFD تهویه کمکی

تنظیمات مرتبط با شبکه‌بندی و حلگر Ansys Fluent مطابق جدول (۳-۵) است.

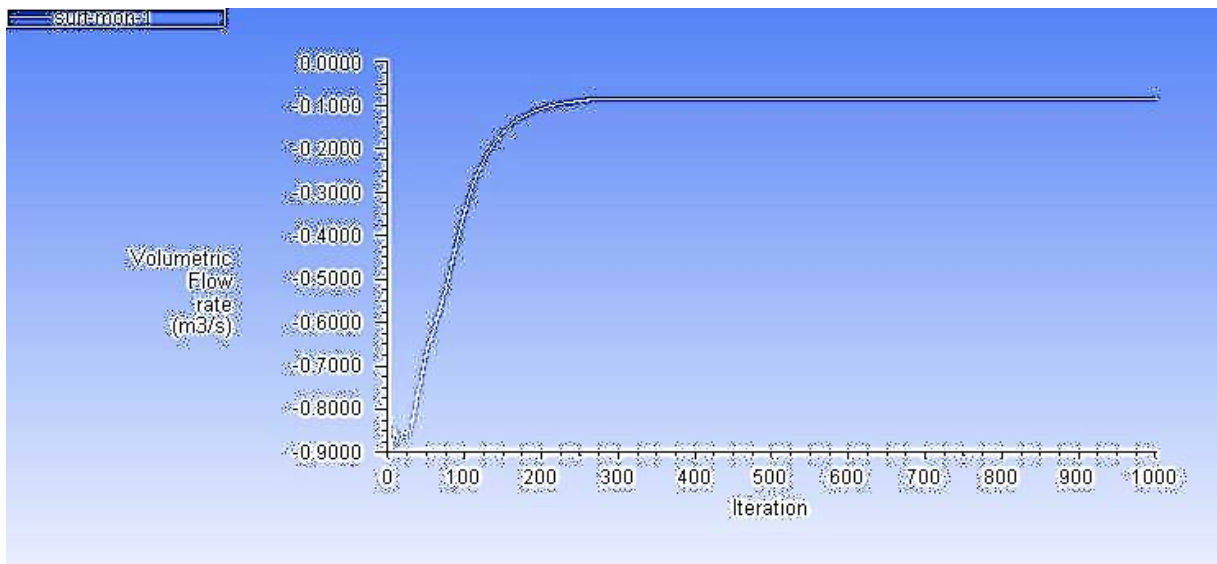
جدول (۳-۵) تنظیمات شبکه‌بندی و حلگر Ansys Fluent برای مدل CFD تهویه کمکی

اتوماتیک	روش مش بندی
۰/۸۶	میانگین معیار کیفیت تعامد
۰/۲۲	میانگین معیار کشیدگی
Standard k-ε	مدل آشفتگی
Species Transport	
Velocity inlet	شرط مرزی ورودی‌های جریان
Pressure outlet	شرط مرزی خروجی جریان
Pressure based	نوع حلگر

شکل (۳-۱۰) نشان می‌دهد که بعد ۲۵۰ تکرار حل همگرا شده است. همگرایی حل به این معنی است که پس از تکرار ۲۵۰ ام با ادامه حل، اختلاف باقیمانده‌ها تغییری نکرده است و شکل (۳-۱۱) نیز بیان کننده این موضوع است که شدت جریان در طی فرایند حل به تعادل رسیده است و تایید دیگری بر همگرا شدن حل مسئله است. همگرا شدن حل در واقع بیان می‌کند که مساله تعریف شده حل شده است و خروجی‌های مدل پس از اعتبارسنجی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نهایتاً پس از همگرایی حل مستقل از شبکه بودن جواب نهایی بررسی شد. نهایتاً پس از همگرایی مستقل از شبکه بودن جواب نهایی بررسی شد.



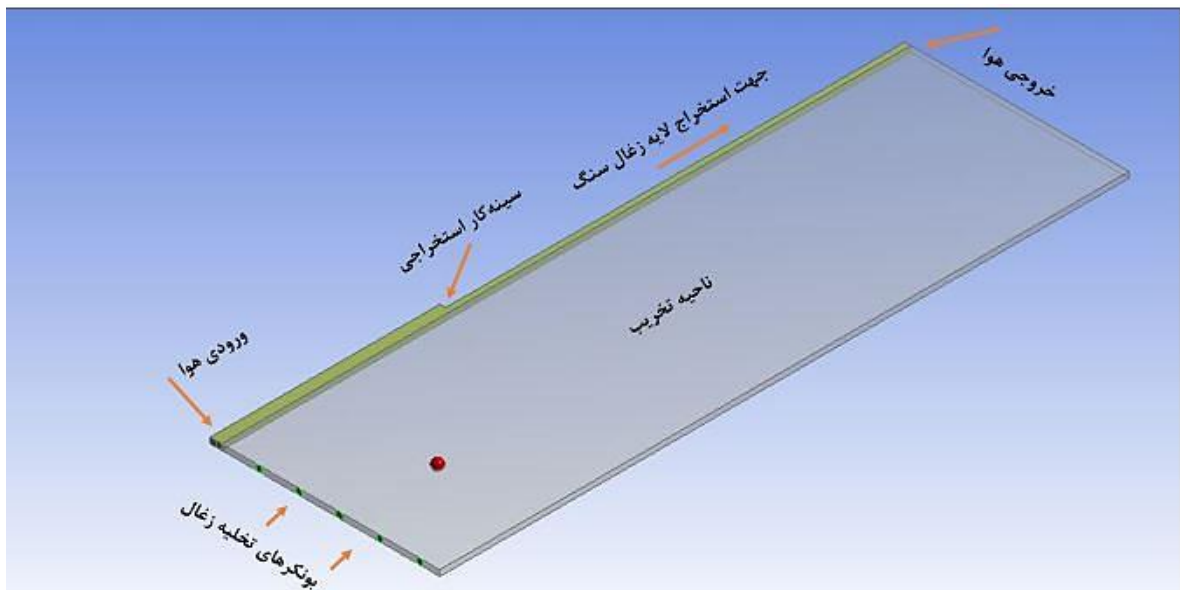
شکل (۱۰-۳) نمودار مقادیر باقیمانده‌های مدل CFD تهویه کمکی



شکل (۱۱-۳) تغییرات شدت جریان طی فرایند حل

### ۳-۴- مدل سازی CFD کارگاه استخراج

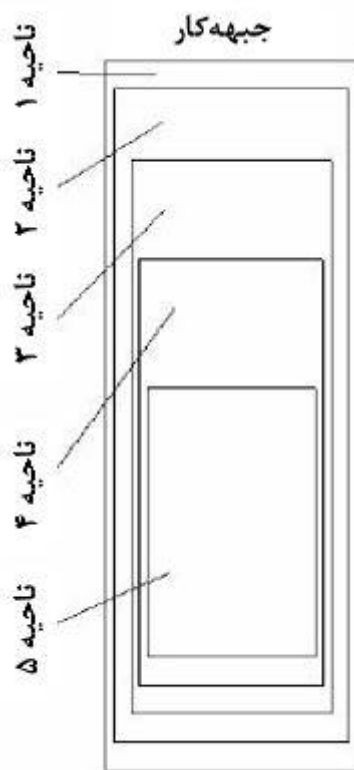
هندسه این مدل مکعب مستطیلی به طول ۱۲۰ متر، ارتفاع ۱ متر، عرض ۵۰ متر و شیب ۴۰ درجه است. روش استخراج جبهه کار بلند و طول کارگاه استخراج ۱۲۰ متر است. پیشروی در طول جبهه کار (عرض بلوک استخراجی) با حداکثر گام ۱ متر صورت می گیرد و نگهداری گام آخر جهت تهویه هوا حفظ می شود. هوای تازه از طریق دوپل نفرو وارد می شود. در عرض بلوک استخراجی بونکرهای تخلیه زغال به فاصله ۶ متر از هم قرار دارند که فقط بونکر انتهایی به طور کامل باز است و بونکرهای قبلی در اثر تخریب سقف مسدود شده اند اما نشت هوا از این قسمت ها به ناحیه تخریب صورت می گیرد. شکل (۳-۱۲) نمای سه بعدی از بلوک استخراجی به همراه کارگاه استخراج که با رنگ سبز در شکل مشخص است را نشان می دهد.



شکل (۳-۱۲) نمای سه بعدی از بلوک استخراجی به همراه کارگاه استخراج

برای مدل سازی ناحیه تخریب نیاز است که نفوذپذیری ناحیه تخریب مشخص باشد. مطالعات انجام شده نشان داده است که با توجه به عدم یکنواختی تنش وارده بر کارگاه استخراج نفوذپذیری نیز در نواحی

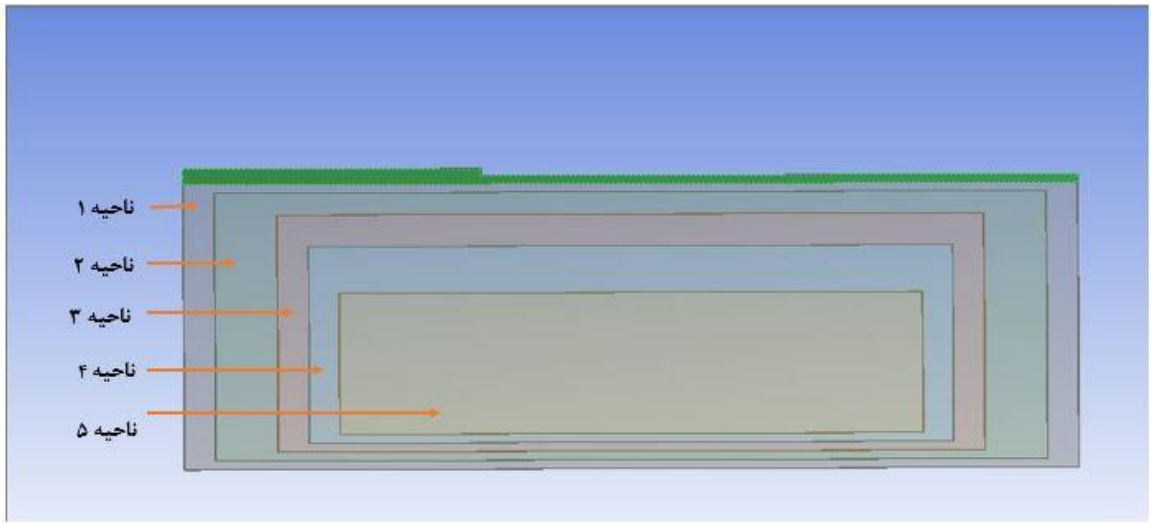
مختلف متفاوت است. استرهویزن و همکارانش<sup>۱</sup> (۲۰۰۷) با مدل سازی ناحیه تخریب به این نتیجه رسیدند که از نقطه نظر نفوذپذیری، ناحیه تخریب به چند ناحیه متفاوت تقسیم می شود. لیمینگ یان و همکارانش<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) نیز با پژوهشی مشابه ناحیه تخریب را به ۵ ناحیه مختلف با نفوذپذیری متفاوت تقسیم کردند. در این مطالعه از نتایج و مقادیر نفوذپذیری مطالعه لیمینگ و همکاران استفاده شده است. مقادیر نفوذپذیری ناحیه های ۱ تا ۵ به ترتیب برابر  $۱ \times ۱۰^۶$  میلی داری،  $۲ \times ۱۰^۵$  میلی داری،  $۷ \times ۱۰^۴$  میلی داری،  $۱ \times ۱۰^۴$  میلی داری و  $۵ \times ۱۰^۳$  میلی داری است. شکل (۳-۱۳) نتایج نهایی مطالعه لیمینگ یان و همکارانش را نشان می دهد.



شکل (۳-۱۳) تقسیم بندی ناحیه تخریب براساس نفوذپذیری (Liming Yuan, 2006)

<sup>1</sup> Esterhuizen et al.

<sup>2</sup> Liming Yuan



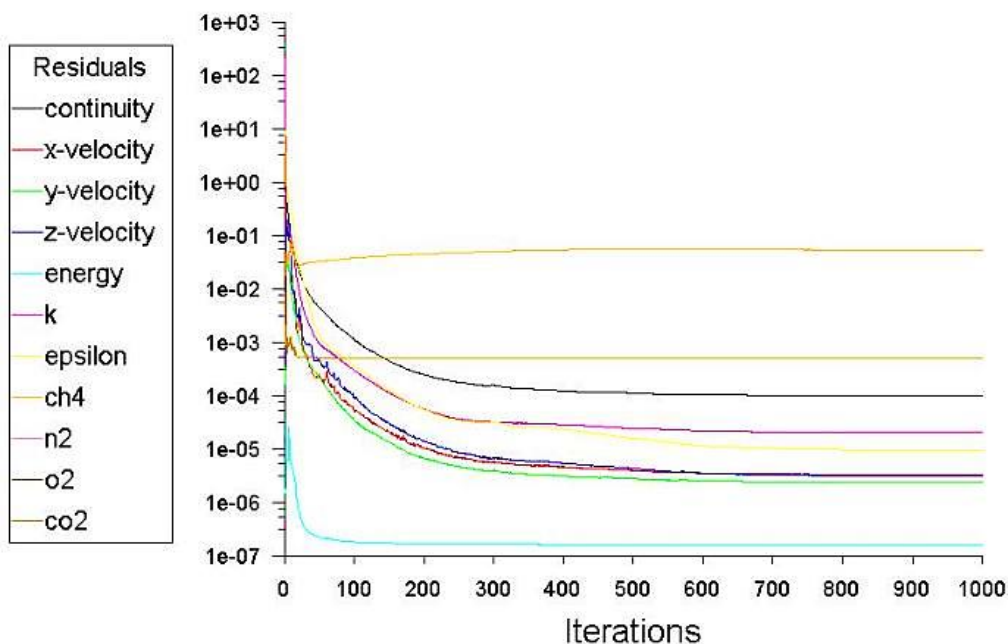
شکل (۳-۱۴) مدل سازی ناحیه تخریب به کمک داده های مطالعه لیمینگ یان و همکارانش شبکه بندی هندسه ایجاد شده به همراه تنظیمات حلگر Ansys Fluent در جدول (۳-۶) آمده است.

جدول (۳-۶) تنظیمات شبکه بندی و حلگر Ansys Fluent برای مدل CFD بلوک استخراجی

اتوماتیک	روش مش بندی
۰,۸۶	میانگین معیار کیفیت تعامد
۰,۲۲	میانگین معیار کشیدگی
Standard k-ε	مدل آشفتگی
Species Transport	
Velocity inlet	شرط مرزی ورودی های جریان
Pressure outlet	شرط مرزی خروجی جریان
Pressure based	نوع حلگر

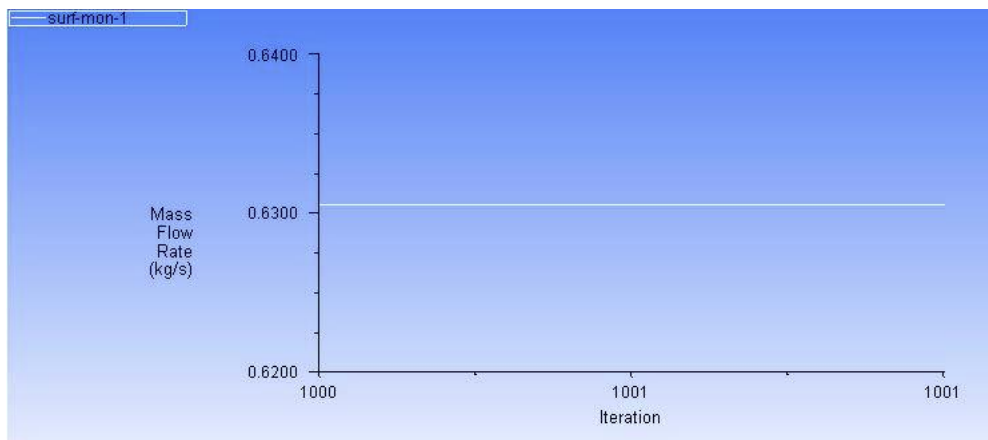
پس از اتمام تکرارها نمودار مقادیر باقیمانده‌ها و پیوستگی شدت جریان در شکل (۳-۱۶) و شکل (۳-۱۷) همگرا شدن حل را نشان می‌دهند.

شکل (۳-۱۵) نشان می‌دهد که بعد ۲۵۰ تکرار حل همگرا شده است. همگرایی حل به این معنی است که پس از تکرار ۲۵۰ ام با ادامه حل، اختلاف باقیمانده‌ها تغییری نکرده است و شکل (۳-۱۶) نیز بیان کننده این موضوع است که شدت جریان در طی فرایند حل به تعادل رسیده است و تایید دیگری بر همگرا شدن حل مسئله است. همگرا شدن حل در واقع بیان می‌کند که مساله تعریف شده حل شده است و خروجی‌های مدل پس از اعتبارسنجی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. نهایتاً پس از همگرایی حل مستقل از شبکه بودن جواب نهایی بررسی شد.



شکل (۳-۱۵) نمودار مقادیر باقیمانده‌های مدل CFD کارگاه استخراج





شکل (۳-۱۶) تغییرات شدت جریان طی فرایند حل

### ۳-۵- اعتبارسنجی

هر مدل عددی تهیه شده پیش از بکارگیری باید اعتبارسنجی شود تا نتایج بدست آمده از آن قابل اعتماد باشد. در این مطالعه برای اعتبارسنجی مدل‌های CFD تهیه شده، سرعت هوا در فواصل مختلف اندازه‌گیری شد و با خروجی مدل‌ها مقایسه شد. نحوه اعتبارسنجی هریک از مدل‌ها به شرح زیر است:

۱. مدل CFD مسیر جریان هوا تا کارگاه استخراج: برای اعتبارسنجی خروجی‌های این مدل سرعت هوا در فواصل ۱۰۰ متری اندازه‌گیری شد که این مقادیر در جدول (۳-۷) نشان داده شده است. با توجه به این موضوع که دستگاه اندازه‌گیری کننده مقادیر سرعت با دقت ۰/۱ مقادیر سرعت را اندازه‌گیری می‌کند، میزان خطای ۱۰۰ درصد در خروجی تونل ۱۷ به این دلیل است که سرعت هوا در این ناحیه از حد تشخیص دستگاه اندازه‌گیری کننده پایین‌تر است (کمتر از ۰/۱ متر بر ثانیه) و مقدار صفر را به سرعت هوا اختصاص داده است در صورتی که مدل مقادیر پایین‌تر از حد تشخیص دستگاه را هم نمایش می‌دهد.

جدول (۳-۷) اعتبارسنجی مدل CFD مسیر جریان هوا

خطا (درصد)	توضیحات	مقادیر سرعت خروجی مدل (متر بر ثانیه)	مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در محل
۴	ابتدای تونل شماره ۲ (ورودی تونل مادر)	۲/۵	۲/۴
۴	به فاصله ۱۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۲	۲/۵	۲/۴
۴	به فاصله ۲۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۲	۲/۵	۲/۴
۴	به فاصله ۳۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۲	۲/۵	۲/۳
۰	به فاصله ۴۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۲	۲/۳	۲/۳
۰	به فاصله ۴۵۰ متر از ابتدای تونل شماره ۲	۱/۵	۱/۵
۰	خروجی کانال تهویه	۳	۳
۵	فاصله ۴۳ متری از سمت راست کانال تهویه	۱/۹	۲
۲	به فاصله ۱۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۵	۱/۸۷	۱/۹
۲	به فاصله ۲۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۵	۱/۸۷	۱/۹
۲	به فاصله ۳۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۵	۱/۸۷	۱/۹
۲	به فاصله ۴۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۵	۱/۸۷	۱/۹
۲	به فاصله ۵۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۵	۱/۸۷	۱/۹
۸	خروجی تونل ۱۰	۱/۳	۱/۲

ادامه جدول (۷-۳) اعتبارسنجی مدل CFD مسیر جریان هوا

خطا (درصد)	توضیحات	مقادیر سرعت خروجی مدل (متر بر ثانیه)	مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در محل
۶	به فاصله ۱۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۱۰	۰/۵۳	۰/۵
۶	به فاصله ۲۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۱۰	۰/۵۳	۰/۵
۶	به فاصله ۳۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۱۰	۰/۵۳	۰/۵
۶	به فاصله ۴۰۰ متر از ابتدای تونل شماره ۱۰	۰/۵۳	۰/۵
۱۷	بخش میانی تونل ۱۵	۰/۱۲	۰/۱
۲۸	خروجی تونل ۱۵	۰/۱۴	۰/۱
۳	خروجی تونل ۱۶	۰/۳۱	۰/۳
۱۰۰	خروجی تونل ۱۷	۰/۰۷	۰

۲. مدل CFD تهویه کمکی: با توجه به طول ۵۰ متری تونل عمود بر لایه مدل‌سازی شده جهت بررسی تهویه کمکی مقادیر برای سرعت هوا در این بخش در فواصل ۱۰ متری از سینه کار اندازه‌گیری شدند. مقادیر اندازه‌گیری شده و خروجی‌های مدل و میزان خطا در جدول (۸-۳) ارائه شده است.

جدول (۸-۳) اعتبارسنجی مدل CFD تهویه کمکی

خطا (درصد)	توضیحات	مقادیر سرعت خروجی مدل (متر بر ثانیه)	مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در محل
۱۰	فاصله ۱۰ متری از جبهه کار	۱	۱/۱
۱۳	فاصله ۲۰ متری از جبهه کار	۰/۳۵	۰/۴
۱۳	فاصله ۳۰ متری از جبهه کار	۰/۳۵	۰/۴
۱۳	فاصله ۴۰ متری از جبهه کار	۰/۳۵	۰/۴
۱۴	فاصله ۵۰ متری از جبهه کار	۰/۳۵	۰/۳

۳. مدل CFD کارگاه استخراج: سرعت هوا در این بخش در فواصل ۱۰ متری در طول کارگاه استخراج اندازه‌گیری شدند. مقادیر اندازه‌گیری شده و خروجی‌های مدل در جدول (۳-۹) نشان داده شده است.

جدول (۹-۳) اعتبارسنجی مدل CFD کارگاه استخراج

خطا (درصد)	توضیحات	مقادیر سرعت خروجی مدل (متر بر ثانیه)	مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در محل
۱۰	فاصله ۱۰ متری از ورودی کارگاه استخراج	۱	۱/۱
۱۴	فاصله ۲۰ متری از ورودی کارگاه استخراج	۰/۹۳	۰/۸
۱۴	فاصله ۳۰ متری از ورودی کارگاه استخراج	۰/۹۳	۰/۸
۱۵	خروجی انتهای کارگاه استخراج	۱/۷	۲

با توجه به اختلاف پایین مقادیر اندازه‌گیری شده در محیط معدن و خروجی‌های مدل‌های CFD تهیه

شده اعتبار مدل‌های تهیه شده تایید می‌شود.

### ۳-۶- جمع‌بندی

در این فصل مدل‌های موردنیاز جهت بررسی سیستم تهویه بررسی و تهیه شد. روند حل یک مسئله CFD

به ترتیب برای هر یک از مدل‌ها طی شده و مدل‌ها اعتبار سنجی شدند. و در بخش‌های بعدی به کمک

مدل‌های تهیه‌شده وضعیت حاکم بر سیستم تهویه موردبررسی قرار می‌گیرد.

فصل چهارم :

بررسی سیستم تهویه

#### ۴-۱- مقدمه

اگرچه در مرحله طراحی شبکه تهویه سعی بر آن است که در تمام نقاط معدن هوای کافی جریان داشته باشد اما به هر حال نتایج واقعی با آنچه که در مرحله طراحی پیش‌بینی شده تا حدودی متفاوت است و به همین خاطر پس از اجرای برنامه طراحی شده باید وضعیت تهویه معدن را بررسی و کنترل کرد و در موارد لزوم اشکالات را برطرف کرد. مقصود از بررسی سیستم تهویه معدن آگاهی از نحوه توزیع شدت جریان در شاخه‌ها، وضعیت فشار هوا در نقاط مختلف و نیز آگاهی از کیفیت هوا در نقاط اصلی شبکه است. این خواسته با اندازه‌گیری مشخصات کمی و کیفی هوا در نقاط مختلف و تعبیر و تفسیر نتایج حاصل می‌شود. جزییات اندازه‌گیری‌ها و دقت موردنظر به هدف بررسی بستگی دارد. در بسیاری از کشورها محل اندازه‌گیری و تناوب زمانی آن‌ها براساس قانون مشخص شده است. حتی اگر قانون و یا دستورالعمل‌های مشخصی در این باره وجود نداشته باشد برنامه بررسی سیستم تهویه باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که از جوانب زیر اطمینان به عمل آید (مدنی، ۱۳۸۲):

- در تمام نقاط کاری معدن هوای لازم چه از نظر مقدار و چه از نظر کیفیت جریان داشته باشد.
- سیستم تهویه معدن بروز باشد.
- علاوه بر محل‌های کار در سایر قسمت‌های شبکه معدن و از آن جمله راه‌های فرار هوای کافی به جریان افتد.

در این فصل به بررسی بخشی از سیستم تهویه معدن به کمک مدل‌های تهیه‌شده از محل ورود هوای تازه به سیستم تا خارج شدن آن از کارگاه استخراج و یک مورد تهویه کمکی پرداخته می‌شود.

## ۴-۲- بررسی وضعیت حاکم بر سیستم تهویه از محل ورود هوای تازه تا ابتدای

### ورودی هوای کارگاه استخراج

همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد این بخش از سیستم تهویه شامل مجموعه‌ای از تونل‌ها با سطح مقطع‌های مختلف است که هم تردد افراد و تجهیزات از آن صورت می‌گیرد و هم هوای تازه به نقاط مختلف انتقال داده می‌شود. بخش مورد مطالعه شامل ۳ ورودی جریان هوا و ۴ خروجی است که اسامی و محل مربوط به آن‌ها در شکل (۴-۱) مشخص شده است. شدت جریان هوا در هر یک از مقاطع به صورت زیر است:

$$\text{Main\_Tunnel\_inlet} = 16.91 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Main\_Tunnel\_outlet} = 28.44 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Main\_inlet} = 18.62 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{winch\_tunnel\_inlet} = 2.08 \text{ m}^3/\text{s}$$

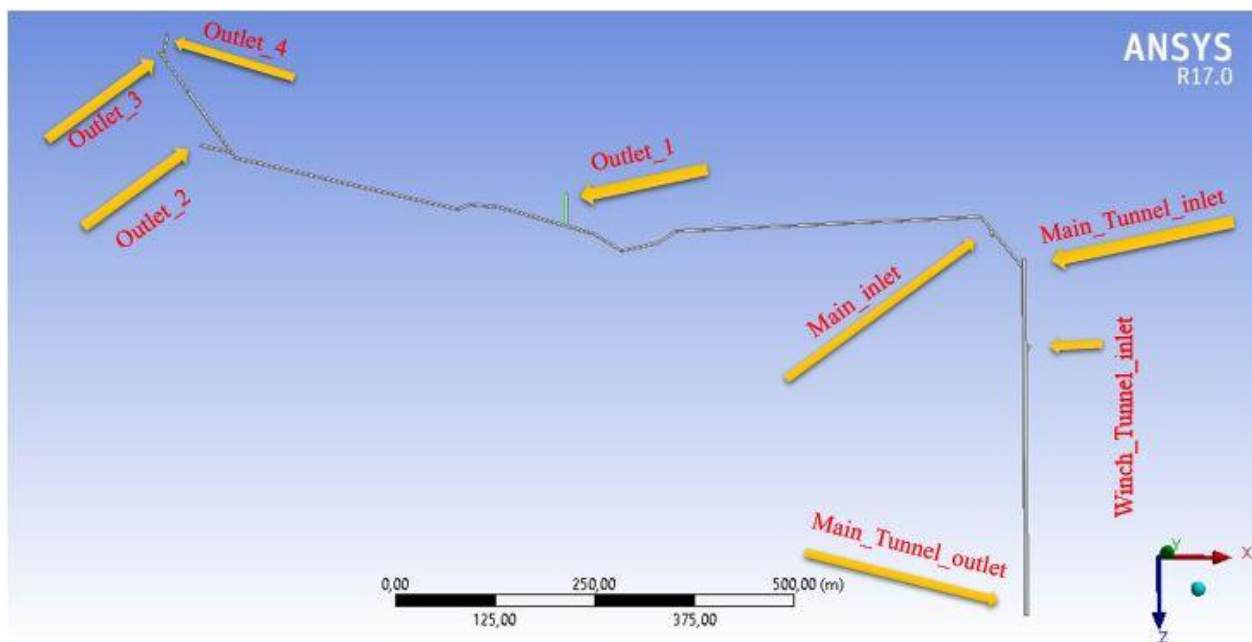
$$\text{Outlet}_1 = 6.57 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Outlet}_2 = 1.55 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Outlet}_3 = 0.70 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Outlet}_4 = 0.36 \text{ m}^3/\text{s}$$

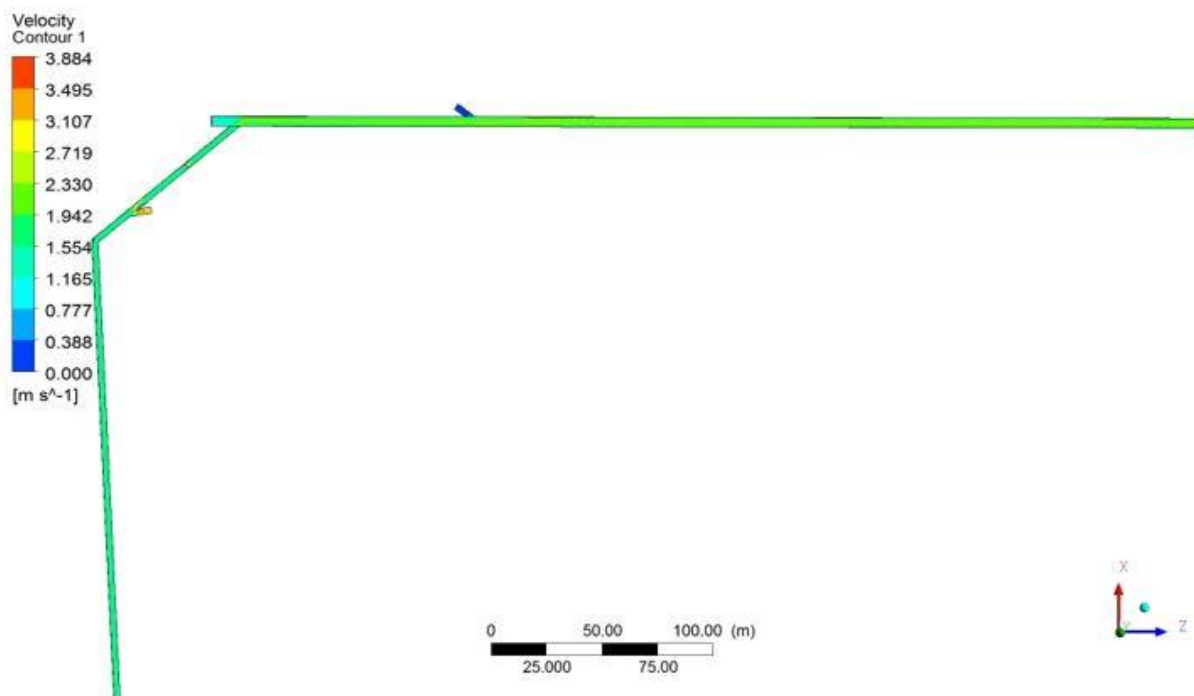




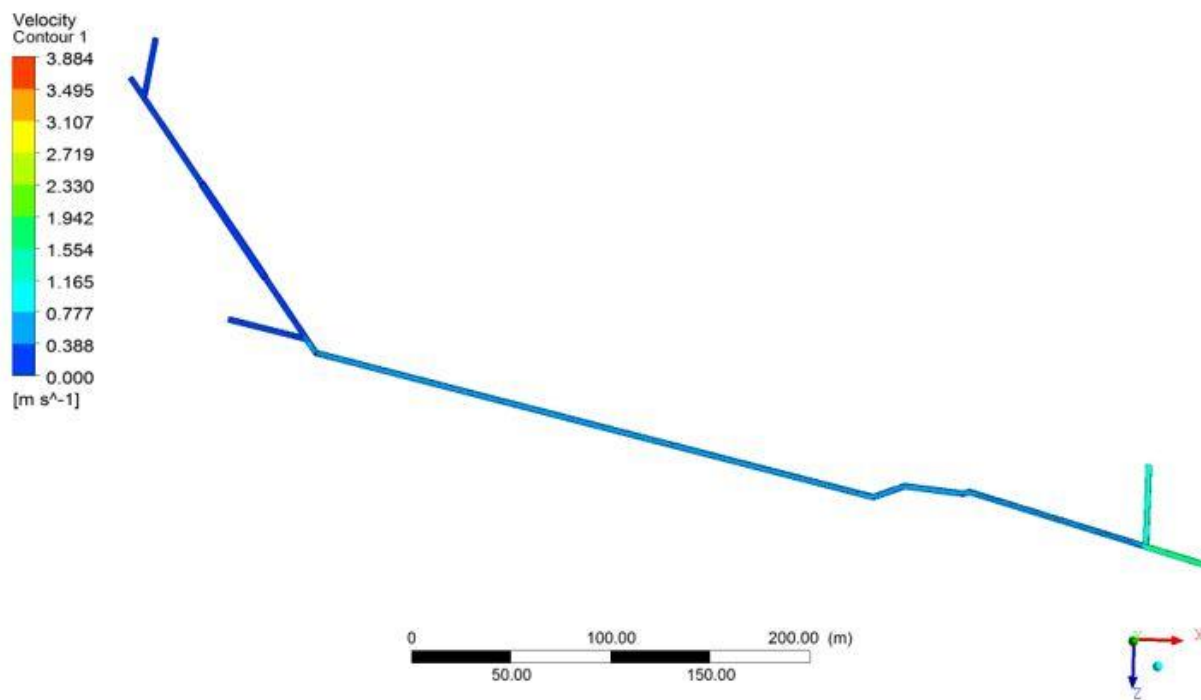
شکل (۱-۴) مرزهای ورودی و خروجی جریان هوا در مدل CFD

#### ۴-۲-۱- شناسایی نواحی مرده

در شکل (۲-۴) و شکل (۳-۴) سرعت هوا در قسمت‌های مختلف بخش مدل‌سازی شده با رنگ‌های مختلف مشخص شده است. همان‌طور در شکل (۲-۴) و شکل (۳-۴) دیده می‌شود سرعت هوا از محل ورود هوای تازه تا خروجی Outlet\_1 در بازه‌ی  $1/94$  تا  $2/33$  متر بر ثانیه، از ابتدای خروجی Outlet\_1 تا ابتدای خروجی Outlet\_2 در بازه‌ی  $0/38$  تا  $0/77$  متر بر ثانیه و مابقی مسیر سرعتی حداکثر تا  $0/38$  متر بر ثانیه را دارد.

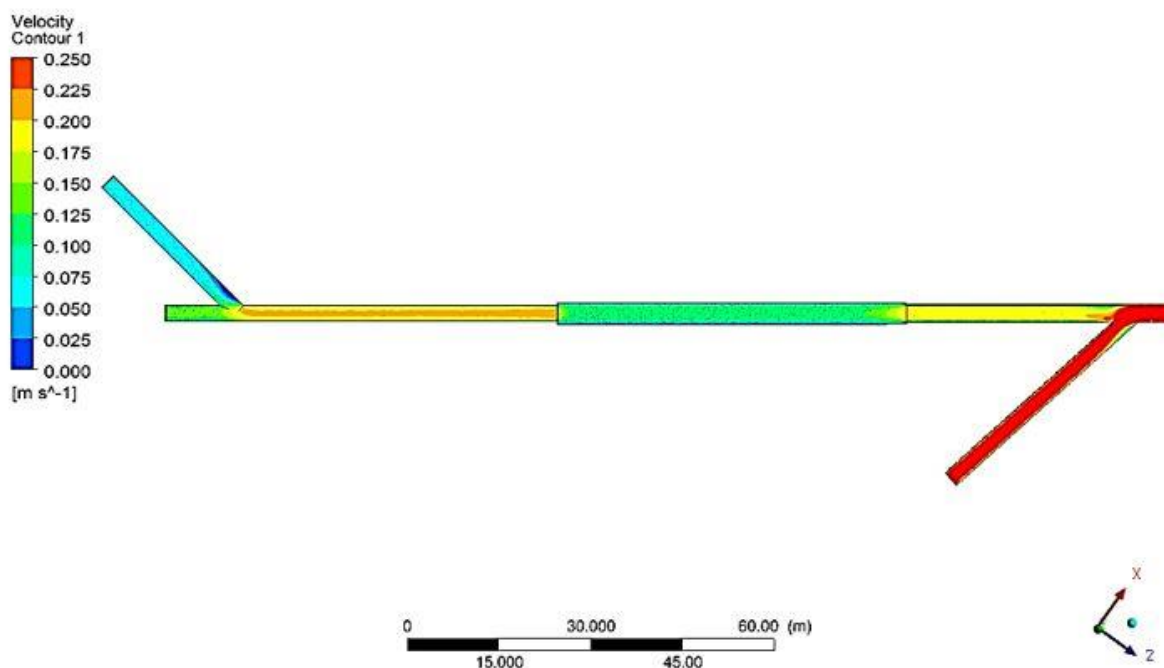


شکل (۲-۴) مقادیر سرعت هوا در بخش مدل سازی شده



شکل (۳-۴) مقادیر سرعت هوا در بخش مدل سازی شده

با توجه به مقادیر سرعت هوا، نواحی مرده درجایی بین خروجی‌های Outlet\_2، Outlet\_3 و Outlet\_4 قرار دارند. جهت بررسی دقیق این بخش مقادیر سرعت در بازه‌های کوچک‌تری بررسی شد. شکل (۴-۴) نشان می‌دهد که سرعت هوا در تونل منتهی به خروجی Outlet\_4 و بخشی میانی‌ای که افزایش سطح مقطع دارد در بهترین حالت نصف حداقل سرعت مجاز هوا را دارد. که برای افرادی که در این ناحیه حضور داشته باشند خطرناک است. قابل‌ذکر است که تنها کارگاه فعال در بخش مدل‌سازی شده در تونل منتهی به خروجی Outlet\_2 قرار دارد و در ادامه مسیر رفت و آمدی صورت نمی‌گیرد ولی پیشروی در این نواحی به صورت موقت تعطیل شده است.

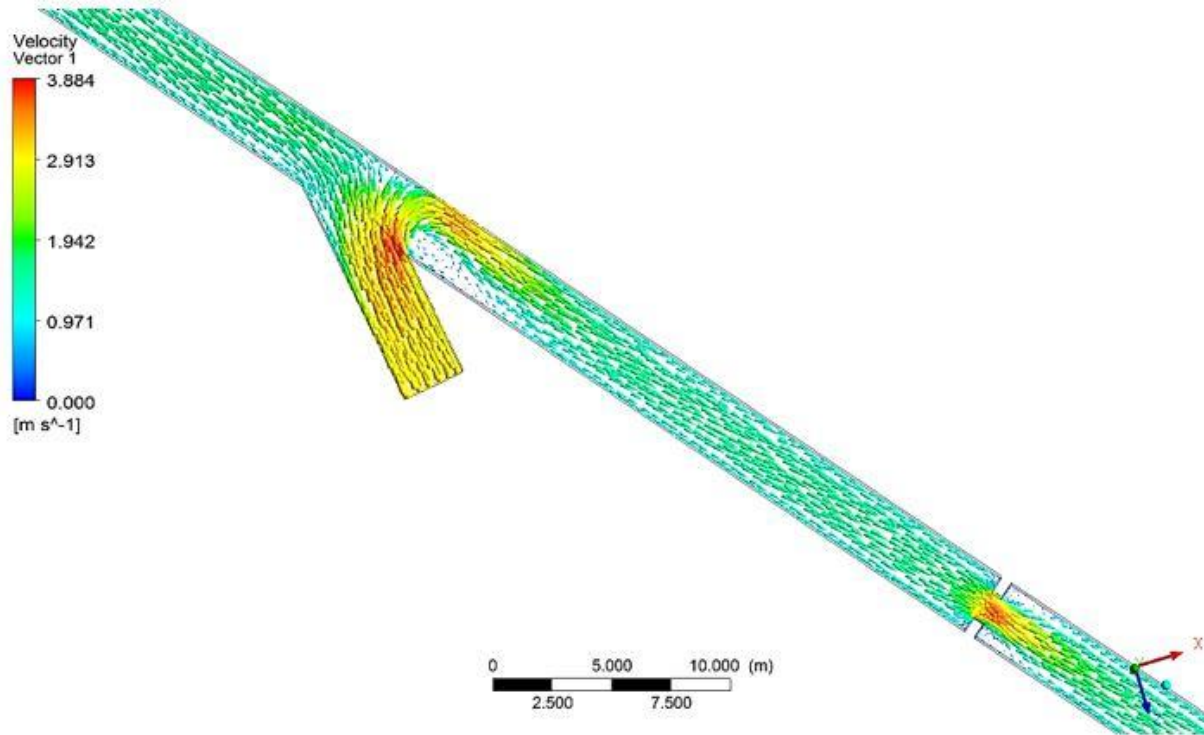


شکل (۴-۴) مقادیر سرعت هوا در ناحیه‌ای بین خروجی Outlet\_2 تا Outlet\_3

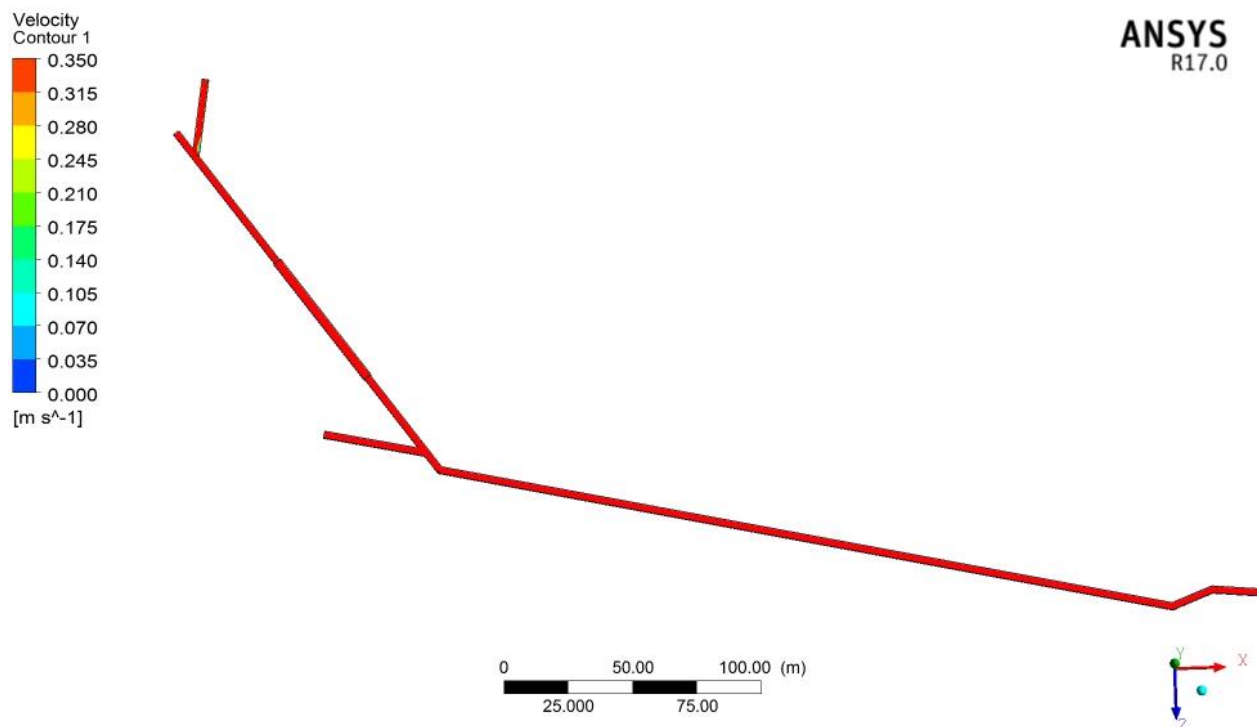
#### ۴-۲-۲- شناسایی مناطق هدر رفت هوای تازه

نکته‌ای که قابل‌توجه است از ۱۸/۶۲ مترمکعب هوای تازه‌ای که برای عملیات تهویه به این بخش تزریق می‌شود تنها ۹/۱۸ مترمکعب از خروجی‌های Outlet\_1 تا Outlet\_4 خارج می‌شود و مابقی آن به سمت

تونل اصلی هدایت شده و به همراه هوای کثیف از معدن خارج می‌شود. این جریان برگشتی در شکل (۴-۵) به وضوح پیداست. همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشخص است یک در تهویه بین تونل اصلی و محل ورود هوای تازه وجود دارد که به دلیل خرابی باز است. با بسته بودن در تهویه نشان داده شده در شکل (۴-۵) طبیعی است که تمام هوای تازه به سمت کارگاه‌های استخراج هدایت می‌شود. با بررسی شدت جریان خروجی از هر یک از مقاطع مشخص شد که ۷۱ درصد هوای تازه از خروجی Outlet\_1 خارج می‌شود و دلیل این امر نیز این است که هوا کوتاه‌ترین مسیر را برای رسیدن به منطقه کم‌فشار انتخاب می‌کند. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد با بستن خروجی Outlet\_1 بیشترین حجم هوا از خروجی Outlet\_2 مدل اتفاق بیفتد که امری مطلوب است. همچنین در مابقی مسیر و خروجی‌ها حداقل سرعت هوا بالای  $0.3$  متر بر ثانیه خواهد بود. شکل (۴-۶) تأییدکننده این موضوع است.



شکل (۴-۵) جریان برگشتی هوای تازه به تونل اصلی



شکل (۴-۶) تغییرات سرعت هوا در صورت بسته بودن خروجی Outlet\_1 و در تهویه

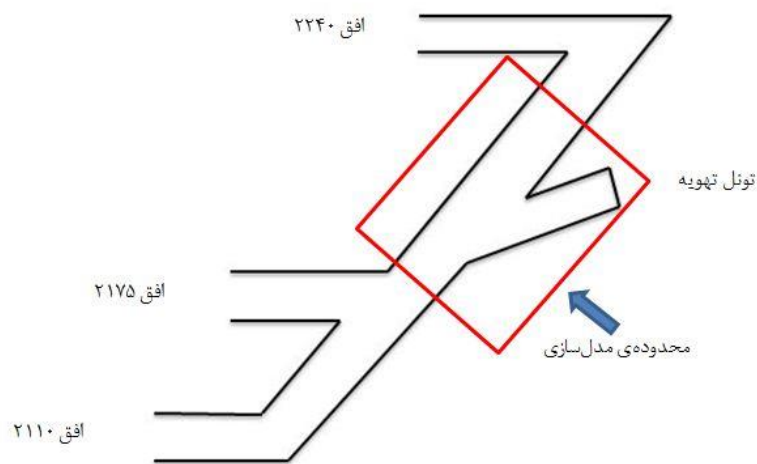
با توجه به این موضوع که در بخش مدل سازی شده فقط هوای تازه حضور دارد و لایه های زغالی برای ورود گاز متان و احتمال خطر انفجار و یا خودسوزی لایه های زغال وجود ندارد ضرورتی برای بررسی سایر معیارها وجود ندارد.

### ۴-۳- بررسی روش های جلوگیری و یا کاهش برگشت هوا به خروجی هوای کثیف

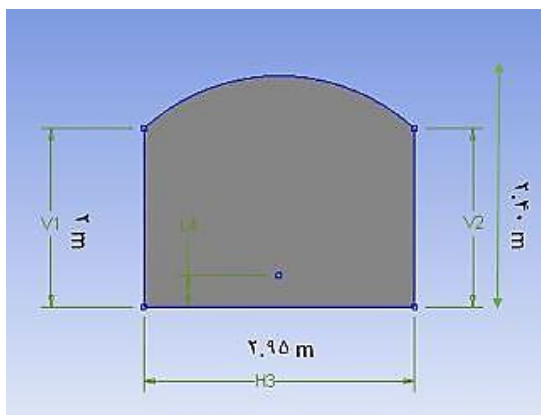
#### به کمک مدل سازی CFD

مکان هایی مشابه با شکل (۴-۵) که بخشی از هوای تازه به سمت خروجی هدایت می شود در شبکه تهویه معادن شرکت البرز شرقی به تعداد قابل توجهی وجود دارد. یکی از این موارد بخشی از اوکلون وینچ معدن زغالسنگ طزره است که این اوکلون با افق زاویه ۲۵ درجه داشته و از قسمت بالا به افق ۲۲۴۰ و از قسمت انتهایی به افق ۲۱۱۰ ختم شده و در میانه راه به افق ۲۱۷۵ متصل می شود. هوای تمیز مورد نیاز افق های

۲۱۷۵ و ۲۱۱۰ توسط یک تونل تهویه که به صورت افقی به تونل وینچ متصل بوده و با آن زاویه ۳۰ درجه می‌سازد تأمین می‌شود. فاصله کانال تهویه تا افق ۲۲۴۰ که هوای کثیف از مسیر آن به بیرون راه پیدا می‌کند ۲۵ متر است. به دلیل کوچک بودن این محدوده، مدل‌سازی CFD برای بررسی راه‌حل‌های ممکن جهت جلوگیری از هدر رفت هوا در این ناحیه تهیه شد. کروکی بخش مدل‌سازی شده مطابق شکل (۴-۷) و سطح مقطع تونل‌ها مطابق شکل (۴-۸) است.



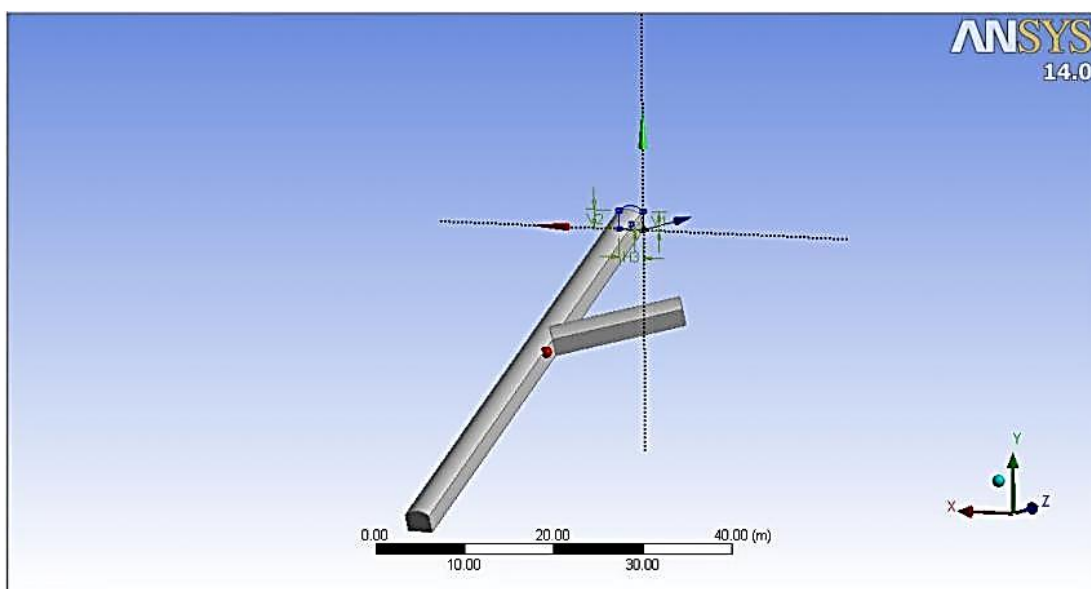
شکل (۴-۷): تصویر دوبعدی محدوده مطالعاتی



شکل (۴-۸) سطح مقطع تونل تهویه و تونل وینچ

هندسه تعریف شده در بخش قبل طراحی شد. و شرایط مرزی تعیین شده در مدل عبارت‌اند از:

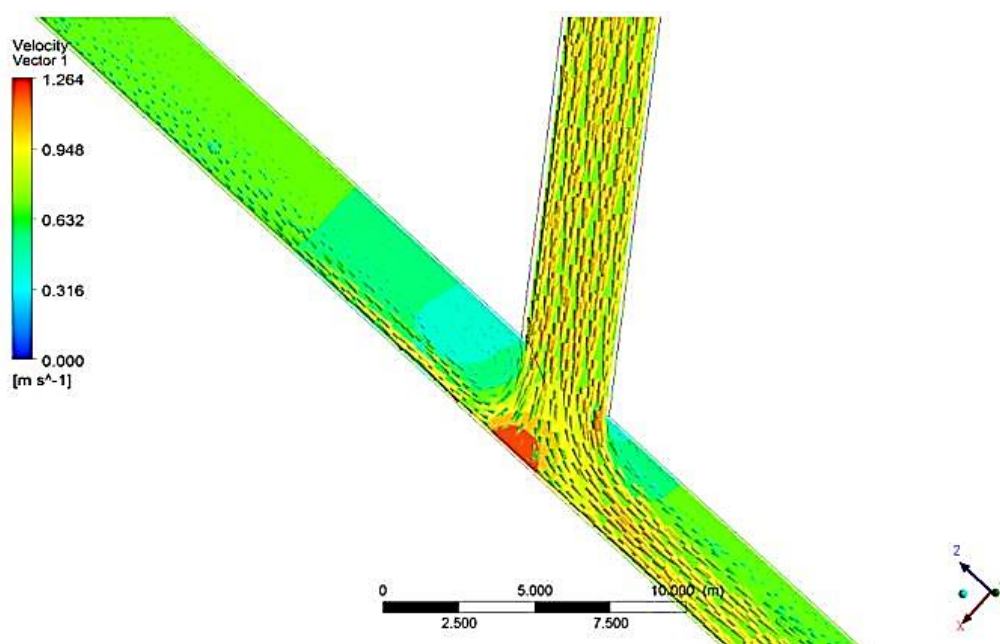
- Inlet: محل ورود هوای تمیز از تونل تهویه
- Outlet-1: محل خروج هوا از مدل به سمت افق ۲۲۴۰
- Outlet-2: محل خروج هوا از مدل به سمت افق ۲۱۱۰
- Wall: شرط مرزی دیواره‌ها



شکل (۴-۹) هندسه مدل CFD محدوده

حجم هوای تازه شده به مدل ۱ متر بر ثانیه در مرز Inlet است که شدت جریان ورودی معادل ۷/۵ مترمکعب بر ثانیه خواهد بود همچنین خروجی‌های مدل نشان می‌دهد حجم هوایی معادل ۲/۰۸ مترمکعب بر ثانیه از مرز Outlet\_1 خارج می‌شود. وضعیت حاکم بر جریان هوا مطابق شکل (۴-۱۰) است. قطعاً اتلاف این میزان هوا در ابتدای مسیر قابل قبول نخواهد بود. به همین دلیل از مدل‌سازی CFD برای حل این مشکل استفاده شد. برای مقابله با این مشکل چهار سناریوی در نظر گرفته شده به شرح زیر است:

۱. استفاده از پرده‌ی هوا
۲. منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از اوکلون وینچ
۳. منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از تونل تهویه
۴. منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از اوکلون وینچ و تونل تهویه



شکل (۴-۱۰) شرایط حاکم بر سیستم تهویه قبل از اعمال تغییرات

#### ۴-۳-۱- استفاده از پرده‌ی هوا

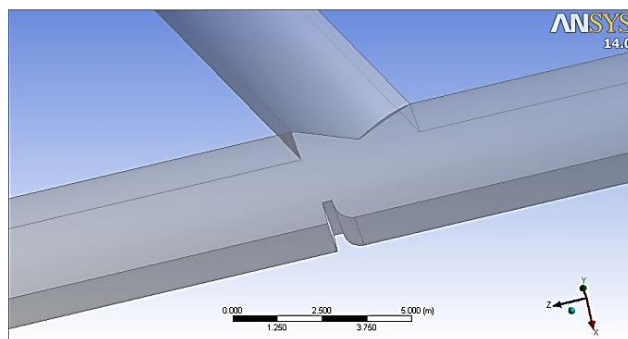
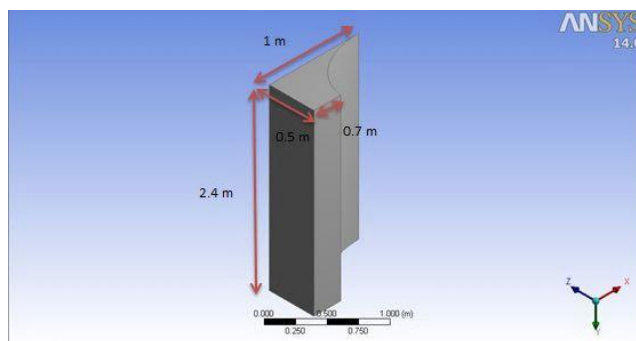
در تونل‌ها در مواقعی که رفت و آمد وسایل زیاد باشد برای محدود کردن جریان هوا از پرده‌ها استفاده می‌شود. واضح است که در صورت استفاده از پرده هوا خروجی هوا از مرز Outlet-1 صفر است. (نشت هوا از پرده صفر در نظر گرفته شده است) و به لحاظ تئوری روش مناسبی است اما با توجه به سوابق گذشته به دلیل رفت و آمد زیاد و سریع واگن‌ها پرده خیلی سریع کنده می‌شود و هر بار توقف سیستم حمل و نقل برای آن نصب



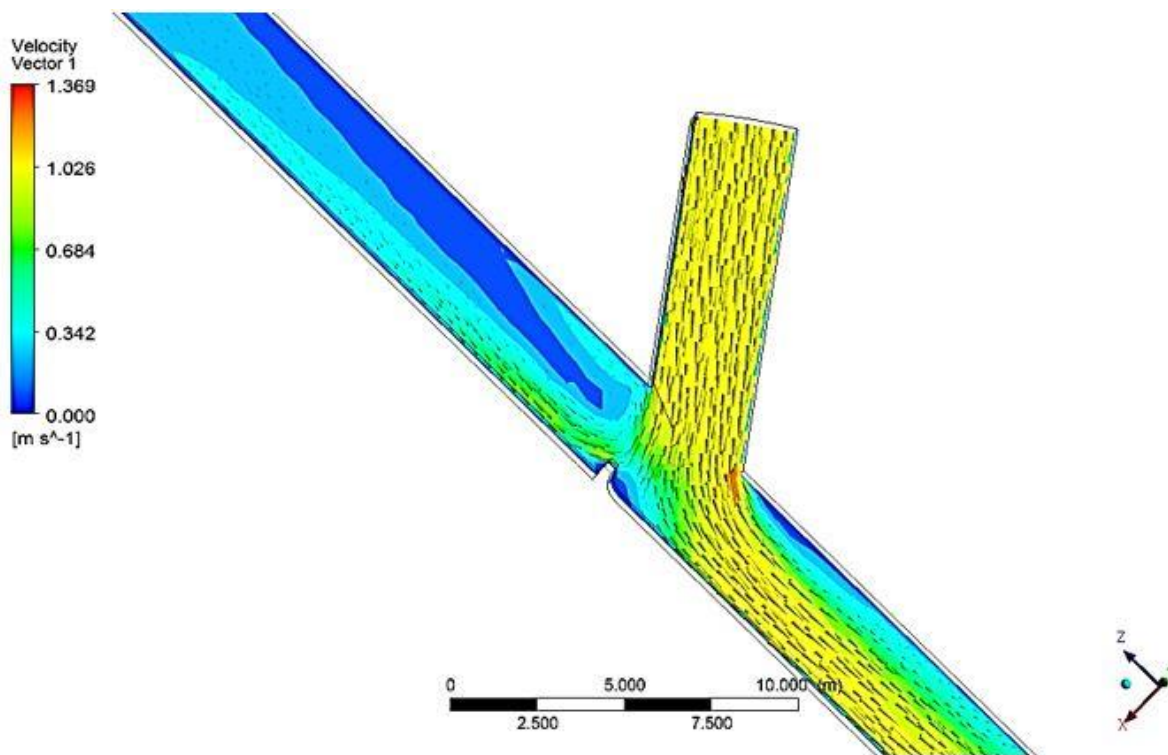
مجدد آن کاهش چشم‌گیری در راندمان کلی دارد به همین دلیل عملاً استفاده از پرده‌ی هوا در این ناحیه موجب بهبود شرایط نخواهد شد.

#### ۴-۳-۲- منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از اوکلون وینچ

با توجه به محدودیت فضا برای جسم خارجی در اوکلون وینچ مانعی مطابق شکل (۴-۱۱) برای منحرف کردن جریان هوا در داخل اوکلون وینچ به سمت افق‌های پایین‌تر در نظر گرفته شد. موقعیت قرارگیری این مانع با توجه به بردارهای سرعت در مدل اولیه در فاصله ۲۵ متری از مرز خروجی Outlet-1 قرار گرفت. محل مانع در شکل (۴-۱۱) مشخص است. خروجی‌ها نتایج نشان می‌دهند که با وجود استفاده از مانع بازهم هدر رفت هوا وجود دارد اما با این شرایط شدت جریان خروجی از ۲/۰۸ مترمکعب بر ثانیه به ۱/۷ مترمکعب بر ثانیه تغییر کرده است که معادل ۱۹ درصد کاهش داشته است.



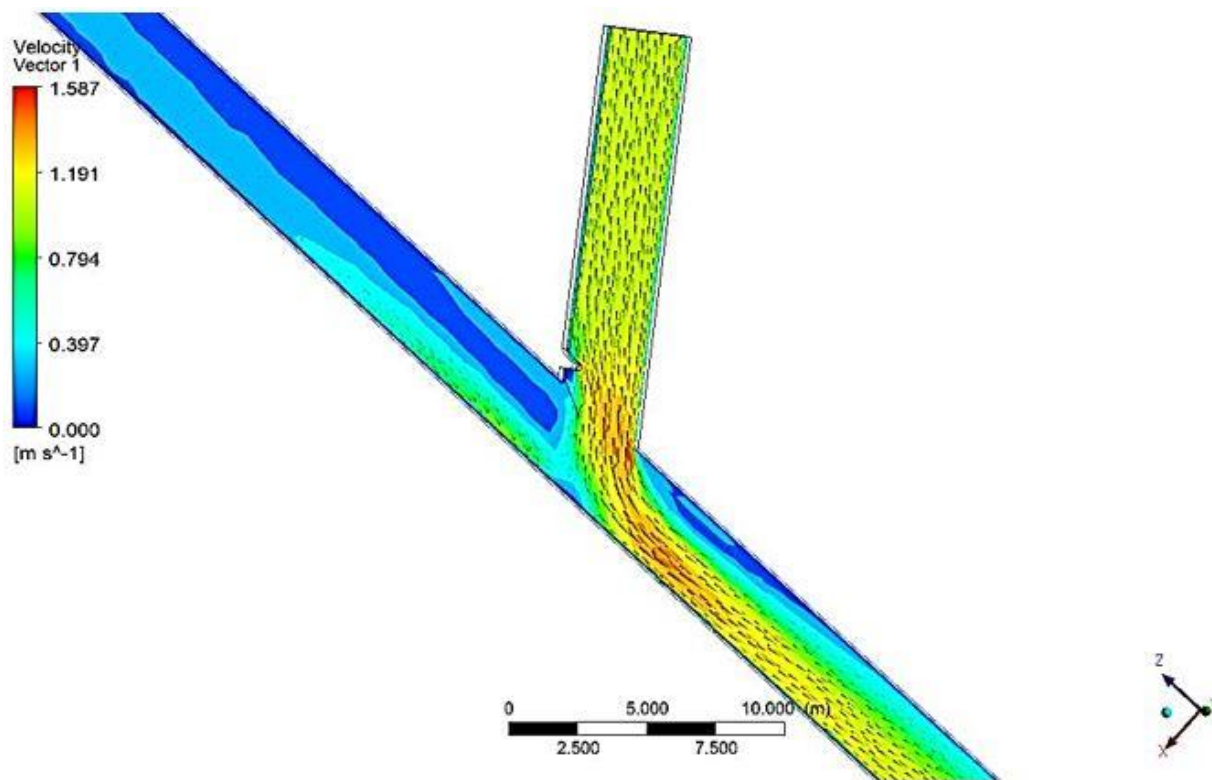
شکل (۴-۱۱) مانع منحرف‌کننده هوا و محل قرارگیری آن



شکل (۴-۱۲) بردارهای سرعت مربوط به حالت منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از اوکلون وینچ

### ۴-۳-۳- منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از تونل تهویه

در مدل تهویه شده مانعی مشابه حالت قبل در تونل تهویه قرار داده شد تا میزان تغییر در جریان هوای خروجی از مرز Outlet-1 مورد بررسی قرار گیرد. همانطور که در شکل (۴-۱۳) مشخص است به دلیل کاهش سطح مقطع تونل تهویه مقداری افزایش سرعت در جریان هوای ورودی به سمت مرز Outlet-2 به وجود می‌آید. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که در صورت استفاده از چنین مانعی میزان خروجی هوا از مرز Outlet-1 از  $2/08$  مترمکعب بر ثانیه به  $1/3$  مترمکعب بر ثانیه خواهد رسید و به میزان ۳۸ درصد کاهش خواهد یافت.



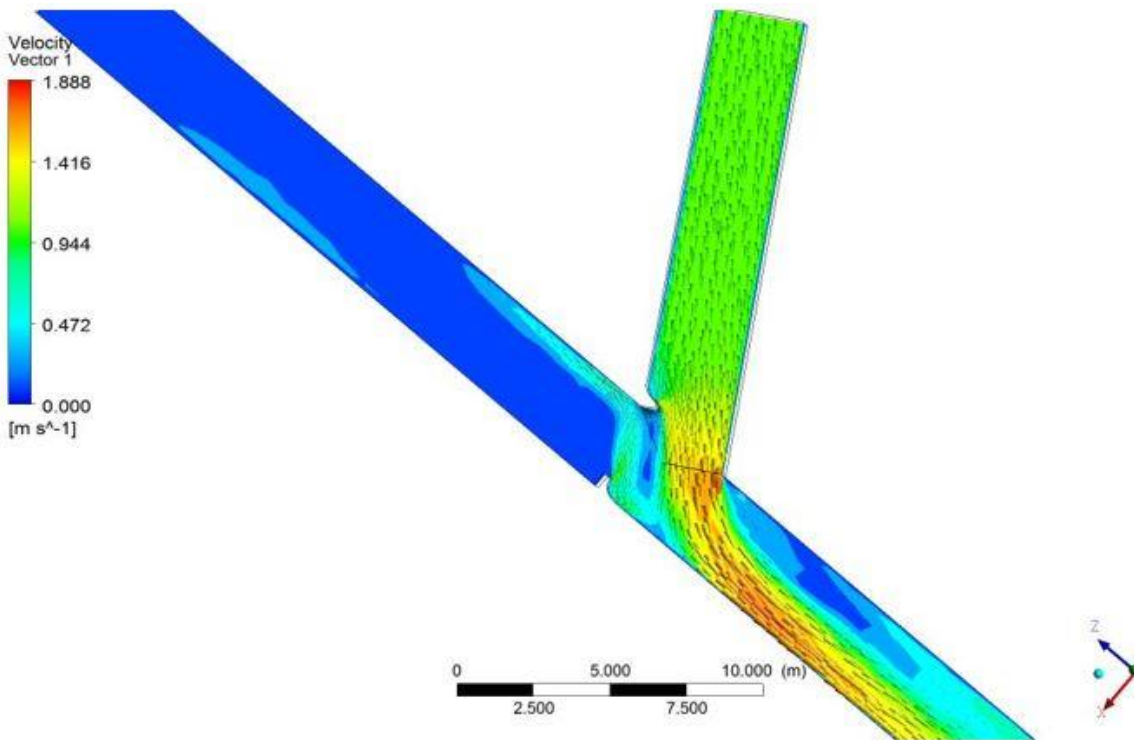
شکل (۴-۱۳) بردارهای سرعت مربوط به حالت منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از تونل تهویه

#### ۴-۳-۴- انحراف مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از اوکلون وینچ و تونل تهویه

در این حالت در هر دو تونل موانع مشابه قرار داده شد تا تأثیر آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. مطابق شکل (۴-۴)

(۱۴) در صورت به کارگیری این حالت میزان خروجی هوا از مرز Outlet-1 از  $2/08$  مترمکعب بر ثانیه به  $0/7$

مترمکعب بر ثانیه خواهد رسید و به میزان ۶۷ درصد کاهش خواهد یافت.



شکل (۴-۱۴) بردارهای سرعت مربوط به حالت منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از اوکلون وینچ و تونل تهویه

عدم هدایت صحیح جریان هوای وارد شده به معدن به محل‌های موردنظر و نشت آن به فضاهای غیرضروری مانند ناحیه تخریب، کارگاه‌های خالی، جریان هوای کثیف و... چیزی جز هدر رفتن انرژی نیست و صرفاً باعث افزایش هزینه‌ها می‌گردد. وجود ابزاری جهت پیش‌بینی و بررسی شرایط در صورت اعمال تغییرات می‌تواند کمک بزرگی برای انجام صحیح‌تر پروژه باشد. برای حل مشکل هدر رفت هوا در بخش بررسی شده سناریوهایی در نظر گرفته شد و میزان تأثیر آن‌ها در هدر رفت هوا مشخص شد. اولویت‌بندی به‌کارگیری آن‌ها با محدودیت‌های موجود در هریک در جدول (۴-۱) نشان داده شده است.

جدول (۴-۱) اولویت بندی سناریوهای بررسی شده

اولویت	روش	میزان کاهش	توضیحات
۱	پرده هوا	٪۱۰۰	در صورت عدم متوقف باربری مناسب است.
۲	منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از اوکلون وینچ و تونل تهویه	٪۶۷	-
۳	منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از تونل تهویه	٪۳۸	-
۴	منحرف کردن مسیر جریان هوا به سمت افق‌های پایین‌تر از اوکلون وینچ	٪۱۹	-

#### ۴-۴- بررسی تهویه کمکی به وسیله مدل سازی CFD

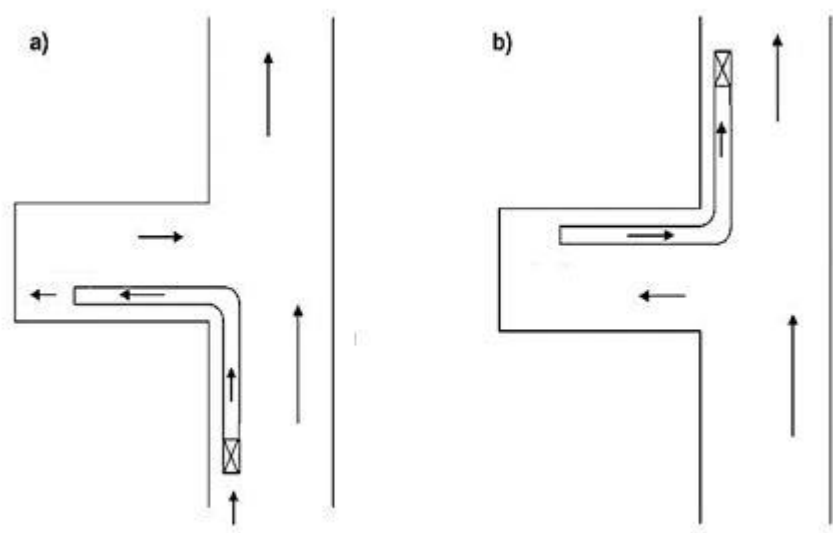
متان گازی است که در معادن زیرزمینی زغالسنگ حضور دارد که عامل بسیاری از حوادث رخ داده در معادن زیرزمینی زغالسنگ در کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته است. به عنوان مثال بیش از ۱۰۰۰ نفر در فرانسه در سال ۱۹۰۶، ۱۴ نفر در اسپانیا در سال ۱۸۵۰ و ۱۰۶ نفر در آمریکا در سال ۱۹۸۰ جان خود را به دلیل حادثه انفجار در معادن زیرزمینی زغالسنگ از دست داده‌اند (Torano et al. 2009). همان‌طور که در مقدمه فصل اشاره شد باید در تمام نقاط کاری معدن هوای لازم چه از نظر مقدار و چه از نظر کیفیت جریان داشته باشد. عموماً در جبهه کارهای بن بست این شرط برقرار نیست به همین دلیل برای تأمین هوای لازم از سیستم تهویه کمکی که شامل بادبزن فرعی، لوله تهویه، بست اتصال لوله و در صورت نیاز از فشانه<sup>۱</sup> است استفاده می‌شود. شکل (۴-۱۵) شمایی از دو روش عمده تهویه کمکی دهشی<sup>۲</sup> و مکشی<sup>۳</sup> برای

<sup>۱</sup> injector

<sup>۲</sup> Forcing

<sup>۳</sup> Exhausting

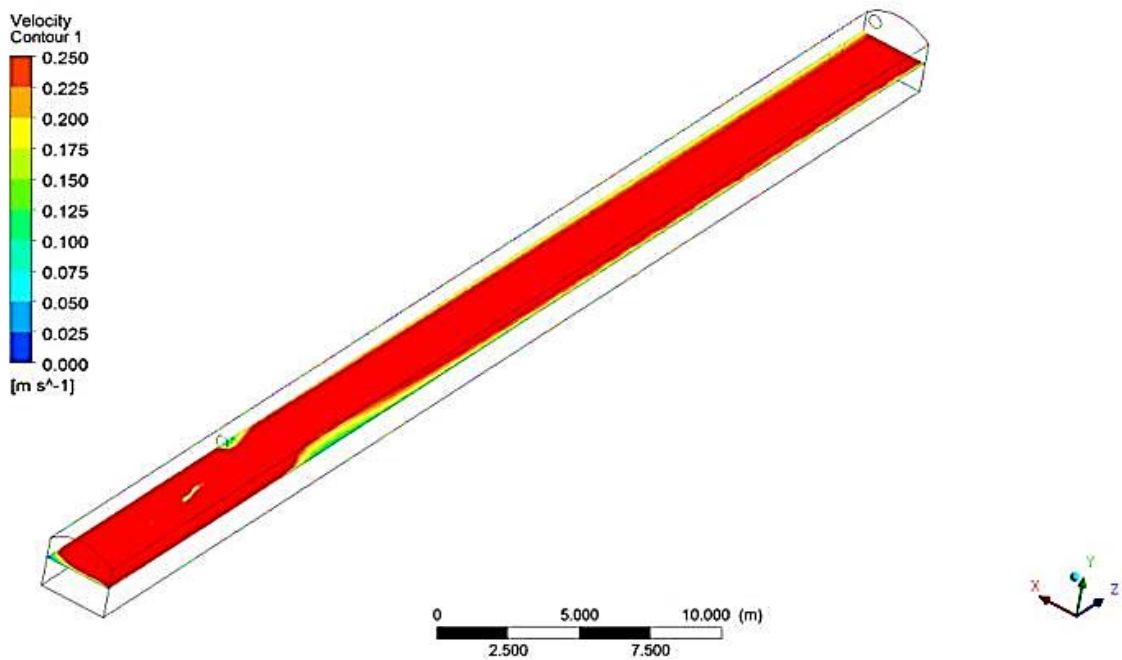
جبهه‌کارهای بن‌بست را نشان می‌دهد. مطالعات نشان داده است که اگر ورود گاز متان به داخل فضای کاری مشکل‌سازتر از سایر عوامل نامطلوب باشد تهویه کمکی دهشی کارایی مؤثرتری نسبت به تهویه کمکی مکشی دارد. به طوری که میزان تأثیرگذاری در تهویه سینه‌کار برای تهویه مکشی ۱۰ درصد و برای تهویه کمکی دهشی ۳۹/۹ درصد است و هرچه فاصله لوله تهویه از سینه‌کار بیشتر می‌شود کارایی تهویه کمکی دهشی نسبت به تهویه کمکی مکشی بهتر می‌شود (Javier Torano, 2009). با توجه به اینکه عمده مشکل در جبهه‌کارهای بن‌بست معدن مورد مطالعه انتشار گاز متان از جبهه‌کار است تهویه کمکی به کار گرفته شده از نوع دهشی است که در ادامه به بررسی تهویه کمکی به وسیله مدل‌سازی CFD پرداخته می‌شود.



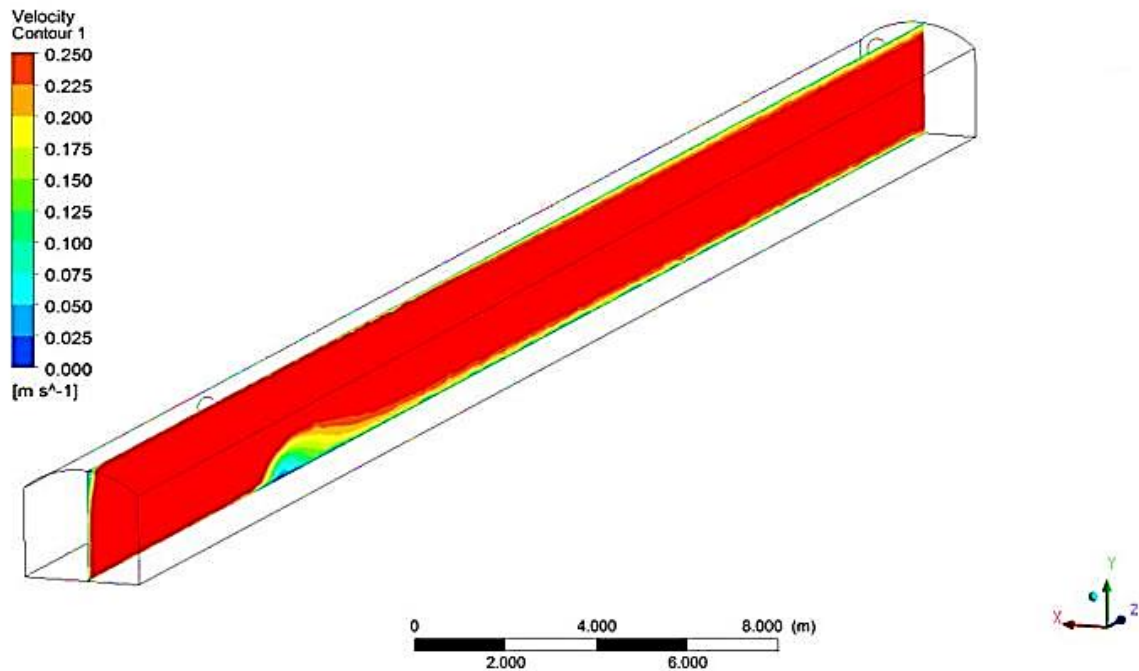
شکل (۴-۱۵) شمایی از تهویه کمکی دهشی (a) و تهویه کمکی مکشی (b)

#### ۴-۴-۱ شناسایی نواحی مرده

در شکل (۴-۱۶) و شکل (۴-۱۷) مقادیر سرعت در مقاطع افقی و قائم نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً در تمام طول تونل استاندارد مربوط به حداقل سرعت هوا رعایت شده است.

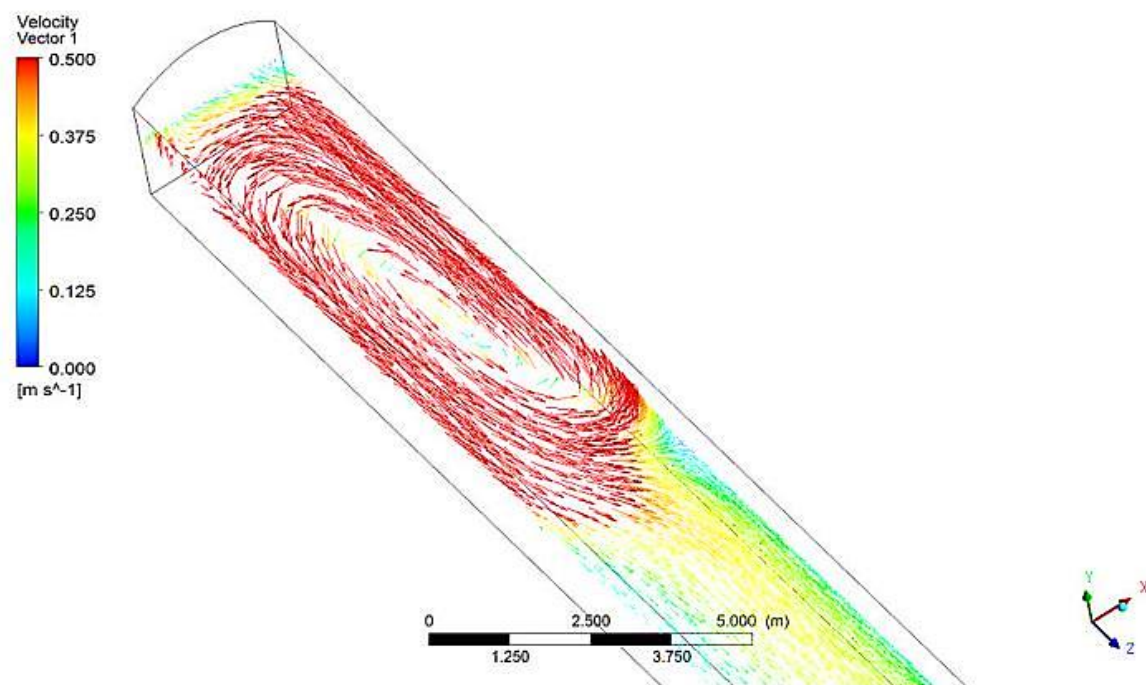


شکل (۴-۱۶) فیلتر مقادیر سرعت هوا تا ۰/۲۵ متر بر ثانیه در مقطع افقی تونل



شکل (۴-۱۷) فیلتر مقادیر سرعت هوا تا ۰/۲۵ متر بر ثانیه در مقطع قائم تونل

با فیلتر کردن مقادیر نمایش داده شده از سرعت هوا بین ۰ تا ۰/۵ متر بر ثانیه و به کمک بردارهای سرعت مشخص می‌شود که در بخش ۵ تا ۱۰ متری جبهه کار یک بازچرخش هوا وجود دارد که خطر تجمع آلاینده‌ها را به وجود می‌آورد.



شکل (۴-۱۸) بردارهای سرعت تا حداکثر سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه

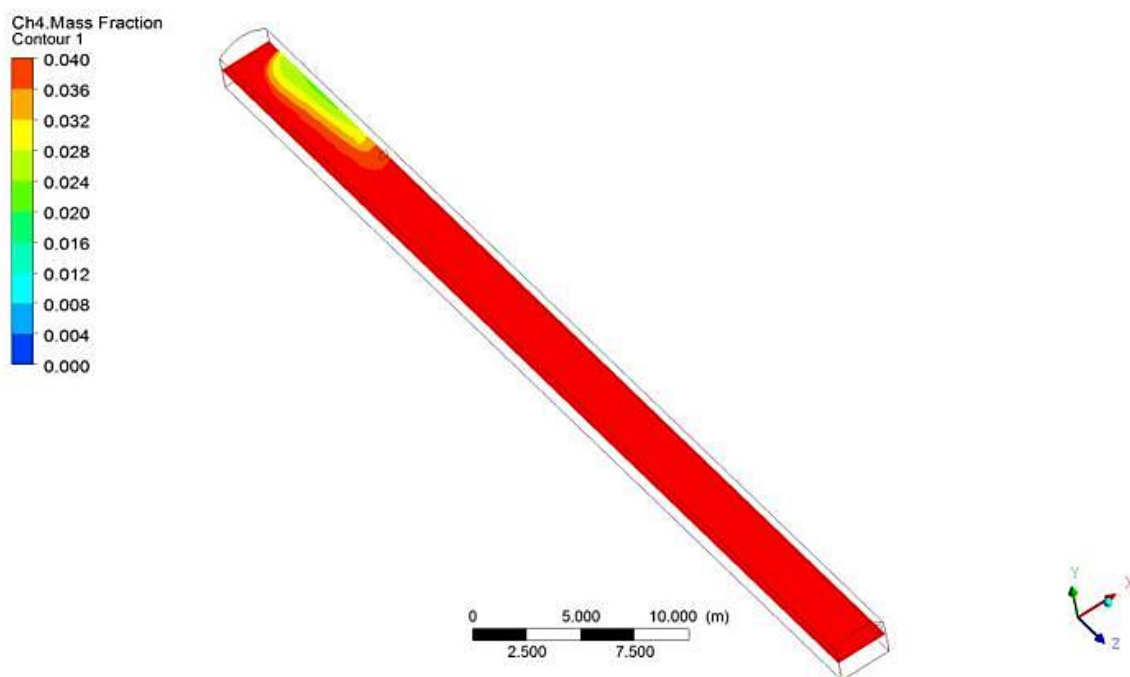
#### ۴-۴-۲- قابلیت انفجار

همان طور که قبلاً بیان شد اگر عیار متان در هوا کمتر از ۴/۵ درصد باشد و گرد زغال در هوای معدن حضور نداشته باشد مخلوط هوا و متان قابل اشتعال و انفجار نخواهد بود. خروجی‌های مدل نشان می‌دهد که ۴/۲ درصد از هوای حاضر در محیط را گاز متان و ۲۰/۸ درصد از هوا را اکسیژن تشکیل داده است. با توجه به شکل (۲-۳) مخلوط گاز متان و اکسیژن در ناحیه مخلوط غیرقابل انفجار قرار می‌گیرد. اما عیار گاز متان از حد استاندارد که ۱ درصد است فراتر رفته است.



#### ۳-۴-۴- بررسی کیفیت هوای تازه

در این بخش از سیستم تهویه هدر رفت هوا و نواحی مستعد خودسوزی زغال وجود ندارد. اما با توجه به شکل (۴-۱۸) و شکل (۴-۱۹) و با توجه به اینکه طبق مقررات حداقل سرعت هوا در محل وجود دارد اما عیار گاز متان ۴ برابر حد مجاز است و در هنگام اندازه‌گیری سرعت هوا تنفس به سختی صورت می‌گرفت و این موضوع بیان‌کننده این است که هوای موجود کیفیت لازم را دارا نیست.



شکل (۴-۱۹) غلظت گاز متان در طول تونل

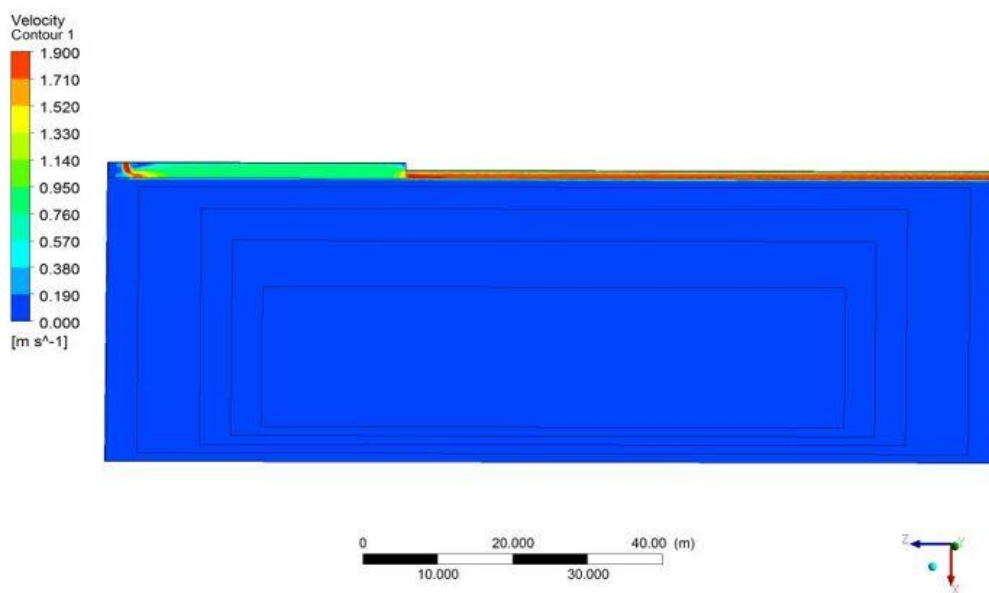
#### ۴-۵- بررسی وضعیت سیستم تهویه در کارگاه استخراج

کارگاه‌های استخراج زغالسنگ از نقطه نظر تهویه‌ای به دلیل حضور بیشتر آلاینده‌ها نظیر گاز متان همواره جزء نقاط حساس سیستم تهویه بوده است. عدم تأمین شرایط مناسب به لحاظ تهویه‌ای شاید در کوتاه‌مدت تأثیرات ملموسی نداشته باشد اما با قرارگرفتن طولانی‌مدت در معرض آلاینده‌هایی که به دلیل شرایط

نامطلوب تهویه‌ای به مقدار کم در محیط حضور دارند صدمات جبران‌ناپذیری به سلامت کارکنان حاضر در کارگاه استخراج وارد خواهد آمد. در ادامه‌ی بررسی سیستم تهویه، کارگاه استخراج و ناحیه تخریب آن با معیارهای در نظر گرفته شده بررسی می‌شود.

#### ۴-۵-۱- شناسایی نواحی مرده

به دلیل ضخامت کم لایه زغال، گام استخراجی کم و حجم مناسب هوای ورودی، در ناحیه‌ای که افراد حضور دارند سرعت هوا ۰/۷۶ تا ۰/۹۵ متر بر ثانیه است و شرایط مناسبی جهت کار فراهم است. در ادامه مسیر با کاهش سطح مقطع سرعت هوا به بالاتر از ۱/۹ متر بر ثانیه افزایش یافته است. البته این افزایش سرعت هوا مشکلی به لحاظ ایجاد گردوغبار و یا سرماخوردگی کارگران ایجاد نمی‌کند زیرا این افزایش سرعت در محلی است که کارکنان حضور ندارند. اما همان‌طور که انتظار می‌رود سرعت هوا در ناحیه تخریب شده بسیار پایین است که باعث تجمع گاز متان و در صورت حضور اکسیژن احتمال خودسوزی زغال وجود دارد که در ادامه این موضوع بررسی خواهد شد.

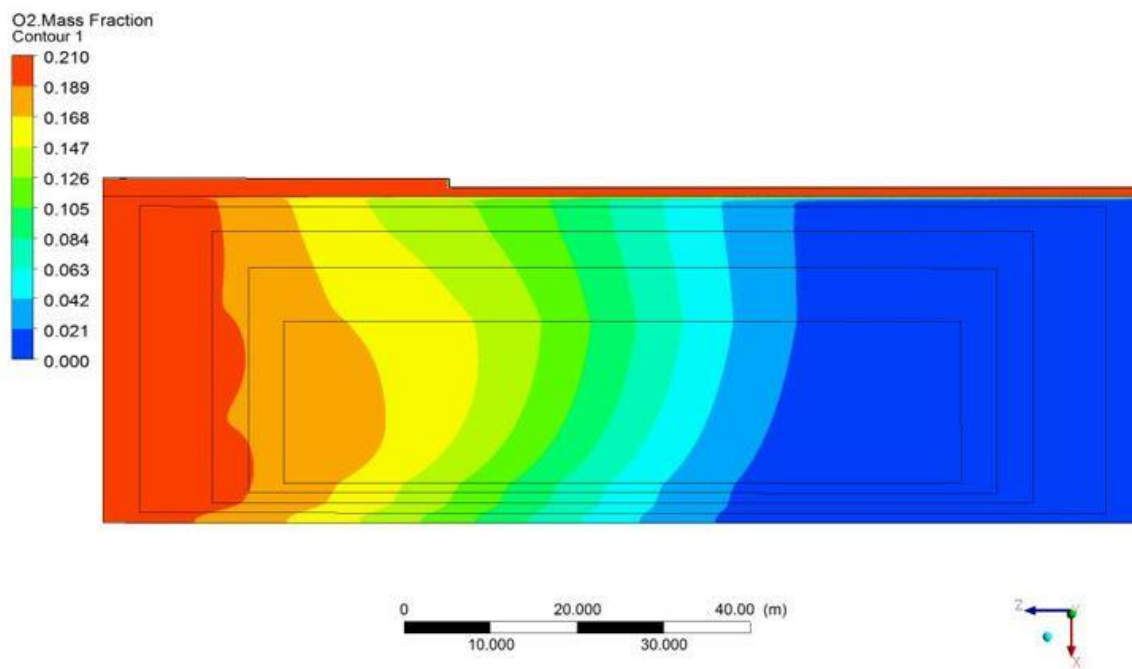


شکل (۴-۲۰) سرعت هوا در کارگاه استخراج

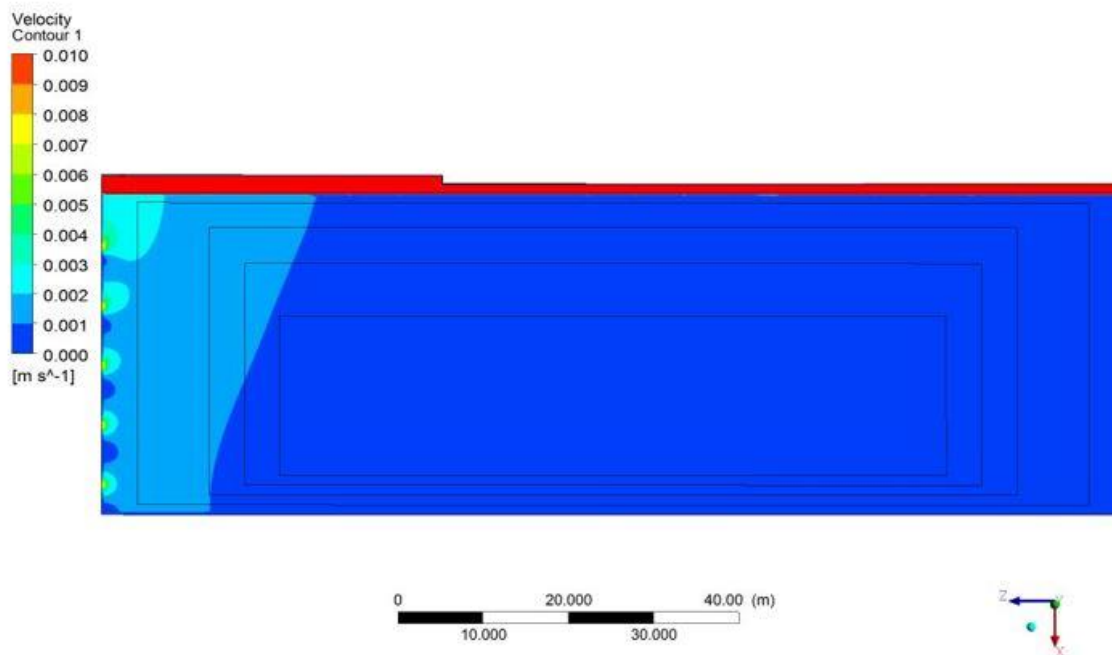
#### ۴-۵-۲- شناسایی نواحی مستعد خودسوزی زغالسنگ

خودسوزی ناشی از گرمایش خود به خودی زغالسنگ در معادن زغالسنگ یکی از مهم‌ترین مشکلات عمده در تمامی کشورهای تولیدکننده زغالسنگ و خطری بزرگ برای صنایع فعال در این زمینه است. اکثر آتش‌سوزی‌های زغالی در یک ناحیه کوچک بر اثر گرمایش خود به خودی شروع می‌شوند و به تدریج ناحیه وسیعی را در برمی‌گیرند که نتایج آن باعث از دست رفتن میلیون‌ها تن زغالسنگ، مرگ کارکنان، خسارت و نابودی تجهیزات در داخل معدن، افزایش دمای داخل معدن، ایجاد مشکل در سیستم تهویه و غیره می‌شود. ناحیه تخریب کارگاه استخراج زغالسنگ یکی از مستعدترین نواحی برای خودسوزی زغالسنگ است که در ادامه این مطالعه به شناسایی بخش‌هایی مستعد پرداخته می‌شود.

با توجه به مکانیزم خودسوزی زغالسنگ که در فصل دوم بیان شد برای جلوگیری از خودسوزی زغالسنگ یا باید به آن اکسیژن نرسد و یا گرمای حاصل از اکسیداسیون زغال از محیط خارج شود. با توجه به شکل (۴-۲۱) از فاصله ۷۰ متر به بعد از طول بلوک استخراجی به دلیل عدم حضور اکسیژن خطر خودسوزی زغال وجود ندارد. اما با توجه به شکل (۴-۲۲) که مقادیر سرعت هوا را نشان می‌دهد تا فاصله‌ی ۲۰ متری نیز سرعت هوا ۷/۲ متر بر ساعت است و خطر خودسوزی زغال را از بین می‌برد. اما ناحیه‌ی ۵۰ متری بین این دو بخش که سرعت هوا در این ناحیه به اندازه‌ای نیست که گرمای حاصل از اکسیدشدن زغال به دلیل حضور اکسیژن را از بین ببرد مستعد خودسوزی زغال است.



شکل (۴-۲۱) غلظت اکسیژن در بخش‌های مختلف کارگاه استخراج و ناحیه تخریب



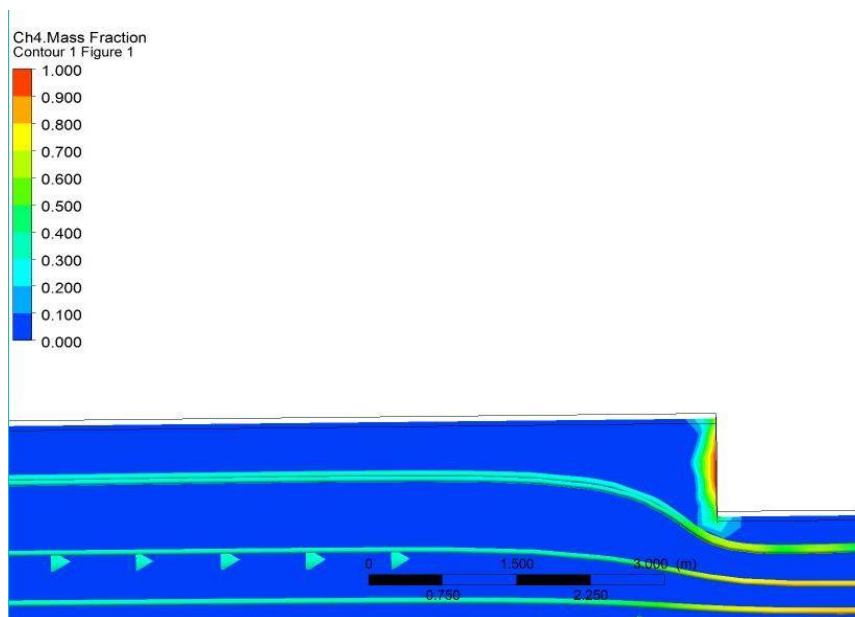
شکل (۴-۲۲) سرعت هوا در ناحیه تخریب

#### ۴-۵-۳- قابلیت انفجار

با توجه به خروجی‌های مدل به‌طور متوسط ۱ درصد از هوای موجود در کارگاه استخراج را متان تشکیل می‌دهد و با توجه به درصد اکسیژن و جدول (۳-۵) مخلوط حاصل از ۲۰ درصد اکسیژن و ۱ درصد متان در ناحیه مخلوط، غیرقابل انفجار قرار می‌گیرد.

#### ۴-۵-۴- بررسی کیفیت هوای تازه

با توجه به این نکته که در مسیر حرکت هوا از محل ورود به شبکه تهویه تا ابتدای این کارگاه استخراج بخش فعال و یا تونل‌هایی که تهویه کمکی در آن‌ها انجام شود که موجب آلوده شدن هوا شوند وجود ندارد هوای وارد شده به کارگاه استخراج کیفیت لازم را دارد و همان‌طور که در شکل (۴-۲۳) مشخص است متان وارد شده به محیط به سمت خروجی و بخشی که افراد حضور ندارند هدایت می‌شود و موجب کاهش کیفیت هوای تنفس شده توسط افراد نمی‌شود.



شکل (۴-۲۳) وضعیت متان در جبهه کار استخراجی

#### ۴-۵-۵- شناسایی مناطق هدر رفت هوای تازه

هدف از انجام عملیات تهویه فراهم کردن هوای تمیز افراد حاضر در محیط کار است. در بخش مدل سازی شده کارگاه استخراج انتهای مسیر است و در انتهای کارگاه هوای کثیف وارد جو می شود. و با توجه به هندسه کارگاه استخراج محلی برای اتلاف هوا وجود ندارد.

#### ۴-۶- جمع بندی

در این فصل به کمک مدل های CFD تهیه شده به بررسی سیستم تهویه پرداخته شد. برای بررسی سیستم تهویه، معیارهای شناسایی نواحی مرده، شناسایی مناطق هدررفت هوای تازه، قابلیت انفجار و بررسی کیفیت هوای تازه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج بدست آمده تجزیه و تحلیل شد. در فصل آینده نتایج بدست آمده از این تحقیق و پیشنهاداتی برای مطالعات بعدی آمده است.



فصل پنجم:

نیجہ گیری و پیشہ ہادہ



## ۵-۱- نتیجه گیری

طراحی سیستم تهویه معادن زیرزمینی زغالسنگ به منظور هوا رسانی صحیح به بخش‌های مختلف معدن برای جلوگیری از خطرات ناشی از انفجار گاز متان و گرد زغال، ایجاد شرایط مناسب کاری به لحاظ گرمایی و تأمین هوای تازه برای کارکنان حاضر در محیط کار صورت می‌گیرد. اما شرایط حاکم بر سیستم تهویه دقیقاً با طراحی صورت گرفته یکسان نیست. از این جهت باید سیستم تهویه به صورت برنامه‌ریزی شده‌ای مورد بررسی قرار بگیرد. یکی از روش‌های بررسی سیستم تهویه بررسی میدانی است که در این روش با تهیه جداولی پارامترهای مهم سیستم تهویه با اندازه‌گیری در محل برداشت می‌شود و نهایتاً داده‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. اما با پیشرفت تکنولوژی روش‌های سنتی جای خود را به کامپیوترها داده‌اند. مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی یکی از جدیدترین روش‌ها برای بررسی رفتار سیال‌ها از جمله هوا است. پس از تهیه مدل ویژگی‌های سیال موردنظر در تمام نقاط بخش مدل‌سازی شده در دسترس است. استفاده از این روش به صورت قابل توجهی باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود.

در گام اول این مطالعه تحقیقات مهم و تأثیرگذار در حوزه‌ی مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه معادن زیرزمینی که طی سال‌های اخیر ارائه شده‌اند مورد بررسی قرار گرفتند و با آگاهی از نقاط ضعف و قوت مطالعات پیشین چهارچوب اصلی تحقیق تعیین شد.

در گام دوم با بازدید از بخش‌های مختلف سیستم تهویه معدن زغالسنگ رزم‌جاغربی بخشی از سیستم تهویه برای مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انتخاب شد. در ادامه با تهیه کروکی بخش مورد نظر و تهیه اطلاعات نقشه‌برداری (طول مسیر و زوایای تونل‌ها نسبت به یکدیگر) هندسه مدل تهیه شد و پس از شبکه‌بندی به کمک حلگر Ansys Fluent حل شد. خروجی‌های مدل تهیه‌شده پس از اعتبارسنجی در نقاط مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

در این مطالعه به دلیل گستردگی شبکه تهویه معدن زغالسنگ رزمجاغربی بخشی از سیستم تهویه که شامل ۱۸۱۰ متر تونل، یک کارگاه استخراج و یک مورد تهویه کمکی مدل‌سازی شده است. مجموعاً ۳ مدل برای انجام این بررسی تهیه شده است که شامل موارد زیر است:

۱. مدل مسیر ورود هوای تازه تا ورودی کارگاه استخراج

۲. مدل کارگاه استخراج

۳. مدل تهویه کمکی

برای بررسی وضعیت حاکم بر سیستم تهویه موارد زیر به‌عنوان معیارهای بررسی سیستم تهویه انتخاب

شدند

✓ شناسایی نواحی مرده

✓ بررسی خطر انفجار

✓ شناسایی نواحی مستعد خودسوزی زغالسنگ

✓ بررسی کیفیت هوای تازه

### ۵-۱-۱- مدل مسیر ورود هوای تازه تا ورودی کارگاه استخراج

- به کمک این مدل مشخص شد که بخش انتهایی مسیر (بعد از خروجی Outlet-2) سرعت هوا از حد مجاز کمتر است و هرگونه تردد افراد در این ناحیه خطرساز خواهد بود.
- عمده حجم هوای تزریق شده به بخش مدل‌سازی شده از خروجی Outlet-1 خارج می‌شود (۷۱ درصد).
- با بسته بودن خروجی Outlet-1 مشکل حداقل سرعت هوا در انتهایی مسیر حل می‌شود.
- به علت خراب بودن در تهویه‌ای که در نزدیکی ورودی هوای تازه قرار دارد بخش قابل توجهی از هوا هدر می‌رود.

- بررسی‌ها نشان می‌دهد که در صورت استفاده از منحرف‌کننده هوا در داخل تونل ورودی هوا و تونل مسیر می‌توان تا ۶۷ درصد از هدر رفت هوا جلوگیری کرد.

### ۵-۱-۲- مدل تهویه کمکی

در بررسی‌های انجام‌شده به کمک مدل تهویه کمکی مشخص شد که حجم هوای وارد شده به سینه‌کار به اندازه‌ای است که حداقل سرعت تعیین‌شده برای تونل‌های مسیر (۰/۲۵ متر بر ثانیه) برقرار شود. اما این حجم هوا نتوانسته عیار گاز متان را تا حد عیار مجاز کاهش دهد و عیار گاز متان ۴ برابر حد مجاز است. همچنین به کمک مدل تهیه شده یک بازچرخش هوا در نزدیکی جبهه‌کار شناسایی شد.

### ۵-۱-۳- مدل کارگاه استخراج

بررسی انجام‌شده بر جریان هوای مدل کارگاه استخراج نشان می‌دهد که سرعت هوای این بخش در بازه‌ی (۰/۹۵ - ۰/۷۶) متر بر ثانیه است که نشان‌دهنده شرایط مطلوب برای محیط کار است. همچنین عیار گاز متان از حداکثر مقدار مجاز (۱ درصد) فراتر نرفته است و مخلوط گاز متان و هوای تازه قابل انفجار نیست. از طرفی به دلیل اینکه در مسیری که هوای تزریق‌شده به شبکه تهویه از بخش آلوده‌ای عبور نمی‌کند کیفیت مطلوبی را داراست. در بررسی نواحی مستعد خودسوزی زغال بلوک استخراجی به چند بخش تقسیم شد که به شرح زیر است:

۱. کارگاه استخراج: به دلیل حضور هوای کافی با سرعت مناسب خطر خودسوزی زغال وجود ندارد.
۲. بخش بالایی ناحیه تخریب‌شده (۵۰ متر بالایی): در این ناحیه تجمع گاز متان وجود دارد و به دلیل عدم حضور گاز اکسیژن خطر خودسوزی زغال وجود ندارد
۳. بخش پایینی: در این بخش به دلیل نشت هوای تازه از بونکرهای قدیمی به ناحیه تخریب، اکسیژن لازم برای اکسیداسیون زغال بجا مانده وجود دارد ولی چون سرعت هوا در این بخش به حدی است که گرمای حاصل از اکسیداسیون را از محل منتقل کند خطر خودسوزی را از بین می‌برد.

۴. بخش میانی : در این بخش اکسیژن نشت کرده از بونکرهای قدیمی حضور دارد و سرعت هوا به قدری پایین است که گرمای حاصل از اکسیداسیون از محل جابجا نمی‌شود و لذا این ناحیه از نقطه نظر تهویه‌ای مستعد خودسوزی شناسایی شده است.

## ۵-۲- پیشنهادها

مطالعه و بررسی سیستم تهویه یکی از اساسی‌ترین مراحل در مطالعه ایمنی یک معدن زغالسنگ است. نتایج حاصل از بررسی سیستم تهویه به انجام طراحی دقیق‌تر برای بخش‌های توسعه داده شده کمک بزرگی است. استفاده از ابزار دقیق مانند مدل‌های CFD برای بررسی سیستم تهویه به‌جای روش‌های قدیمی کمک می‌کند تا شناخت دقیق‌تری از وضعیت حاکم بر سیستم تهویه در اختیار طراحان و بخش ایمنی قرار گیرد. بنابراین نتایج حاصل از این پایان‌نامه می‌تواند سرآغاز بسیار خوبی برای تحقیقات عمیق‌تر از وضعیت آینده بر روی سیستم تهویه پیشنهاد می‌شود.

۱. مدل‌سازی CFD کامل از شبکه تهویه می‌تواند دید دقیق‌تر و کامل‌تری از وضعیت حاکم بر سیستم تهویه در اختیار مهندسان قرار دهد.

۲. یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی آتش‌سوزی است که می‌تواند کمک بزرگی برای امداد و نجات افراد در هنگام حادثه باشد.

۳. استفاده از نرم‌افزارهایی با کلید فعال‌سازی قانونی می‌تواند خطاهای احتمالی ناشی از نرم‌افزارهای قفل شکسته را کاهش دهد.

## منابع

۱. توحیدی ا، غفاری قهرودی ه، (۱۳۹۲)، "راهنمای جامع Ansys Fluent (مقدماتی)" موسسه فرهنگی و هنری دیباگران تهران.
۲. شجاعی فرد م. نورپور هشتروودی ع، (۱۳۷۹)، "مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی" مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. شهرخانی م، (۱۳۹۰)، "مدل‌سازی در دینامیک سیالات محاسباتی" انتشارات یزدا
۴. عظیمیان ا، ملکی م، (۱۳۷۶)، "دینامیک سیالات محاسباتی برای مهندسان" دانشگاه صنعتی اصفهان.
۵. مدنی ح، (۱۳۸۷)، "تهویه در معادن" مرکز نشر دانشگاهی.
۶. مقیمان م، (۱۳۹۴)، "انتقال حرارت و حرکت سیالات" موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
۷. مهربان م، (۱۳۸۰)، "دینامیک سیالات محاسباتی: اصول و کاربردها" دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۸. نظام مهندسی معدن، (۱۳۸۸)، "مقررات ایمنی در معادن" انتشارات نظام مهندسی معدن،
9. Aziz, N I, Baafi, E, Hewitt, A, Srinivasa Rao, B, 1993, Respirable Dust Concentration and Air Velocity Profiles in Longwall Faces, The Australian Coal Journal, No.40, pp 19-24.
10. C. Kurnia, J., P. Sasmito, A., & S. Mujumdar, A. (2014). CFD simulation of methane dispersion and innovative methane management in underground mining faces. Applied Mathematical Modelling.
11. Calautit, J., & Hughes, B. (2014). Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower. Building and Environment.
12. Creedy, D P and Clarke, R D C, 1992, Minimizing Firedamp Risks on High Production Coalfaces: A Computational Modelling Approach, Proceedings of an

- International Symposium: Safety, Hygiene and Health in Mining, Harrogate, Doncaster: The Institution of Mining Engineers, pp192-203.
13. Diego, I., Torno, S., Toraño, J., Menéndez, M., & Gent, M. (2011). A practical use of CFD for ventilation of underground works. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 189–200.
  14. Ding Ang, C. (2016). Simulating longitudinal ventilation flows in long tunnels: Comparison of full CFD and multi-scale modelling approaches in FDS6. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19–126.
  15. Domingo, J., Barbero, R., Iranzo, A., Cuadra, D., & Servert, J. (2011). Analysis and optimization of ventilation systems for an underground transport interchange building under regular and emergency scenarios. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, 179–188.
  16. Esterhuizen, G., & Karacan, C. (n.d.). A METHODOLOGY FOR DETERMINING GOB PERMEABILITY DISTRIBUTIONS AND ITS APPLICATION TO RESERVOIR MODELING OF COAL MINE LONGWALLS.
  17. Grever T., (1994), “Thermal hazards of chemical reaction”, Vol. 4, *Industrial Safety Series*, **Elsevier Press**, Amsterdam, pp. 444.
  18. Hargreaves, D., & Lowndes, I. (2007). The computational modeling of the ventilation flows within a rapid development drivage. *Tunnelling and Underground Space Technology* 22, 150–160.
  19. Lee, C J, 1994. Computational Modelling of Mine Fires, *The Mining Engineer*, July, pp17-21.
  20. Levin, L. Y., Semin, M. A., & Klyukin, Y. A. (2014). Estimation of wall roughness functions acceptability in CFD simulation of mine ventilation networks.
  21. Li, M., Aminossadati, S., & Wu, C. (2016). Numerical simulation of air ventilation in super-large underground developments. *Tunnelling and Underground Space Technology* 52, 38–43.
  22. Moloney, K W, Hargreaves, D M and Lowndes, IS, 1998, Computational fluid dynamics (CFD) simulations in underground auxiliary ventilated headings, APCOM98. Published by The Institution of Mining and Metallurgy, 19 to 23rd April 1998, London, UK. pp721-731. ISBN 1 870706 36 6.

23. Moloney, K W, Hargreaves, D M and Lowndes, IS, 1998, Computational fluid dynamics (CFD)simulations in underground auxiliary ventilated headings, APCOM98. Published by The Institution of Mining and Metallurgy, 19 to 23rd April 1998, London, UK. Pp721-731.ISBN 1 870706 36 6.
24. P. Sasmito, A., Birgersson, E., C. Ly, H., & S. Mujumdar, A. (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.
25. Parra, M., Villafruela, J., Castro, F., & Me´ndez, C. (2006). Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines. *Building and Environment*, 87–93.
26. Ren, T., & Balusu, R. (2010). The use of CFD modelling as a tool for solving mining health and safety problems. *Coal Operators' Conference*, 339-349.
27. Ren, T., Wang, Z., & Cooper, G. (2014). CFD modelling of ventilation and dust flow behaviour above an underground bin and the design of an innovative dust mitigation system. *Tunnelling and Underground Space Technology* 41, 241–254.
28. Sullivan, P and Heerden, J V , 1993. The simulation of environmental conditions in continuous miner developments using Computational Fluid Dynamics, *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, January, pp2-11.
29. Tauziede C, Mouilleau, Y and Bouet, R,1993,. Modelling of Gas Flows in the Goaf of Retreating Faces. Paper Presented at the 25th International Conference on Safety in Mines Research Institutes atPretoria, SA.
30. Tomata, S., Uchino, K., Inoue, M., 1999. Methane concentration at heading faces with auxiliary ventilation. In: *Proceedings of the 8th US Mine Ventilation Symposium*, SME, Littleton, pp. 187–192.
31. Toraño, J., Torno, S., Menendez, M., Gent, M., & Velasco, J. (2009). Models of methane behaviour in auxiliary ventilation of underground coal mining. *International Journal of Coal Geology*, 35–43.
32. Uchino, K., Inoue, M., 1997. Auxiliary ventilation at a heading of a face by a fan. In: *Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress*, SME, Littleton, pp. 493–496.

33. Xu, G., C. Jong, E., Luxbacher, K. D., Ragab, S. A., & Karmis, M. E. (2015). Remote characterization of ventilation systems using tracer gas and CFD in an underground mine. *Safety Science*, 140–149.
34. Xu, G., D. Luxbacher, K., Ragab, S., & 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.
35. Yuan L, Smith A C, 2008. Numerical study on effects of coal properties on spontaneous heating in longwall gob areas, *Fuel*, Volume 87, Issues 15-16, November 2008, Pages 3409-3419
36. Yuan, L., Smith, A. C., & Brune, J. F. (2006). *Computational Fluid Dynamics Study on the Ventilation Flow Paths in Longwall Gobs*. National Institute for Occupational Safety and Health.



## Abstract

Ventilation network design is aimed to establishing adequate air flow in all parts of mine, but the actual results are different to those obtained from prediction design. Thus after performing designed plan, qualification of mine ventilation must be considering and where it is necessary, fixing the issues. Computational fluid dynamics (CFD) modelling is a rapid, accurate, low costs and reliable method for fluid behavior investigation that used in considering of ventilation network. In this study, after detailed checking of western Razmja coal mine ventilation system, one of the ventilation system parts is chosen for modeling. This part is divided into 3 models including, main tunnel model with the direction of air flow to the extraction stop, auxiliary ventilation model and extraction stop model. After developing of CFD model, target areas was fulfilled with respect to dead air identification criteria, evaluation of the explosion risk, identify the areas that disposed for coal self-burning, identify the areas that had fresh air wastage and evaluation of fresh air qualification. The results are showing that in air way to the stop, due to ventilation door devastation, 52% of air, are conducted to the dirty air outlet. Also, in some parts of way, the air velocity was lower than allowed limitation. Thus solutions are developed for these problems. It was found that in evaluation of auxiliary ventilation model, although air velocity is not lower than allowed limitation, but could not supply air qualification requirements and the gray of methane gas is 4 times of allowed limitation. Also, the air recirculation was identified near the face. The evaluation of extraction stop model, shows that conditions prevailing in extraction stop is appropriate, with regard to ventilation, but from the standpoint of ventilation, in caved part, middle part is disposed for self-burning.

**Keywords:** Computational fluid dynamics (CFD) modelling, ventilation system, extraction stop, auxiliary ventilation.





**Faculty of mining, Petroleum and Geophysics Engineering**

**M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation**

**Survey ventilation system of coal mines using Computational  
Fluid Dynamics modeling  
Case study: western razmja main tunnel, Alborz Sharghi Coal  
Mines Company**

By: Kazem Nasiri Doghaei

Supervisor:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Ali Abbasnejad

Advisor:

Keramat Ghanbari

February 2017