



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

اولویت بندی نجات پرسنل در مواقع حادثه در معادن زیرزمینی با استفاده از مدل سازی CFD

نگارنده: امیربابک شعبانی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر محمد عطایی

تابستان ۹۷

## تقدیم بہ

پدرم کہ عالمانہ بہ من آموخت تا چگونہ در عرصہ زندگی ایستادگی را تجربہ کنم.  
و مادرم کہ وجودش دریای بی کران فداکاری و عشق است و وجودم برایش ہمہ رنج بود و وجودش بر ایم ہمہ مهر.  
و ہمسرم کہ عزیزم کہ در پناہ محبت جوانہ زوم و بانسیم صداقت بہ بار نشستم و معنا و مفہوم زندگی را در با تو بودن یافتم

## 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 محمد عطایی** که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را به عهده داشتند صمیمانه سپاس گذارم و برایشان سلامتی، طول عمر و موفقیت در تمام مراحل زندگی را آرزومندم.

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

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

این مطالعه با هدف اولویت‌بندی نجات پرسنل حادثه دیده در بخشی از معدن نمک گرمسار صورت گرفت. به این منظور بخشی از این معدن که شامل تونلی با سطح مقطع  $۸/۱$  مترمربع و طول  $۱۵۰$  متر و تونل جانبی با زاویه  $۳۶$  درجه و سطح مقطع  $۵/۷$  مترمربع انتخاب شد. شرایط حاکم بر سیستم تهویه در این بخش به این صورت است که در زمان‌های مختلف جریان وارده به تونل اصلی با دو حجم متفاوت  $۶/۴۸$  و  $۳$  مترمکعب برثانیه بوده و جریان هوای تونل دوم نیز یا  $۲/۸۵$  و یا صفر مترمکعب برثانیه است. با توجه به نکات بیان شده چهار حالت تهویه‌ای برای بررسی شرایط سیستم تهویه تعریف شد. در ادامه مدل CFD مرتبط با هریک از این حالت‌ها تهیه و اعتبارسنجی شد. در گام بعدی آزمایش گاز شاخص با پارامترهای مناسب برای این مطالعه طراحی شد که شامل تعیین نقطه مناسب آزادسازی، نمونه‌گیری، مدت زمان آزادسازی گاز شاخص برای نمونه‌گیری ( $۱۰$  دقیقه)، تعیین گاز مناسب بعنوان گاز شاخص (گاز متان) و دبی مناسب گاز شاخص برای نمونه‌گیری ( $۰/۵$  مترمکعب بر ثانیه) بود. این آزمایش پس از اعتبارسنجی در مدل CFD هم در نرم‌افزار Ansys Fluent و هم در محیط معدن برای هریک از حالت‌ها انجام شد. خروجی هریک از این آزمایش‌ها برای هر حالت یک نمودار غلظت- زمان گاز شاخص بود. این نمودارها با هدف تعیین حالت حاکم بر سیستم تهویه با انجام آزمایش گاز شاخص در مواقع لازم و بررسی شباهت نمودار غلظت- زمان آزمایش انجام شده با کدام نمودار از قبل موجود حالت‌ها است. به همین منظور آزمایش گاز شاخص با عدم آگاهی از حالت حاکم بر سیستم تهویه انجام شد و حالت حاکم بر سیستم تهویه تعیین شد.

**کلمات کلیدی:** مدل‌سازی CFD، آزمایش گاز شاخص، حالت سیستم تهویه، نمودار غلظت- زمان گاز

شاخص

## فهرست مطالب

۲	۱-۱- مقدمه .....
۴	۲-۱- تعریف مسئله .....
۴	۳-۱- اهمیت تحقیق .....
۵	۴-۱- ضرورت تحقیق .....
۵	۵-۱- اهداف تحقیق .....
۵	۶-۱- روش انجام تحقیق .....
	<b>Error! Bookmark not defined.</b> .....
۶	۷-۱- روش انجام آزمایش گاز شاخص .....
۶	۸-۱- سابقه علمی موضوع .....
۱۱	۹-۱- ساختار پایان نامه .....
۱۳	۱-۲- مقدمه .....
۱۴	۲-۲- یک برنامه CFD چگونه کار می کند .....
۱۴	۱-۲-۲- پیش پردازنده .....
۲۴	۲-۲-۲- حل کننده .....
۲۵	۳-۲-۲- پس پردازنده .....
۲۶	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
۲۹	۴-۳-۲- معادله‌های ناویر - استوکس
۳۰	۵-۳-۲- مدل آشفتگی Standard k-ε
۳۰	۴-۲- اولویت‌بندی نجات پرسنل در هنگام حادثه
۳۲	۱-۴-۲- آزمایش گاز شاخص
۳۳	۱-۱-۴-۲- ویژگی‌های گاز شاخص
۳۳	۲-۱-۴-۲- تعیین محل ، دبی، مدت زمان و محل نمونه‌گیری گاز شاخص
۳۵	۲-۵- جمع‌بندی
۳۷	۱-۳- مقدمه
۳۸	۲-۳- محل انجام آزمایش
۴۰	۳-۳- مدلسازی CFD محدوده انتخاب شده
۴۱	۱-۳-۳- مدل‌سازی هندسه محل مورد مطالعه
۴۳	۲-۳-۳- شبکه‌بندی هندسه محل مورد مطالعه
۴۴	۳-۳-۳- حل مسئله جریان با Ansys Fluent
۴۹	۴-۳- جمع‌بندی
۵۱	۱-۴- مقدمه
۵۱	۲-۴- آزمایش گاز شاخص
۵۲	۱-۲-۴- محل آزادسازی گاز شاخص

۵۳	۲-۲-۴- دبی گاز شاخص
۵۳	۳-۲-۴- مدت زمان آزادسازی گاز شاخص
۵۴	۴-۲-۴- محل نمونه‌گیری گاز
۵۵	۳-۴- نتایج آزمایش گاز شاخص
۵۵	۱-۳-۴- نتایج آزمایش گاز شاخص حالت اول
۵۶	۲-۳-۴- نتایج آزمایش گاز شاخص حالت دوم
۵۸	۳-۳-۴- نتایج آزمایش گاز شاخص حالت سوم
۵۹	۴-۳-۴- نتایج آزمایش گاز شاخص حالت چهارم
۶۱	۵-۳-۴- آزمایش تصادفی گاز شاخص
۶۴	۴-۴- جمع‌بندی
۶۷	۱-۵- مقدمه
۶۷	۲-۵- نتیجه‌گیری
۶۸	۳-۵- پیشنهادهای
۶۹	منابع



## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) شمای کلی از آزمایش گاز شاخص ..... **Error! Bookmark not defined.**
- شکل (۲-۱) انواع شبکه در حالت دوبعدی و سه‌بعدی ..... ۱۷
- شکل (۲-۲): نمایش بردارها و سلول در محاسبه کیفیت تعامد ..... ۱۸
- شکل (۳-۲) توصیف سلول واقعی و سلول بهینه ..... ۱۹
- شکل (۴-۲) جریان آرام و آشفته ..... ۲۲
- شکل (۵-۲) شمای کلی از نحوه اولویت‌بندی نجات پرسنل به کمک مدل‌سازی CFD ..... ۳۱
- شکل (۱-۳) طرح اولیه بخش تونل ورودی ..... ۳۸
- شکل (۲-۳) موانع موجود در مسیر جریان واقع در تونل اصلی ..... ۳۹
- شکل (۳-۳) روند مدل‌سازی در نرم‌افزار Ansys Fluent ..... ۴۱
- شکل (۴-۳) هندسه تهیه شده توسط نرم‌افزار ANSYS DesignModeler از بخش مدل‌سازی شده ... ۴۱
- شکل (۵-۳) نام‌گذاری سطوح هندسه مدل ..... ۴۲
- شکل (۶-۳) محل قرارگیری ورودی گاز شاخص ..... ۴۳
- شکل (۷-۳) دستگاه ABH-4225 وسیله اندازه‌گیری سرعت و فشار هوا ..... ۴۸
- شکل (۸-۳) دستگاه کروماتوگراف ..... ۴۹
- شکل (۱-۴) تصویر دوبعدی از هندسه مدل شامل محل‌های آزادسازی گاز شاخص ..... ۵۲
- شکل (۲-۴) محل نمونه‌برداری و نام‌گذاری نقاط نمونه‌برداری ..... ۵۴

- شکل (۳-۴) نمونه ظروفی که جهت نمونه برداری از هوای معدن مورد استفاده قرار گرفته است..... ۵۵
- شکل (۴-۴) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به حالت اول ..... ۵۶
- شکل (۵-۴) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به حالت دوم ..... ۵۷
- شکل (۶-۴) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به حالت سوم ..... ۵۸
- شکل (۷-۴) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به حالت چهارم ..... ۶۰
- شکل (۸-۴) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به آزمایش تصادفی ..... ۶۲
- شکل (۹-۴) نمودارهای غلظت - زمان گاز شاخص تمامی حالت‌ها در کنار یکدیگر ..... ۶۳
- شکل (۱۰-۴) نمودارهای غلظت- زمان گاز شاخص حالت تصادفی و حالت اول ..... ۶۳

## فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۱) تاریخچه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه در معدن ..... ۷
- ادامه جدول (۱-۱) تاریخچه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه معدن ..... ۸
- ادامه جدول (۱-۱) تاریخچه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه در معدن ..... ۹
- ادامه جدول (۱-۱) تاریخچه مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم تهویه در معدن ..... ۱۰
- جدول (۱-۲) روش‌های شبکه‌بندی. .... ۱۷
- جدول (۲-۲) ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار تعامد ..... ۱۸
- جدول (۳-۲) ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار کشیدگی ..... ۲۰
- جدول (۴-۲) طبقه‌بندی شرایط مرزی ..... ۲۱
- جدول (۵-۲) مدل‌های آشفتگی موجود در Ansys Fluent ..... ۲۳
- جدول (۱-۳) حالت‌های تهویه‌ای حاکم بر بخش مدل‌سازی شده ..... ۴۰
- جدول (۲-۳) تنظیمات شبکه‌بندی و حل‌گر Ansys Fluent برای مدل CFD محل مورد آزمایش ..... ۴۴
- جدول (۳-۳) واحدهای اندازه‌گیری سرعت توسط دستگاه ABH-4225 ..... ۴۶
- جدول (۴-۳) واحدهای اندازه‌گیری فشار توسط دستگاه ABH-4225 ..... ۴۷



# فصل اول: کلیات تحقیق

## ۱-۱- مقدمه

در هنگام بروز یک حادثه در یک معدن زیرزمینی جمع‌آوری اطلاعات خارج از محل حادثه بخصوص زمانی که شرایطی مانند ریزش سقف و یا انفجار و... مانع ورود افراد به معدن زیرزمینی می‌شود ضروری است. در چنین حوادثی در بهترین حالات نیز ارتباطات بین کارگران معادن زیرزمینی و تیم نجات در سطح زمین شکننده است. اگرچه سیستم‌های ارتباطی در معادن زیرزمینی پیشرفت قابل توجهی در سالهای گذشته داشته است اما عملکرد دقیق آنها در شرایط اضطراری و فاجعه‌بار نامعلوم است. با این حال پیش از تعیین روش نجات و بهبود شرایط باید اطلاعات مربوط به وضعیت معدن و وسعت آسیب وارده جمع‌آوری گردد.

نیاز شدید و سریع بدن انسان برای ادامه حیات به هوای تازه موجب می‌شود که بعد بروز حادثه اولویت نجات افراد محبوس شده در مناطق مختلف فضای زیرزمینی با افرادی باشد که دسترسی آنها به هوای تازه قطع شده است و به عبارتی دیگر عملیات تهویه هوا در آن مناطق مختل شده است. برای بررسی سیستم تهویه 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.

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

---

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics

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 به طور 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 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 اولویت‌بندی نجات افراد با استفاده از مدل‌سازی CFD مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه تحقیق و در فصل‌های آینده به بیان جزئیات بیشتری از مدل‌سازی CFD و اولویت نجات افراد به کمک این روش پرداخته خواهد شد.

## ۱-۲- تعریف مسئله

به دنبال حادثه غیرمنتظره در یک معدن زیرزمینی این موضوع اهمیت دارد که وضعیت حاکم بر بخش-های مختلف معدن اعم از مسیرهای ورود و خروج، سیستم تهویه، سیستم ترابری، میزان پایداری فضاهای در دسترس و ... به منظور مدیریت موثر شرایط پیش آمده به سرعت مشخص شود. بخصوص زمانی که تمام و یا بخشی از معدن غیرقابل دسترسی باشد. تعیین وضعیت تهویه هوای افراد محبوس به پرسنل معدن و تیم‌های نجات امکان تصمیم‌گیری موثرتر جهت اولویت بندی عملیات نجات را می‌دهد. در این مطالعه که هدف نهایی آن اولویت‌بندی نجات افراد محبوس در فضای زیرزمینی است به کمک آزمایش گاز شاخص و مدل‌سازی CFD به جمع‌آوری اطلاعات خارج از محل حادثه و تجزیه و تحلیل سیستم تهویه معادن زیرزمینی پرداخته می‌شود. این مطالعه در یک معدن زیرزمینی با به کارگیری حالت‌های مختلف تهویه‌ای با هدف شبیه‌سازی حالات مختلف آسیب‌دیدن سیستم تهویه انجام می‌شود.

در این مطالعه منظور از جمع‌آوری اطلاعات خارج از محل حادثه در واقع تعیین تقریبی شرایط حاکم بر سیستم تهویه با کمک آزمایش گاز شاخص و مدل‌سازی CFD است که موجب بالا بردن شانس نجات تمامی افراد محبوس در فضای زیرزمینی می‌شود. در فصل دوم مفاهیم مرتبط با آزمایش گاز شاخص و مدل‌سازی CFD به طور کامل شرح داده خواهد شد.

## ۱-۳- اهمیت تحقیق

پس از وقوع یک حادثه در معدن زیرزمینی و محبوس شدن تعدادی از افراد در بخش‌های مختلف معدن تصمیم‌گیری موثر و دقیق برای اولویت‌بندی صحیح نجات جان افراد به کمک اطلاع دقیق از شرایط حاکم بر سیستم تهویه موجب بالا رفتن شانس حفظ جان پرسنل حادثه دیده خواهد شد. لذا این مطالعه می‌تواند یک روش مناسب و کارآمد برای رسیدن به این هدف باشد.



## ۱-۴- ضرورت تحقیق

حفظ جان افراد از مهم‌ترین اقداماتی است که معادن در اولویت کاری خود قرار می‌دهند. این موضوع زمانی اهمیت بالایی پیدا می‌کند که حادثه‌ای در معدن رخ داده باشد و تعدادی از پرسنل کاری در بخش‌های داخلی حبس شده باشند. همانطور که پیش‌تر گفته شد در این مواقع اطلاع از شرایط حاکم بر سیستم تهویه اهمیت خاصی برای اولویت نجات افراد دارد. بکارگیری روش‌های نوین کنترل از راه دور سیستم تهویه از جمله روش CFD برای رسیدن به این هدف بسیار کارآمد است. لذا به لحاظ زمانی ضرورت دارد تا پیش از بروز حادثه ابزار لازم برای عملکرد بهینه در دسترس باشد.

## ۱-۵- اهداف تحقیق

با توجه به اینکه محیط معدنی بخصوص معادن زیرزمینی مستعد بروز حوادث گوناگون هستند در گام اول تلاش برای جلوگیری از بروز حادثه و در گام بعدی آمادگی برای مواجهه با هرگونه اتفاق ممکن، از سیاست‌های بخش ایمنی تمامی معادن است. از جمله اتفاقاتی که در طول تاریخ بارها در معادن رخ داده است محبوس شدن افراد مشغول به کار در بخش‌های کاری آنها است لذا هدف نهایی این مطالعه کمک به اولویت‌بندی نجات افراد بخصوص در شرایطی که در چند نقطه افراد محبوس شده‌اند است.

## ۱-۶- روش انجام تحقیق

در این مطالعه بخشی از معدن مورد مطالعه بصورت یک معدن فرضی در نظر گرفته می‌شود و مدل CFD مرتبط با آن تهیه و اعتبارسنجی می‌شود. در ادامه حالت‌های تهویه‌ای که ممکن است بر این بخش حاکم شود لیست شده و آزمایش گاز شاخص برای هریک از حالت‌ها انجام می‌شود و هریک از حالت‌های تهویه‌ای بطور جداگانه در نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌شود و نمودارهای غلظت گاز شاخص بر حسب زمان در تمامی حالت‌های آزمایش میدانی و نرم‌افزاری تهیه می‌شود و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. و در صورت وجود

یک رابطه معنادار و شباهت نمودارهای غلظت گاز شاخص آزمایش میدانی و خروجی نرم‌افزار، در انتها یک آزمایش گاز شاخص بصورت میدانی با عدم آگاهی از حالت تهویه‌ای حاکم انجام می‌شود و با بررسی شباهت نمودار غلظت زمان گاز شاخص به کدام نمودار غلظت زمان گاز شاخص خروجی نرم‌افزار، حالت تهویه‌ای حاکم تعیین می‌شود و اولویت‌بندی نجات صورت می‌گیرد.

## 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 جبهه کار 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 طراحی تهویه کمکی استفاده کردند. در همان سال توزیدو و همکاران<sup>۳</sup> از مدل‌سازی CFD برای بررسی جریان گاز متان در نواحی تخریب‌شده استفاده کردند که نقاط خطرساز به لحاظ خودسوزی شناسایی شد. در جدول (۱-۱) خلاصه‌ای از تحقیقاتی که سیستم تهویه به کمک مدل‌سازی CFD مورد بررسی قرار گرفته به صورت خلاصه بیان شده است.

---

<sup>1</sup> Creedy and clarke

<sup>2</sup> Heerden and Sullivan

<sup>3</sup> Taziedo et al

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

موضوع تحقیق	محقق (محققین)
بررسی خطر تجمع گاز متان در تولید بالای زغال از جبهه‌کار به کمک مدل‌سازی CFD و ارائه راهکارهای مناسب برای حل این مشکل به کمک مدل‌سازی CFD	Creedy and Clarke (1992)
بررسی الگوی جریان هوا، متان و گردوغبار به وسیله مدل‌سازی CFD در جبهه‌کاری که ماشین حفار پیوسته در آن کار می‌کند و استفاده از نتایج آن برای طراحی تهویه کمکی	Heerden and Sullivan (1993)
در این مطالعه به بررسی چگونگی توزیع گردوغبار و سرعت هوا در جبهه‌کار زغال استخراجی به روش جبهه‌کاربلند با کمک مدل‌سازی 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 مدل‌سازی CFD آتش‌سوزی معدن انجام شده و پس از شناسایی نقاط خطر آفرین راه‌کارهایی جهت مهار دقیق آتش ارائه شده است.	Lee (1994)
در این مطالعه مدل‌سازی CFD بخشی از معدن زیرزمینی که پیشروی به کمک تهویه فرعی صورت می‌گیرد 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 مدل‌سازی CFD و داده‌های تحقیقات Uchino and Inoue (1997) و بررسی توزیع متان در جبهه‌کار در حال پیشروی.	Moloney et al. (1998)
تهیه مدل CFD جهت بررسی جریان متان از میان لایه‌هایی با نفوذپذیری بالا در اطراف جبهه‌کار زغال که به روش جبهه‌کاربلند استخراج می‌شود.	Tomata et al. (1999)

موضوع تحقیق	محقق (محققین)
<p>شبهه سازی سیستم تهویه و آتش سوزی در تأسیسات زیرزمینی با مدل MFIRE در این مقاله بررسی شده است. هدف این مطالعه راه اندازی یک سیستم تهویه اضطراری برای به حداقل رساندن آسیبها و فراهم ساختن یک محیط امن است.</p>	L.H. Cheng and atc
<p>از آزمایش گاز شاخص جهت بهینه سازی چال های گازکشی و افزایش ایمنی و کنترل میزان گاز متان در ناحیه تخریب استفاده شده است. در این مطالعه به تعداد هفت بار نقطه رهاسازی گاز شاخص (SF6) در مسیر اصلی هوا بوده و محل اندازه گیری گاز شاخص پل های استخراج شده انتخاب شده است.</p>	Mucho et al. (2001)
<p>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.</p>	Hargreaves (2007)
<p>استفاده از آزمایش گاز شاخص جهت تعیین ضریب پخش متان و هوای تازه و بررسی نشت هوا در قسمت های موزد مطالعه استفاده شده است.</p>	ARPA et al (2008)
<p>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.</p>	Yuan and smith (2008)
<p>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</p>	Ren and Balusu (2010)

موضوع تحقیق	محقق (محققین)
<p>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.</p>	Diego et al. (2011)
<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 می تواند در این شرایط یک ابزار مفید برای شناسایی و اولویت بندی نجات افراد باشد. در این پروژه ی تحقیقاتی در یک معدن فرضی در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است و برای حالت های مختلف سیستم تهویه مدل هایی تهیه شده است. و نتایج به دست آمده از مدل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.</p>	Domingo et al. (2011)
<p>در این مقاله عملکرد یک سیستم تهویه طبیعی به کمک مدل سازی CFD و تونل بادی که به مقیاس ۱:۱۰ تهیه شده یا اختصاص مقادیر مختلف سرعت برای جریان هوا بررسی شده است.</p>	Sasmito et al. (2013)
<p>در این مطالعه که در یک معدن زغالسنگ که با روش اتاق و پایه استخراج صورت می گرفت روش های جهت بهبود سیستم تهویه حاکم بر معدن بر پایه مدل سازی CFD ارائه شده است. در این مطالعه ویژگی های مختلف مرتبط با سیستم تهویه مانند حذف آلاینده ها و سرعت هوا در نظر گرفته شده است. تمرکز مطالعه در دو تونل عمود بر لایه بوده است که پیشروی مناسب بوده و حالت های مختلف تهویه جهت حذف متان مورد بررسی قرار گرفته است. مزایا و محدودیت های هر یک نه تنها از نظر کیفیت و کمیت، بلکه از نظر افت فشار کلی که نشان داده شده است و هزینه های مرتبط به سیستم تهویه مطبوع مورد بحث و مقایسه قرار گرفته است.</p>	Guang et al. (2013)

موضوع تحقیق	محقق (محققین)
<p>بیان این نکته که یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی که در امر تهویه و ایمنی معادن در نظر گرفته شود نحوه پخش شدن گازهای مزاحم و خطرناک است. این فاکتور میزان گسترش طولی گازها و میزان معلق ماندن ذرات در هوا را در شبکه معدن تعیین می‌کند. این تحقیق به کمک مدل‌سازی عددی CFD و طراحی گاز شاخص به دنبال تعیین ضریب پخش (دیفیوژن) گازها است.</p>	<p>Widiatmojo (2014)</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>
<p>بررسی نحوه‌ی توزیع متان و جریان هوا به کمک مدل‌سازی CFD در یک تونل معدنی که از نقاط متعدد و متفاوتی متان به داخل تونل نفوذ می‌کند. شرایط مختلفی که ممکن از اتفاق بیفتد شبیه‌سازی و بررسی شده است و در بخش نتیجه‌گیری بیان شده که توزیع و غلظت متان به تعداد و محل نقاطی که از آن‌ها متان وارد تونل می‌شود بستگی دارد.</p>	<p>Ren et al. (2014)</p>
<p>در پروژه‌های فوق‌العاده بزرگ زیرزمینی در چین برای پارامترهای سیستم تهویه از استانداردهای مربوط به فضاهای متوسط استفاده می‌شود. در این تحقیق به کمک مدل‌سازی 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، <math>O_2</math>، <math>CO</math> و درجه حرارت هوا بررسی کردند. 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، <math>O_2</math>، و درجه حرارت هوا ایجاد نمی‌کند ولی این میزان سرعت هوا برای کنترل میزان <math>CO</math> در حد استاندارد کافی نیست.</p>	<p>Ming et al. (2016)</p>

بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که با پیشرفت تکنولوژی گام‌های موثری در زمینه مشکلات موجود در صنعت معدنکاری برداشته شده است که یکی از این موارد استفاده از علم دینامیک سیالات محاسباتی در قالب نرم‌افزارهای صنعتی نظیر FIUENT برای حل مشکلات موجود در مسیر تهویه هوای معدن است. استفاده از نرم‌افزارهای CFD برای بررسی مواردی مانند شناسایی نواحی مستعد خودسوزی، بررسی حریق در معادن، بررسی خطر تجمع گاز متان، بررسی تهویه کمکی و... کمک زیادی برای بالا بردن ضریب ایمنی محیط کاری بخصوص در معادن زیرزمینی کرده است.

## ۹-۱- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل است که خلاصه هر یک از آن‌ها به صورت زیر است

فصل اول- کلیات: در این فصل به بیان اهمیت و ضرورت این مطالعه پرداخته می‌شود 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 می‌کند و حل یک مسئله به وسیله مدل‌سازی CFD چگونه صورت می‌گیرد. در ادامه درمورد آزمایش گاز شاخص و ملزومات آن بحث شده است.

فصل سوم- مدل‌سازی CFD محل آزمایش: در این فصل گام‌به‌گام مراحل ساخت مدل CFD طی

می‌شود

فصل چهارم- آزمایش گاز شاخص: در این فصل آزمایش گاز شاخص توضیح داده می‌شود.

فصل پنجم- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

# فصل دوم : معایم تحقیق



## ۲-۱- مقدمه

حفظ و صیانت از نیروی شاغل در هر حرفه نخست مستلزم شناخت و ارزیابی خطرات کاری مشمول آن حرفه و در ادامه آن ارائه راهکارهای عملیاتی برای پیشگیری و کنترل این خطرات است. خطرات کار در معادن زیرزمینی به دلیل شرایط ناشی از محدودیت فضا، آلاینده های محیطی، پتانسیل آتش سوزی و انفجار، کنترل لایه ها و پایداری تونل ها و استفاده از ماشین آلات در مکان های بسته، توجه خاص به همه عوامل تاثیرگذار در ایمنی عملیاتی را طلب می کند. علیرغم سوابق تاریخی حوادث در این بخش، به دلیل نیاز مبرم جوامع و تقاضای شدید مواد معدنی در بخش صنعت و ساختمان، نه تنها از میزان تقاضا برای استخراج کاسته نشده است، بلکه رشد روزافزون آن را نیز سبب شده است. از این رو استفاده از علوم مختلف و ابزار جدید برای بهبود شرایط محیط کاری امری ضروری به نظر می رسد.

علم دینامیک سیالات محاسباتی به صورت گسترده ای در تهویه معادن کاربرد داد که از جمله آن ها می توان به کاربرد آن در کنترل میزان متان حاضر در محیط کار، کنترل آتش سوزی، مباحث مرتبط با انفجار، کنترل گردوغبار، خودسوزی زغالسنگ، فراوری مواد معدنی، بررسی ناحیه تخریب و بالا بردن کارایی سیستم تهویه اشاره کرد.

در این فصل در ابتدا مبانی برنامه CFD بیان می شود و در ادامه بخش های مختلف برنامه بطور کامل توضیح داده می شود. سپس معادلات حاکم بر جریان سیال که شامل معادله های بقای جرم، معادله ی اندازه حرکت، معادله ی انرژی و معادله ی ناویر- استوکس و همچنین مدل آشفستگی Standard k-ε بررسی شده و در انتهای فصل آزمایش گاز شاخص و جزییات انجام آن بصورت جامع توضیح داده می شود.

## ۲-۲- مبانی برنامه CFD

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
- حل کننده
- پس پردازنده

در ادامه هر یک از این اجزاء را در درون یک برنامه CFD مورد بررسی قرار می‌گیرند (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 می‌شود (شجاعی فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

- تعریف هندسه ناحیه مورد نظر: میدان محاسباتی
- تولید شبکه یا تقسیم به بخش‌های کوچک
- انتخاب مجموعه پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی که باید مدل شوند.
- تعریف خواص سیال
- تشخیص و تعریف شرایط مرزی لازم در سلول‌هایی که منطبق و یا در تماس با مرز محدوده می‌باشند.

در صنعت بیش از ۵۰٪ زمان صرف شده برای پروژه CFD صرف تعریف هندسه محدوده و تولید شبکه می‌شود. در حال حاضر برای به حداکثر رساندن بهره‌مندی کاربران CFD، اغلب برنامه‌های مهم شامل فصل مشترک با نرم‌افزارهایی واسطه نظیر CAD بوده و یا از امکاناتی برای ورود اطلاعات از سطح سازهای تخصصی و تولیدکننده‌های شبکه برخوردارند (شجاعی‌فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

#### الف - تولید شبکه

یکی از مسائل اصلی در حل عددی معادلات با مشتقات جزئی ایجاد شبکه‌بندی مناسب است. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می‌توان حل یک سیستم معادلات دیفرانسیل را تا حد زیادی ساده نمود و بالعکس انتخاب نامناسب محل نقاط شبکه می‌تواند باعث ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات شود (شجاعی‌فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

سابقاً روش تفاضل محدود فقط برای مسائلی استفاده می‌شد که این توانایی وجود داشت تا سیستم مختصات مناسبی در آن‌ها اختیار شود چراکه معادلات حاکم را در این سیستم می‌توان حل کرد. هم‌زمان با پیشرفت در محاسبه میدان‌های پیچیده، نگرش‌ها جهت انتقال دامنه فیزیکی به دامنه محاسباتی بکار گرفته شد. برای مثال سطح جسم را می‌توان همانند یک لایه در صفحه محاسباتی در نظر گرفت و به راحتی به عنوان شرایط مرزی سطحی بکار برد. عموماً تبدیلات طوری مورد استفاده قرار می‌گیرند که یک فضای شبکه‌ای یکنواخت و همگن را ایجاد می‌نمایند. درحالی‌که نقاط در فضای فیزیکی همگن نیستند (شجاعی‌فرد و نورپور، ۱۳۷۹).

مسئله ایجاد شبکه در حقیقت تعیین یک نگرشی است که نقاط شبکه را از دامنه فیزیکی به دامنه

محاسباتی می‌برد. شرایط لازم برای چنین نگرشی عبارت‌اند از

(۱) نگرش می‌بایست یک‌به‌یک باشد.

۲) خطوط شبکه می‌بایستی صاف باشند و مشتقات پیوسته‌ای را ایجاد نمایند.

۳) نقاط شبکه بایستی به اندازه‌ای به هم نزدیک باشند که خطاهای زیادی را ایجاد نکند.

۴) از انحنای زیاد خطوط گره‌ها باید جلوگیری شود.

ایجاد شبکه مناسب در حالت یک‌بعدی تقریباً ساده است. توابع زیادی وجود دارند که می‌توانند برای ایجاد شبکه به نحو مناسبی مورد استفاده قرار گیرند. در حالت یک‌بعدی مسائل مرزی پیچیده ممکن است اتفاق نیافتد، به همین دلیل بیشتر تلاش‌ها در زمینه ایجاد شبکه در حالت دوبعدی انجام می‌شود. ایجاد شبکه در حالت سه‌بعدی بسیار پیچیده است که امروزه کامپیوترهای قوی و برنامه‌های کامپیوتری مناسب این مشکل را ساده کرده‌اند. امروزه به کمک نرم‌افزارها می‌توان شبکه‌های سه‌بعدی مناسبی را ایجاد نمود. در این مطالعه از نرم‌افزار ANSYS Meshing برای شبکه‌بندی مدل استفاده شده است. فرایند شبکه‌بندی در این نرم‌افزار به ترتیب شامل مراحل زیر است (توحیدی، ۱۳۹۳).

۱) تنظیم روش شبکه‌بندی

۲) تعیین تنظیمات شبکه‌بندی کلی

۳) تعیین تنظیمات شبکه‌بندی محلی

۴) پیش‌نمایش و ایجاد شبکه







۵) چک کردن کیفیت شبکه

در ANSYS Meshing شش روش برای شبکه‌بندی اجسام سه‌بعدی و چهار روش برای اجسام

دوبعدی وجود دارد که در جدول (۲-۱) و شکل (۲-۱) آورده شده است.

جدول (۱-۲) روش‌های شبکه‌بندی (توحیدی، ۱۳۹۳).

شبکه سه‌بعدی	شبکه دوبعدی
Automatic	Automatic
Multi Zone	Triangles
Hex Dominant	Uniform Quad /Tri
Tetrahedron	Uniform Quad
Sweep	
Cut Cell	

مش سه‌بعدی		مش دوبعدی	
Hexahedral		Quadilateral (Quad)	
Tetrahedral			
Prismatic(wedge)		Triangle (Tri)	
Pyramidal			

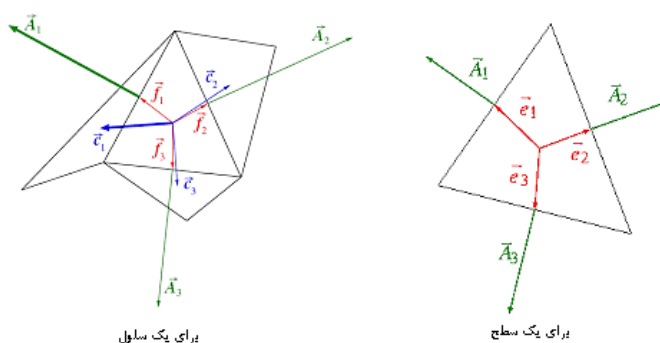
شکل (۱-۲) انواع شبکه در حالت دوبعدی و سه‌بعدی (توحیدی، ۱۳۹۳).

### ب- کیفیت شبکه

شبکه‌بندی مناسب در کاهش خطاهای حل گر 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 را دارد. ANSYS Meshing کیفیت شبکه را

با استفاده از ابزارهای مختلف کمی می‌نماید که مهم‌ترین آن‌ها معیار کیفیت تعامد<sup>۱</sup> و معیار کشیدگی<sup>۲</sup> هستند. بازه کیفیت تعامد بین صفر تا یک است که مقدار صفر، بیانگر بدترین و مقدار یک، بیانگر بهترین حالت است. معیار کیفیت تعامد با استفاده از بردار نرمال سطح ( $A_i$ )، بردار مرکز سلول به مرکز هریک از سلول‌های مجاور ( $C_i$ ) و بردار مرکز سلول به هر وجه ( $f_i$ ) برای یک سلول به صورت مقدار مینیمم  $\frac{A_i \cdot c_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|}$  و  $\frac{A_i \cdot f_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|}$  برای هر وجه  $i$  محاسبه می‌شود. این معیار برای وجه به صورت مقدار مینیمم  $\frac{A_i \cdot e_i}{|\vec{A}_i| |\vec{e}_i|}$  برای هر لبه  $i$  محاسبه می‌شود که  $e_i$  برداری از مرکز وجه با مرکز لبه است. در جدول (۲-۲)

نحوه ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از روش کیفیت تعامد آورده شده است (توحیدی، ۱۳۹۳).



شکل (۲-۲): نمایش بردارها و سلول در محاسبه کیفیت تعامد (توحیدی، ۱۳۹۳).

جدول (۲-۲) ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار تعامد (توحیدی، ۱۳۹۳).

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

<sup>1</sup>- Orthogonal Quality

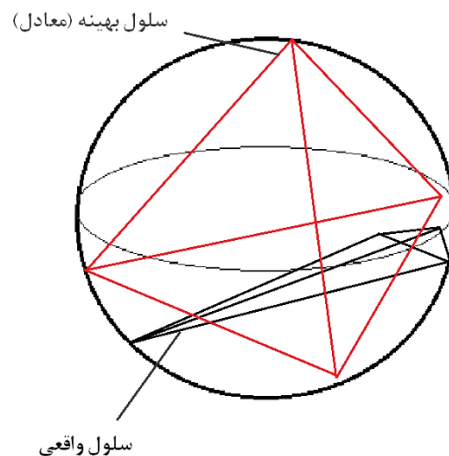
<sup>2</sup>- Skewness

معیار کشیدگی تعیین می‌کند که یک شبکه‌بندی چقدر به ایده آل نزدیک است. دو روش برای تعیین کشیدگی وجود دارد؛ روش انحراف حجمی معادل<sup>۱</sup> و روش انحراف زاویه نرمال شده<sup>۲</sup> (توحیدی، ۱۳۹۳).

روش انحراف حجمی معادل تنها برای المان‌های مثلثی و Tetrahedrons اعمال می‌شود در این روش کشیدگی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{کشیدگی} = \frac{\text{اندازه سلول} - \text{اندازه بهینه سلول}}{\text{اندازه بهینه سلول}}$$

اندازه بهینه سلول عبارت است از اندازه یک سلول متساوی‌الاضلاع با همان شعاع محاطی.



شکل (۲-۳) توصیف سلول واقعی و سلول بهینه (توحیدی، ۱۳۹۳).

در روش انحراف زاویه نرمال کشیدگی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{کشیدگی} = \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (1-2)$$

<sup>1</sup>- Equilateral Volume Deviation

<sup>2</sup>- Normalized Angle Deviation

در معادله فوق  $\theta_{max}$  بزرگ‌ترین زاویه در سطح یا سلول،  $\theta_{min}$  کوچک‌ترین زاویه در سلول و  $\theta_e$  زاویه معادل سطح یا سلول است ( $\theta_e$  برای مثلث و حرم ۶۰ درجه و برای مکعب و چهارضلعی ۹۰ درجه است). طیف ارزیابی کشیدگی در جدول ۴-۴ آورده شده است (توحیدی، ۱۳۹۳).

جدول (۳-۲) ارزیابی کیفیت شبکه با استفاده از معیار کشیدگی (توحیدی، ۱۳۹۳)

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

#### پ- استقلال از شبکه

خیلی مهم است که اطمینان حاصل شود که شبکه‌بندی انجام‌شده موجب جواب صحیح خواهد شد. برای اعتماد به نتیجه باید حل، مستقل از شبکه باشد. به این معنی که حل با اصلاح شبکه تغییر نکند. برای بررسی استقلال از شبکه باید مراحل زیر طی شود (توحیدی، ۱۳۹۳):

- ۱) شبکه ریزتر ایجاد شود.
- ۲) به مرحله اعمال شبکه بازگشته و به صورت دستی شبکه تنظیم شود.
- ۳) از توانایی سازگاری مبتنی بر حل در ANSYS FLUENT استفاده شود.
- ۴) لیست‌های سازگاری شبکه ایجاد شود.
- ۵) محاسبات تا همگرایی انجام شود.
- ۶) نتایج حاصله روی مش‌های متفاوت مقایسه شود.
- ۷) فرایند در صورت نیاز تکرار شود.



## ت- 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 به کاررفته 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):

- 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>

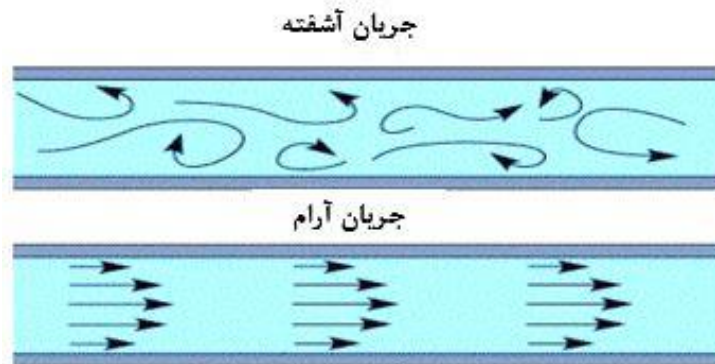
جدول (۲-۴) طبقه‌بندی شرایط مرزی (دهقانی، ۱۳۸۷)

دسته‌بندی	نوع شرط مرزی
سطح	محور، تقارن، وردی فشار، خروجی فشار، ورودی سرعت، دیوار، فن ورودی، فن خروجی،
سطوح دوطرفه	فن، داخلی، افزایش فشار، دیوار، خنک‌کننده
تناوبی	تناوبی
سلول‌ها	جامد، سیال، متخلخل

<sup>1</sup> Interior

### ث- 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).



شکل (۲-۴) 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 (۲-۵) هستند.

<sup>1</sup> Fluctuation

جدول (۵-۲) مدل‌های آشفتگی موجود در Ansys Fluent (توحیدی، ۱۳۹۳).

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

در جدول نشان داده شده از بالا به پایین هزینه، زمان محاسبات، دقت و کارایی افزایش پیدا می‌کند. متأسفانه 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-ε 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 Standard k-ε، RNG K-ε و Realizable K-ε است. در مدل پایه دو معادله‌ای Standard k-ε،

معادله‌هایی برای محاسبه دو پارامتر  $k$  و  $\varepsilon$  حل می‌شوند. این مدل، مدل  $k-\varepsilon$  پیش‌فرض است. ثوابت 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  $k-\varepsilon$  یک نوع مدل مشتق شده از مدل Standard  $k-\varepsilon$  است. معادله‌ها و ضرایب این مدل به صورت تحلیلی به دست آمده و تغییرات قابل‌توجهی در معادله  $\varepsilon$  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 حرکت چرخشی متوسط، گردابه‌ها و جریان‌های محلی گذار مناسب است Realizable  $k-\varepsilon$  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 Standard  $k-\varepsilon$  استفاده شده است.

## ۲-۲-۲- حل‌کننده

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

<sup>1</sup> Pressure-based

<sup>2</sup> Density-based

<sup>3</sup> Explicit

<sup>4</sup> Implicit

زمانی دارد. دو الگوریتم منفک<sup>۱</sup> و کوپل<sup>۲</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>۳</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.

## ۲-۲-۳- پس‌پردازنده

مقدار زیادی از کار در محیط پس‌پردازنده صورت می‌گیرد. به دلیل افزایش تنوع نیازهای مهندسی، بسیاری از آن‌ها دارای توانایی ترسیم 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

---

<sup>1</sup> Segregated

<sup>2</sup> Coupled

<sup>3</sup> Non-iterative Transient Advancement

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:

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

برای سیالات تراکم ناپذیر:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3-2)$$

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 بقا 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

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (4-2)$$

• مولفه y معادله اندازه حرکت

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (5-2)$$

• مولفه y معادله اندازه حرکت

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + S_{Mz} \quad (6-2)$$

که در این روابط:

$$\tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{zx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}, \tau_{zy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{zz} = \text{مولفه‌های تنش روی المان سیال}$$

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

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

### 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):

$$\rho \frac{DE}{Dt} = -\text{div}(pu) + \left[ \begin{aligned} & \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \\ & \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \end{aligned} \right] + \text{div}(k \text{ grad } T) + S_E \quad (7-2)$$



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 در زمینه فناوری رایانه در چند دهه 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).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div} (\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (۸-۲)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div} (\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (۹-۲)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div} (\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (۱۰-۲)$$

$$\mu = \text{ضریب لزجت}$$

<sup>۱</sup> Navier-Stokes

## 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).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (۱۱-۲)$$

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

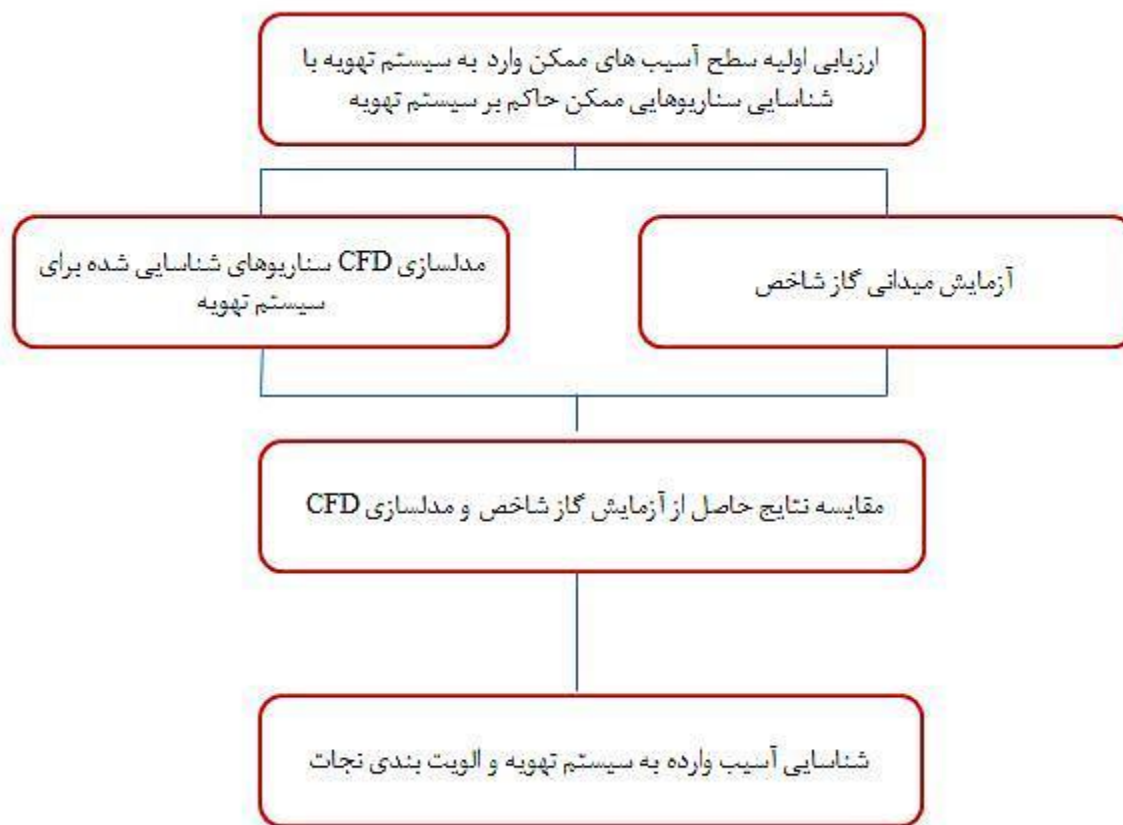
$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon U) = \text{div} \left[ \frac{\mu_t}{\partial_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

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

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

## ۲-۴- اولویت‌بندی نجات پرسنل در هنگام حادثه

هدف از این مطالعه توسعه یک روش جدید است که می‌تواند سطح آسیب‌های وارده به سیستم تهویه را با استفاده از یک گاز شاخص و مدل‌سازی CFD مشخص کند. یک شمای کلی از این روش را می‌توان در نمودار نشان داده شده در شکل (۲-۵) مشاهده کرد.



شکل (۵-۲) شمای کلی از نحوه اولویت بندی نجات پرسنل به کمک مدل سازی CFD و آزمایش گاز شاخص

پس از یک رویداد پیش بینی نشده که کنترل روی سیستم تهویه را از بین برده، شرایط به طور کامل تغییر کرده است و باید سطح آسیب و شرایط حاکم بر سیستم تهویه بر پایه اطلاعات در دسترس برآورد شود. در این مطالعه سعی بر این است که با کمک مدل سازی CFD و آزمایش گاز شاخص اولویت بندی نجات پرسنل محبوس در محل حادثه انجام شود.

همانطور که در شکل (۵-۲) مشخص است اولین قدم ارزیابی اولیه سطح آسیب های ممکن وارد به سیستم تهویه با شناسایی حالت های ممکن حاکم بر سیستم تهویه است. به این مفهوم که در این بخش از فضای زیرزمینی چه شرایطی ممکن است بر سیستم تهویه حاکم شود و جریان هوا چگونه از مسیر خود منحرف شود. در ادامه مسیر مطالعه در ابتدا برای شرایط نرمال سیستم تهویه و بعد برای هر یک از حالت

حالت‌های تهویه‌ای، یک آزمایش میدانی گاز شاخص و یک مدل‌سازی CFD انجام می‌شود. در نهایت از مقایسه نتایج مدل شبیه‌سازی شده CFD و گاز شاخص در سایت کاری می‌توان سطح عمومی آسیب به سیستم تهویه را مشخص کرد.

## ۲-۴-۱- آزمایش گاز شاخص

آزمایش گاز شاخص عبارت است از آزاد کردن یک گاز در یک محل خاص و اندازه‌گیری غلظت آن در محلی دیگر است. روال کلی این آزمایش برای این مطالعه نیز به همین صورت است و هدف از این آزمایش استفاده از نتایج آزمایش میدانی و شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار FLUENT برای کمک به اولویت‌بندی نجات پرسنل حادثه دیده است. اما جزئیاتی در ارتباط با انجام این آزمایش وجود دارد که نمی‌توان آن را نادیده گرفت. این جزئیات عبارتند از:

۱. گازی که به عنوان گاز شاخص استفاده می‌شود باید چه ویژگی‌هایی داشته باشد؟
۲. مناسب‌ترین محل آزادسازی گاز کجای محیط مورد بررسی است؟
۳. گاز با چه نرخ نسبت به زمان (دبی گاز) آزاد شود؟
۴. مدت زمان آزادسازی گاز چقدر است؟
۵. مناسب‌ترین محل نمونه‌گیری گاز کجاست؟
۶. خروجی‌های آزمایش چیست و کاربرد آن چیست؟

## ۲-۴-۱-۱- ویژگی‌های گاز شاخص

گازی که در این آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد

- ✓ در غلظت‌های پایین قابل شناسایی باشد.
- ✓ غیر سمی باشد.
- ✓ به صورت طبیعی در محیط حضور نداشته باشد.
- ✓ با گازهای حاضر در محیط ترکیب نشود (به لحاظ شیمیایی پایدار باشد).

با توجه به ویژگی‌های بیان شده برای گاز شاخص در این مطالعه از گاز متان برای این مطالعه استفاده شد. و تمام ویژگی‌های لازم برای گاز شاخص مورد استفاده در این آزمایش را داشت.

## ۲-۴-۱-۲- تعیین محل ، دبی، مدت زمان و محل نمونه‌گیری گاز شاخص

استناد به نتایج مدل‌های عدی اعتبارسنجی نشده در مطالعات علمی جایگاهی ندارد اما استفاده از آنها تنها به منظور حدس دقیق‌تر برای تعیین یک مقدار اولیه برای شروع یک آزمایش به منظور رسیدن به پاسخ نهایی می‌تواند مفید باشد. در این مطالعه برای طراحی مناسب برای پارامترهای آزمایش گاز شاخص از یک مدل‌سازی اولیه CFD استفاده شده است.

### ● محل آزادسازی

تعیین محل دقیق آزادسازی گاز شاخص در واقع بر پایه آزمایش صحیح و خطا است به این مفهوم که باید با انجام آزمایش‌های زیاد محل مناسب تعیین شود و در مکان انتخاب شده باید علاوه بر اینکه امکان انجام آزمایش گاز شاخص برای تمامی حالت‌های تعریف شده وجود داشته باشد باید این محل به گونه‌ای انتخاب شده باشد که ضمن آزادکردن کمترین میزان گاز شاخص و در کمترین زمان به تمامی اهداف خود

دست پیدا کنیم. از طرفی چون امکان انجام آزمایش‌های زیاد در محل وجود ندارد، در مدل CFD تهیه شده چندین مکان مختلف مورد آزمایش قرار می‌گیرد و چند نقطه محدود برای محل آزادسازی گاز در نظر گرفته شده و آزمایش در محل انجام شده و محل مناسب آزادسازی گاز شاخص انتخاب می‌شود.

#### • دبی گاز شاخص

دبی گاز شاخص باید به اندازه‌ای باشد غلظت گاز شاخص حاضر را در محل نمونه‌برداری در حد تشخیص دستگاه GC باشد.

#### • مدت زمان آزادسازی گاز شاخص

مدت زمانی که گاز شاخص باید با دبی تعیین شده آزاد شود باید به گونه‌ای باشد که اولاً گاز شاخص در محل نمونه‌گیری به حداکثر غلظت خود برسد و ثانیاً باقی ماندن غلظت گاز در بالاترین مقدار خود به اندازه‌ای باشد که بتوان نمونه‌های لازم را جمع‌آوری کرد. برای دستیابی به این هدف از مدل CFD استفاده می‌شود تا حدس اولیه مناسبی در اختیار ما قرار ما قرار بگیرد.

#### • محل نمونه‌گیری گاز شاخص

با توجه به اینکه غلظت گاز شاخص در عرض تونل یکسان نیست باید محلی برای نمونه‌گیری انتخاب شود که بتوان نمونه‌های مناسبی را تهیه کرد. مدل CFD بهترین ابزار برای تعیین این محل است.

## • خروجی آزمایش گاز شاخص

پس از اینکه آزمایش گاز شاخص با پارامترهای مناسب طراحی و اجرا شود خروجی آن برای هر حالت، یک نمودار غلظت نسبت به زمان گاز شاخص است و کاربرد آن زمانی است که ما بخواهیم در شرایط خاص با انجام آزمایش گاز شاخص در محیط معدن حالت حاکم بر سیستم تهویه را با مقایسه نمودار غلظت نسبت به زمان گاز شاخص آزمایش با خروجی‌های مدل‌سازی CFD مشخص کنیم.

### ۲-۵- جمع‌بندی

در این فصل در ابتدا به این موضوع پرداخته شد که CFD چیست و یک برنامه CFD چگونه کار می‌کند و مفاهیم مرتبط با آنها بیان شد. در ادامه معادلات حاکم بر جریان سیال مورد بررسی قرار گرفت و همچنین اهمیت و نحوه اولویت‌بندی نجات پرسنل محبوس در اثر حادثه ذکر شده و آزمایش گاز شاخص و ویژگی‌های گاز مورد استفاده بعنوان گاز شاخص بیان شد. در فصل آینده مدل‌سازی CFD محل مورد مطالعه و چگونگی نجات پرسنل به کمک مدل‌سازی CFD و آزمایش گاز شاخص بیان خواهد شد.

فصل سوم:

مدل سازی CFD سیستم تهویه



### ۳-۱- مقدمه

شرایط کار در معادن زیر زمینی در مقایسه با معادن روباز و صنایع مشکلتر است. در معادن زیرزمینی به علت محدود بودن فضا، فقدان نور کافی، وجود گازهای سمی و قابل انفجار، گرد و غبار، بیماری‌های گوناگون، هجوم آب، ریزش سقف و بسیاری موارد دیگر از جمله عواملی هستند که بهداشت و سلامتی کارکنان و اقتصاد معدن را به مخاطره می‌اندازد.

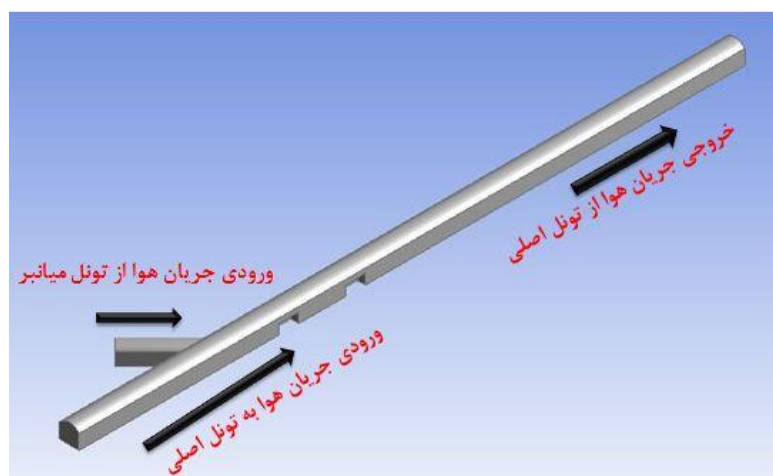
آگاهی از خطرات موجود در معادن و چگونگی پیشگیری و مقابله با آنها موجب می‌شود که راندمان کار و ایمنی افزایش یابد و از میزان حوادث و ضایعات ناشی از عدم توجه به مقررات حفاظتی به نحو چشمگیری کاسته شود.

سالانه در حین استخراج مواد معدنی، تعداد زیادی از کارگران معدن جان خود را از دست می‌دهند. حوادث معدنی می‌توانند دلایل مختلفی داشتند باشند. ریزش دیوارهای معدن، زمین‌لرزه، وقوع سیل، استفاده ناصحیح از ابزار توسط کارگران و نشت گازهای سمی و منفجرشونده از جمله این عوامل هستند. براساس آمارهای موجود بیشتر این مرگ‌ومیرها در کشورهای در حال توسعه اتفاق می‌افتند. در دنیا چین بالاترین میزان مرگ‌ومیر معدنی را دارد. به طور میانگین روزانه ۱۳ نفر در چین در معادن زغال سنگ، جان خود را از دست می‌دهند و ۸۰ درصد مرگ‌ومیرهای مربوط به معدن در کشور چین اتفاق می‌افتد. این در حالی است که این کشور تنها ۳۵ درصد زغال سنگ جهان را تأمین می‌کند. اگرچه چین همواره در جهت بهبود و ایمن‌سازی معادن خود تلاش کرده است، اما آمار تلفات در معادن این کشور همچنان بالاست. آمارهای بالا نشان می‌دهد که اگر در یک محیط زیرزمینی بخصوص معادن زیرزمینی هر لحظه انتظار یک اتفاق ناگوار را داشته باشیم چیز عجیبی نیست. لذا در گام اول باید به حفظ ایمنی محیط کار اندیشید و در گام بعد برای هرگونه اتفاقی آمادگی لازم را داشت. امروزه گستره علم مهندسی نه تنها در بخش صنعت بلکه در بخش معدن نیز جای خود را یافته است. مجموعه نرم‌افزار ANSYS توانایی حل

مسائل مکانیک جامدات، سیالات، عمران، انتقال حرارت، فیزیک و ... را داراست و یک نرم‌افزار چندمنظوره به شمار می‌رود. در این فصل بخش مورد مطالعه به کمک این نرم‌افزار مدل‌سازی شده و پس از حل مسئله و اعتبارسنجی مدل، آزمایش گاز شاخص هم بصورت میدانی و هم در نرم‌افزار انجام می‌شود. و نتایج حاصل از آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و جهت کمک به اولویت‌بندی نجات پرسنل در هنگام حادثه مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

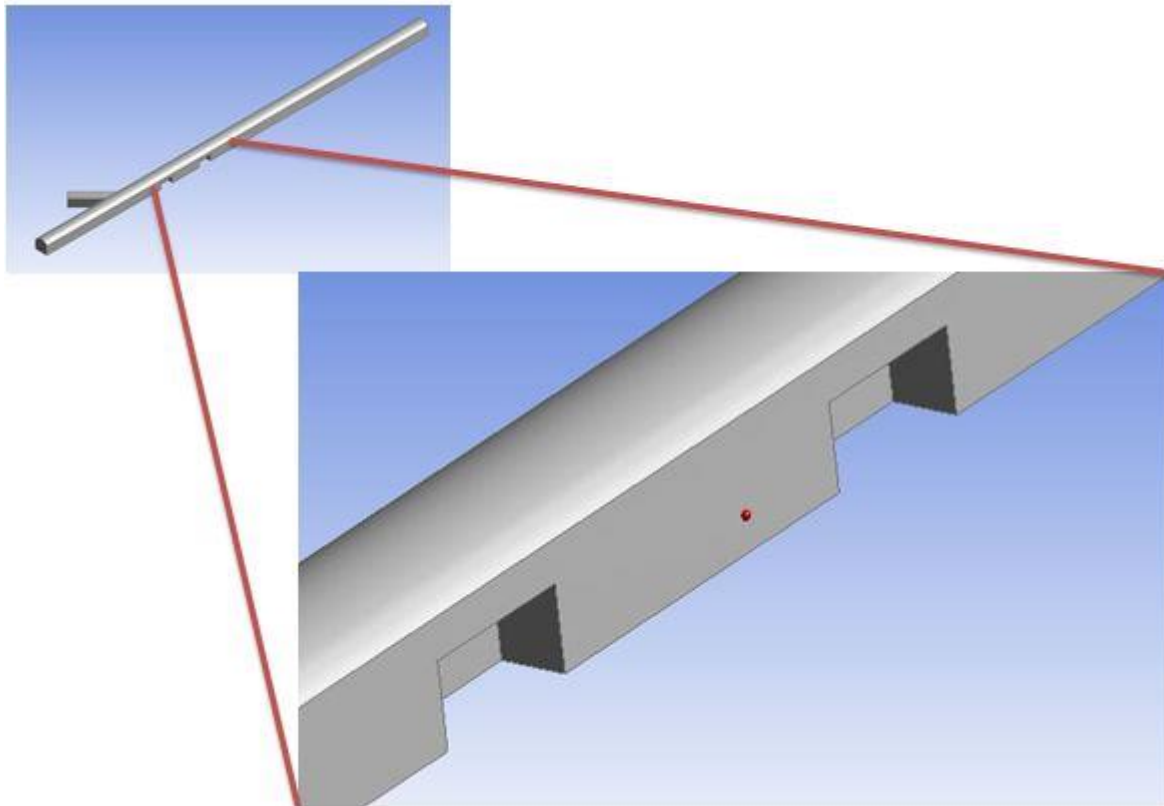
### ۳-۲- محل انجام آزمایش

بخش مدل‌سازی شده قسمتی از معدن زیرزمینی نمک گرمسار است. همانطور که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است این بخش شامل تونلی به طول ۱۵۰ متر است که یک تونل جانبی به با زاویه ۳۶ درجه به آن متصل است. سطح مقطع تونل اصلی ۸/۱ مترمربع سطح مقطع تونل جانبی ۵/۷ مترمربع است. لازم به ذکر است که بخش مدل‌سازی شده قسمتی از شبکه سیستم تهویه معدن است و بخش‌های ورودی و خروجی مدل ادامه‌دار هستند.



شکل (۳-۱) طرح اولیه بخش تونل ورودی (فلش‌های سیاه جهت جریان را نشان می‌دهند)

در محل انجام آزمایش در تونل اصلی تجهیزاتی موجود بود که بدلیل تاثیرگذاری آنها در جریان هوا به عنوان مناطق نفوذناپذیر جامد در نظر گرفته شد. شکل (۲-۳) موانع موجود در مسیر جریان را بصورت بزرگنمایی شده نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳) موانع موجود در مسیر جریان واقع در تونل اصلی

مطابق شکل (۱-۳) در محل انجام آزمایش دو مسیر ورود هوا و یک مسیر خروج هوا وجود دارد. ورودی اول در ابتدای تونل اصلی قرار دارد که حجم هوای ورودی با سرعت  $0.8$  متر برثانیه معادل  $6/48$  مترمکعب برثانیه است. مسیر دوم ورود هوا از تونل جانبی است که سرعت هوا از آن  $0.5$  متر برثانیه بوده و حجم هوای ورودی از آن معادل  $2/85$  مترمکعب برثانیه است. نکته‌ای که باید در مدل‌سازی جریان هوا در نظر گرفته شود این است که با توجه به شبکه سیستم تهویه حجم هوای ورودی به تونل اصلی دو حالت دارد. به این صورت که حجم هوای ورودی به مدل از ورودی تونل اصلی یا  $6/48$  مترمکعب برثانیه و یا  $3$

مترمکعب برثانیه است. همچنین جریان هوای ورودی از تونل جانبی بصورت دائم نیست و ممکن است در حالت‌های خاص حجم هوای ورودی آن صفر شود.

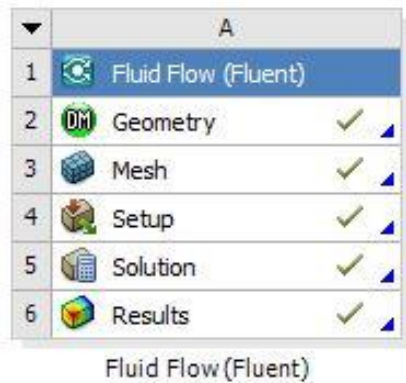
با توجه به موارد بیان شده و مشاهدات میدانی چهار حالت تهویه‌ای بر بخش مدل شده حاکم است. بعنوان مثال اولین حالت تهویه‌ای به این صورت است که شدت جریان هوای ورودی از تونل اصلی ۶/۴۸ مترمکعب برثانیه بوده و جریان هوا از تونل میانبر برقرار باشد. تمامی حالت‌های تهویه‌ای در جدول (۱-۳) آمده است.

جدول (۱-۳) حالت‌های تهویه‌ای حاکم بر بخش مدل‌سازی شده

شماره حالت	حالت تهویه‌ای	سرعت هوا در تونل اصلی (متر بر ثانیه)	سرعت هوا در تونل میانبر (متر بر ثانیه)
۱	حجم هوای تونل اصلی ۶/۴۸ مترمکعب برثانیه است جریان هوا در تونل میانبر برقرار است	۰/۸۰	۰/۵۰
۲	حجم هوای تونل اصلی ۶/۴۸ مترمکعب برثانیه است جریان هوا در تونل میانبر برقرار نیست	۰/۸۰	۰
۳	حجم هوای تونل اصلی ۳ مترمکعب برثانیه است جریان هوا در تونل میانبر برقرار است	۰/۳۷	۰/۵
۴	حجم هوای تونل اصلی ۳ مترمکعب برثانیه است جریان هوا در تونل میانبر برقرار نیست	۰/۳۷	۰

### ۳-۳- مدل‌سازی CFD محدوده انتخاب شده

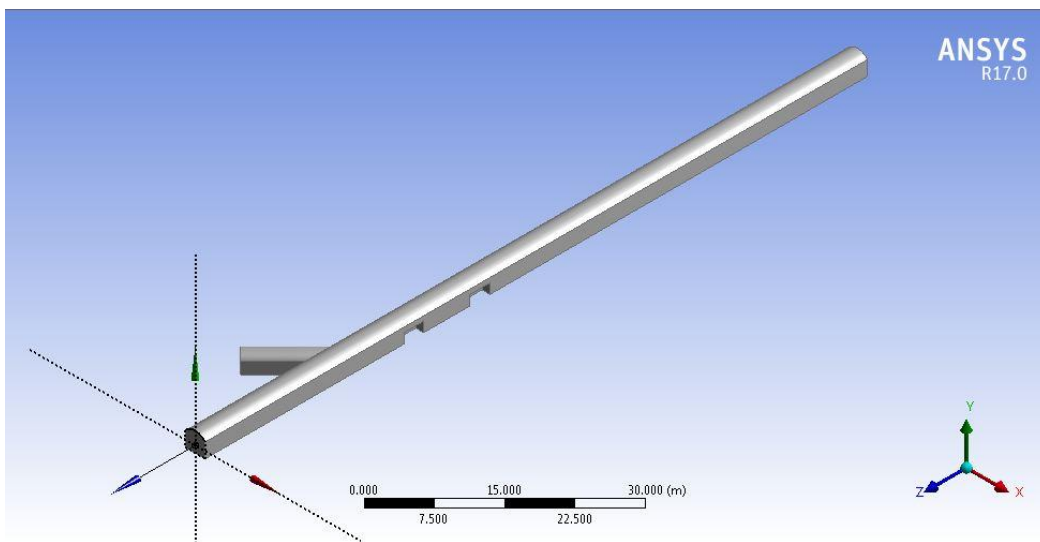
پیش‌تر بیان شد که در این مطالعه از نرم‌افزار Ansys Fluent برای تهیه مدل CFD استفاده شده است. روند مدل‌سازی در این نرم‌افزار مطابق شکل (۳-۳) است. که ابتدا هندسه بخش مدل‌سازی شده تهیه شد سپس هندسه شبکه‌بندی شد در ادامه مسئله حل و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل (۳-۳) روند مدل‌سازی در نرم‌افزار Ansys Fluent

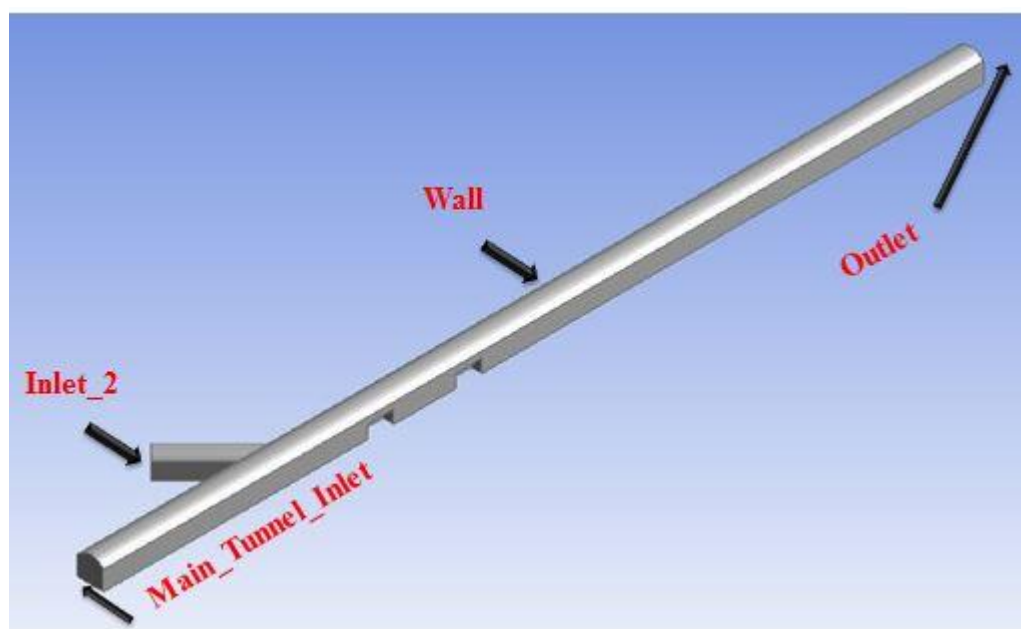
### ۳-۳-۱- مدل‌سازی هندسه محل مورد مطالعه

همانگونه که در فصل دوم بیان شد گام اول در مدل‌سازی CFD ساخت هندسه بخشی است که مدل‌سازی می‌شود. پس از تهیه کروکی و جزئیات نقشه محل مورد مطالعه از جمله طول تونل‌ها، سطح مقطع هر یک از تونل‌ها، زوایای تونل‌ها با هم و شیب تونل‌ها و شناسایی عوامل تاثیرگذار بر جریان هوا (موانع موجود در مسیر)، به کمک نرم‌افزار ANSYS DesignModeler هندسه مورد نیاز برای ادامه حل مسئله تهیه شد. هندسه ساخته شده مطابق شکل (۳-۴) است.



شکل (۳-۴) هندسه تهیه شده توسط نرم‌افزار ANSYS DesignModeler از بخش مدل‌سازی شده

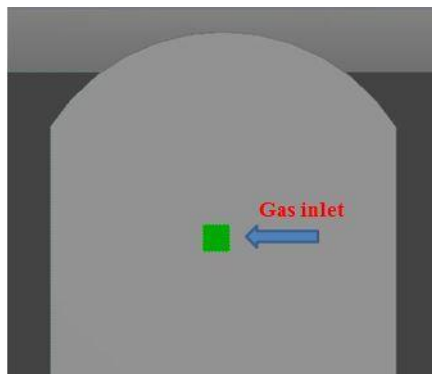
در حل مسئله به کمک نرم‌افزار ANSYS 17 پیش از شبکه‌بندی هندسه ساخته شده بهتر است تمامی سطوح دسته‌بندی و نامگذاری شوند تا پس از شبکه‌بندی عملیات نسبت دادن شرایط مرزی راحت‌تر انجام شود. به این صورت که هریک از سطوحی که جریان هوا از آن وارد مدل می‌شود را بصورت جداگانه عموماً با نام Inlet، سطوحی که جریان هوا از آن از مدل خارج می‌شود را بصورت جداگانه عموماً با نام Outlet و سطوحی که ویژگی‌های مشترکی دارند مانند دیوارها (wall) را در یک دسته قرار می‌گیرند. در این هندسه سطح ورودی جریان هوا به تونل اصلی Main\_Tunnel\_Inlet، سطح ورودی جریان هوا از تونل جانبی Inlet\_2، سطح خروجی مجموع جریان هوای ورودی Outlet و مابقی سطوح به عنوان دیوار با نام Wall در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۳-۵) نامگذاری مرزهای هندسه مدل را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵) نامگذاری سطوح هندسه مدل

هندسه تعریف شده در واقع هندسه محل آزمایش است ولی برای تعریف آزمایش گاز شاخص در محیط نرم‌افزار، در هندسه تعریف شده باید یک سطح ورودی برای وارد شدن گاز به داخل مدل در نظر

گرفته شود. در ادامه جزئیات بیشتری درباره نحوه انتخاب محل قرارگیری ورودی گاز شاخص بیان خواهد شد و در شکل (۶-۳) محل قرارگیری آن که در سطح ورودی هوا از تونل جانبی است نشان داده شده است. سطح مقطع ورودی گاز شاخص ۰/۰۴ مترمربع و سرعت ورود گاز ۲۰ متربرثانیه بوده و تحت عنوان gas\_inlet نامگذاری شده است.



شکل (۶-۳) محل قرارگیری ورودی گاز شاخص

### ۲-۳-۳- شبکه‌بندی هندسه محل مورد مطالعه

دومین قدم در ساخت یک مدل CFD شبکه‌بندی هندسه تهیه شده است. همانطور که در فصل دوم بیان شد شبکه‌بندی‌ای مناسب و قابل قبول است که اولاً مقادیر اختصاص یافته به معیارهای کیفیت تعامد و کشیدگی آن در بازه‌ای قابل قبول قرار بگیرد و تایید کند که شبکه‌بندی مناسبی صورت گرفته است و دوماً شرایط نتایج بدست آمده مستقل از شبکه‌بندی باشد. به این مفهوم که با ریزتر شدن شبکه تغییری در جواب نهایی بوجود نیاید. در این مطالعه برای شبکه‌بندی هندسه تهیه شده از روش شبکه‌بندی اتوماتیک استفاده شد، مقادیر مرتبط با معیارهای کیفیت تعامد و معیار کشیدگی قابل قبول بودن کیفیت شبکه را نشان می‌دهند، مقادیر اختصاص یافته به این معیارها و جزئیات شبکه‌بندی هندسه در جدول (۲-۳) آمده است. پس از تایید کیفیت شبکه که مستقل از شبکه بودن جوابها پس از حل مسئله مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳-۳-۳ - حل مسئله جریان با Ansys Fluent

در ادامه مدل‌سازی CFD، شبکه تهیه شده مناسب از هندسه بخش مورد مطالعه به عنوان ورودی حلگر Ansys Fluent مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بخش حلگر مدل آشفتگی و شرایط مرزی مناسب با مسئله انتخاب شده و پس از اختصاص مقادیر اولیه به معادلات، حل مسئله آغاز می‌شود و با هربار حل مسئله مقادیر بدست آمده برای متغیرها به عنوان مقدار اولیه برای حل مجدد معادلات مورد استفاده قرار می‌گیرد و این روند تکرارها آنقدر انجام می‌شود تا اختلاف مقادیر باقیمانده معادلات به مقدار قابل قبول و ثابتی برسد در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود که حل همگرا شده و در گام بعدی به اعتبارسنجی مدل پرداخته می‌شود. در این مطالعه هندسه شبکه‌بندی شده در بخش قبل به عنوان ورودی حلگر Ansys Fluent مورد استفاده قرار گرفت. همانگونه که در فصل دوم بیان شد ساده‌ترین مدل‌های آشفتگی که نسبتاً کامل‌اند، 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). به همین دلیل از این مدل آشفتگی برای حل این مسئله استفاده شد. همچنین شرایط مرزی اختصاص یافته به مدل در جدول (۳-۲) آمده است.

جدول (۳-۲) تنظیمات شبکه‌بندی و حلگر Ansys Fluent برای مدل CFD محل مورد آزمایش

روش شبکه‌بندی	اتوماتیک
میانگین معیار کیفیت تعامد	۰/۸۶
میانگین معیار کشیدگی	۰/۲۲
مدل آشفتگی	Standard $k-\epsilon$
شرط مرزی ورودی‌های جریان	Velocity inlet
شرط مرزی خروجی جریان	Pressure outlet



مسئله بعد ۱۵۰۰ تکرار حل همگرا شد. همگرایی حل به این معنی است که پس از تکرار ۱۵۰۰ ام با ادامه حل، اختلاف باقیمانده‌ها تغییری نکرده 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.

برای اعتبارسنجی مدل CFD پس از حل و بررسی همگرایی، اعتبارسنجی تمامی مدل‌ها با اندازه‌گیری سرعت هوا (برای اعتبارسنجی مدل اصلی) و اندازه‌گیری غلظت گاز آزاد شده (برای اعتبارسنجی آزمایش گاز شاخص در مدل اصلی) صورت گرفته است.

اندازه‌گیری سرعت 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 (۳-۳) بیان شده است.

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

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

### ۳. اندازه‌گیری فشار

واحدهای اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری، میزان خطا و بازه اندازه‌گیری هر یک از واحدهای فشار توسط دستگاه ABH-4225 در جدول (۳-۴) بیان شده است.

<sup>1</sup> m/s  
<sup>2</sup> Km/h  
<sup>3</sup> fpm  
<sup>4</sup> mpf  
<sup>5</sup> knot

جدول (۳-۴) واحدهای اندازه‌گیری فشار توسط دستگاه ABH-4225

خطا	بازه اندازه‌گیری	دقت	واحد اندازه‌گیری
هکتو پاسکال $\pm 1/5$	۱۰ - ۹/۹۹۹	۰/۱	هکتو پاسکال <sup>۱</sup>
هکتو پاسکال $\pm 2$	۱۰۰۰ - ۱۱۰۰	۱	
میلی‌متر جیوه $\pm 1/2$	۷/۵ - ۸۲۵	۰/۱	میلی‌متر جیوه <sup>۲</sup>
اینچ جیوه $\pm 1/2$	۰/۲۹ - ۳۲/۴۸	۰/۰۱	اینچ جیوه <sup>۳</sup>

۴. اندازه‌گیری رطوبت هوا تا ۰.۸٪

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

- فشار/ رطوبت

- فشار/ سرعت

۸. ثبت مقادیر ماکزیمم و مینیمم برای بازخوانی داده‌ها

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

شکل (۷-۳) تصویری از این دستگاه را نشان می‌دهد.

مقادیر سرعت هوا در فواصل ۱۰ متری در تونل اصلی و تونل جانبی هم به کمک دستگاه و هم در مدل CFD اندازه‌گیری و مقایسه شد. بیشترین اختلاف مشاهده شده ۵ درصد بود که این میزان اختلاف در مقادیر واقعی و مقادیر مدل‌سازی شده قابل قبول است.



شکل (۷-۳) دستگاه ABH-4225 وسیله اندازه‌گیری سرعت و فشار هوا

در گام دوم اعتبارسنجی مدل تهیه شده به این صورت است که بعد از رهاسازی در محیط معدن از هوای داخل معدن نمونه‌هایی تهیه شد و به کمک دستگاه کروماتوگراف (GC) غلظت گاز مشخص شده و با خروجی‌های مدل مقایسه شد. بیشترین اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی در مدل، CFD ۴ درصد بود که این میزان اختلاف به دلیل آشفتگی جریان هوا بوده و قابل قبول است. در شکل (۸-۳) دستگاه کروماتوگراف نشان داده شده است.



شکل (۳-۸) دستگاه کروماتوگراف

### ۳-۴- جمع‌بندی

در این فصل درمورد محل مورد مطالعه اطلاعاتی ارائه شد و در درباره تهیه هندسه مدل، شبکه‌بندی و معیارهای مرتبط با آن بحث شد. و در ادامه روند حل یک مسئله CFD درباره حلگر Ansys Fluent، مدل آشفستگی مورد استفاده، همگرایی و اعتبارسنجی بحث شد. در ادامه روند این مطالعه در فصل آینده در ابتدا پارامترهای مورد نیاز برای انجام آزمایش گاز شاخص تعیین شده و پس از انجام آزمایش میدانی و عددی نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

فصل چهارم:

آزمایش کارشناس

#### ۴-۱- مقدمه

در ادامه روند این مطالعه در این فصل به بیان جزئیات آزمایش گاز شاخص پرداخته می‌شود و جزئیات مرتبط با آن تعیین شده و خروجی‌های حاصل از آزمایش برای اولویت‌بندی نجات پرسنل حادثه دیده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۴-۲- آزمایش گاز شاخص

در فصل دوم توضیحات کاملی درباره آزمایش گاز شاخص ارائه شد. اینکه در این آزمایش، گازی تحت عنوان گاز شاخص با ویژگی‌های که برای آن ذکر شد جهت دستیابی به اهدافی خاص در محیط آزمایش آزاد می‌شود.

در این آزمایش گاز متان به عنوان گاز شاخص مورد استفاده قرار گرفت زیرا:

۱. کمترین غلظت آن در نمونه‌های تهیه شده از هوا در محل نمونه‌گیری هم توسط دستگاه GC قابل شناسایی است.
۲. بصورت طبیعی در محیط حضور نداشت.
۳. غیرسمی است.
۴. و به لحاظ شیمیایی پایدار است.
۵. تهیه آسان و قیمت مناسب آن نیز از امتیازات این گاز است.

همچنین بیان شد که برای انجام این آزمایش پیش از آزاد کردن گاز پارامترهایی از قبیل:

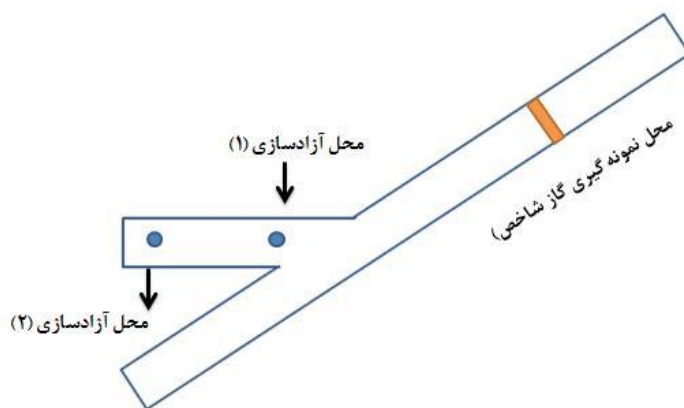
۱. محل آزادسازی گاز شاخص در محیط معدن
۲. دبی ورودی گاز شاخص
۳. مدت زمان آزادسازی گاز شاخص

#### ۴. محل نمونه‌گیری گاز شاخص

باید تعیین گردند. در ادامه به تعیین هریک از این پارامترها پرداخته می‌شود.

#### ۴-۲-۱- محل آزادسازی گاز شاخص

محل آزادسازی گاز شاخص در تونل جانبی در نظر گرفته شد زیرا اگر این محل در تونل اصلی قرار می‌گرفت در صورت عدم جریان هوا در تونل میانبر حالت شماره (۲) و (۴) از سیستم تهویه به کمک آزمایش گاز شاخص قابل شناسایی نخواهد بود. اما نکته بعدی در تعیین محل آزادسازی گاز شاخص فاصله این مکان از محل اتصال دو تونل است. در گام اول همانطور که در شکل (۴-۱) مشخص است دو نقطه یکی در ابتدا و دیگری در انتهای تونل میانبر (به فاصله ۴۰ متر از تقاطع دو تونل) در نظر گرفته شد. اما نقطه آزادسازی (۲) مورد قبول قرار نگرفت زیرا با افزایش فاصله از ابتدای تونل در صورت عدم جریان هوا در تونل میانبر حجم زیادی از گاز شاخص باید آزاد می‌شد تا گاز شاخص به محل تقاطع دو تونل می‌رسید و به کمک جریان هوای تونل اصلی به محل اندازه‌گیری گاز شاخص انتقال داده می‌شد.



شکل (۴-۱) تصویر دوبعدی از هندسه مدل شامل محل‌های آزادسازی گاز شاخص



در مورد محل آزادسازی (۱) که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است باید فاصله آن از محل تقاطع تونل به اندازه‌ای باشد که ضمن اینکه حجم گاز شاخص کمتری مصرف شود بتوان تمامی حالت‌های تهویه‌ای بخصوص حالت‌های (۲) و (۴) که ورودی هوای تونل میانبر ناچیز است را پوشش داد و مدل‌سازی کرد. برای این منظور در مدل CFD تهیه شده برای سیستم تهویه در شرایط حالت شماره (۱) فواصل مختلفی مورد آزمایش قرار گرفت و فاصله ۱۵ متر بعنوان فاصله مناسب انتخاب شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

#### ۴-۲-۲- دبی گاز شاخص

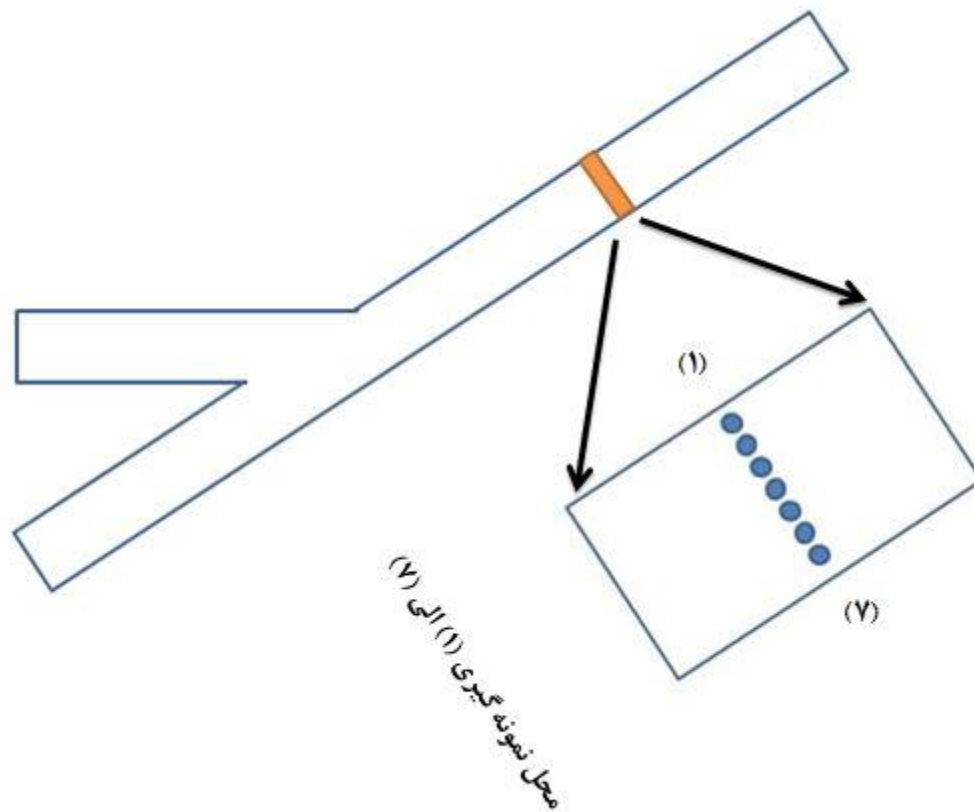
همانطور که در فصل دوم گفته شد دبی گاز شاخص باید به اندازه‌ای باشد غلظت گاز شاخص حاضر را در محل نمونه‌برداری در حد تشخیص دستگاه GC باشد. برای تعیین یک دبی مناسب در مدل CFD تهیه شده مقادیر مختلفی از دبی گاز شاخص امتحان شد و نهایتاً دبی ۰/۵ مترمکعب بر ثانیه به عنوان یک دبی مناسب انتخاب شد.

#### ۴-۲-۳- مدت زمان آزادسازی گاز شاخص

در فصل دوم بیان شد که مدت زمانی که گاز شاخص باید با دبی تعیین شده آزاد شود باید به گونه‌ای باشد که اولاً گاز شاخص در محل نمونه‌گیری به حداکثر غلظت خود برسد و ثانیاً باقی ماندن غلظت گاز در حد ماکزیمم خود به اندازه‌ای باشد که بتوان نمونه‌های لازم را جمع‌آوری کرد. در ادامه خواهیم دید که حداکثر غلظت گاز شاخص و مدت زمانی که باید گاز در نقطه ابتدایی آزاد شود تا زمان کافی برای جمع‌آوری نمونه‌ها در دسترس باشد در حالت‌های مختلف با هم یکسان نیست. نتایج مدل‌سازی CFD و آزمایشات میدانی نشان داد که اگر ۹ دقیقه گاز شاخص آزاد شود زمان کافی برای نمونه‌گیری هوا در سطح غلظت ماکزیمم گاز شاخص برای تمامی حالت‌ها را داریم.

#### ۴-۲-۴- محل نمونه‌گیری گاز

برای نمونه‌گیری فاصله ۱۰۰ متری از محل تقاطع دو تونل در نظر گرفته شد و عرض تونل به هفت نقطه نمونه‌گیری تقسیم شد. شکل (۲-۴) محل قرارگیری نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

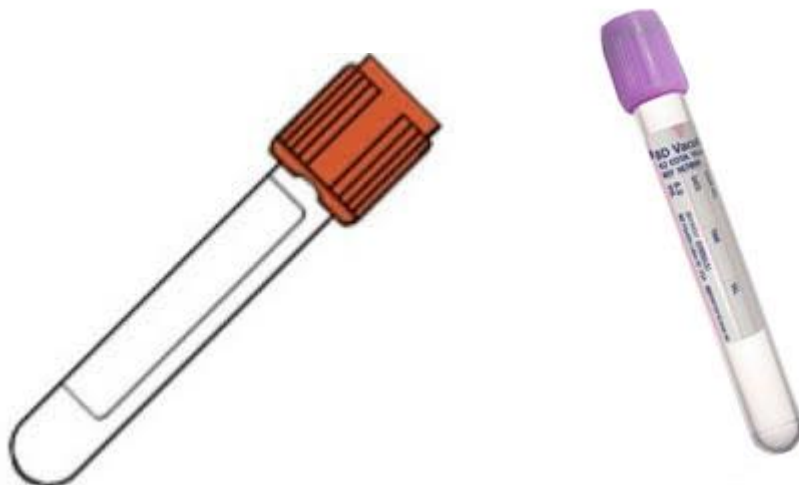


شکل (۲-۴) محل نمونه‌برداری و نامگذاری نقاط نمونه‌برداری

اما نتایج مدل‌سازی CFD نشان می‌دهد که غلظت گاز شاخص در تمامی عرض تونل یکسان نیست به طوری که غلظت گاز شاخص در نقطه (۱) بیشترین مقدار و در نقطه (۷) کمترین مقدار را داراست. به همین خاطر نقطه نمونه‌برداری (۱) بعنوان محل نمونه‌برداری انتخاب شد.

به منظور تهیه نمونه‌های کافی برای رسم نمودار غلظت- زمان هر یک از حالت‌ها با فواصل زمانی ۱۰ ثانیه به مدت ۵۶۰ ثانیه از هوای معدن نمونه‌گیری شد. نمونه‌های تهیه شده به کمک ظروف مخصوص

نمونه‌گیری خون که درپوش مناسبی جهت جلوگیری از خروج هوای محبوس شده دارند انجام شد. نمونه‌ای از این ظروف مخصوص در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



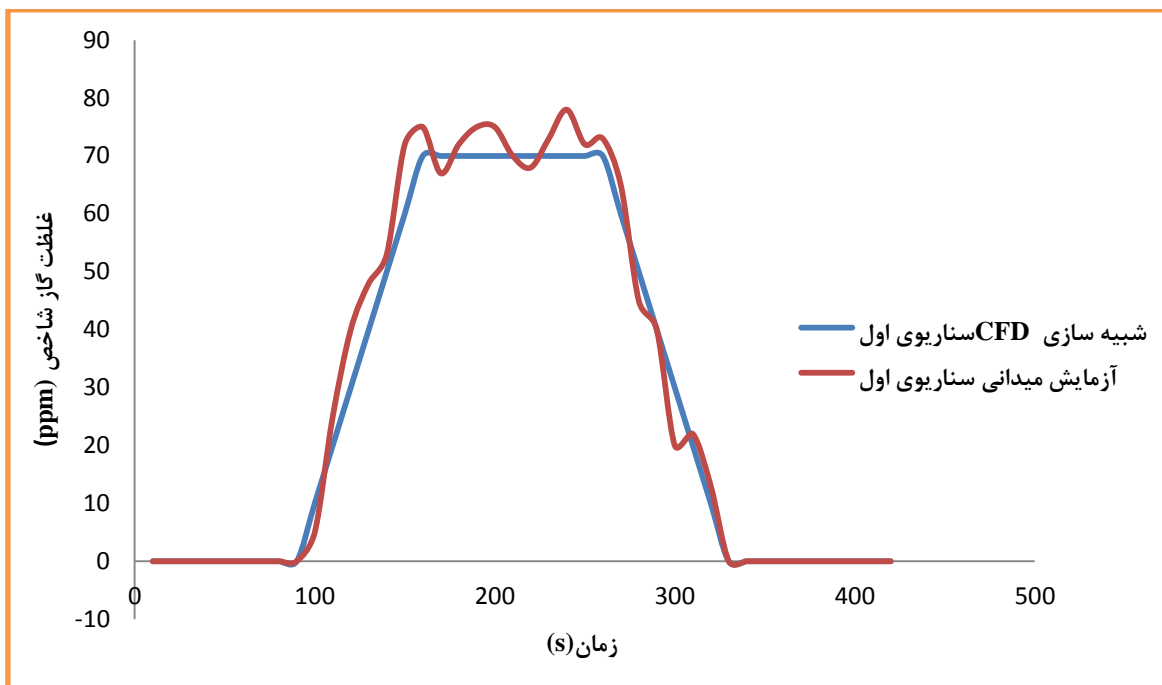
شکل (۳-۴) نمونه ظروفی که جهت نمونه‌برداری از هوای معدن مورد استفاده قرار گرفته است

### ۳-۴- نتایج آزمایش گاز شاخص

آزمایش گاز شاخص هم در محیط معدن و هم در نرم‌افزار AnsysFluent طراحی و اجرا شد. خروجی آزمایش طراحی شده در محیط نرم‌افزار و داخل معدن نمودارهای غلظت نسبت به زمان گاز شاخص برای هر یک از حالت‌ها بود که در ادامه به بررسی و تحلیل هریک از این نمودارها می‌پردازیم.

### ۳-۴-۱- نتایج آزمایش گاز شاخص حالت اول

در حالت اول شرایط حاکم بر سیستم تهویه به این صورت بوده است که شدت جریان ورودی هوا به محیط مدل‌سازی شده ۶.۴۸ مترمکعب برثانیه از تونل اصلی و ۲.۸۵ مترمکعب برثانیه از تونل جانبی است. نمودارهای غلظت - زمان گاز شاخص مرتبط با این حالت مطابق شکل (۴-۴) است که نمودار آبی رنگ مربوط به آزمایش گاز شاخص در نرم‌افزار AnsysFluent و نمودار قرمز رنگ مربوط به آزمایش گاز شاخص در محیط معدن است.



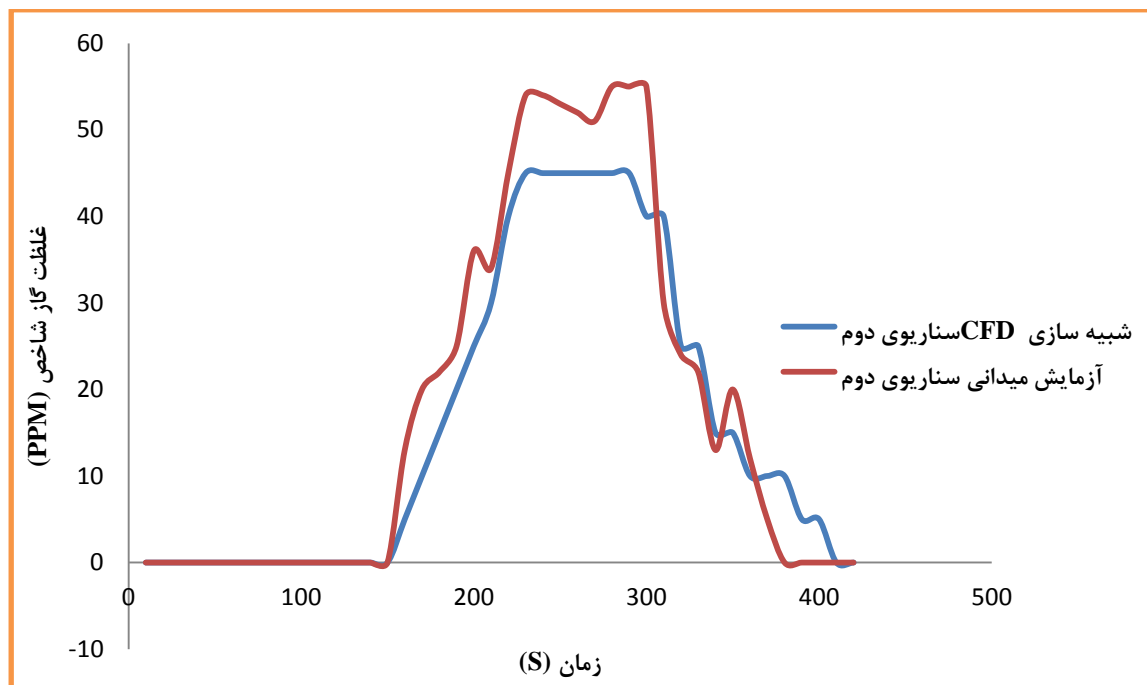
شکل (۴-۴) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به حالت اول

همانطور که در شکل (۴-۴) مشخص است در محل نمونه‌گیری تا ۱۰۰ ثانیه پس از آزادسازی گاز شاخص غلظت آن صفر است. رفته رفته با گذشت زمان غلظت آن افزایش یافته پس از گذشت ۱۶۰ ثانیه به حداکثر غلظت خود که معادل ۷۰ ppm در شبیه‌سازی و ۷۸ ppm در آزمایش میدانی رسیده است. همچنین غلظت گاز شاخص پس از ۳۲۰ ثانیه دوباره به صفر رسیده است. از دیگر مواردی که در شکل به چشم می‌خورد عدم تطابق کامل دو نمودار بر روی یکدیگر است. تفاوت جزئی در مقادیر دو نمودار به دلیل آشفتگی جریان هوا است که موجب تفاوت در مقادیر غلظت گاز شاخص در زمان‌های مشابه است.

#### ۴-۳-۲- نتایج آزمایش گاز شاخص حالت دوم

در حالت دوم شدت جریان ورودی هوا به محیط مدل‌سازی شده ۶.۴۸ مترمکعب برثانیه از تونل اصلی ولی از ورودی دوم جریان به مدل سرعت هوا معادل ۰/۰۷ متر بر ثانیه است که مقدار ناچیزی است و عملاً

حجم قابل توجهی وارد نمی‌شود. نمودارهای غلظت - زمان گاز شاخص مرتبط با این حالت مطابق شکل (۵-۴) است که نمودار آبی رنگ مربوط به آزمایش گاز شاخص در نرم‌افزار AnsysFluent و نمودار قرمز رنگ مربوط به آزمایش گاز شاخص در محیط معدن است.

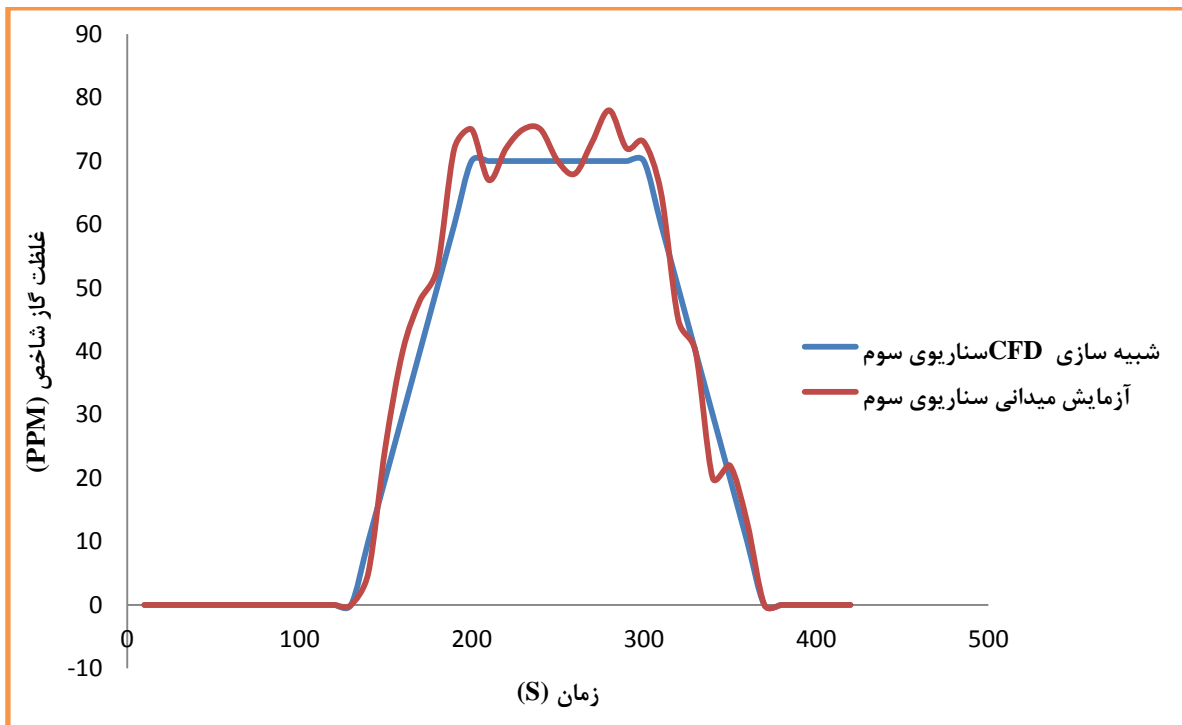


شکل (۵-۴) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به حالت دوم

همانطور که در شکل (۵-۴) مشخص است در محل نمونه‌گیری تا ۱۶۰ ثانیه پس از آزادسازی گاز شاخص غلظت آن صفر است. رفته رفته با گذشت زمان غلظت آن افزایش یافته پس از گذشت ۲۳۰ ثانیه به حداکثر غلظت خود که معادل ۴۵ ppm در شبیه‌سازی و ۵۵ ppm در آزمایش میدانی رسیده است. همچنین غلظت گاز شاخص پس از ۳۸۰ ثانیه دوباره به صفر رسیده است. از دیگر مواردی که در شکل به چشم می‌خورد عدم تطابق کامل دو نمودار بر روی یکدیگر است. تفاوت جزئی در مقادیر دو نمودار به دلیل آشفتگی جریان هوا است که موجب تفاوت در مقادیر غلظت گاز شاخص در زمان‌های مشابه است.

#### ۴-۳-۳- نتایج آزمایش گاز شاخص حالت سوم

در حالت سوم شدت جریان ورودی هوا به محیط مدل‌سازی شده از تونل اصلی تغییر کرده و معادل ۳ مترمکعب برثانیه شده است. در این حالت از تونل اصلی جریان هوا برقرار نبوده و سرعت هوا معادل ۰/۳۷ متر بر ثانیه است که مقدار ناچیزی است و عملاً حجم قابل توجهی وارد نمی‌شود. نمودارهای غلظت - زمان گاز شاخص مرتبط با این حالت مطابق شکل (۴-۶) است که نمودار آبی رنگ مربوط به آزمایش گاز شاخص در نرم‌افزار AnsysFluent و نمودار قرمز رنگ مربوط به آزمایش گاز شاخص در محیط معدن است.



شکل (۴-۶) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به حالت سوم

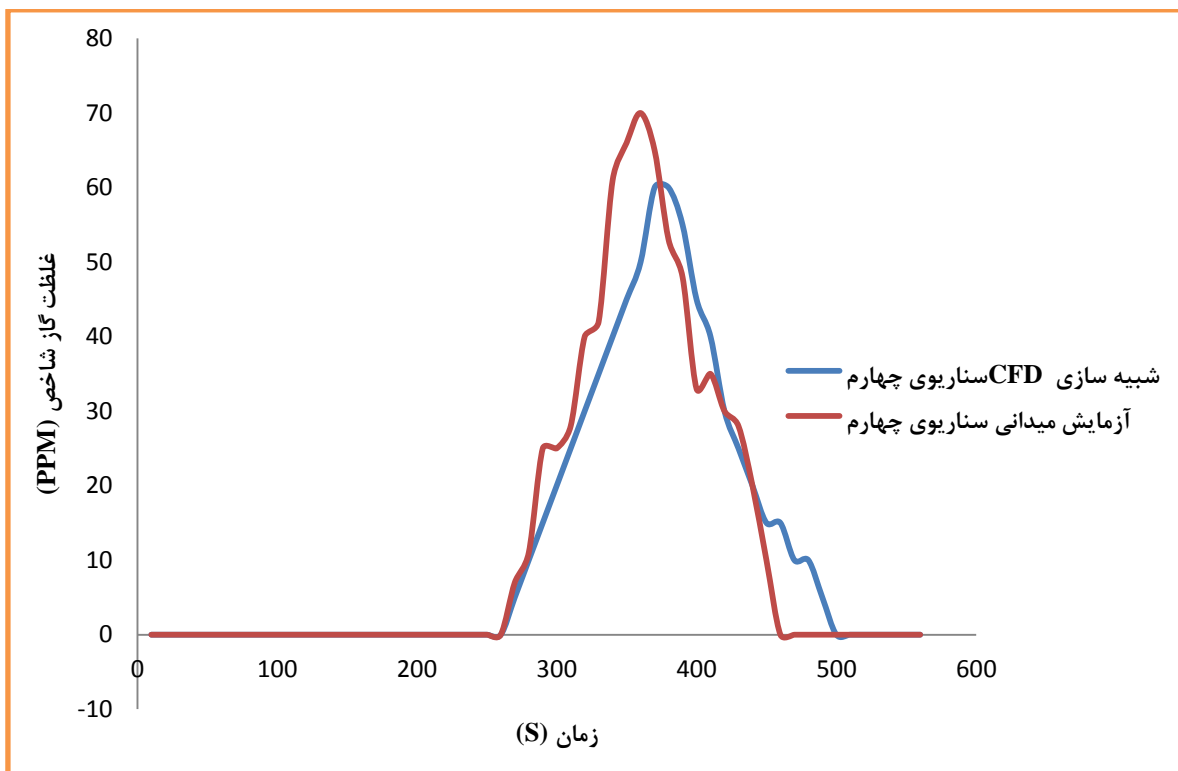
همانطور که در شکل (۴-۶) مشخص است در محل نمونه‌گیری تا ۱۴۰ ثانیه پس از آزادسازی گاز شاخص غلظت آن صفر است. رفته رفته با گذشت زمان غلظت آن افزایش یافته پس از گذشت ۲۰۰ ثانیه

به حداکثر غلظت خود که معادل ۷۰ ppm در شبیه‌سازی و ۷۸ ppm در آزمایش میدانی رسیده است. همچنین غلظت گاز شاخص پس از ۳۷۰ ثانیه دوباره به صفر رسیده است.

از دیگر مواردی که در شکل به چشم می‌خورد عدم تطابق کامل دو نمودار بر روی یکدیگر است. تفاوت جزئی در مقادیر دو نمودار به دلیل آشفتگی جریان هوا است که موجب تفاوت در مقادیر غلظت گاز شاخص در زمان‌های مشابه است.

#### ۴-۳-۴- نتایج آزمایش گاز شاخص حالت چهارم

در حالت چهارم شدت جریان ورودی هوا به محیط مدل‌سازی شده از تونل اصلی تغییر کرده و معادل ۳ مترمکعب برثانیه شده است. در این حالت از تونل جانبی جریان هوا برقرار بوده و معادل ۲.۸۵ مترمکعب برثانیه است. نمودارهای غلظت - زمان گاز شاخص مرتبط با این حالت مطابق شکل (۴-۷) است که نمودار آبی رنگ مربوط به آزمایش گاز شاخص در نرم‌افزار AnsysFluent و نمودار قرمز رنگ مربوط به آزمایش گاز شاخص در محیط معدن است. در این حالت سیستم تهویه چون جریان هوا از تونل فرعی بسیار اندک است عمده گاز شاخص آزاد شده در تونل فرعی صرف حرکت کند گاز تا رسیدن به تونل اصلی و جریان هوا با سرعت مناسب جهت انتقال می‌شود. به همین علت مدت زمانی که گاز شاخص در محل نمونه‌گیری در حداکثر غلظت خود است کم است.



شکل (۷-۴) نمودارهای غلظت - زمان آزمایش گاز شاخص مربوط به حالت چهارم

همانطور که در شکل (۷-۴) مشخص است در محل نمونه‌گیری تا ۲۷۰ ثانیه پس از آزادسازی گاز شاخص غلظت آن صفر است. رفته رفته با گذشت زمان غلظت آن افزایش یافته پس از گذشت ۳۷۰ ثانیه به حداکثر غلظت خود که معادل ۶۰ ppm در شبیه‌سازی و ۷۰ ppm در آزمایش میدانی رسیده است. همچنین غلظت گاز شاخص پس از ۴۹۰ ثانیه دوباره به صفر رسیده است.

از دیگر مواردی که در شکل به چشم می‌خورد عدم تطابق کامل دو نمودار بر روی یکدیگر است. تفاوت جزئی در مقادیر دو نمودار به دلیل آشفتگی جریان هوا است که موجب تفاوت در مقادیر غلظت گاز شاخص در زمان‌های مشابه است.

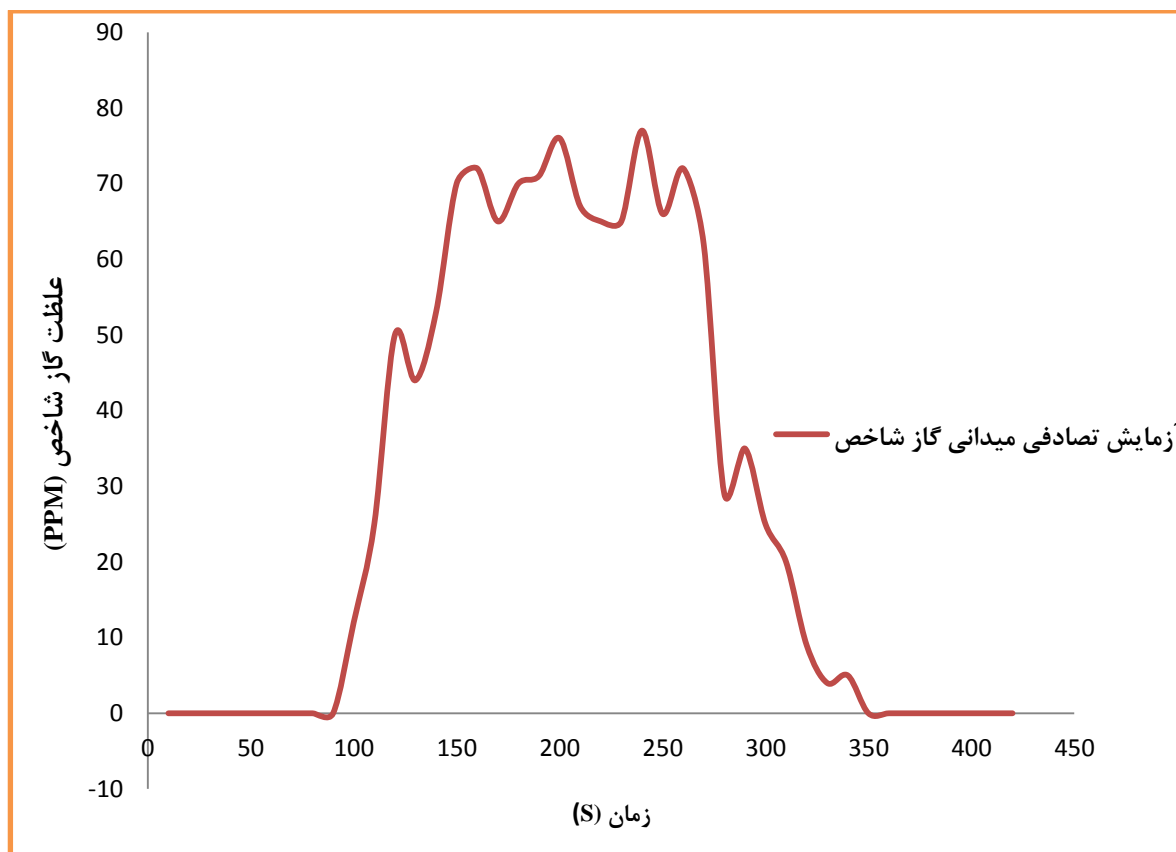


#### ۴-۳-۵- آزمایش تصادفی گاز شاخص

در ادامه روند مطالعه کارایی این روش مورد بررسی قرار گرفت. به این صورت که یک آزمایش گاز شاخص بصورت تصادفی تهویه انجام شد. شرایط این آزمایش به این صورت بود که از مسئول مربوط به امور سیستم تهویه درخواست شد که یکی از حالت‌های حاکم بر سیستم تهویه را به صورت دلخواه برقرار کند و تا پایان آزمایش اطلاعاتی از این حالت حاکم را در اختیار ما قرار ندهد. سپس به کمک نمودار غلظت- زمان تهیه شده از آزمایش و مقایسه آن با نمودارهای غلظت- زمان گاز شاخص در حالت‌های بررسی شده شرایط حاکم بر سیستم تهویه تعیین می‌شود.

پس از انجام آزمایش نمودار غلظت- زمان گاز شاخص تصادفی بصورت زیر شکل (۴-۸)

است.



چند ویژگی از نمودار مشخص می‌کند که شرایط حاکم بر سیستم تهویه مربوط به حالت اول است.

این ویژگی‌ها عبارتند از:

۱. در این نمودار پس از حدوداً ۱۰۰ ثانیه غلظت گاز شاخص شروع به افزایش می‌کند که این ویژگی مشابه به حالت اول است در صورتی که حالت دوم این زمان ۱۶۰ ثانیه، حالت سوم ۱۴۰ ثانیه و در حالت چهارم ۲۷۰ ثانیه است.

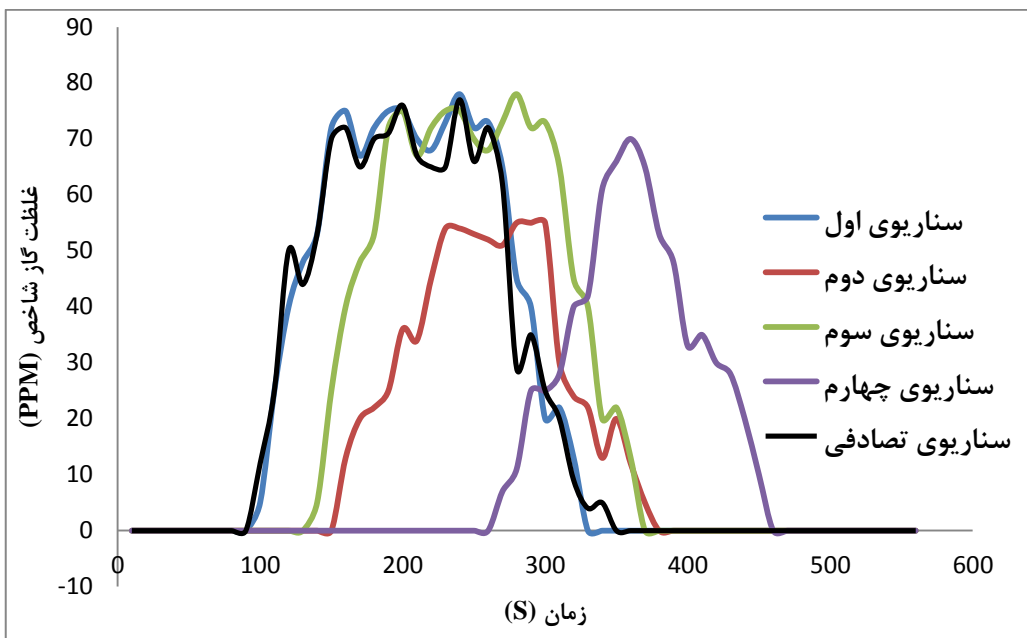
۲. زمان صفر شدن غلظت گاز شاخص حدود ۳۵۰ ثانیه است. و با مقایسه زمان شروع و پایان قابل شناسایی بودن گاز شاخص مشخص می‌شود که این نمودار غلظت- زمان گاز شاخص مربوط به حالت اول است.

۳. ماکزیمم غلظت گاز شاخص ۷۵ ppm است. این میزان ماکزیمم غلظت گاز شاخص نزدیک به مقادیر ماکزیمم غلظت گاز شاخص حالت‌های اول، سوم و چهارم است اما گستردگی زمان ماکزیمم مقدار غلظت گاز شاخص فرضیه ارتباط با حالت چهارم را رد می‌کند و فقط می‌تواند مربوط به حالت اول و سوم باشد که مجموعه تحلیل‌ها ارتباط آن با حالت سوم را نیز رد می‌کند.

همچنین با مقایسه چشمی نمودار غلظت- زمان آزمایش تصادفی با نمودارهای غلظت- زمان گاز

شاخص در شکل (۴-۹) نیز می‌توان به این نتیجه رسید که حالت حاکم بر سیستم تهویه همان حالت اول

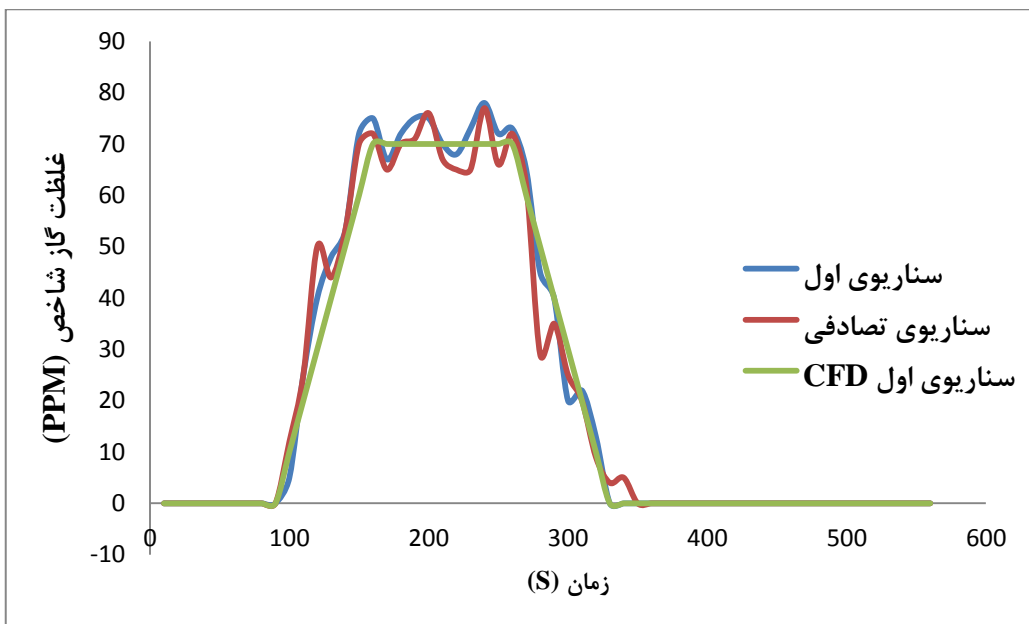
است.



شکل (۴-۹) نمودارهای غلظت - زمان گاز شاخص تمامی حالت‌ها در کنار یکدیگر

برای تایید این موضوع که آزمایش تصادفی گاز شاخص مربوط به حالت اول است نمودار

غلظت- زمان گاز شاخص برای این دو آزمایش در شکل (۴-۱۰) در کنار هم نمایش داده شده است.



شکل (۴-۱۰) نمودارهای غلظت- زمان گاز شاخص حالت تصادفی و حالت اول

#### ۴-۴- جمع بندی

همانطور که پیش تر بیان شد در هنگام حادثه در یک فضای زیرزمینی آگاهی از شرایط حاکم بر سیستم تهویه بسیار مهم است و همچنین عنوان شد که در صورت بروز حادثه با انجام یک آزمایش گاز شاخص در محیط معدن و شبیه سازی حالات مختلف سیستم تهویه معدن و مقایسه نمودار غلظت- زمان گاز شاخص آزمایش میدانی و خروجی های نمودار غلظت- زمان نرم افزار می توان شرایط حاکم بر سیستم تهویه را پیش بینی کرده و اولویت بندی گاز شاخص را انجام داد. در این فصل در ابتدا پارامترهای مربوط به طراحی آزمایش گاز شاخص تعیین شد سپس آزمایش گاز شاخص برای حالت های تعیین شده هم در محیط معدن و هم در محیط نرم افزار انجام شد و نمودارهای غلظت- زمان گاز شاخص هریک از حالت ها در هر دو حالت تهیه شد. برای بررسی کارایی این آزمایش برای تعیین حالت حاکم بر سیستم تهویه یه آزمایش گاز شاخص با عدم اطلاع از حالت حاکم بر سیستم تهویه در محیط معدن انجام شد و با مقایسه نمودار غلظت- زمان گاز شاخص این آزمایش با نمودارهای غلظت- زمان گاز شاخص دیگر حالت شرایط حاکم بر سیستم تهویه تعیین شد.



# فصل پنجم

## نتیجہ گیری و پیشہاوا

## ۵-۱- مقدمه

استفاده از تکنولوژی و پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌های گوناگون در مواقع حادثه به تیم نجات کمک می‌کند تا بتواند در کمترین زمان و به بهترین روش ممکن پرسنل حادثه دیده را نجات دهند. دینامیک سیالات محاسباتی علمی است که به بررسی رفتار سیال به کمک کامپیوترها می‌پردازد. به کمک این علم و نرم‌افزارهای تجاری موجود در بازار و در راس همه آنها نرم‌افزار Ansys Fluent رفتار سیال هوا را در محیط معدن مدل‌سازی کرد و برای اهداف گوناگون مانند طراحی سیستم تهویه، بررسی شرایط حاکم بر سیستم تهویه، بهینه‌سازی سیستم تهویه و اهداف گوناگون استفاده کرد.

## ۵-۲- نتیجه‌گیری

در این مطالعه از این نرم‌افزار برای اولویت‌بندی نجات پرسنل حادثه استفاده شد. به این صورت که ابتدا بخشی از معدن مورد مطالعه انتخاب شد و شرایط مختلف حاکم بر سیستم تهویه تحت عنوان حالت‌های تهویه‌ای مشخص شد. سپس به کمک نرم‌افزار Ansys Fluent هندسه بخش مورد مطالعه تهیه و شبکه‌بندی شده و در نرم‌افزار Fluent با تعیین مدل مناسب جریان آشفته مسئله حل و اعتبارسنجی شد. سپس پارامترهای آزمایش گاز شاخص در تعیین شده و در محیط نرم‌افزار و محیط معدن مورد آزمایش قرار گرفت. خروجی این آزمایشات در هر دو حالت شبیه‌سازی و واقعی نمودارهای غلظت- زمان گاز شاخص بود که برای هر یک از حالت‌ها تهیه شد. سپس برای بررسی کارایی این روش جهت اولویت‌بندی نجات پرسنل حادثه دیده بوسیله تعیین شرایط حاکم بر سیستم تهویه یک آزمایش گاز شاخص بدون اطلاع از شرایط حاکم بر سیستم تهویه انجام شد و به کمک مقایسه نمودار غلظت- زمان گاز شاخص این آزمایش با نمودارهای غلظت- زمان گاز شاخص حالت‌های تعیین شده مشخص شد که شرایط حاکم بر سیستم تهویه مربوط به حالت اول است.

### ۵-۳- پیشنهادها

واضح است که تمامی تحقیق‌ها این ظرفیت را دارند که توسط محقق دیگری ادامه داده شوند و تکمیل‌تر شوند این مطالعه نیز از این قاعده جدا نیست لذا به علاقمندان مطالعه در زمینه مدل‌سازی CFD و بصورت ویژه زمینه اولویت‌بندی نجات پرسنل حادثه دیده پیشنهاد می‌شود معادن کوچکتری را پیدا کرده و تمامی سیستم تهویه را مدل‌سازی کنند تا نتایج حاصله نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود با توجه به اینکه معادن زغال سنگ از مستعدترین معادن به لحاظ تعدد حوادث هستند به کمک این روش ارزیابی شوند. محدودیت بکارگیری این روش در معادن زغال انتخاب‌گازی تحت عنوان گاز شاخص است که شرایط ذکر شده در فصول قبل را برای آن داشته باشد. عموماً این گاز در مطالعات انجام شده توسط دیگر محققین گاز SF6 است که گازی گران قیمت است و دسترسی به آن آسان نیست ولی در صورت دسترسی به این گاز توسط محققین پیشنهاد می‌شود این آزمایش در معادن زغالی نیز انجام شود.



## منابع

۱. توحیدی ا، غفاری قهرودی ه، (۱۳۹۲)، "راهنمای جامع Ansys Fluent (مقدماتی)" موسسه فرهنگی و هنری دیباگران تهران.
۲. شجاعی فرد م. نورپور هشترودی ع، (۱۳۷۹)، "مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی" مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. شهرخ خانی 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. مهربابیان 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. 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.
11. Cheng L.H, Ueng T.H. and Liu C.W ( 2001) "Simulation of ventilation and fire in the underground facilities" Fire Safety Journal, Vol 36, pp. 597–619.

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. Grewer 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. 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*.
20. Lee, C J, 1994. Computational Modelling of Mine Fires, *The Mining Engineer*, July, pp17-21.
21. Levin, L. Y., Semin, M. A., & Klyukin, Y. A. (2014). Estimation of wall roughness functions acceptability in CFD simulation of mine ventilation networks.

22. 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.
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. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.

31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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
37. 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**

In mine and civil environments, many incidents always happen due to equipment existence despite to safety. And for this matter, personnel rescue team should be fully prepared. At the time of the incident, the rescue team needs to rescue the lives of all personnel who have been injured in different parts with the aid of tools that they have. This study was investigated in part of Garmsar salt mine, With the purpose of prioritizing the rescue injured personnel. For this regard, some parts of this mine have been selected, that include a main tunnel with  $8.1 \text{ m}^2$  cross section and 150 m length and another tunnel with  $36^\circ$  angle and  $5.7 \text{ m}^2$  cross section. The ventilation conditions in this section are as follows, in different times, the airflow into main tunnel has two different volumes as 3 and  $6.48 \text{ m}^3/\text{s}$  and the airflow in second tunnel is zero or  $2.85 \text{ m}^3/\text{s}$ . According to mentioned points, four ventilation scenarios has been introduced. In the following, the relevant CFD model to each scenarios Prepared and validated .In the next step, indicator gas test with proper parameters designed that including appropriate point of release determination, sampling, indicator gas release time for sampling (10 min), suitable gas determination for indicator gas (methane gas), and suitable indicator gas rate of flow for sampling ( $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ). This test carried out for each scenarios in AnsysFluent application as well as in mine environment, after validation in CFD model. Output of each test for any scenarios was a density-time plot of indicator gas. This plots aim to determine the dominant scenario to ventilation system with use of indicator gas test if necessary, and investigation of density-time plot similarities to preexistence scenarios. For this purpose, an indicator gas test carried out with lack of knowledge of dominant scenario to ventilation system, and dominant scenario to ventilation system has been determined.

**Key words:** CFD modeling, indicator gas test, ventilation system scenario, density-time plot of indicator gas.





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

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

**prioritizing rescue of personnel in case of an emergency in underground mines**

**By: Amirbabak Shabani**

**Supervisor:**

**Dr. Mohammad Ataei**

**Dr. Farhang Sereshki**

**Oct 2018**