

بِه نام حق ...



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

مدل سازی تهویه کارگاه استخراج و تونل های جانبی معادن زغال سنگ زیرزمینی به روش جبهه  
کار طولانی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

نگارنده: مهدی محمدی

اساتید راهنما

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر رضا خالوکاکایی

استاد مشاور  
دکتر علی خالقی

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۹۶۲۰۳۲  
تاریخ: ۹۶/۷/۱۸

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی محمدی با شماره دانشجویی ۹۳۱۵۴۲۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج تحت عنوان: مدل سازی تهریه کارگاه استخراج و تونل های جانبی معادن زغال سنگ زیرزمینی به روش جبهه کاربند با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD).

(مطالعه موردی: معدن زغال سنگ طبری) که در تاریخ ۹۶/۰۶/۱۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۶ درجه اول)  مردود   
نوع تحقیق: نظری  عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر رضا خالوکاکی	استاد	
۳- استاد مشاور	دکتر علی خالقی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمد جهانی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر محمد عطایی	استاد	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر کیومرث سیف پناهی شعبانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:   
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۶/۷/۱۸

تصريحاً در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته ای که از خواسته هایشان گذشتند، سختی ها را به

جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا

من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم.

## تقدیر و تشکر

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این مرحله از تحصیل را به پایان برسانم .

از اساتید فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر فرهنگ سرشکی و جناب آقای دکتر رضا خالوکاایی و استاد مشاور دکتر علی خالقی که همواره بنده را در تهیه این پایان نامه، مورد لطف و محبت خود قرار داده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب مهدی محمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته معدن گرایش استخراج دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله "مدل سازی تهویه کارگاه استخراج و تونل های جانبی معادن زغال سنگ زیرزمینی به روش جبهه کار طولانی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)" تحت راهنمایی دکتر فرهنگ سرشکی و دکتر رضا خالوکاکایی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله 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 رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

تهویه یکی از مهم‌ترین ارکان در معدن‌کاری زیرزمینی است که به طور مستقیم بر روی سلامت کارگران تأثیر می‌گذارد. در معدن زغال‌سنگ به علت وجود گازهای سمی، قابل اشتعال و خودسوزی زغال‌سنگ اهمیت بیشتری پیدا می‌کند و طراحی مناسب آن به علت این شرایط ویژه سخت و دشوار است. برای طراحی و مدل‌سازی تهویه روش‌های مختلفی وجود دارد که امروزه با توجه پیشرفت فناوری و سخت‌افزار کامپیوتری، روش دینامیک سیالات محاسباتی رایج شده است. در این پایان‌نامه نیز از این روش برای مدل‌سازی تهویه کارگاه W<sub>2</sub> معدن زغال‌سنگ پروده طبس استفاده شده است. برای مدل‌سازی، ابتدا یک مدل اولیه ساخته شده و نتایج آن در مدل‌سازی نهایی استفاده شده است. مدل نهایی شامل ۴ مدل ساده‌تر با ویژگی‌های متفاوت است، بر اساس نتایج آن، بیشترین میزان سرعت در قسمت انتهایی جرزبندی با میزان ۱۲/۹ در وسط جرزبندی قرار دارد. میزان عیار گاز متان در قسمت انتهایی کارگاه استخراج تا ورودی راهرو TG، در قسمت بالایی کارگاه (سقف) در محدوده قابل انفجار قرار دارد. در قسمت بالای منطقه تخریب به عمق تقریبی نصف ارتفاع راهرو TG، و به اندازه ارتفاع راهرو TG در قسمت پایینی منطقه تخریب زون مستعد برای خودسوزی قرار دارد که با شیبی ملایم تا ۱/۳ ارتفاع به طرف انتهایی راهرو استخراج ادامه می‌یابد. حدود ۴۰ درزه در طول کارگاه استخراج بر روی دیواره شیلد مدل شده که حدود ۱۸ درزه اول هوا وارد منطقه تخریب و از باقی درزه‌ها گاز متان از منطقه تخریب خارج شده و وارد سیستم تهویه می‌شود. گازکشی تأثیر بسیار مطلوبی بر روی غلظت بالای منطقه تخریب می‌گذارد که می‌تواند یکی از مؤثرترین روش‌ها برای رفع غلظت بالای گاز متان در منطقه تخریب باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تهویه، دینامیک سیالات محاسباتی، معدن زغال‌سنگ پروده طبس، مدل‌سازی، گاز متان.



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

- ۱- مهدی محمدی، فرهنگ سرشکی، رضا خالوکاکایی، علی خالقی، تأثیر جرزبندی بر سرعت و وضعیت جریان هوای تهویه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، چاپ شده در سومین کنگره ملی زغال سنگ ایران، شهریور ۹۵.

## فهرست

### فصل اول: کلیات تحقیق

- ۱-۱- مقدمه ..... ۲
- ۲-۱- بیان مسأله ..... ۲
- ۳-۱- اهمیت مسأله ..... ۳
- ۴-۱- ضرورت انجام تحقیق ..... ۴
- ۵-۱- پیشینه تحقیق ..... ۵
- ۶-۱- روش تحقیق ..... ۸
- ۷-۱- اهداف تحقیق ..... ۸
- ۸-۱- ساختار پایان نامه ..... ۹

### فصل دوم: مفاهیم و مبانی نظری

- ۱-۲- مقدمه ..... ۱۲
- ۲-۲- روش جبهه کار طولانی ..... ۱۲
- ۱-۲-۲- نحوه آماده سازی ..... ۱۲
- ۲-۲-۲- نحوه استخراج ..... ۱۴
- ۳-۲- سیستم تهویه ..... ۱۵
- ۱-۱-۳-۲- سیستم تهویه " R " ..... ۱۶
- ۲-۱-۳-۲- سیستم تهویه R برای ناحیه تخریب گاز خیز ..... ۱۷
- ۳-۱-۳-۲- سیستم تهویه " Z " یا " Y " ..... ۱۷
- ۲-۳-۲- سیستم تهویه بر اساس نوع تهویه منطقه تخریب ..... ۱۸
- ۱-۲-۳-۲- سیستم تهویه شریانی جبهه کار طولانی ..... ۱۸
- ۲-۲-۳-۲- سیستم تهویه مهر و موم شده جبهه کار طولانی ..... ۲۰
- ۴-۲- مشکلات و ویژگی های سیستم تهویه معادن زغال سنگ روش جبهه کار طولانی ..... ۲۱

۲۲	۵-۲-انواع روش‌های مدل‌سازی سیستم تهویه
۲۳	۱-۵-۲-روش‌های تجربی (آزمایشگاهی)
۲۳	۲-۵-۲-روش‌های تئوری و تحلیلی
۲۴	۳-۵-۲-روش‌های عددی و CFD
۲۴	۶-۲-مشخصات و ویژگی‌های مطالعه موردی
۲۴	۱-۶-۲-حوضه زغالی طبس
۲۵	۲-۶-۲-مشخصات لایه‌های زغالی
۲۵	۱-۲-۶-۲-لایه D
۲۶	۲-۲-۶-۲-لایه C <sub>2</sub>
۲۶	۳-۲-۶-۲-لایه C <sub>1</sub>
۲۶	۴-۲-۶-۲-لایه B <sub>2</sub>
۲۷	۵-۲-۶-۲-لایه B <sub>1</sub>
۲۷	۳-۶-۲-معدن پروده ۱
۲۹	۴-۶-۲-گاز خیزی منطقه پروده ۱
۳۰	۵-۶-۲-مشخصات سنگ‌های در بر گیرنده لایه زغالی C <sub>1</sub>
۳۰	۱-۵-۶-۲-مشخصات کمر بالای لایه C <sub>1</sub>
۳۱	۶-۶-۲-مشخصات تهویه
۳۲	۷-۶-۲-مشخصات کارگاه W <sub>2</sub>
۳۳	۷-۲-مشخصات ماده معدنی (زغال سنگ)
۳۳	۱-۷-۲-خودسوزی زغال سنگ
۳۵	۲-۷-۲-گاز زغال
۳۶	۱-۲-۷-۲-مشخصات گاز زغال
۳۶	۲-۲-۷-۲-طرز تشکیل گاز زغال

۳۷	۲-۷-۳- عوامل مؤثر در تصاعد گاز زغال
۳۷	۲-۷-۴- طریقه تصاعد گاز زغال
۳۸	۲-۷-۳- طبقه‌بندی معادن بر اساس میزان تصاعد گاز زغال
۳۹	۲-۷-۴- منابع گاز زغال در معادن زغال سنگ زیرزمینی
۳۹	۲-۷-۵- نحوه انتشار و ورود گاز متان به سیستم تهویه
۴۱	۲-۸-۱- میزان هوای مورد نیاز برای کارگاه $W_2$
۴۱	۲-۸-۱-۱- میزان هوای مورد نیاز برای تهویه بر اساس رقیق سازی گاز متان
۴۳	۲-۸-۱-۲- میزان هوای مورد نیاز بر اساس تعداد نفرات
۴۳	۲-۹- ناحیه استخراج شده
۴۳	۲-۹-۱- قسمت‌های مختلف ناحیه استخراج شده در روش جبهه کار طولانی
۴۴	۲-۹-۱-۱- ناحیه تخریب
۴۵	۲-۹-۱-۲- ناحیه شکسته شده
۴۵	۲-۹-۱-۳- ناحیه خمش پیوسته
۴۵	۲-۹-۲- تخلخل و نفوذپذیری در منطقه تخریب
۴۸	۲-۹-۳- تعیین میزان نرخ خروج گاز زغال در منطقه تخریب
۴۸	۲-۹-۴- کنترل گاز در منطقه تخریب
۵۱	۲-۱۰- مراحل تحقیق
۵۲	۲-۱۱- نتیجه‌گیری

### فصل سوم: مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی، مدل سازی اولیه

۵۴	۳-۱- دینامیک سیالات محاسباتی
۵۴	۳-۱-۱- مقدمه
۵۴	۳-۱-۲- نحوه کار CFD
۵۶	۳-۱-۳- نرم‌افزار Fluent

۵۶	۳-۱-۴- نحوه حل مسأله در نرم افزار Fluent
۵۷	۳-۲- معادلات اساسی
۵۷	۳-۲-۱- معادله بقای جرم یا پیوستگی
۵۸	۳-۲-۲- معادله ناویر استوکس
۵۹	۳-۲-۳- معادله مرکب (گونه‌ها)
۶۱	۳-۲-۴- معادله انرژی
۶۲	۳-۲-۵- آشفتگی (اغتشاش)
۶۵	۳-۲-۵-۱- معادله $K - \varepsilon$
۶۵	۳-۳- مش
۶۷	۳-۴- شرایط مرزی
۷۰	۳-۵- ساده سازی‌ها
۷۱	۳-۶- مدل سازی اولیه
۷۱	۳-۶-۱- مشخصات کلی مدلسازی‌ها
۷۲	۳-۶-۲- مدل سازی
۷۲	۳-۶-۳- فیزیک کلی مسأله
۷۳	۳-۶-۴- مدل سازی اولیه
۷۹	۳-۷- نتیجه گیری

#### فصل چهارم: مدل سازی ثانویه (نهایی)

۸۲	۴-۱- مقدمه
۸۲	۴-۲- مدل سازی ثانویه
۸۲	۴-۲-۱- مدل شماره ۱
۸۳	۴-۲-۱-۱- مشخصات مدل
۸۶	۴-۲-۱-۲- بررسی استقلال از مش

۸۸	..... ۳-۱-۲-۴ نمودار خطا
۸۸	..... ۴-۱-۲-۴ بررسی کیفیت مش
۸۹	..... ۵-۱-۲-۴ اعتبارسنجی مدل
۸۹	..... ۶-۱-۲-۴ بررسی عیار گاز متان
۹۱	..... ۱-۶-۱-۲-۴ در ناحیه انتهایی کارگاه استخراج
۹۷	..... ۲-۶-۱-۲-۴ در ناحیه ابتدایی کارگاه استخراج
۹۸	..... ۷-۱-۲-۴ سرعت
۹۹	..... ۸-۱-۲-۴ بررسی اکسیژن
۱۰۳	..... ۲-۲-۴ مدل شماره ۲
۱۱۱	..... ۳-۲-۴ مدل شماره ۳
۱۱۹	..... ۴-۲-۴ مدل شماره ۴
۱۲۰	..... ۱-۴-۲-۴ بخش اول: بر اساس جرزبندی نوع ۱
۱۲۱	..... ۱-۱-۴-۲-۴ بررسی سرعت
۱۲۲	..... ۲-۱-۴-۲-۴ نتایج مدل ۴، جرزبندی مدل نوع ۱
۱۲۴	..... ۳-۱-۴-۲-۴ اعتبار سنجی مدل
۱۲۵	..... ۲-۴-۲-۴ بخش دوم: بر اساس جرزبندی مدل نوع ۲
۱۲۵	..... ۱-۲-۴-۲-۴ نتایج مدل
۱۲۷	..... ۲-۲-۴-۲-۴ نتیجه‌گیری مدل شماره ۴
<b>فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات</b>	
۱۳۰	..... نتیجه‌گیری
۱۳۲	..... پیشنهادات
۱۳۳	..... منابع

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۲) پهنه‌های استخراجی ..... ۱۳
- شکل (۲-۲) نمایی از یک پهنه ..... ۱۵
- شکل (۳-۲): سیستم تهویه R (شکل a)، سیستم تهویه R ساده (شکل b)، سیستم تهویه R برای ناحیه تخریب گاز خیز (شکل c) ..... ۱۶
- شکل (۴-۲) سیستم تهویه نوع Z یا Y ..... ۱۸
- شکل (۵-۲): نمایی از تهویه شریانی در جبهه کاربلند ..... ۱۹
- شکل (۶-۲): سیستم تهویه مهروموم شده ..... ۲۰
- شکل (۷-۲) تصویری از منطقه زغال سنگ طبس ..... ۲۵
- شکل (۸-۲): نمایی کلی از ورودی‌های معدن ..... ۲۹
- شکل (۹-۲): نمایی از کارگاه W2 ..... ۳۱
- شکل (۱۰-۲): مثلث آتش ..... ۳۳
- شکل (۱۱-۲): نمایی از منطقه استخراج شده ..... ۴۴
- شکل (۱۲-۲): بازدهی انواع روشهای کنترل متان ..... ۴۹
- شکل (۱۳-۲): سیستم گاز کشی عمودی منطقه تخریب ..... ۵۰
- شکل (۱-۳) نمایی از نوع جواب به دست آمده از گسسته سازی ..... ۵۵
- شکل (۲-۳) نمایی از مش بندی و حجم کنترل ..... ۵۷
- شکل (۳-۳): چگونگی تعیین ضریب منظر ..... ۶۶
- شکل (۴-۳): تأثیر تخلخل و نفوذپذیری در میزان انتشار گاز متان در منطقه تخریب (محدوده عیار گاز ۰ تا ۱۰۰ درصد) ..... ۷۸
- شکل (۵-۳): تأثیر تخلخل و نفوذپذیری در میزان انتشار گاز متان در منطقه تخریب (محدوده عیار گاز ۲ تا ۹۰ درصد) ..... ۷۸
- شکل (۶-۳): تأثیر تنظیمات نامناسب حلگر در واگرایی مدل ..... ۷۹

- شکل (۳-۷): تأثیر تنظیمات مناسب حلگر در همگرایی مدل ..... ۷۹
- شکل (۴-۱): هندسه کلی مدل شماره ۱ ..... ۸۳
- شکل (۴-۲): ترتیب زون‌های مختلف منطقه تخریب ..... ۸۴
- شکل (۴-۳): هندسه مدل شماره ۱ با تفکیک منطقه تخریب ..... ۸۴
- شکل (۴-۴): نمودار خطا ..... ۸۸
- شکل (۴-۵): محاسبه ضریب منظر با استفاده از نرم‌افزار Gambit ..... ۸۹
- شکل (۴-۶): میزان غلظت گاز متان با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد (a) ..... ۹۰
- شکل (۴-۷): میزان غلظت گاز متان با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد (b) ..... ۹۰
- شکل (۴-۸): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۰ تا ۵ درصد ..... ۹۱
- شکل (۴-۹): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۱۰ درصد ..... ۹۲
- شکل (۴-۱۰): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۹ درصد ..... ۹۲
- شکل (۴-۱۱): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۸ درصد ..... ۹۳
- شکل (۴-۱۲): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۷ درصد ..... ۹۳
- شکل (۴-۱۳): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۶ درصد ..... ۹۴
- شکل (۴-۱۴): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۵ درصد ..... ۹۴
- شکل (۴-۱۵): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۴ درصد ..... ۹۵
- شکل (۴-۱۶): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۳ درصد ..... ۹۵
- شکل (۴-۱۷): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۲ درصد (a) ..... ۹۶
- شکل (۴-۱۸): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۳ درصد (b) ..... ۹۶
- شکل (۴-۱۹): میزان غلظت گاز متان در ابتدای کارگاه استخراج با محدوده ۰/۲ تا ۱۰ درصد ..... ۹۷
- شکل (۴-۲۰): میزان غلظت گاز متان در ابتدای کارگاه استخراج با محدوده ۰/۲ تا ۵ درصد ..... ۹۷
- شکل (۴-۲۱): میزان غلظت گاز متان در ابتدای کارگاه استخراج با محدوده ۰/۲ تا ۲ درصد ..... ۹۸
- شکل (۴-۲۲): سرعت کل سیال (هوا و گاز متان) در کارگاه  $w_2$  ..... ۹۸



- شکل (۴-۲۳): کنتور غلظت اکسیژن با غلظت ۱۰ تا ۱۸ درصد..... ۹۹
- شکل (۴-۲۴): کنتور غلظت اکسیژن با غلظت ۲ تا ۸ درصد..... ۱۰۰
- شکل (۴-۲۵): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۵ تا ۱ درصد..... ۱۰۰
- شکل (۴-۲۶): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۵ تا ۱ درصد (a)..... ۱۰۱
- شکل (۴-۲۷): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۵ تا ۱ درصد (b)..... ۱۰۱
- شکل (۴-۲۸): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۰۵ تا ۱ درصد (a)..... ۱۰۲
- شکل (۴-۲۹): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۰۵ تا ۱ درصد (b)..... ۱۰۲
- شکل (۴-۳۰): غلظت گاز متان (a)..... ۱۰۳
- شکل (۴-۳۱): غلظت گاز متان (b)..... ۱۰۴
- شکل (۴-۳۲): غلظت گاز متان (c)..... ۱۰۴
- شکل (۴-۳۳): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد..... ۱۰۵
- شکل (۴-۳۴): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (a)..... ۱۰۵
- شکل (۴-۳۵): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (b)..... ۱۰۶
- شکل (۴-۳۶): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (a)..... ۱۰۶
- شکل (۴-۳۷): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (b)..... ۱۰۷
- شکل (۴-۳۸): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (a)..... ۱۰۷
- شکل (۴-۳۹): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (b)..... ۱۰۸
- شکل (۴-۴۰): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (c)..... ۱۰۸
- شکل (۴-۴۱): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (d)..... ۱۰۹
- شکل (۴-۴۲): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (e)..... ۱۰۹
- شکل (۴-۴۳): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (f)..... ۱۱۰
- شکل (۴-۴۴): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (g)..... ۱۱۰
- شکل (۴-۴۵): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (h)..... ۱۱۱

- شکل (۴-۴۶): هندسه درزه‌های روی شیلد ..... ۱۱۲
- شکل (۴-۴۷): هندسه کلی مدل ۳ ..... ۱۱۲
- شکل (۴-۴۸): سرعت در نیمه دوم کارگاه استخراج (a) ..... ۱۱۳
- شکل (۴-۴۹): سرعت در نیمه دوم کارگاه استخراج (b) ..... ۱۱۳
- شکل (۴-۵۰): سرعت در نیمه اول کارگاه استخراج ..... ۱۱۴
- شکل (۴-۵۱): سرعت در نیمه اول کارگاه استخراج با محدوده ۰ تا ۳ متربرثانیه ..... ۱۱۴
- شکل (۴-۵۲): سرعت در نیمه دوم کارگاه استخراج با محدوده ۰ تا ۳ متربرثانیه ..... ۱۱۵
- شکل (۴-۵۳): کنترل غلظت اکسیژن در نیمه دوم کارگاه استخراج بر روی دیواره شیلد با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد ..... ۱۱۵
- شکل (۴-۵۴): کنترل غلظت اکسیژن در نیمه دوم کارگاه استخراج بر روی دیواره شیلد با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد ..... ۱۱۶
- شکل (۴-۵۵): کنترل غلظت اکسیژن در کارگاه استخراج بر روی قسمت ابتدایی منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد ..... ۱۱۶
- شکل (۴-۵۶): غلظت اکسیژن در کارگاه استخراج بر روی قسمت ابتدایی منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد ..... ۱۱۷
- شکل (۴-۵۷): غلظت اکسیژن در روی قسمت راست دیواره راهرو MG و منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد ..... ۱۱۷
- شکل (۴-۵۸): غلظت گاز متان در روی قسمت ابتدایی کارگاه استخراج و منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد ..... ۱۱۸
- شکل (۴-۵۹): غلظت گاز متان در روی قسمت ابتدایی کارگاه استخراج و قسمت بالایی منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد ..... ۱۱۸
- شکل (۴-۶۰): کنترل غلظت گاز متان در روی قسمت ابتدایی کارگاه استخراج و قسمت بالایی منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد ..... ۱۱۹
- شکل (۴-۶۱): نمای هندسی با استفاده از جرزبندی نوع ۱ ..... ۱۲۰

- شکل (۴-۶۲): نمای هندسی از مختصات جرزبندی نوع ۱ ..... ۱۲۰
- شکل (۴-۶۳): مشخصات هندسی جرزبندی نوع ۱ ..... ۱۲۱
- شکل (۴-۶۴): سرعت هوا در راهرو TG ..... ۱۲۱
- شکل (۴-۶۵): وضعیت سرعت هوا در مدل ۴، جرزبندی نوع ۱ (a) (جهت هوا از سمت چپ به راست است). ۱۲۲
- شکل (۴-۶۶): توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۱ (جهت حرکت هوا از سمت چپ به راست است). ..... ۱۲۳
- شکل (۴-۶۷): کنتور توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۱ (a) (جهت حرکت هوا از سمت چپ به راست است). ..... ۱۲۳
- شکل (۴-۶۸): کنتور توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۱ (b) (جهت حرکت هوا از سمت چپ به راست است). ..... ۱۲۴
- شکل (۴-۶۹): مشخصات هندسی جرزبندی نوع ۲ ..... ۱۲۵
- شکل (۴-۷۰): توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۲ (a) ..... ۱۲۶
- شکل (۴-۷۱): توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۲ (b) ..... ۱۲۶

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲): میزان گاز خیزی لایه‌های زغالی پروده ۱ با توجه به عمق ..... ۳۰
- جدول (۲-۲): مشخصات ژئو مکانیکی کمر بالای لایه  $C_1$  ..... ۳۰
- جدول (۳-۲): مشخصات کلی کارگاه  $w_2$  ..... ۴۲
- جدول (۴-۲): خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در رابطه با میزان نفوذپذیری ..... ۴۷
- جدول (۵-۲): انواع روش‌های کنترل گاز متان و ناحیه استفاده آن ..... ۴۹
- جدول (۶-۲): میزان نشت هوای تهویه به منطقه تخریب ..... ۵۰
- جدول (۱-۳): محدوده مجاز مورب بودن ..... ۶۶
- جدول (۲-۳): دسته‌بندی انواع شرایط مرزی در فلوئنت ..... ۶۸
- جدول (۱-۴): مشخصات راهروها و کارگاه استخراج ..... ۸۳
- جدول (۲-۴): میزان نفوذپذیری در منطقه تخریب ..... ۸۵
- جدول (۳-۴): مشخصات منطقه تخریب ..... ۸۵
- جدول (۴-۴): مشخصات هوای تهویه و گازهای ..... ۸۵
- جدول (۵-۴): ابعاد مش‌های مورد آزمایش بر روی مدل در قسمت‌های کارگاه استخراج و راهروهای MG و TG ..... ۸۷
- جدول (۶-۴): ابعاد مش‌های مورد آزمایش بر روی مدل در قسمت منطقه تخریب ..... ۸۷
- جدول (۷-۴): توزیع وضعیت سرعت در طول جرزبندی ..... ۱۲۲
- جدول (۸-۴): میزان سرعت اندازه‌گیری شده در قسمت انتهایی جرزبندی ..... ۱۲۴

## فصل اول

### کلیات تحقیق

## ۱-۱- مقدمه

تهویه یکی از مراحل حیاتی در معدن‌کاری زیرزمینی است. این موضوع در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی به دلیل وجود انواع گازهای قابل اشتعال و سمی، گرد زغال و خودسوزی زغال اهمیت ویژه‌ای دارد. طراحی نادرست سیستم تهویه و یا اجرای نامناسب آن می‌تواند به طور مستقیم بر روی ایمنی و سلامت کارگران، و حتی فعالیت مناسب ماشین‌آلات تأثیر گذار باشد. مشکلات ذکر شده را می‌توان به وسیله طراحی درست و اجرای مناسب سیستم تهویه پیشگیری کرد و شرایط لازم را در معدن برای فعالیت کارگران و ماشین‌آلات به وجود آورد. در حال حاضر روش‌های متنوعی برای طراحی و مدل‌سازی سیستم تهویه وجود دارد، اما روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> (CFD) به علت هزینه مناسب و دقت بالا یکی از رایج‌ترین روش‌ها در طراحی و مدل‌سازی سیستم تهویه است.

## ۱-۲- بیان مسأله

پیشرفت جوامع بشری و گسترش صنعت باعث افزایش تقاضا برای منابع انرژی شده است. یکی از منابع تأمین انرژی زغال‌سنگ است، که به صورت روباز و زیرزمینی استخراج می‌شود. با افزایش تقاضا برای زغال‌سنگ و کاهش منابع روباز زغال‌سنگ کرد، نیاز به استخراج منابع زیرزمینی بیشتر شده است. پیشرفت‌های تکنولوژی باعث امکان استخراج از عمق بیشتر، با ابعاد و تناژ استخراجی بالاتر شده است. در عمق بیشتر میزان گازخیزی زغال‌سنگ بیشتر شده و نیز استخراج با تناژ بالاتر باعث افزایش میزان گاز آزاد شده می‌شود، که این خود باعث تحمیل بار بیشتر بر روی سیستم تهویه می‌شود، و حتی ممکن است سیستم تهویه باعث محدودیت در استخراج زغال‌سنگ شود. روش جبهه‌کار طولانی امروزه به دلیل تناژ استخراجی بالا و قیمت مناسب یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ است. اما این روش نیاز به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه زیادی دارد، لذا در تمامی مراحل طراحی و اجرا باید دقت

<sup>۱</sup> - Computational Fluid Dynamics (CFD)

بسیار بالایی داشت، از جمله مرحله طراحی سیستم تهویه که یکی از بحرانی‌ترین پارامترها در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی است.

بنابراین امروزه بر اهمیت موضوع سیستم تهویه افزوده شده است. روش‌های متنوعی برای مطالعه، طراحی و مدل‌سازی سیستم‌های تهویه وجود دارد از قبیل روش‌های عددی و CFD، روش‌های تئوری و تحلیلی، روش‌های آزمایشگاهی. روش‌های عددی و CFD به دلیل دقت بالا، انعطاف‌پذیری<sup>۱</sup>، سرعت و هزینه مناسب به طور گسترده برای طراحی و مدل‌سازی سیستم تهویه استفاده می‌شود. ویژگی اصلی این روش، شبیه‌سازی جریان سیال با دقت بالا و نمایش آن به صورت سه‌بعدی است. تحقیقات بسیاری با استفاده از روش CFD در مورد مسائل و مشکلات مختلف سیستم تهویه در معادن زیرزمینی انجام شده است، نتایج حاصل از این تحقیقات به خوبی رفتار سیال (هوا و یا سایر گازها) را نشان داده، که کمک بسیار زیادی به شناخت الگوهای جریان سیال در سیستم تهویه، و در نتیجه آن شناخت بهتر مشکلات سیستم تهویه، داشته است. در این پایان‌نامه نیز از روش CFD برای مدل‌سازی سیستم تهویه استفاده می‌شود، و سعی بر آن است که به سؤالات زیر پاسخ داده شود.

آیا روش CFD می‌تواند نقاط بحرانی و حساس را در سیستم تهویه مشخص کند؟ آیا سیستم تهویه به درستی طراحی شده است؟

### ۱-۳- اهمیت مسأله

تهویه به علت ارتباط مستقیم با سیستم تنفسی یکی از تأثیرگذارترین عوامل بر روی سلامت کارگران است. خصوصاً در معادن زغال‌سنگ به سبب وجود گردزغال و انواع گازها تهویه اهمیت ویژه‌ای دارد. در معادن زغال‌سنگ عملکرد و وضعیت سیستم تهویه باید به نحوی باشد که میزان غلظت گازها در حد

<sup>۱</sup> - Flexibility

استاندارد قرار بگیرد، مخصوصاً گاز متان که دارای خاصیت اشتعال و انفجار است، همچنین شرایط جوی محیط معدن را برای فعالیت کارگران مناسب سازد، که این خود باعث افزایش راندمان کاری می‌شود. برای رسیدن به وضعیت مطلوب، بایستی در طراحی سیستم تهویه نهایت دقت را داشت و حتی بعد از طراحی، در مرحله اجرا نیز از کارکرد صحیح سیستم تهویه اطمینان حاصل کرد. ممکن است در هنگام استخراج مشکلات غیرقابل پیش‌بینی رخ دهد، اگر به صورت صحیح و در زمان مناسب حل نشود امکان دارد خطرات بسیار جدی در طول زمان استخراج ایجاد کند و فرآیند استخراج با مشکل روبرو سازد و حتی باعث شود که عملاً دیگر امکان پیشروی و استخراج وجود نداشته باشد. با استفاده از روش CFD می‌توان سیستم تهویه را به صورت مناسب طراحی، و در مرحله اجرا و استخراج از موارد ذکر شده، با صرف هزینه و مدت زمان مناسب، اطمینان حاصل نمود.

#### ۴-۱- ضرورت انجام تحقیق

پیشرفت تکنولوژی استخراج و معدن‌کاری منجر به افزایش عمق زغال‌سنگ استخراجی و بزرگ‌تر شدن ابعاد استخراج شده است، که در نتیجه بر مشکلات سیستم تهویه از قبیل انتشار گازهای سمی و قابل انفجار، گرد زغال، خودسوزی زغال و حرارت ناشی از آن و فراهم کردن محیط مناسب برای کار (که باعث افزایش راندمان کاری می‌گردد) افزوده می‌شود، رفع این مشکلات مهم‌ترین وظیفه سیستم تهویه است.

امروزه نیاز به مطالعه و شناخت بیشتر مشکلات طراحی و اجرای سیستم تهویه بیشتر شده است تا تکنولوژی سیستم تهویه (در بخش طراحی و اجرا) همگام با پیشرفت تکنولوژی استخراج پیشرفت کند تا گسترش و پیشرفت صنعت معدن‌کاری با مشکل روبرو نشود، و با توجه به پیشرفت‌های روز افزون تکنولوژی‌های استخراج امری ضروری است. روش‌های CFD یکی از روش‌هایی است که در دهه اخیر به



علت دقت، سرعت بالا و هزینه مناسب برای طراحی و مدل سازی سیستم تهویه بسیار مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۵-۱- پیشینه تحقیق

از سال ۱۹۸۰ پیشرفت بسیار زیاد تکنولوژی کامپیوترها و کامل تر شدن نرم افزارهای CFD تحقیقات بسیار زیادی در خصوص تهویه در معادن زغال سنگ، در روش جبهه کار طولانی تمرکز اصلی این تحقیقات در رابطه با خصوصیات و ویژگی های منطقه تخریب (به دلیل حساسیت این ناحیه) بوده است. با توجه اینکه شرایط و ویژگی های هر معدن می تواند بسیار متفاوت باشد و مدل سازی انجام شده برای هر معدن می تواند بسیار متفاوت باشد، لذا از توضیح جامع تحقیقات صرف نظر شده و در هنگام طراحی مدل سازی و به توضیح نتایج این تحقیقات با توجه به نیاز و قسمت مدل سازی توضیح داده می شود.

لوندز<sup>۱</sup> و همکاران، مطالعه ای بر تأثیر تغییرات جوی، بر روی ایمنی کارگران در داخل معدن زغال سنگ (در داخل تونل معدنی) با استفاده از مدل سازی کامپیوتری و استفاده از نرم افزار CLIMSIM پیشنهاد کرد (Lowndes et al, 2004).

بالوسو<sup>۲</sup> و رن<sup>۳</sup>، مدل سازی CFD جابه جایی گاز زغال سنگ در ناحیه تخریب روش جبهه کار طولانی کار انجام دادند و از نتایج آن برای کنترل خودسوزی استفاده کردند (Balusu and Ren, 2005).

یوان<sup>۴</sup> و همکاران، بر روی الگوهای جریان سیال در ناحیه تخریب بر اساس مدل سازی CFD کار کردند، آنها این تحقیق را بر روی سه مدل سیستم تهویه (با تغییر درها و مسیرهای تهویه) را انجام دادند و آنها به این نتیجه دست یافتند که حداکثر جریان در قسمت پشت سپر نگهدارنده قدرتی است (Yuan et al, 2006).

<sup>1</sup> - Lowndes

<sup>2</sup> - Balusu

<sup>3</sup> - Ren

<sup>4</sup> - Yuan

تارابا<sup>۱</sup> و همکاران، تحقیقی در رابطه با اکسیداسیون زغال و گرمای ناشی از آن در منطقه تخریب روش جبهه کار طولانی انجام دادند، آنها در این تحقیق برای به دست آوردن الگوی رفتار زغال در اثر فرآیند خودسوزی از آزمایش‌های آزمایشگاهی استفاده کردند، و سپس با استفاده از نتایج آن بر اساس شبیه‌سازی CFD گسترش خودسوزی و حرارت ناشی از آن را در منطقه تخریب مدل کردند. آنها در این تحقیق به این نتیجه که در منطقه تخریب ناحیه‌ای وجود دارد که برای گسترش و پیشرفت سریع فرآیند گرمایش خودبه‌خودی بسیار مستعد است (Taraba et al, 2008).

آتالولون<sup>۲</sup>، تحقیقاتی با استفاده از شبیه‌سازی CFD در موقعیت منطقه داغ (پر خطر، از نظر مستعد بودن برای افزایش دما) در ناحیه تخریب جبهه کار طولانی (بر اساس سناریوهای مختلف) معادن زغال سنگ انجام داد که مدلی آزمایشگاهی از جبهه کار طولانی ساخته شده است و خصوصیات منطقه تخریب در آزمایشگاه شبیه‌سازی و از نتایج آن در مدل‌سازی استفاده می‌شود (Atta lolon, 2008).

گوان نان<sup>۳</sup> و همکاران، شبیه‌سازی جریان تبادل دمایی بین هوای تهویه و هوای معدن در معادن زغال سنگ با استفاده از مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند (Guan-nan et al, 2009).

رن و بالوسو، با استفاده از مدل‌سازی CFD روش جبهه کار طولانی را شبیه‌سازی، و از نتایج آن برای حل مشکل گرد و غبار استفاده کردند و پیشنهادهایی در رابطه با خصوصیات و نحوه گازکشی از منطقه تخریب، خودسوزی و کنترل آن و حرارت ایجاد شده در منطقه تخریب و گرد و غبار ناحیه جبهه کار دادند (Ren and Balusu, 2010).

دگاما<sup>۱</sup>، از مدل‌سازی CFD برای کنترل گاز متان و گرد و غبار در معادن زغال سنگ زیرزمینی استفاده کرده است. نتایج مدل‌سازی به وسیله مدل آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته، و از نتایج برای تعیین موقعیت بهینه فن‌ها استفاده کرده است (Ndeguma, 2010).

---

<sup>1</sup> - Taraba

<sup>2</sup> - Atta lolon

<sup>3</sup> - Guan-nan

استفنز<sup>۲</sup>، تحقیقات آزمایشگاهی به همراه مدل‌سازی CFD برای مشخص کردن نشت هوا در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی انجام داد، از دو نرم‌افزار VNETPC و Fluent برای مدل‌سازی استفاده کرده است و یک مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱/۲۵ ساخته شده ( منطقه تخریب جزئی از مدل ساخته شده نیست ) که از نتایج مدل آزمایشگاهی برای کالیبره کردن مدل CFD استفاده شده است (Stephens, 2011).

تارابا<sup>۳</sup> و مایکلک<sup>۴</sup>، بر روی تأثیر نرخ پیشروی جبهه کار طولانی در فرآیند گرمایش خودبه‌خودی در ناحیه تخریب با استفاده از مدل‌سازی CFD کار کردند. بر اساس این تحقیق، در ناحیه تخریب یک زون مستعد در افزایش حرارت وجود دارد، که موقعیت و حداکثر دمای آن، رابطه‌ی مستقیمی با نرخ پیشروی جبهه کار دارد؛ در نرخ پیشروی کمتر حداکثر دما و کمترین عمق زون در ناحیه تخریب دیده می‌شود (Taraba and Michalec, 2011).

ورال<sup>۵</sup>، تحقیقاتی بر روی مدل‌سازی الگوی جریان گاز در جبهه کار طولانی معادن زغال‌سنگ با استفاده از CFD انجام داد، ورال برای تعیین نفوذپذیری و تخلخل ناحیه تخریب از نرم‌افزار Flac 3D استفاده کرده است. ورال هم چنین اثر تزریق گاز نیتروژن، اثر حساسیت پارامترهای طراحی بر و به کاهش حجم گازهای قابل انفجار در منطقه تخریب تحقیق کرده است (Worrall, 2012).

تنگوتوری<sup>۶</sup> و بالوسو<sup>۷</sup>، مدل‌سازی CFD انتشار گاز متان و سازوکار کنترل آن در معادن زغال‌سنگ جبهه کار طولانی انجام داده‌اند، آنها در این تحقیق اثرات گازکشی در منطقه تخریب و پرده هواوند در کارگاه استخراج را مورد بررسی قرار داده‌اند (Tanguturi and Balusu, 2014).

---

<sup>1</sup> - Ndeguma

<sup>2</sup> - Stephens

<sup>3</sup> - Taraba

<sup>4</sup> - Michalec

<sup>5</sup> - Worrall

<sup>6</sup> - Tanguturi

<sup>7</sup> - Balusu

## ۱-۶- روش تحقیق

تهویه یکی از بحرانی‌ترین مسائل در معادن زغال‌سنگ زیرزمینی است، که تأخیر و یا انجام نادرست آن در کوتاه مدت یا بلند مدت باعث آسیب‌های جدی به کارگران و حتی ماشین‌آلات می‌شود. بنابراین طراحی و اجرای آن بسیار مهم و ضروری است. روش‌های متنوعی برای طراحی و مدل‌سازی تهویه وجود دارد که با توجه به امکانات در دسترس و ویژگی‌های روش‌ها، روش CFD برای مدل‌سازی در این تحقیق انتخاب می‌شود. با توجه به ویژگی‌های نرم‌افزار Fluent، تعدد مقالات و تحقیقاتی (در رابطه با تهویه معادن زغال‌سنگ) که با نرم‌افزار Fluent انجام شده، این نرم‌افزار برای طراحی و مدل‌سازی تهویه مناسب بوده و بنابراین برای مدل‌سازی در این تحقیق استفاده می‌شود.

در این پایان‌نامه ابتدا به صورت دستی، با توجه به شرایط و ویژگی‌های معدن مورد مطالعاتی، سیستم تهویه طراحی می‌شود، سپس با استفاده از نرم‌افزار Gambit مدل هندسی اولیه از سیستم تهویه معدن ساخته می‌شود و خروجی آن با استفاده از نرم‌افزار Fluent اجرا می‌شود. با توجه به نتایج مدل اولیه اصلاحات مناسب انجام می‌شود و دوباره مدل هندسی در صورت نیاز اصلاح و با نرم‌افزار Fluent اجرا می‌شود، استقلال این نتایج از مقدار مش‌بندی باید اثبات شود، سپس نتایج اعتبارسنجی شده و از درستی و صحت نتایج اطمینان حاصل می‌شود.

در نهایت نتایج مدل‌سازی و محاسبات دستی انجام شده، مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرد و با توجه به آن مسائل بحرانی و در صورت لزوم بهینه‌سازی انجام می‌شود.

## ۱-۷- اهداف تحقیق

حوضه زغال دار طبس با وسعتی بالغ بر ۳۰ هزار کیلومترمربع با ذخیره اکتشافی ۲/۵ میلیارد تن زغال‌سنگ کک‌شو و زغال‌سنگ حرارتی، یکی از بزرگترین ناحیه‌های زغالی در خاورمیانه است که از سال

۱۳۵۷ عملیات اکتشافی و شناسایی روی آن انجام گرفته و هم اکنون نیز ادامه دارد و روش اصلی

استخراج زغال جبهه کار طولانی است؛ با توجه به شرایط و ویژگی‌های این معدن اهداف زیر مدنظر است:

- مدل‌سازی سیستم تهویه با استفاده از روش CFD و شبیه‌سازی هوای تهویه (با انجام ساده‌سازی‌های مناسب).

- بررسی وضعیت سیستم تهویه بر اساس شبیه‌سازی انجام شده.

- برطرف کردن مشکلات احتمالی با استفاده از شبیه‌سازی در CFD و انجام مجدد شبیه‌سازی پس از رفع مشکل.

- مشخص کردن نقاط بحرانی و حساس در سیستم تهویه.

### ۱-۸- ساختار پایان‌نامه

فصل اول: مسأله مورد تحقیق تعریف، اهمیت تحقیق و تاریخچه مسأله بیان شد.

فصل دوم: روش تحقیق، شرایط و ویژگی‌های مسأله و مطالعه موردی پرداخته شده است.

فصل سوم: مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی، ساخت مدل هندسی و اجرای مدل اولیه ساخته شده، بحث و نتیجه‌گیری از اجرای اولیه و اصلاح مدل صورت گرفته شده است.

فصل چهارم: ساختن مدل اصلی با استفاده از نتایج مدل اولیه و اجرای آن، بحث و نتیجه‌گیری.

فصل پنجم: خلاصه و نتیجه‌گیری، پیشنهادها.



## فصل دوم

### مفاهیم و مبانی نظری

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل روش استخراج جبهه کار طولانی و انواع روش‌های تهویه توضیح داده، و با توجه به سیستم تهویه معدن زغال سنگ طبس، سیستم به صورت دستی محاسبه می‌شود. برای مدل‌سازی CFD، ابتدا مدل هندسی سیستم تهویه در نرم‌افزار Gambit ساخته و مش‌بندی شده، سپس خروجی نرم‌افزار Gambit وارد نرم‌افزار Fluent، و با توجه به شرایط معدن، مدل‌سازی انجام می‌شود (این بخش دارای دو مرحله اولیه و ثانویه است). استقلال نتایج خروجی مدل ثانویه از میزان مش‌بندی اثبات و سپس نتایج اعتبارسنجی می‌شود. در نهایت نتایج و محاسبات دستی، مورد نقد و بررسی قرار قرار می‌گیرد.

۲-۲- روش جبهه کار طولانی<sup>۱</sup>

روش جبهه کار طولانی (یا بلند) از جمله روش‌هایی است که در معادن زغال و گاهی در معادن فلزی یا غیر فلزی و به طور کلی در کنسارهای لایه‌ای با شیب و ضخامت کم به کار می‌رود. استفاده از روش جبهه کار طولانی در قرن هفدهم در معادن زغال سنگ اروپا آغاز شد. امروزه یکی روش‌های پرکاربرد برای استخراج زغال سنگ روش جبهه کار طولانی است.

روش جبهه کار طولانی در زمره روش‌های بزرگ مقیاس از نظر بهره‌برداری و یکی از ارزان‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی است. در این روش در مقایسه با هر روش استخراج دیگری به ازای آماده‌سازی مشخص، تناژ استخراجی بالاتری به دست می‌آید.

## ۲-۲-۱- نحوه آماده‌سازی

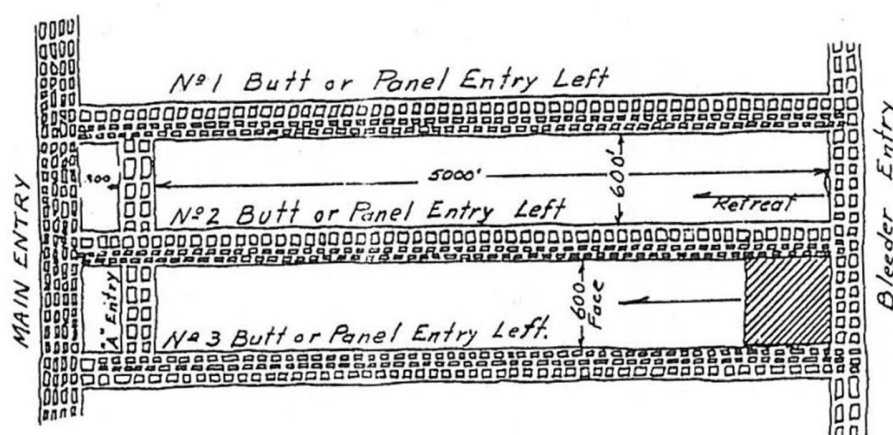
برای آماده‌سازی کارگاه استخراج روش جبهه کار طولانی راهروهای اصلی در داخل ماده‌ی معدنی حفر می‌شود و از این راهروها، راهروهای پهنه‌ای<sup>۱</sup> به صورت متعامد منشعب می‌شوند. این راهروها در انتها به

---

<sup>۱</sup> - Longwall



راهروهای شریانی متصل می‌شوند. راهروهای شریانی به منظور برگشت هوای آلوده به مسیرهای هوای برگشتی اصلی متصل هستند. بدین ترتیب کانسار به تعدادی بلوک تقسیم می‌شود که هر یک از این بلوک های استخراجی، پهنه<sup>۲</sup> نامیده می‌شود که برای استخراج در یک مرحله در نظر گرفته شده است. بنابراین پهنه از سمت پیشروی دارای ابعاد زیادتری است. پهنه‌ها اصولاً به یک مستطیل شباهت دارد که بعد سوم آن به ضخامت لایه که معمولاً بین ۱ تا ۳ متر تغییر می‌کند، محدود شده است.



شکل (۱-۲) پهنه‌های استخراجی (عطایی، ۱۳۹۰)

در این روش به تونل بالایی، سر میله و یا تونل سرویس گفته می‌شود که معمولاً هوا از طریق این تونل از کارگاه خارج می‌شود و به همین دلیل به آن راهرو خروجی<sup>۳</sup> نیز گفته می‌شود. به تونل پایینی، که معمولاً برای حمل و نقل مواد استخراجی به کار می‌رود، زیر میله، تونل باربری و یا راهرو ورودی نیز گفته می‌شود. در صورتی که لایه استخراجی افقی باشد عمق یا ارتفاع راهرو بالایی با راهرو پایینی یکی است و نام‌گذاری این دو تونل استخراجی مطابق سلیقه افراد یا با توجه به اطلاعات کسب شده از سایر نقاط انجام می‌شود (عطایی، ۱۳۹۰).

<sup>1</sup> - Panel entries

<sup>2</sup> - Panel

<sup>3</sup> - Tail entry

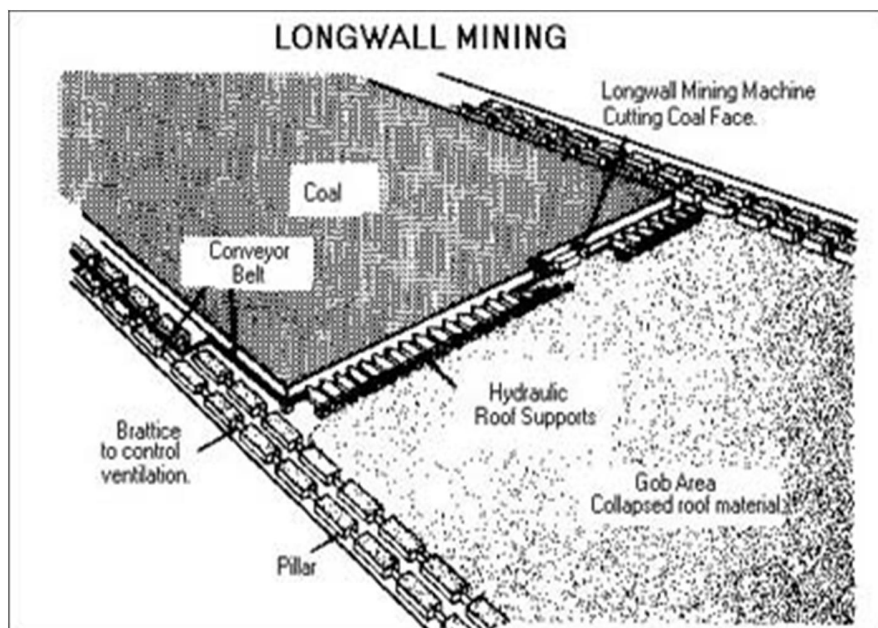
## ۲-۲-۲- نحوه استخراج

پس از ایجاد پهنه استخراجی، استخراج با کندن برش‌های کم عرض به صورت پیشرو یا پسرو انجام می‌شود. در روش پیشرو پس از حفر راهروهای ورودی و خروجی پهنه، راهرو نصب تجهیزات به موازات راهرو اصلی و در پشت پایه حائل می‌شود و در داخل آن تجهیزات کارگاه شامل سیستم کندن، وسایل نگهداری و حمل‌ونقل نصب می‌شود. پس از آماده کردن و تجهیز کارگاه، مواد معدنی توسط برش‌هایی در طول کارگاه، استخراج شده و جبهه کار به سمت راهرو شریانی (راهرو مرزی) حرکت می‌کند. در روش پسرو راهروی نصب تجهیزات<sup>۱</sup> به موازات راهرو شریانی حفر شده و جبهه کار به سمت ورودی اصلی حرکت می‌کند.

برای کندن ماده معدنی ممکن است از پیکور، چال زنی و انفجار و یا ماشین‌های زغال‌کن استفاده شود. مواد کنده شده بر روی ناو مجاور جبهه کار ریخته شده و توسط آن به نقاله اصلی در تونل حمل‌ونقل منتقل می‌شود. در سیستم‌های مکانیزه حمل‌ونقل در داخل کارگاه استخراج توسط ناو زنجیری و یا ناوهای AFC<sup>۲</sup> انجام می‌شود. سقف نزدیک جبهه کار به وسیله پایه‌های چوبی، تک پایه‌های فلزی، پایه‌های اصطکاکی، جک‌های هیدرولیکی و یا توسط وسایل نگهداری قابل انعطاف قدرتی، که توان تحمل بار زیادی دارند و از پایه و سپر تشکیل شده‌اند، نگهداری می‌شود. با پیشروی جبهه کار، ناو مخصوص جبهه کار و تجهیزات نگهداری با یک برنامه معین به سمت جلو حرکت می‌کنند و به سنگ‌های سقف در پشت تجهیزات نگهداری، امکان تخریب داده می‌شود. تخریب باعث می‌شود که از فشار زیاد ناشی از وزن طبقات بالایی بر روی وسایل نگهداری کاسته شود. لذا از تخریب وسایل نگهداری جلوگیری خواهد شد. منطقه تخریب شده را فضای تخریب می‌نامند (عطایی، ۱۳۹۰).

<sup>۱</sup> - Setup entry

<sup>۲</sup> - AFC = Armoured face conveyor



شکل (۲-۲) نمایی از یک پهنه (عطایی، ۱۳۹۰)

به خاطر تهویه حفر دو راهرو الزامی است. هوا و تجهیزات از یک راهرو وارد و از راهرو دیگر هوای کثیف و مواد معدنی استخراج شده خارج می‌شود. معمولاً راهرویی که مواد معدنی از آن خارج می‌شود راهرو اصلی<sup>۱</sup> و راهرویی که هوای تازه از آن وارد می‌شود راهرو فرعی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود (عطایی، ۱۳۹۰).

### ۲-۳- سیستم تهویه

انتخاب نوع سیستم تهویه در معادن جبهه کار طولانی به شرایط موجود در آن معدن وابسته است، از قبیل میزان گاز آزاد شده که به گازخیزی معدن و میزان استخراج وابسته است، میزان گرد و غبار آزاد شده که به نوع ماشین استخراج و نحوه استفاده از آن بستگی دارد، تعداد کارگران و ماشین‌آلات در حال کار، میزان دما و رطوبت. تأثیرگذارترین عامل در انتخاب نوع سیستم تهویه میزان گاز موجود در محیط معدن است.

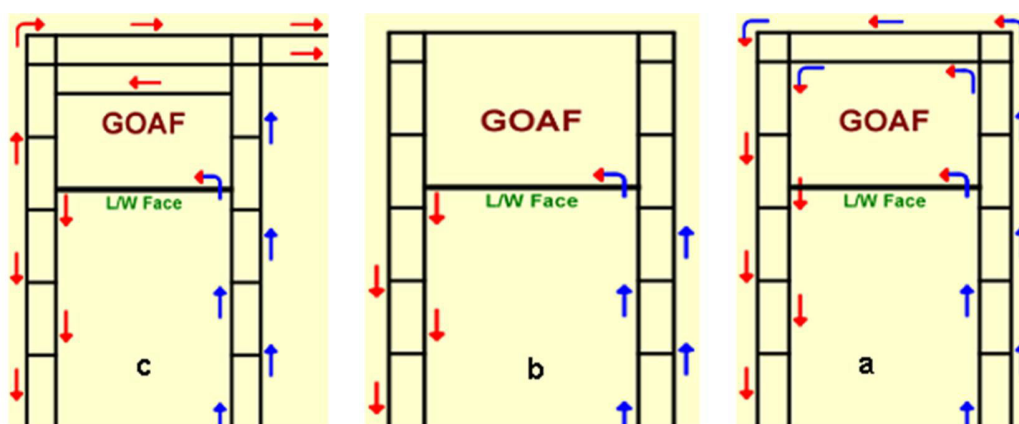
<sup>۱</sup> - Main gate ( MG )

<sup>۲</sup> - Tail gate ( TG )

سیستم‌های متنوعی برای تهویه معادنی که به روش جبهه کار طولانی استخراج می‌شوند وجود دارد، که مهم‌ترین این سیستم‌ها در ادامه توضیح داده می‌شوند، و تقریباً دیگر سیستم‌های تهویه از این سیستم‌ها منشعب می‌شوند، ویژگی‌ها و تغییرات در نوع سیستم تهویه به هنر مهندسان تهویه بستگی دارد.

### ۲-۳-۱-۱ سیستم تهویه "R"

این سیستم شامل مجموعه‌ای از تونل‌های (راهروهایی) ورودی و خروجی هوا، که در دو طرف بلوک جبهه کار طولانی قرار دارد، می‌شود. جهت حرکت هوا در ورودی‌ها<sup>۱</sup> و خروجی‌های<sup>۲</sup> (بازگشتی) هوا عکس همدیگر هستند. این نوع سیستم در مواقعی استفاده می‌شود که هیچ خروجی هوای اصلی در داخل<sup>۳</sup> یا انتهای ناحیه استخراج شده قرار نگیرد. مسیرهای حمل و نقل معمولاً سمت متروکه اطراف قسمت استخراج شده بلوک قرار می‌گیرد برای به حداقل رساندن درهای تهویه<sup>۴</sup> در اطراف مرز ناحیه تخریب.



شکل (۲-۳): سیستم تهویه R (شکل a)، سیستم تهویه R ساده (شکل b)، سیستم تهویه R برای ناحیه تخریب گاز خیز (شکل c)

این نوع سیستم فقط برای لایه‌های زغال با نرخ انتشار گاز خیلی کم می‌توان مورد استفاده قرار بگیرد زیرا در این نوع سیستم ناحیه تخریب به خوبی تهویه نمی‌شود و گازهای منتشر در ناحیه به TG

<sup>1</sup> - Intake  
<sup>2</sup> - Return  
<sup>3</sup> - Inbye  
<sup>4</sup> - Bleeder

بازگردانده می‌شود. میزان جریان هوای تهویه معمولاً بیش از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه است. این روش همچنین به دلیل شباهت مسیرهای تهویه با حرف U سیستم تهویه U نیز شناخته می‌شود (Hartman, 2012).

### ۲-۳-۱-۲- سیستم تهویه R برای ناحیه تخریب گاز خیز

در این سیستم تهویه ناحیه استخراج مانند سیستم R است اگرچه درهای تهویه اضافی، از قسمت پشتی ناحیه تخریب، برای فراهم کردن تهویه مثبت (قطعی) مسیرهای انتقال گاز ناحیه تخریب امکان-پذیر می‌کند. درهای تهویه هوای برگشتی از ناحیه تخریب با میزان جریان هوای حدود ۲۰ تا ۳۰ مترمکعب بر ثانیه از هوای ورودی پانل ورودی رقیق می‌شود که البته این میزان هوا برای ترقیق به نرخ انتشار گاز بستگی دارد (Darling, 2011).

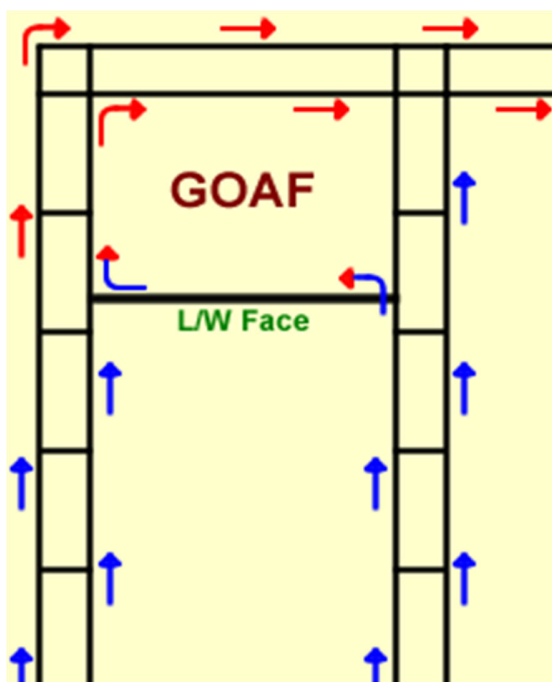
جبهه کار استخراج با میزان هوایی بین ۱۵ تا ۲۵ مترمکعب بر ثانیه تهویه می‌شود و میزان اندکی از این میزان هوا به ناحیه تخریب وارد و از TG خارج می‌شود تا مطمئن شویم که تمام گازهای ناحیه تخریب به درهای تهویه برگشتی منتقل شود و در TG منتشر نشود. این نوع سیستم تهویه در لایه‌های زغالی با نرخ انتشار گاز متوسط (۵ تا ۱۰ مترمکعب بر تن) و نفوذپذیری کم استفاده می‌شود.

### ۲-۳-۱-۳- سیستم تهویه “Z” یا “Y”

این نوع سیستم بیشترین اختلاف فشار را در سراسر ناحیه تخریب ایجاد می‌کند و بیشترین انعطاف-پذیری<sup>۱</sup> را برای ترقیق هوای ورودی را فراهم می‌کند. از این نوع سیستم در لایه‌های زغالی که حاوی گاز زیادی هستند (بیش از ۱۰ مترمکعب بر تن) استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup> - Flexibility

سه نوع اصلی سیستم تهویه در معادن زغال سنگ که به روش جبهه کار طولانی استخراج می‌شوند معرفی شد.



شکل (۴-۲) سیستم تهویه نوع Z یا Y

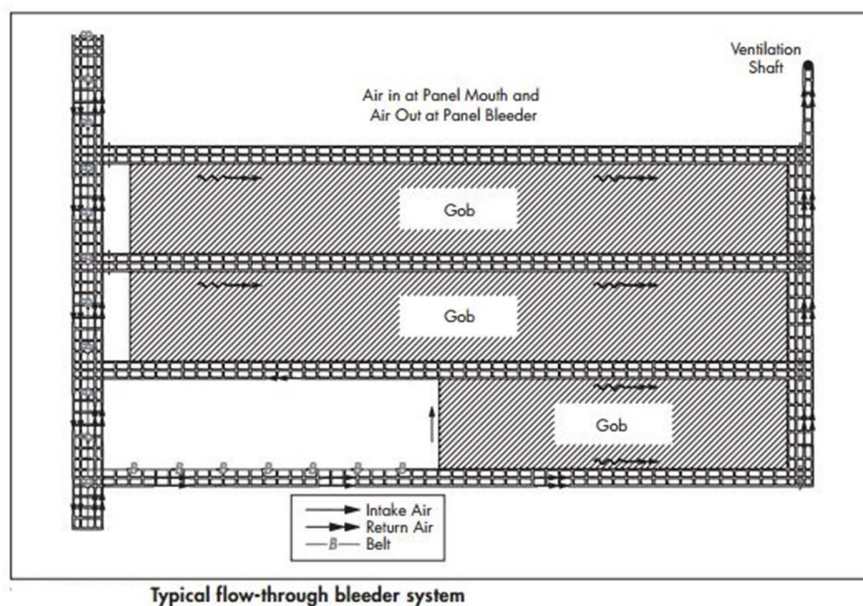
۲-۳-۲- سیستم تهویه بر اساس نوع تهویه منطقه تخریب

۲-۳-۲-۱- سیستم تهویه شریانی جبهه کار طولانی<sup>۱</sup>

این سیستم تهویه مبتنی بر ترقیق و خارج کردن گاز متان از منطقه تخریب است؛ که به عنوان تهویه شریانی شناخته می‌شود.

در ایالات متحده آمریکا برای تهویه منطقه تخریب این نوع سیستم تهویه رایج است (شکل ۲-۵).

<sup>۱</sup> - Bleeder Longwall Ventilation System



شکل (۲-۵): نمایی از تهویه شریانی در جبهه کاربلند (sme darling volume2).

در تهویه شریانی از رگلاتور<sup>۱</sup> (تنظیم کننده)، برای ایجاد فشار هوای مورد نیاز برای ایجاد جریان در داخل منطقه تخریب، استفاده می شود. رگلاتورها معمولاً در نقاطی استراتژیک مانند دو انتهای پانل انتخاب می-شود. محل رگلاتورها باید به نحوی انتخاب شود که:

- منجر به تولید جریان در سراسر منطقه تخریب گردد؛ تا از افزایش غلظت گاز متان در منطقه تخریب جلوگیری کند.

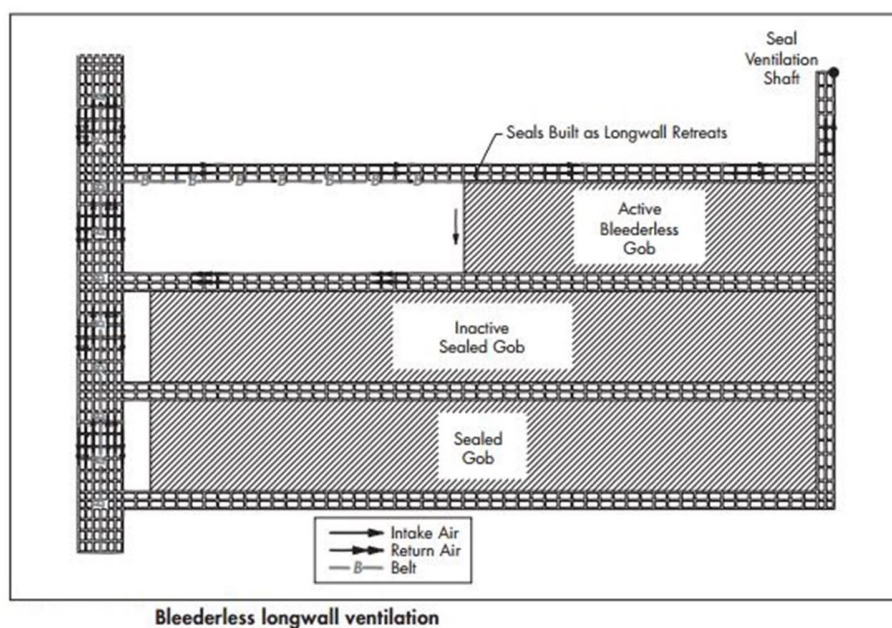
- در دسترس باشد؛ زیرا با پیشروی جبهه کار به وسعت منطقه تخریب افزوده می شود در نتیجه مقاومت ذاتی منطقه تخریب در مقابل تهویه بیشتر می گردد، پس نیاز است که رگلاتورها مورد اصلاح گیرند تا فشار تهویه لازم در منطقه تخریب را تأمین کنند.

<sup>۱</sup> - Regulator

- تهویه شریانی باید به نحوی باشد که در صورت ایجاد وقفه در عملکرد سیستم تهویه، منطقه تخریب مورد هجوم گاز متان (به مقدار زیاد) قرار نگیرد. برای گازکشی تکمیلی در تهویه شریانی معمولاً از چال-های عمودی در نزدیکی جبهه کار و یا پایه‌ها استفاده می‌شود (Hartman، 2012).

### ۲-۲-۳-۲- سیستم تهویه مهروموم شده جبهه کار طولانی<sup>۱</sup>

در این نوع سیستم تهویه برخلاف سیستم تهویه شریانی سعی بر آن است که از ورود هوای تهویه به داخل منطقه تخریب جلوگیری شود (شکل ۲-۶). سیستم تهویه مهروموم شده معمولاً به همراه چال‌های گازکشی از منطقه تخریب و همچنین تزریق گاز خنثی به منطقه تخریب استفاده می‌شود (Darling, 2011).



شکل (۲-۶): سیستم تهویه مهروموم شده (sme darling volume2)

<sup>۱</sup> - Bleederless Longwall Ventilation System



## ۲-۴- مشکلات و ویژگی‌های سیستم تهویه معادن زغال سنگ روش جبهه کار طولانی

مشکلات اصلی تهویه معادن زغال سنگ در هنگام استخراج (با توجه به مدل‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> (CFD) انجام شده) عبارت‌اند از:

۱- تجمع گاز زغال در تونل‌های دسترسی، به صورت عمده در راهرو فرعی<sup>۲</sup> (TG) و گاهی با توجه به

نوع سیستم تهویه در راهرو اصلی<sup>۳</sup> (MG) و نیز قسمتی از سینه کار استخراجی (اکثراً در ناحیه اتصال با راهرو فرعی) (Balusu and Ren, 2010).

۲- تشکیل گرد زغال و خروج گاز زغال در هنگام استخراج و پیشروی (در سینه کار استخراجی) (Heerden and Sullivan, 1993).

۳- خودسوزی<sup>۴</sup> زغال و افزایش دمای ناشی از این فرآیند اکسیداسیون در ناحیه تخریب<sup>۵</sup> (2009 Yuan and Smith).

یکی از راه‌حل‌های مناسب برای برطرف کردن (پس از انتشار گاز) و پیش‌گیری از این مشکلات طراحی سیستم تهویه مناسب است، این سیستم تهویه باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:

۱- در سینه کار استخراج سرعت تهویه به مقداری باشد که از پراکنده شدن گرد زغال در طول سینه

کار استخراج جلوگیری کند و همچنین نیز در تونل‌های دسترسی گرد زغال ته‌نشین شده بر روی کف تونل نیز پراکنده نشود (Smith and Yuan, 2008).

۳- میزان دبی هوای تهویه در تونل‌ها و سینه استخراج به گونه‌ای باید باشد که از تجمع گازها (عمدتاً گاز متان) جلوگیری شود و همواره غلظت گازها در حدود مقادیر استاندارد قرار داشته باشد.

<sup>۱</sup> - CFD = Computational Fluid Dynamics

<sup>۲</sup> - TG = Tail Gate

<sup>۳</sup> - MG = Main Gate

<sup>۴</sup> - Spontaneous heating process

<sup>۵</sup> - Gob

۴- در ناحیه تخریب، با توجه به نوع سیستم تهویه مورد استفاده، هوای تهویه باید به گونه‌ای باشد که باعث تشدید شدت فرآیند خودسوزی زغال نگردد و میزان حرارت ناشی از اکسیداسیون زغال نیز افزایش نیابد.

در هنگام پیشروی سینه کار استخراجی (با توجه به نرخ پیشروی سینه کار)، و به تناسب آن افزایش ناحیه تخریب، در داخل ناحیه تخریب یک زون مستعد برای افزایش دما (ناشی از فرآیند خودسوزی زغال) تشکیل می‌شود (Taraba and Michalec, 2011)، که در نتیجه آن اثر تهویه در این منطقه مانند شمشیری دو لبه می‌شود که هم سودمند است (در صورت طراحی و استفاده صحیح) و هم مضر (افزایش فرآیند خودسوزی و گرمای به وجود آمده).

افزایش میزان هوای تهویه در این ناحیه باعث کاهش دمای این زون می‌شود اما در عوض باعث شدت یافتن فرآیند اکسیداسیون و در نتیجه آن افزایش حرارت می‌شود. کاهش میزان هوای تهویه باعث کاسته شدن از شدت فرآیند خودسوزی زغال می‌شود اما در نتیجه آن باعث افزایش دمای (تراکم دمایی) این زون می‌گردد.

مشکلات اصلی و ویژگی‌های سیستم تهویه در معدن زغال‌سنگ به صورت خلاصه ذکر شد، یک سیستم تهویه مناسب تا حدود زیادی می‌تواند در صورت داشتن طراحی مناسب از این مشکلات جلوگیری و در هنگام اجرا و استخراج این مشکلات را حل کند.

هزینه‌های اصلاح و مشکلات ناشی از یک سیستم نامناسب و غلط به مراتب بیشتر از طراحی یک سیستم تهویه مناسب است.

## ۲-۵- انواع روش‌های مدل‌سازی سیستم تهویه

برای طراحی و مدل‌سازی تهویه روش‌های مختلفی وجود دارد که شامل:

## ۲-۵-۱- روش‌های تجربی (آزمایشگاهی)

این روش‌ها بر پایه اندازه‌گیری‌های عملی و اغلب بر اساس قضیه پی باکینگهام بنا شده‌اند، یعنی با بی بعدسازی معادلات می‌توان به جای آزمایش کردن یک مدل حقیقی با اندازه بزرگ و شرایط خاص، یک نمونه کوچکتر و با شرایط مناسب آزمایش کرد، سپس با استفاده از قضیه پی باکینگهام نتایج حاصله را به مدل حقیقی و اصلی نسبت داد؛ از طرفی با کمک این قضیه و بی بعد سازی می‌توان تعداد آزمایش‌های لازم برای رسیدن به نتیجه را کاهش داد.

ویژگی‌های این روش:

- این روش معمولاً گران است و نیاز به این دارد که یک نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شود.
- اطلاعات و نتایج به دست آمده از این روش فقط برای مدل و شرایط خاصی صدق می‌کند و جامعیت لازم را ندارد.
- نتایج به دست آمده از این روش دقیق است و معمولاً برای تأیید صحت روش‌های دیگر از آن استفاده می‌شود.

## ۲-۵-۲- روش‌های تئوری و تحلیلی

روش‌های تئوری و تحلیلی بر اساس حل معادلات حاکم در سیالات و انتقال حرارت ساخته شده، در اکثر موارد قوانین پایه مکانیک (قانون بقای جرم، قانون بقای ممنتوم) و انتقال حرارت به صورت معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای<sup>۱</sup> (PDE) مرتبه دومی تبدیل می‌شود که تا به حال برای آنها تحلیلی پیدا نشده است و تنها با اعمال ساده‌سازی‌هایی، در بعضی از حالت‌های خاص دارای حل تحلیلی و دقیق هستند. ساده‌سازی‌هایی که برای قابل حل شدن معادلات انجام می‌شود به حدی زیاد است که باعث می‌شود در عمل این روش کاربرد چندانی نداشته باشد و به طور غیرمستقیم استفاده شود.

<sup>۱</sup> - Partial Differential Equations (PDE)

## ۲-۵-۳- روش‌های عددی و CFD

معادلات به دست آمده در روش تحلیلی، یک مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیرخطی و وابسته است که باید در یک قلمرو ناهموار و با شرایط اولیه و مرزی متفاوت حل شود، این دستگاه معادلات با اعمال شرایط مرزی و با استفاده از سرعت بالای پردازش رایانه، بدون آنکه معادلات بقا زیاد ساده شوند، حل می‌شوند، این روش حل CFD یا دینامیک سیالات محاسباتی نام دارد (دهقانی، ۱۳۸۷).

ویژگی‌های این روش:

کاهش بسیار زیاد در زمان و هزینه، امکان مطالعه و شبیه‌سازی مسائلی که انجام آزمایش‌ها به روی آنها مشکل یا غیرممکن است، ارائه اطلاعات و جزئیات بسیار دقیق، برای مدل‌های پیچیده نیاز به ابر کامپیوتر است که دارای قیمت بسیار بالایی هستند.

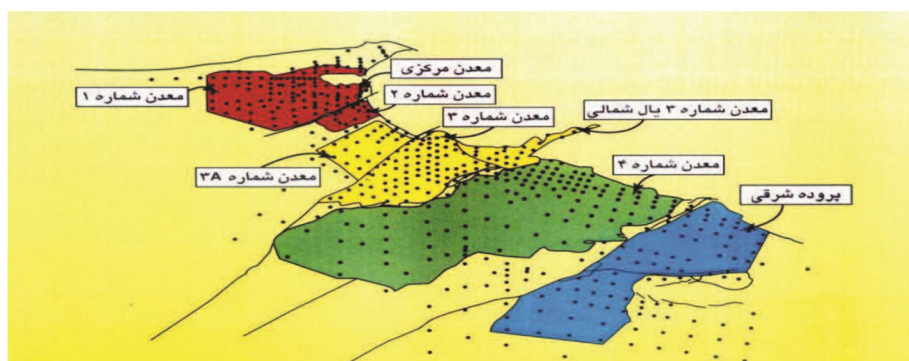
با توجه به مطالب ارائه شده و نیز مزایا و معایب روش‌های طراحی و مدل‌سازی تهویه، و تعدد مقالات و آزمایش‌هایی که به روش CFD انجام شده (که حاکی از قدرت و دقت مناسب روش است) در این تحقیق برای مدل‌سازی تهویه در روش استخراج جبهه کارطولانی از روش CFD استفاده می‌شود.

## ۲-۶-۲- مشخصات و ویژگی‌های مطالعه موردی

### ۲-۶-۱- حوضه زغالی طبس

حوضه زغالی طبس در قسمت مرکزی ایران، در بین استان‌های خراسان جنوبی، کرمان و یزد واقع شده است. وسعت آن ۴۵ هزار کیلومترمربع بوده و به نحوه قرارگیری آن در درون زمین به شکل دوکی است. حوضه زغال دار طبس در فاصله ۸۰ تا ۲۰۰ کیلومتری جنوب و جنوب غربی طبس واقع شده و با توجه به وضعیت زمین‌شناسی به سه ناحیه پروده، مزینو و نایبند تفکیک شده است. نواحی زغال دار طبس دارای وسعتی در حدود ۳۰ هزار کیلومترمربع است. این ناحیه با میزان ذخیره تخمینی ۲/۵ میلیارد تن

یکی از بزرگترین ناحیه‌های زغالی در منطقه خاورمیانه است. ناحیه پروده با وسعتی در حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در ۷۰ کیلومتری جنوب شهرستان طبس قرار گرفته است.



شکل (۷-۲) تصویری از منطقه زغال سنگ طبس (گزارش فنی معدن طبس)

میزان ذخیره زغال سنگ ناحیه پروده بیش از یک میلیارد تن تخمین زده شده است. این ناحیه با توجه به گسل‌های موجود در منطقه به ۵ منطقه به نام‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و شرقی تقسیم شده است (تصویری از منطقه زغال سنگ طبس در شکل (۷-۲) نشان داده شده است). در ناحیه پروده ۵ لایه زغالی به نام‌های  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $B_1$ ،  $B_2$  و  $D$  است.

## ۲-۶-۲-۲- مشخصات لایه‌های زغالی

### ۲-۶-۲-۱- لایه D

لایه D دارای ساختمان مرکب بوده که از یک تا چهار شعبه زغالی تشکیل شده است، در ۸۲ درصد نقاط (بخش‌های مطالعه شده) دارای ساختمان ۱ تا ۲ شعبه‌ای بوده و به وسیله شعبه‌های غیر زغالی از همدیگر تفکیک می‌شوند ضخامت شعبه‌های غیر زغالی نسبت به کل لایه ۴۴ درصد است. ضخامت کل لایه D بین ۰/۳ تا ۲/۵۵ متر در نوسان و میانگین ضخامت آن ۰/۷۵ متر است.

**۲-۶-۲-۲- لایه C<sub>2</sub>**

این لایه در ۴۹۶ متری زیر آهک بادامو واقع شده و فاصله آن از لایه زیرین خود یعنی C<sub>1</sub> به طور متوسط ۱۲ متر است. C<sub>2</sub> نسبت به لایه‌های دیگر دارای ارزش اقتصادی کمتری است. طول بیرون زدگی آن ۸۳۶۹ متر بوده که ۷۶ درصد آن دارای ضخامت کمتر از ۰/۴ متر است. ضخامت شعبه‌های غیر زغالی ۴۱ درصد کل لایه را شامل می‌شود. این نسبت در قسمت قابل کار لایه به ۱۰ درصد می‌رسد، که نشان دهنده ضخامت زیاد شعبه‌های غیر زغالی در سراسر لایه است. جنس کمر بالای این لایه در اکثر نقاط (۷۴ درصد) آرژیلیت و کمر پایین آن در ۶۶ درصد نقاط آرژیلیت و ۳۳ درصد سیلیت است.

**۲-۶-۲-۳- لایه C<sub>1</sub>**

لایه C<sub>1</sub> به طور متوسط در ۵۰۸ متری زیر آهک بادامو قرار گرفته و فاصله آن از لایه زیرین خود یعنی B<sub>2</sub> بین ۲۰ تا ۵۰ متر در نوسان است. لایه C<sub>1</sub> براساس اطلاعات بدست آمده از حفاری‌ها از ۱ تا ۴ شعبه و به ندرت از ۵ شعبه زغالی تشکیل می‌شود ضخامت شعبه‌های غیر زغالی به طور متوسط ۰/۱۵ متر بوده و ۱۹ درصد کل ضخامت لایه را تشکیل می‌دهد، در برداشت‌هایی که از حفاریات سطحی صورت گرفته است، تعداد شعبه‌های زغالی در بعضی موارد تا ۷ شعبه را نشان می‌دهد. حداقل ضخامت لایه C<sub>1</sub> ۰/۲ و حداکثر آن ۳/۹۵ متر بوده، و متوسط ضخامت آن برابر ۱/۹۵ متر است.

**۲-۶-۲-۴- لایه B<sub>2</sub>**

لایه B<sub>2</sub> به طور متوسط در ۵۳۴ متری زیر آهک بادامو قرار گرفته و میانگین فاصله آن از لایه زیرین خود یعنی B<sub>1</sub>، ۱۴ متر است. طول بیرون زدگی این لایه ۴۷۰۷ متر بوده که ۸۱ درصد آن دارای ضخامت قابل کار است.

این لایه از یک تا شش و بندرت از ۷ شعبه زغالی تشکیل شده و در اغلب نقاط دارای ساختمان ۳ و ۴ شعبه‌ای است که عمدتاً به وسیله شعبه‌های غیر زغالی از جنس آرژیلیت از هم تفکیک می‌شوند. ضخامت متوسط شعبه‌های غیر زغالی ۰/۱۹ متر بوده که ۴۱ درصد کل ضخامت لایه را تشکیل می‌دهند. ساختمان لایه در قسمت شرق یال شمالی پیچیده‌تر شده و بعضی از شعبه‌های زغالی به وسیله زغال آرژیل و آرژیلیت جایگزین می‌شوند. ضخامت لایه B<sub>2</sub> بین ۰/۵۶ تا ۲/۹۵ متر در نوسان بوده که متوسط آن ۱/۴۵ متر است.

#### ۲-۶-۲-۵- لایه B<sub>1</sub>

لایه B<sub>1</sub> به‌طور متوسط در ۵۴۶ متری زیر آهک بادامو قرار گرفته و پایین‌ترین لایه زغالی محسوب می‌شود. طول بیرون زدگی این لایه ۴۱۹۶ متر بوده که ۹۵ درصد آن دارای ضخامت قابل کار است. این لایه در اغلب نقاط دارای ساختمان مرکب بوده و از یک تا ۶ شعبه زغالی تشکیل شده که به وسیله شعبه‌های غیر زغالی از یکدیگر جدا شده‌اند. در قسمت غرب منطقه لایه پیچیده‌تر (مرکب‌تر) شده به‌طور کلی ۶۴ درصد نقاط دارای ساختمان ۱ و ۲ شعبه‌ای و ۳۶ درصد آن ۳ تا ۶ شعبه‌ای بوده که ضخامت شعبه‌های غیر زغالی نسبت به کل لایه ۱۹ درصد است.

ضخامت کلی لایه B<sub>1</sub> بین ۰/۴۵ تا ۲/۱۸ متر در نوسان و میانگین ضخامت آن ۱/۲ متر است.

#### ۲-۶-۳- معدن پروده ۱

منطقه پروده ۱ در قسمت شرقی ایران، جنوب غربی خراسان رضوی، حاشیه غربی کویر لوت و در جنوب شرقی شهرستان طبس قرار دارد. در این معدن لایه C<sub>1</sub> استخراج می‌شود. ضخامت این لایه از ۲/۲ متر در بخش شمال شرقی محدوده معدن تا ۱/۴۵ متر در جنوب غربی آن متغیر است. اما عمدتاً در محدود ۱/۸-۲ متر است.

بازکننده‌های معدن عبارت‌اند از سه چاه مایل که با فاصله‌ای در حدود ۱۲ متر از هم زده شده‌اند. شیب این چاه‌ها در حدود ۱۸-۱۲ درجه است؛ از داخل چاه مایل شماره ۳ چاه مایل دیگری منشعب می‌شود که با آزیموتی مساوی سه چاه قبلی پیش می‌رود. این چاه‌ها تا انتهای پیشروی‌ها دارای طولی در حدود ۴ کیلومتر هستند. نکته قابل توجه این است که شیب لایه در محدوده این معدن بین ۲۶-۵ درجه است که در نواحی اولیه معدن کاری عمدتاً بین ۲۶-۱۱ درجه است. از این رو کارگاه‌های استخراج نه در طول خط بزرگترین شیب بلکه با زاویه‌ای نسبت به آن در نظر گرفته شده‌اند تا شیب کارگاه از ۱۴ درجه بیشتر نگردد. طول کارگاه استخراج در اولین پانل ۱۸۰ متر و در بقیه پانل‌ها ۲۰۰ متر است. طول پانل‌های استخراجی نیز حدود یک کیلومتر است که به شیوه پسر و استخراج می‌گردند. مدت زمان آماده‌سازی هر کارگاه استخراج ۳ ماه است.

هر یک از راه‌های ورودی معدن (تونل‌های چهارگانه) جهت انجام فعالیت خاصی طراحی شده‌اند که به‌صورت زیر است (شکل (۲-۸)):

Slope 1: برگشت هوای کثیف از کارگاه‌های یال غربی

Slope 2: جهت رفت و آمد افراد و تدارکات

Slope 3: جهت خروج بار استفاده می‌شود.

Slope 4: جهت خروج هوای کثیف از کارگاه‌های شرقی





جدول (۱-۲): میزان گاز خیزی لایه‌های زغالی پروده ۱ با توجه به عمق (گزارش فنی معدن طبس)

عمق لایه بر حسب متر	متوسط گاز خیزی لایه C <sub>1</sub>	متوسط گاز خیزی لایه‌های B <sub>1</sub> و B <sub>2</sub>
۱۰۰	۲/۱	۱۰/۴
۲۰۰	۱۵/۴	۵/۱۵
۳۰۰	۱۷/۵	۱۸
۴۰۰	۸/۱۷	۹/۱۹
۵۰۰	۴/۱۹	۲۰/۳
۶۰۰	۸/۱۹	۷/۲
۷۰۰	۲۰	۲۱

## ۲-۶-۵- مشخصات سنگ‌های در بر گیرنده لایه زغالی C<sub>1</sub>

### ۲-۶-۵-۱- مشخصات کمر بالای لایه C<sub>1</sub>

سقف بلا واسطه از لایه‌های نازک و بسیار ضعیف گل‌سنگ (Mudstone) تشکیل شده که در هنگام استخراج زغال امکان فرو ریختن آن وجود دارد. در بالای آن به ترتیب لایه‌ای از سنگ سیلت (Siltstone) و ماسه‌سنگ (Sandstone) قرار دارد که سقف محکم‌تری را به وجود آورده است. نتایج متوسط آزمایشگاهی (در نتیجه آزمایش‌ها) که جهت تعیین خصوصیات مواد این سقف بلا واسطه انجام شده، به صورت جدول (۲-۲) است.

جدول (۲-۲): مشخصات ژئو مکانیکی کمر بالای لایه C<sub>1</sub> (گزارش فنی معدن پروده طبس)

RQD	تخریب % (Slake)	مقاومت برشی Mpa	مقاومت فشاری Mpa	وزن مخصوص ظاهری	سنگ‌شناسی (Lithology)
۳۸	۹۷	۳۲/۲۷	۹۰/۴	۲/۷	ماسه‌سنگ
۲۷	۸۸	۱۷/۶۶	۸۴/۲۸	۷۲/۲	سنگ سیلت
۶۶	۶۴	-	-	۶۵/۲	گل‌سنگ



در راهرو TG به دلیل شرایط بد زمین‌شناسی از جرزبندی برای نگه‌داری استفاده می‌شود؛ به این صورت که از فاصله تقریباً ۵ متری انتهای راهرو TG جرزبندی شروع و تقریباً ۳۰ متر طول دارد. این جرزبندی سطح قابل توجهی از سطح مقطع راهرو TG را می‌پوشاند که تأثیر قابل توجهی بر سرعت هوای تهویه راهرو TG دارد. به دلیل غلظت زیاد گاز متان در راهرو TG داکت هوایی به قطر ۰/۹ متر در انتهای جرزبندی استفاده شده که هوای آن از Slop2 تأمین می‌شود.

## ۲-۶-۷- مشخصات کارگاه W<sub>2</sub>

کارگاه W<sub>2</sub> در لایه C<sub>1</sub> (معدن شماره ۱) قرار دارد. طول کلی این کارگاه در حدود ۸۵۰ متر و عرض آن (طول کارگاه استخراج) در حدود ۲۰۵ متر است. این کارگاه دارای دو راهرو است که از آن‌ها برای تهویه و حمل و نقل استفاده می‌شود. ارتفاع و عرض هر دو راهرو یکسان و به ترتیب ۴/۲ و ۳ متر است (میزان طراحی شده حدود ۴/۵ و ۳/۵ متر بوده است). ارتفاع کارگاه استخراج هم‌اندازه راهروها (قطر لایه استخراجی در حدود ۱/۸ متر است) و عرض کارگاه استخراج در حدود ۷ متر است. شیب لایه C<sub>1</sub> در محدوده معدن شماره ۱ بین ۵-۲۶، در نواحی استخراجی عمدتاً ۱۱-۲۶ درجه، است. به همین دلیل کارگاه‌های استخراج با زاویه‌ای نسبت به طول خط بزرگترین شیب طراحی شده است تا شیب کارگاه از ۱۴ درجه بیشتر نشود. شیب راهروهای TG و MG (راهروهای کناری) مثبت ۳ درجه و کارگاه استخراج ۱۴ درجه (از MG به سمت TG) است. در زمان برداشت اطلاعات از معدن (اسفند ۹۵) عمق استخراج در حدود ۳۸۰ متر و طول منطقه تخریب در حدود ۵۱۰ متر بوده است.

## ۲-۷-مشخصات ماده معدنی (زغال سنگ)

## ۲-۷-۱- خودسوزی زغال سنگ

خودسوزی مواد معدنی، یکی از دلایل عمده آتش‌سوزی در معادن زیرزمینی زغال سنگ است. در بعضی شرایط، تقریباً هر نوع زغال سنگی در اثر خودسوزی، آتش می‌گیرد. اثرات خودسوزی ماد معدنی از افزایش مختصر مونوکسید کربن موجود در هوا تا حریق بزرگ که مهلک است کل معدن را در برگیرد تغییر می‌کند. به منظور متمایز شدن خودسوزی از آتش‌سوزی، وقوع آن را با عنوان " گرمایش " یا احتراق خودبه‌خودی بیان می‌کنند (مدنی، ۱۳۷۳).

خودسوزی زغال که اصطلاحاً به آن "Self-heating" یا "Spontaneous Combustion" می‌گویند به معنای گرمایش زغال و شروع یک واکنش شیمیایی گرمازا و به دنبال آن افزایش دما و در نتیجه ایجاد یک آتش‌سوزی خودبه‌خودی بدون استفاده از منابع گرمایی خارجی اضافی است.

هر آتش‌سوزی نیاز به ۳ عنصر اصلی دارد تا به وقوع بپیوندد که اصطلاحاً به « مثلث آتش<sup>۱</sup> » معروف است. ۳ عنصر تشکیل دهنده مثلث آتش عبارت‌اند از: اکسیژن، گرما (جرقه) و سوخت (ماده سوختنی) است (شکل ۲-۱۰).



شکل (۲-۱۰): مثلث آتش

<sup>۱</sup> - Fire Triangle

در پدیده خودسوزی زغال نیز به همین ۳ عنصر نیاز است که اکسیژن از هوای تهویه، گرما از طریق جذب اکسیژن به زغال و افزایش دمای زغال تأمین می‌شود و سوخت مورد نظر زغال سنگ است. مجموعه فرآیند خودسوزی زغال را می‌توان به‌طور خلاصه بر اساس ۷ مرحله زیر بیان کرد (Grewer, 1994):

۱- جذب اکسیژن توسط زغال و تشکیل ترکیب اکسیژن به علاوه و ایجاد فرآیند اکسیداسیون بدون تشکیل کربن مونوکسید که در این مرحله از فرآیند برگشت‌پذیر<sup>۱</sup> است.

۲- شروع فرآیند اکسیداسیون و تولید گرما.

۳- همچنان که دما تا حدود ۳۰-۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد گازهای مونواکسید کربن و دی-اکسید کربن تولید می‌شود.

۴- با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون افزایش یافته و مقدار تولید گازهای مونواکسید کربن، دی‌اکسید کربن و سایر گازها افزایش می‌یابد.

۵- اگر گرمای تولید نشده از فرآیند اکسایش زغال سنگ 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 اصطلاحاً «اکسیداسیون با دما پایین» گفته می‌شود. در چنین شرایطی حتی اگر زغال به نقطه اشتعال هم نرسد اما تحت تأثیر هوازگی قرار گرفته است و زغال‌های هوازده دارای میزان انرژی حرارتی ضعیفی هستند.

۶- اگر دمای تولید شده توسط اکسیداسیون پراکنده نشود و از محیط اکسیداسیون خارج نشود، این گرما توسط ظرفیت گرمایی زغال جذب شده و دمای زغال افزایش می‌یابد و باعث می‌شود تا اکسایش سریع‌تر

---

<sup>۱</sup> - Reversible

اتفاق بیفتد و با افزایش دما، سرعت اکسیداسیون به صورت نمایی افزایش می‌یابد، به طوری که به ازای ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش دما سرعت اکسیداسیون تقریباً ۲ برابر می‌شود.

۷- سرانجام پس از واکنش اکسیژن با زغال، دمای زغال‌سنگ افزایش می‌یابد و بعد از گذشت مدت زمان معین و در یک دمای بحرانی، زغال به مرحله اشتعال می‌رسد و خودسوزی زغال صورت می‌گیرد (صفاری و دیگران، ۱۳۹۳).

## ۲-۷-۲- گاز زغال<sup>۱</sup>

مقصود از گاز زغال گازی است که در معادن زغال‌سنگ از لایه‌های زغال و یا سنگ‌های درون‌گیر آن متصاعد می‌شود. از آنجا که بیشتر این گاز (تا ۹۹ درصد) از متان تشکیل شده است، آن را گاز متان نیز می‌نامند. در ایران، غالباً واژه فرانسوی گریزو<sup>۲</sup> برای این ترکیب به کار می‌رود. علاوه بر این واژه‌های روسی رودنیشنی گاز<sup>۳</sup> و آلمانی شلاگوتتر<sup>۴</sup> نیز گاهی به این گاز اطلاق می‌شود.

گاز زغال از خطرناک‌ترین گاز معادن است و در موارد بسیاری، باعث انفجار معدن و مرگ افراد زیادی شده است. علاوه بر گاز متان، گازهایی نظیر دی‌اکسیدکربن، ازت، هیدروژن و نیز هیدروکربورهای سنگین مانند اتان، هیدروژن سولفور، گاز سولفور و منو و دی‌اکسیدکربن در ترکیب آن دیده می‌شود. درصد دی‌اکسیدکربن موجود در گاز زغال، همواره کمتر از ۵ درصد است. مقدار ازت نیز معمولاً ناچیز است ولی در بعضی موارد نادر، میزان آن به ۲۰ درصد نیز رسیده است. گرچه درصد هیدروژن، اتان و اتیلن نیز ناچیز است ولی وجود این گازها به مقدار کم نیز خطرناک است زیرا این گازها، به شدت قابل انفجارند و نقطه اشتعال آنها به مراتب پایین‌تر از خود متان است (مدنی، ۱۳۹۳).

<sup>۱</sup> - Fire Damp

<sup>۲</sup> - Grisou

<sup>۳</sup> - Rudnichny Gas

<sup>۴</sup> - schlagwetter

## ۲-۷-۲-۱- مشخصات گاز زغال

همان‌طور که گفته شد، قسمت عمده گاز زغال را متان تشکیل می‌دهد و بدین ترتیب، خصوصیات آن نظیر خصوصیات متان است. متان گازیست بی‌رنگ و بی‌بو است ولی در مواردی که حاوی گازهایی از قبیل  $SO_2$ ،  $SH_2$  و یا هیدروکربورهای معطر باشد، بسته به میزان این گازها، ممکن است دارای بوهای مختلف شود. چگالی آن نسبت به هوا ۰/۵۵۴ و بنابراین از هوا سبکتر است. با توجه به وزن مخصوص کم، این گاز در قسمت‌های بالای کارهای معدنی جمع می‌شود.

گاز متان سمی نیست و از نظر تنفسی مشابه گاز ازت است. اما اگر مقدار آن زیاد شود، باعث کاهش اکسیژن موجود در هوا می‌شود و از این نظر خطرناک است. متان اندکی در آب حل می‌شود ولی مقدار آن قابل توجه نیست. مهم‌ترین خطر گاز زغال انفجار آن است.

## ۲-۷-۲-۲- طرز تشکیل گاز زغال

هنگام تجزیه مواد گیاهی و تبدیل آنها به انواع زغال، مقدار زیادی گاز متان و سایر گازهای موجود در گاز زغال تشکیل می‌شود. بیشتر این گازها در لایه‌های زغال محبوس و مقداری از آن نیز در سنگ‌های درون-گیر لایه‌های زغال جمع می‌شود و به همین خاطر، هنگام حفاری در سنگ‌های اطراف زغال نیز بایستی همیشه هوای معدن را از نظر گاز کنترل کرد.

گاز به دو صورت در داخل لایه‌های زغال حبس می‌شود. قسمتی در خلل و فرج و شکستگی‌های موجود در لایه‌های زغال را پر می‌کند، ممکن است تا ۱۲ درصد گازهای ایجاد شده حین فرآیند تشکیل زغال-سنگ درون این خلل و فرج و شکستگی‌ها محبوس شود (Edwards and et al, 1996)، و قسمت دیگر در اثر جذب سطحی، به سطوح زغال می‌چسبد. معمولاً میزان گازی که به حالت جذب سطحی در زغال حبس می‌شود بیشتر از حالت دیگر است.



### ۲-۷-۲-۳- عوامل مؤثر در تصاعد گاز زغال

تصاعد گاز از لایه‌های زغالی و سنگ‌های درون‌گیر آنها، به عوامل مختلفی بستگی دارد. مهم‌ترین عوامل ذاتی زغال که در میزان گازدهی آن مؤثر است عبارت‌اند از:

- ۱- شدت دگرگونی زغال، هر چه زیادتر باشد میزان گازدهی زغال بیشتر می‌شود.
- ۲- مدت زمانی که از حفر لایه زغال می‌گذرد، هر چه بیشتر باشد فرار گاز از لایه زغال زیادتر است.
- ۳- عمق لایه زغال، در مورد یک لایه واحد نیز میزان گازخیزی قسمت‌های عمیق لایه زیادتر از قسمت‌های کم عمق آن است.
- ۴- ساختمان زمین‌شناسی حوضه زغالی، بسته به وضعیت زمین‌شناسی منطقه، فرار گاز تسهیل یا مشکل می‌شود. مثلاً اگر قسمت‌هایی از حوضه چین‌خوردگی پیدا کند، باعث سهولت فرار گاز و در نتیجه کاهش میزان گازدهی لایه می‌شود. علاوه بر مشخصات ذاتی زغال، طریقه استخراج نیز در نحوه گازدهی زغال مؤثر است و برای استخراج لایه‌هایی که دارای میزان قابل توجهی گاز و یا دارای تصاعد آنی‌اند، بایستی از روش‌های خاصی استفاده نمود (مانند استفاده از روش تهویه مناسب، گازکشی و ...).

### ۲-۷-۲-۴- طریقه تصاعد گاز زغال

گاز زغال معمولاً به یکی از سه طریق زیر، از لایه‌های زغال و یا سنگ‌های درون‌گیر آنها متصاعد می‌شود.

- ۱- طریقه عادی، هم‌زمان با حفر لایه زغالی، مقداری گاز از قسمت‌های سطحی و خلل و فرج لایه استخراجی متصاعد و وارد هوای معدن می‌شود. عموماً در این نوع تصاعد، خروج گاز زغال یا سنگ محسوس نیست و نمی‌توان آن را تشخیص داد، هرچند در بعضی موارد ممکن است خروج آن با صدای ضعیفی همراه باشد.

۲- وزش<sup>۱</sup>، هنگامی که کار معدنی به قسمت‌های خاصی از لایه برخورد کند، مقدار زیادی گاز از شکاف‌ها و منافذ لایه خارج و در هوای معدن پراکنده می‌شود. خروج گاز از لایه در این نوع تصاعد، با صدای سوت همراه است. میزان گاز متصاعد شده در معادن مختلف متفاوت است و از چند مترمکعب تا چندین هزار مترمکعب در روز تغییر کند. مدت خروج گاز نیز در مقیاس وسیعی تغییر می‌کند، به طوری که در بعضی موارد این زمان به چند روز و در بعضی حالات ممکن است به چند سال برسد.

۳- تصاعد آبی<sup>۲</sup>، طی زمان کوتاهی مقدار بسیار زیادی گاز از لایه یا سنگ‌های درون‌گیر آن خارج و ضمن آن، حجم وسیعی از زغال یا سنگ به بیرون پرتاب می‌شود. این نحوه تصاعد، فوق‌العاده خطرناک است و علاوه بر پراکنده کردن حجم زیادی از گاز، در اثر آزاد شدن انرژی زیاد در مدت زمان کوتاه ممکن باعث پرتاب سنگ و زغال و یا تولید گرادیان فشار بسیار زیاد (که به صورت ضربه به هوای تهویه وارد می‌شود) و انتقال آن به وسیله سیستم تهویه که باعث آسیب به ماشین‌آلات، سیستم نگهداری و حتی منجر به مرگ افراد شود (مدنی، ۱۳۹۳).

### ۲-۷-۳- طبقه‌بندی معادن بر اساس میزان تصاعد گاز زغال

میزان گازدهی لایه زغالی به صورت حجم گازهای متصاعد شده به ازای هر تن زغال بر حسب مترمکعب بیان می‌شود. معادن زغال را از نقطه نظر میزان گازدهی به چهار طبقه تقسیم می‌شود (قانون معادن ایران، ۱۳۹۱).

۱- طبقه یک، تا ۵ مترمکعب بر تن.

۲- طبقه دو، ۵ تا ۱۰ مترمکعب بر تن.

<sup>۱</sup> - Gas Blower  
<sup>۲</sup> - Sudden Outburst

۳- طبقه سه، ۱۰ تا ۱۵ مترمکعب بر تن.

۴- طبقه چهار، بیشتر از ۱۵ مترمکعب بر تن.

## ۲-۷-۴- منابع گاز زغال در معادن زغال سنگ زیرزمینی

به طور کلی برای گاز زغال وارد شده به سیستم تهویه سه منبع اصلی پذیرفته شده است:

۱- رگه واقعی در حال کار.

۲- زغال سنگ باقیمانده در پشت جبهه کار (منطقه تخریب).

۳- بسترهای زغالی (لایه‌های دارای مواد کربنی) در بالا یا پایین کارهای معدنی.

با توجه به نحوه استخراج، مرحله استخراج و شرایط زمین‌شناسی نقش منابع ذکر شده پررنگ‌تر می‌شود

(Edwards and et al, 1996).

## ۲-۷-۵- نحوه انتشار و ورود گاز متان به سیستم تهویه

پس از فرآیند زغالی شدن، گاز متان زغال سنگ به صورت جذب سطحی یا حالت آزاد گاز در زغال سنگ ذخیره و در نهایت به تعادل می‌رسد. فعالیت‌های معدنی، مانند حفر چال در لایه‌های زغالی، باعث برهم خوردن این تعادل و باعث ایجاد یک گرادیان فشار گاز می‌شود؛ که در نتیجه آن باعث تشکیل جریان گاز از طریق هر شکستگی طبیعی یا ایجاد شده به واسطه فعالیت معدنکاری می‌شود. زغال سنگ در حالت اصلی و دست‌نخورده تحت فشار بالایی است. هنگامی که فشار گاز درون حفره‌ای (منفذی) کاهش یابد (به

واسطه فعالیت معدنکاری) در نتیجه آن پدیده دفع<sup>۱</sup> رخ خواهد داد. که در برابر جریان گاز و مهاجرت آن مقاومت می‌شود به وسیله اتصالات درونی پیچیده و نازک بین حفرات و ریزشکستگی‌ها.

فعالیت‌های معدنی در ارتباط با هوا یا در نزدیکی فشار اتمسفر، باعث تشکیل فشاری به نام فشار سینک<sup>۲</sup> می‌شود که منجر به ایجاد جریان متان از بسترهای منبع زغالی اطراف فعالیت‌های معدنی می‌شود.

عامل اصلی در کنترل مهاجرت متان از بسترهای منبع به فعالیت‌های معدنی یک نیروی محرک<sup>۳</sup> است که می‌تواند ترکیبی از:

۱- پخش<sup>۴</sup> (نفوذ، پدیده‌ای است که پخش ناشی از حرکت اتفاقی مولکول‌ها از غلظت بیشتر به غلظت‌های پایین را توصیف می‌کند.) مولکولی به علت گرادیان غلظت یا گرادیان حرارتی.

۲- جریان ویسکوز<sup>۵</sup> یا جریان توده‌ای<sup>۶</sup> به علت گرادیان فشار.

حرکت متان از طریق زغال سنگ برجا (دست‌نخورده)، از محل دفع تا زمانی که متان، یک شکاف در درون زغال را دنبال (ره‌گیری<sup>۷</sup>) می‌کند، به واسطه پدیده انتشار (نفوذ) است. فرآیند انتشار تابع گرادیان غلظت است و به وسیله قانون فیک<sup>۸</sup> (نفوذ را از لحاظ آماری در محیط‌های پیوسته بررسی کرده) توصیف می‌شود. جریان متان به وسیله قانون دارسی<sup>۹</sup> (جریان سیال از میان یک محیط متخلخل را توصیف می‌کند؛ تنها در جریان نوع آرام.) توصیف می‌شود؛ و جریان در امتداد درز و شکستگی به وسیله اختلاف فشار بین فشار گاز (متان یا گاز زغال) برجا و فشار اتمسفر هوای معدن هدایت می‌شود.

---

<sup>1</sup> - Desorption  
<sup>2</sup> - Pressure Sink  
<sup>3</sup> - Driving Force  
<sup>4</sup> - Diffusion  
<sup>5</sup> - Viscous Flow  
<sup>6</sup> - Mass Flow  
<sup>7</sup> - Intercepts  
<sup>8</sup> - Fick's Law  
<sup>9</sup> - Darcy's Law

اگرچه هر دو، انتشار و جریان آرام به طور هم‌زمان در طول فرآیند پراکنده شدن گاز رخ می‌دهد، اما حجم متان وارد شده به فعالیت معدنی به وسیله جریان از طریق شکاف و شکستگی‌ها به طور کلی بسیار بیشتر از طریق انتشار به تنهایی است.

آزاد شدن گاز متان هر لایه<sup>۱</sup> از بسترهای منبع و مهاجرت بعدی آن به سمت ناحیه‌های کاری به عوامل زمین‌شناسی، فیزیکی و معدنی بستگی دارد؛ و عامل اصلی کنترل انتشار گاز به فعالیت معدنی، نفوذپذیری است. آزاد شدن متان از زغال و جریان آن از طریق لایه‌ها به طرف فعالیت معدنی عمدتاً به وسیله نفوذپذیری تشکیل شده مربوطه (سازند مربوطه) کنترل می‌شود (Ediz, 1991). اغتشاشات تنش ایجاد شده به وسیله فعالیت‌های معدنی بر روی نفوذپذیری هر دو لایه کار و لایه‌های مجاور تأثیر می‌گذارد که در نتیجه، الگوی انتشار گاز متان را تعیین می‌کند (Edwards and et al, 1996).

## ۲-۸-۱- میزان هوای مورد نیاز برای کارگاه $w_2$

برای به دست آوردن میزان هوای مورد نیاز کارگاه، بر اساس تعداد نفرات و رقیق سازی گاز می‌شود و بالاترین عدد به دست آمده انتخاب خواهد شد.

## ۲-۸-۱-۱- میزان هوای مورد نیاز برای تهویه بر اساس رقیق سازی گاز متان

جدول (۲-۳) خلاصه‌ای از مشخصات کارگاه  $W_2$  است.

---

<sup>۱</sup> - Strata

جدول (۲-۳): مشخصات کلی کارگاه  $w_2$ 

واحد	مقدار	عنوان
m	۲۰۵	طول کارگاه استخراج
m	۰/۸	عمق برش شیرر
m	۱/۸	ارتفاع لایه زغال سنگ
m <sup>3</sup> /ton	۱۹	نرخ گاز خیزی لایه
ton/m <sup>3</sup>	۱/۵۶	چگالی زغال سنگ
s	۲۷۰۰	مدت زمان هر برش
s	۲۸۸۰۰	مدت زمان هر شیفت
-	۳ تا ۲	تعداد برش در هر شیفت
m <sup>3</sup> /s	۵۰/۴	دبی هوای تهویه
%	۱۰۰	عیار گاز متان مجاز

میزان گاز تولیدی در هر برش

$$V_c = (205 \times 0.8 \times 1.8 \times 19 \times 1.56) = 8749.728 \text{ (m}^3\text{)}$$

میزان درصد گاز (راهرو TG)

$$P_{Methane} = \frac{\left(\frac{8749.728}{28800}\right)}{50.4} \times 100 = 6.43$$

میزان گاز تولیدی بر اساس یک برش در یک شیفت

$$Q_{C1S} = \frac{8749.728}{28800} = 0.30381 \text{ (m}^3 / \text{s)}$$

میزان درصد گاز (راهرو TG) یک برش در شیفت

$$P_{C1S} = \frac{0.30381}{50.4} \times 100 = 0.6028$$

این میزان درصد برای یک برش در یک شیفت ۸ ساعته است. اگر تعداد برش در هر شیفت ۲ برش باشد میزان هوای مورد نیاز ۶۰/۱۶ متر مکعب و ۳ برش ۹۰/۲۳ متر مکعب است. با توجه به اینکه عیار مجاز گاز متان ۱ درصد است، حداکثر تعداد برش در یک شیفت ۱/۶۷ برش است (با توجه به حجم هوای تهویه ۵۰/۴ متر مکعب کارگاه استخراج).

### ۲-۸-۱-۲- میزان هوای مورد نیاز بر اساس تعداد نفرات

در کارگاه  $W_2$  بین ۱۸ تا ۲۴ نفر نیروی کاری وجود دارد. به ازای هر نفر نیز ۶ متر مکعب بر دقیقه هوای تهویه نیاز است بنابراین داریم:

$$Q_2 = 6 \times 24 = 144$$

که برابر با ۲/۴ متر مکعب بر ثانیه است.

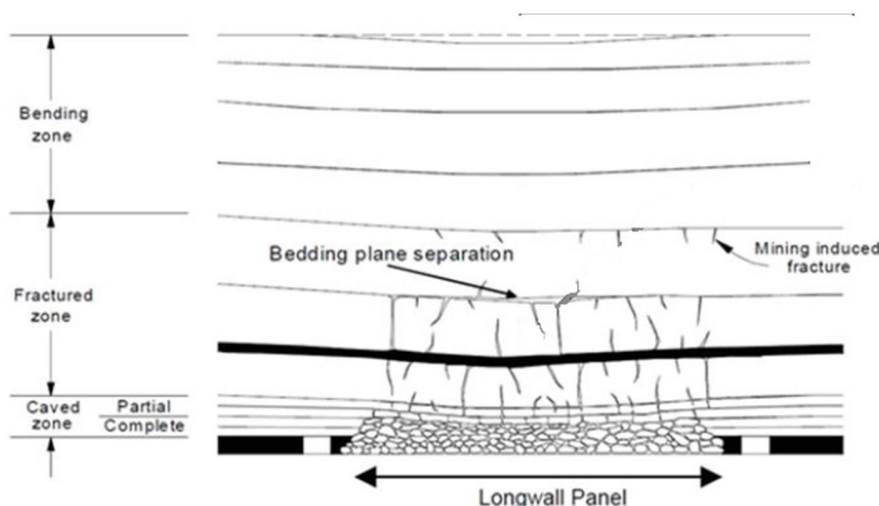
با توجه به محاسبات انجام شده، میزان هوای ۳۰/۱ متر مکعب بر ثانیه حداقل میزان هوای مورد نیاز برای یک برش در هر شیفت است. طبق اعلام مسئولین معدن که در هر شیفت ۲ تا ۳ برش انجام می‌شود، این برای این تعداد برش نیاز به ۶۰/۶۱ تا ۹۰/۲۳ متر مکعب هوای تهویه است. در حال حاضر میزان هوای تهویه کارگاه ۵۰/۴ متر مکعب است که حداکثر تعداد برش در هر شیفت ۱/۶۷ برش می‌تواند باشد.

### ۲-۹- ناحیه استخراج شده

#### ۲-۹-۱- قسمت‌های مختلف ناحیه استخراج شده در روش جبهه‌کار طولانی

پس از استخراج یک پهنه جبهه‌کار طولانی با عرض و طول کافی، لایه‌های پوششی سقف صدمه دیده و این تغییرات از سقف بلاواسطه شروع شده و تا سطح زمین ادامه می‌یابد. شکل (۲-۱۱) سه ناحیه صدمه

دیده از مواد پوششی را نشان می‌دهد. این سه ناحیه عبارت‌اند از: ناحیه تخریب<sup>۱</sup>، ناحیه شکسته شده<sup>۲</sup> و ناحیه خمش پیوسته<sup>۳</sup>.



شکل (۲-۱۱): نمایی از منطقه استخراج شده (worrall, 2015).

## ۲-۹-۱-۱- ناحیه تخریب

این ناحیه در واقع سقف بلاواسطه است که ضخامتی حدود ۲ تا ۸ برابر ضخامت لایه استخراجی دارد. سقف بلاواسطه بعد از این که منطقه استخراج شد، به داخل فضای خالی عقب کارگاه ریزش می‌کند. در اثر این ریزش از نظر حجمی منبسط می‌شود. مقدار این انبساط حجم را توسط نسبت تورم یا ضریب حجمی<sup>۴</sup> محاسبه می‌کنند. در واقع تخریب و ریزش سنگ‌ها تا حدودی ادامه می‌یابد که فضای خالی شده در اثر استخراج، پر شود. ضریب حجمی برای سنگ‌های مختلف متفاوت است. با توجه به این ضریب می‌توان ارتفاع ناحیه تخریب را به دست آورد.

<sup>۱</sup> - Caved zone

<sup>۲</sup> - Fractured zone

<sup>۳</sup> - Continuous deformation zone

<sup>۴</sup> - Bulking factor



**۲-۹-۱-۲- ناحیه شکسته شده**

این ناحیه در بالای ناحیه تخریب قرار دارد که در این ناحیه لایه‌ها توسط شکاف‌های قائم و ترک‌های افقی ناشی از جدایش لایه‌ای، به صورت بلوک‌هایی شکسته می‌شوند. در اثر وجود نیروهای افقی این بلوک‌ها در هم قفل می‌شوند و باعث می‌شوند که بلوک‌ها نتوانند بدن تأثیر نسبت به بلوک‌های مجاور بلغزند. بنابراین لایه به صورت یک تیر انتقال نیرو<sup>۱</sup> عمل می‌کند. ضخامت این ناحیه ۲۸ تا ۴۸ برابر لایه استخراجی است. بنابراین مجموع ضخامت ناحیه تخریب و ناحیه شکسته شده در حدود ۳۰ تا ۵۰ برابر ضخامت کارگاه استخراجی است.

**۲-۹-۱-۳- ناحیه خمش پیوسته**

این ناحیه بین ناحیه شکسته شده و سطح زمین وجود دارد. در این ناحیه لایه‌ها بدون این که دچار ترک شوند، تغییر شکل پیدا می‌کنند ولی به صورت یک محیط پیوسته عمل می‌کنند (عطایی، ۱۳۹۰).

**۲-۹-۲- تخلخل و نفوذپذیری در منطقه تخریب**

پس از استخراج و فرآیند تخریب، محیطی متخلخل به وجود می‌آید. میزان تخلخل در کل ناحیه تخریب بسیار متفاوت است و مقدار آن با پیشروی جبهه کار و گذشت زمان تغییر می‌کند. می‌توان تخلخل در منطقه تخریب را به ۲ نوع تخلخل اولیه و تخلخل ثانویه (نهایی) تقسیم کرد. تخلخلی که بلافاصله پس از تخریب به وجد می‌آید، تخلخل اولیه، و پس از تشکیل تخلخل اولیه با گذشت زمان و پیشروی جبهه کار به تخلخل ثانویه یا نهایی، که مقدار کمتری نسبت به تخلخل اولیه دارد، تغییر می‌کند (به دلیل تغییر در میزان تنش‌های وارده). تخلخل اولیه به نوع و جنس سنگ‌های روباره و ارتفاع لایه استخراج؛ و تخلخل

---

<sup>۱</sup> - Force transmitting beam

نهایی به مدت زمان پس از استخراج، سرعت پیشروی جبهه کار (باعث افزایش وزن روباره در نتیجه بازفشرده گی<sup>۱</sup> می شود) (Yuan et al, 2006) ارتفاع کارگاه استخراج و وزن سنگ های روباره بستگی دارد. میزان تخلخل معمولاً در ابتدا و انتهای منطقه تخریب (نزدیک دیواره های حائل) و در اطراف نزدیک پایه های زنجیری بیشترین مقدار را دارد و در تقریباً در قسمت مرکز منطقه تخریب که بیشترین تنش قائم (حاصل از وزن مواد روباره) کمترین تخلخل را دار است.

نفوذپذیری در منطقه تخریب بسیار متفاوت است و دارای تغییرات زیادی در جهت های سه گانه مختصات است. رابطه تخلخل و نفوذپذیری با فرمول Kozeny-Carmen بیان می شود.

$$k = f \left( \frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \quad (1-2)$$

که در آن  $k$  میزان نفوذپذیری بر حسب داری،  $n$  میزان تخلخل و  $f$  قطر ویژه ذرات است (2015، Gilmore).

تحقیقات بسیار زیادی در رابطه با تعیین میران تخلخل و نفوذپذیری در منطقه تخریب شده است که بخشی از نتایج این تحقیقات در جدول (۲-۴) آمده است.

---

<sup>1</sup> - Recompaction

جدول (۲-۴): خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در رابطه با میزان نفوذپذیری (worall 2012)

منبع اطلاعات	توضیحات لایه	نفوذپذیری (میلی داری)	نفوذپذیری (داری)	نفوذپذیری (مترمربع)	مقاومت (مترمربع/۱)
ویچل <sup>۱</sup> (۲۰۱۲)	لایه زغال بالایی	$4/907 \times 10^{-1}$	$4/91 \times 10^{-2}$	$4/84 \times 10^{-14}$	$2/07 \times 10^{-13}$
	ناحیه خورد شده	$2/937 \times 10^{-1}$	$2/294 \times 10^{-4}$	$2/90 \times 10^{-16}$	$3/45 \times 10^{-15}$
	منطقه تخریب	$2/026 \times 10^{-8}$	$2/03 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-6}$
رامورتی <sup>۲</sup> و دیگران (۲۰۰۳)	لایه زغال	۴/۵	$4/5 \times 10^{-3}$	$4/44 \times 10^{-15}$	$2/25 \times 10^{-14}$
	سنگ‌های طبیعی	۱/۵	$1/5 \times 10^{-3}$	$1/48 \times 10^{-15}$	$6/75 \times 10^{-14}$
استرهوزن <sup>۳</sup> و کاراکان <sup>۴</sup> (۲۰۰۵)	لایه زغال نازک	۴	$4 \times 10^{-3}$	$3/95 \times 10^{-15}$	$2/253 \times 10^{-14}$
	لایه زغال زخیم	۱	$1 \times 10^{-3}$	$9/87 \times 10^{-16}$	$1/01 \times 10^{-15}$
	شیل متوسط	۱	$1 \times 10^{-3}$	$9/87 \times 10^{-16}$	$1/01 \times 10^{-15}$
کاراکان (۲۰۰۹)	طبقه بالایی	۱۰۰	$1 \times 10^{-1}$	$9/87 \times 10^{-14}$	$1/01 \times 10^{-13}$
	طبقه بالایی	۱۰۰۰	۱	$9/87 \times 10^{-13}$	$1/01 \times 10^{-12}$
استرهوزن و کاراکان (۲۰۰۷)	بیشترین نفوذپذیری	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-3}$	$9/87 \times 10^{-10}$	$1/01 \times 10^{-9}$
	کمترین نفوذپذیری	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-2}$	$9/87 \times 10^{-11}$	$1/01 \times 10^{-10}$
	نفوذپذیری میانگین	$5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-2}$	$4/93 \times 10^{-10}$	$2/03 \times 10^{-9}$

تعیین میزان تخلخل و نفوذپذیری منطقه تخریب کار بسیار مشکل زمان‌بری است که نیاز به استفاده از نرم‌افزارهایی مانند Matlab، Flac3d، ...، استفاده از گاز ردیاب<sup>۵</sup>، مدل و کار آزمایشگاهی دارد که بسیار فراتر از یک پایان‌نامه ارشد است و نیز به زمان زیادی نیاز دارد. بنابراین در این پایان‌نامه از مدل و

<sup>1</sup> - Wachel

<sup>2</sup> - Ramurathy

<sup>3</sup> - Esterhuizen

<sup>4</sup> - karacan

<sup>5</sup> - tracer

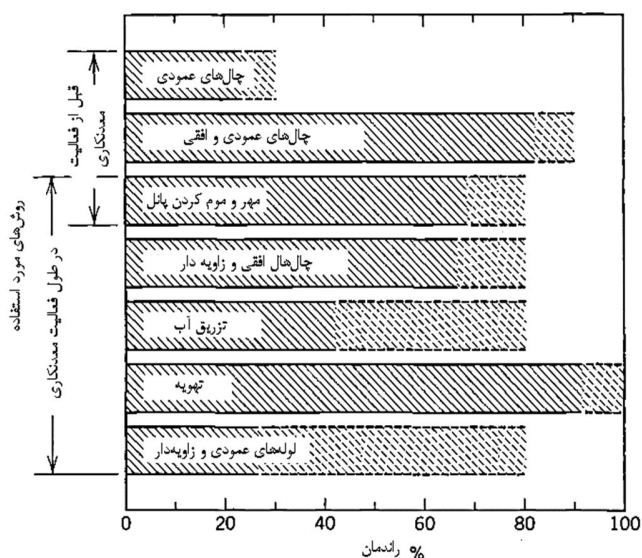
اطلاعات مربوط به منطقه تخریب ساخته شده توسط یوان و همکاران (Yuan et al, 2006) استفاده شده، که در بخش مدل سازی اطلاعات کافی توضیح داده شده است.

### ۲-۹-۳- تعیین میزان نرخ خروج گاز زغال در منطقه تخریب

نرخ آزاد شدن گاز بستر زغالی تازه استخراج شده بسیار متفاوت است و ممکن است تا  $10^{-4} \times 19-9$  مترمکعب بر ثانیه برای هر  $0.093$  مترمربع و برای معادن فوق گازی (معادن شرق ویرجینیا) این نرخ به  $0.02$  تا  $0.2$  مترمکعب بر ثانیه برسد. نرخ آزاد شدن گاز در معادن زغال سنگ زیرزمینی  $9-6$  برابر بزرگتر در نظر گرفته می شود چون که علاوه بر زغال سنگ تازه استخراج شده، از زغال سنگ باقیمانده در منطقه تخریب، از پایه ها و دیگر لایه های زغالی نیز گاز آزاد می شود. نرخ آزاد شدن گاز از لایه های زغالی تابع عوامل مختلفی مانند: قابلیت انتشار، فشار محلی، نفوذپذیری و میزان گاز لایه است. به طور سرعت خروج گاز از لایه زغالی  $10^{-6} \times 1$  متربرثاینه در نظر گرفته می شود، که این مقدار  $100$  برابر بزرگتر از میزان واقعی لایه زغال پیتزبورگ (Pittsburgh) است (Hartman, 2012).

### ۲-۹-۴- کنترل گاز در منطقه تخریب

با توجه به ناحیه ای که در آن غلظت گاز متان بالا است روش های مختلفی برای کنترل آن وجود دارد (شکل (۲-۱۲) و جدول (۲-۵))، با توجه به ناحیه مورد استفاده، نحوه حذف گاز متان از محیط در هر کدام از این روش ها متفاوت است؛ بنابراین بازدهی در هر روش فرق می کند شکل (۲-۱۲) نشان دهنده میزان بازدهی بعضی از این روش ها است.

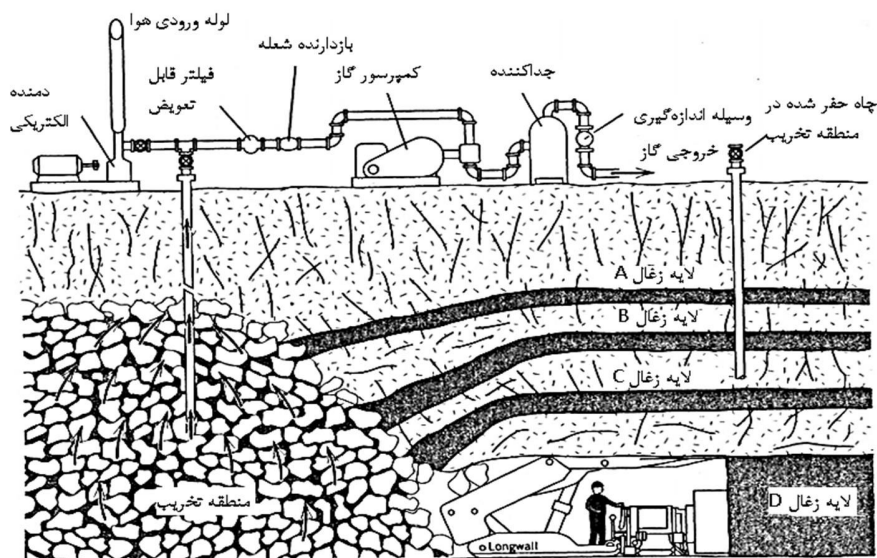


شکل (۲-۱۲): بازدهی انواع روش‌های کنترل متان (هارتمن ۲۰۱۲)

جدول (۲-۵): انواع روش‌های کنترل گاز متان و ناحیه استفاده آن هارتمن (۲۰۱۲)

روش مورد استفاده		
نحوه حذف متان	روش ترقیق با استفاده از هوا	محل
فرآیندهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی	عمل تهویه؛ مهر و موم کردن و انجام تهویه	ناحیه استخراج
چال‌های سطحی	عمل تهویه؛ استفاده از درهای تهویه	منطقه تخریب
چال‌های سطحی عمودی؛ چال‌های زیرزمینی به صورت افقی و زاویه‌دار	-	زغال‌سنگ
استفاده از چال‌ها	-	ناحیه مجاور

یکی از روش‌های کنترل گاز متان در منطقه تخریب، سیستم گازکشی عمودی منطقه تخریب (Vertical Gob Degas System) است. این سیستم شامل چال‌هایی است که به صورت عمودی حفر می‌شود و قسمت یا قسمت‌هایی از این چال‌ها، به منظور استخراج گاز متان، با منطقه تخریب در ارتباط است (شکل ۲-۱۳).



شکل (۲-۱۳): سیستم گازکشی عمودی منطقه تخریب (هارتمن ۲۰۱۲)

گازکشی موفق از منطقه تخریب نیازمند اطلاعات دقیقی از خواص منطقه تخریب، لایه‌های موجود، میزان زمان تشکیل آن بخش از منطقه تخریب، فاصله از جبهه کار فعال و ... است. در این روش اغلب ۲ یا ۳ چال برای پانلی به طول ۱۵۰۰ متر کافی است (با توجه به شرایط این تعداد متغیر است). اولین چال در فاصله ۱۵۰ متری از جبهه کار و بقیه چال‌ها می‌تواند تا فاصله ۶۰۰ متری حفر می‌شود. جدول (۲-۶) نشان‌دهنده میزان نشت هوای تهویه از جبهه کار به منطقه تخریب است. این میزان تابع میزان آب‌بندی شیلدها و نوع روش تهویه منطقه تخریب است. در روش تهویه U میزان نشت هوا کم است (Hartman, 2012).

جدول (۲-۶): میزان نشت هوای تهویه به منطقه تخریب (هارتمن ۱۹۹۱).

فاصله بین ورودی و خروجی (فوت)	نشت هوا در طول منطقه تخریب بر اساس میزان درصد هوای تهویه جبهه کار
۱۵۰	۲۰
۳۰۰	۱۰
۶۰۰	۵

## ۲-۱۰- مراحل تحقیق

## فاز اول

ساختن مدل اولیه هندسی، انجام مش‌بندی مناسب، که مقدار آن با توجه به فیزیک مسأله انتخاب می‌شود (حدس زده می‌شود به این علت دقیق نیست) و شرایط مرزی برای زون‌های مختلف مدل هندسی اولیه انتخاب می‌شود. سپس این مدل اولیه وارد نرم‌افزار Fluent می‌شود و با توجه به فیزیک مسأله گزینه‌های نرم‌افزار Fluent برای حل مدل اولیه آماده می‌شود و در نهایت مدل اولیه حل می‌شود. نتایج نرم‌افزار Fluent از حل مدل اولیه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، اشکالات و ضعف مدل شناسایی و برطرف می‌گردد.

## فاز دوم

ساختن مدل هندسی ثانویه، انجام مش‌بندی و انتخاب شرایط مرزی مناسب برای زون‌های مختلف مدل ثانویه (این فاز با توجه به نتایج فاز اولیه صورت می‌گیرد). سپس این مدل وارد نرم‌افزار Fluent می‌شود و حل می‌شود، در نهایت نتایج حاصل مورد بحث و نقد قرار می‌گیرد.

## فاز سوم

در مرحله باید استقلال جواب مسأله از مقدار مش‌بندی (Grid study) ثابت شود (با توجه به این که معادلات حاکم بر مسأله از نوع داخلی هستند)، بنابراین مدل ثانویه برای انواع تراکم مش‌بندی حل می‌شود تا جایی که دیگر تغییر در میزان مش‌بندی تأثیری در نتایج نداشته باشد و استقلال جواب مسأله ثابت شود.

## فاز چهارم

اعتبارسنجی نتایج حاصل از فاز دوم با استفاده از اطلاعات معدن.

## فاز پنجم

محاسبه میزان تهویه مورد نیاز برای معدن (به صورت دستی).

## فاز ششم

بحث و نقد بر روی سیستم تهویه معدن با توجه به نتایج حاصل از مدل سازی صورت گرفته.

## فاز هفتم

جمع بندی و نتیجه گیری از مدل سازی و کارهای صورت گرفته.

## ۲-۱۱- نتیجه گیری

روش استخراج جبهه کار طولانی امروزه یکی از بهترین روش های استخراج با قیمت مناسب و تناژ بالا است. سه روش عمده برای تهویه این روش استخراج وجود دارد که بسته به شرایط استخراج و جوی معدن استفاده می شود. میزان هوای تهویه کارگاه استخراج ۵۰/۴ مترمکعب است که با این میزان هوای تهویه در هر شیف حداکثر می توان ۱/۶۷ برش انجام داد.

روش CFD روش مناسبی برای طراحی سیستم تهویه است که دقت بالایی دارد. نرم افزار Fluent یکی از قدرتمندترین نرم افزارها در این روش است که در تحقیقات و طراحی های مربوط به معدن کاری به صورت زیاد مورد استفاده قرار گرفته شده است. در این نرم افزار ابتدا مدل فیزیکی در نرم افزار Gambit ساخته و مش بندی شده و سپس وارد نرم افزار Fluent شده و با توجه به شرایط معدن حل می شود. برای مدل سازی در این پایان نامه ابتدا یک مدل اولیه ساخته و از نتایج برای کامل تر شدن مدل ثانویه استفاده می شود. در مرحله بعد اثبات می شود که نتایج حاصل از مدل ثانویه از میزان مش بندی مستقل است، بعد به اعتبارسنجی نتایج پرداخته می شود. این نتایج پس از اطمینان از صحت مورد بحث و بررسی قرار می گیرند.



## فصل سوم

مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی، مدل‌سازی اولیه

### ۳-۱- دینامیک سیالات محاسباتی

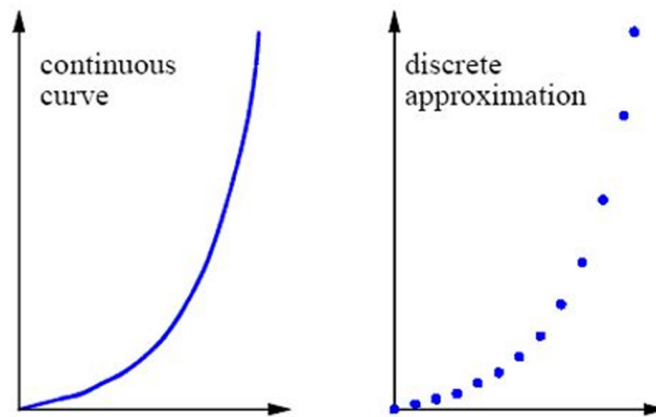
#### ۳-۱-۱- مقدمه

دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> (CFD) عبارت است از: تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه، نظیر واکنش‌های شیمیایی، بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری (Versteeg and Malalasekera, 1995). امروزه با پیشرفت روزافزون در زمینه فناوری و قطعات کامپیوتری، استفاده از CFD در شاخه‌های مختلف از قبیل: خودروسازی، مهندسی شهرسازی، محیط زیست، هوافضا، هواشناسی، دریانوردی و ... بسیار رایج شده است. در بخش معدن نیز به دلیل سرعت و دقت سهولت استفاده در طراحی و مدل‌سازی تهویه بسیار پرکار است. در این فصل تعریف CFD و نحوه کار آن توضیح داده می‌شود، سپس مدل‌سازی اولیه ارائه خواهد شد که از نتایج آن در مدل‌سازی ثانویه در فصل بعد استفاده خواهد شد.

#### ۳-۱-۲ نحوه کار CFD

معادلات حاکم بر جریان سیال به صورت مستقیم قابل حل نیستند (شکل مدل‌سازی به صورت حل غیرخطی معادلات دیفرانسیل جزئی است). این معادلات به شکل ریاضی ساده تبدیل شده تا بتوان آن را به صورت عددی حل کرد، این روش گسسته‌سازی نام دارد. در CFD برای مسأله مورد نظر یک پاسخ اولیه در نظر گرفته می‌شود، اما این پاسخ به صورت پیوسته<sup>۱</sup> نیست بلکه به صورت گسسته است (در صورتی که ماهیت سیال پیوسته است). حال این جواب گسسته، با استفاده یک سری معادلات، با دقت مناسبی به صورت پیوسته تبدیل می‌شود (شکل ۳-۱).

<sup>۱</sup> - Computational fluid dynamics (CFD)



شکل (۳-۱) نمایی از نوع جواب به دست آمده از گسسته سازی

معادلات استفاده شده شامل: ناویر-استوکس<sup>۲</sup>، قانون بقای جرم، قانون بقای انرژی، قانون بقای ممنتوم است، معادلات برای یک حجم کنترل اعمال، و در نهایت این معادلات به فرم معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای (PDE) مرتبه دومی تبدیل شده که معادلات به صورت غیرخطی هستند و به حل این معادلات به صورت غیرممکن است.

در نتیجه برای حل، معادلات به یک دستگاه معادلات جبری قابل حل تبدیل می‌شود که با تکرار بسیار زیاد قابل حل است (با خطای قابل قبول). زمانی که معادلات از حالت دیفرانسیلی به حالت جبری می‌شوند تعداد بسیار زیادی معادله به وجود می‌آید، در نتیجه عملاً حل آن به صورت دستی ناممکن است، اما با استفاده از سرعت پردازش بسیار زیاد رایانه‌ها حل می‌شوند.

این خلاصه‌ای از طرز کار دینامیک سیالاتی محاسباتی بود. با ظهور کامپیوترها CFD پیشرفت چشمگیری کرد و استفاده از آن برای مسائل بسیار رایج شد (به دلیل ویژگی‌های آن)، و لذا برنامه‌های کامپیوتری برای آن ساخته شد، از قبیل Fluent که در این پایان‌نامه نیز از این نرم‌افزار استفاده می‌شود (Versteeg and Malalasekera, 1995).

### ۳-۱-۳- نرم‌افزار Fluent

نرم‌افزار Fluent اولین بار در سال ۱۹۸۵ توسط شرکت Fluent ساخته شد است و حال حاضرین یکی از بهترین نرم‌افزارهای CFD است. این شرکت توسط شرکت Ansys در سال ۲۰۰۶ خریداری شده و بعد از آن نسخه 6.3 Fluent را ارائه کرده است. شرکت Ansys نرم‌افزار Fluent را در قالب نرم‌افزار Ansys ارائه می‌کند.

### ۳-۱-۴- نحوه حل مسأله در نرم‌افزار Fluent

معادلات در این نرم‌افزار بر اساس روش حجم محدود<sup>۱</sup> (FVM) حل می‌شود. در نتیجه مدلی که برای حل ساخته می‌شود باید به حجم‌های مشخصی تقسیم‌بندی، یا در اصطلاح مش‌بندی شود. قسمت‌های مش‌بندی شده حجم کنترل نام دارند (شکل ۳-۲)، بین اضلاع یک حجم کنترل فشار، سرعت، چگالی و دما (در داخل المان یا همان حجم کنترل) ثابت است.

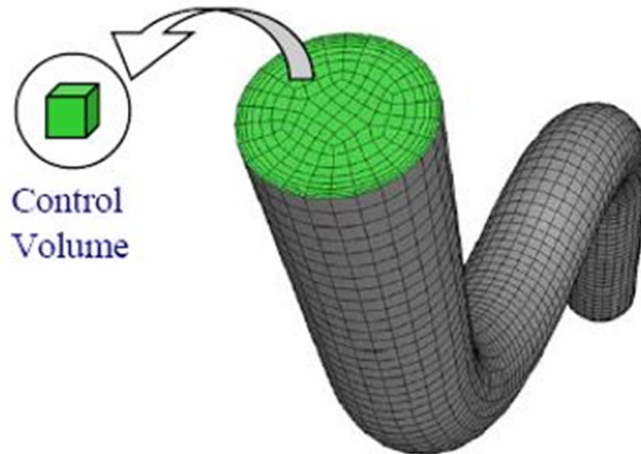
معادلات ناویر-استوکس<sup>۲</sup> در هر کدام از حجم کنترل‌ها حل شده و با انجام تعداد حل مناسب به میزان خطای مناسب نزدیک می‌شود، با در کنار هم قرار دادن این حجم کنترل‌ها تغییرات فشار، سرعت و ... در کل میدان حل به دست می‌آید.

ساخت مدل هندسی و مش‌بندی آن توسط نرم‌افزار Gambit انجام می‌شود.

پس از ساخت مدل هندسی، شرایط مرزی، فرمول‌ها و ویژگی‌های حل تعیین می‌شود. سپس میزان خطای حل (حداقل ۰/۰۰۱) مشخص شده و با مقدار دهی اولیه به مسأله (حدس اولیه و یا داشتن اطلاعات از مسأله) با تعداد حل تعریف شده مسأله حل می‌شود (Fluent6.3 user's manual, 2006).

<sup>۱</sup> - FVM = Finite volume method

<sup>۲</sup> - Navier - Stokes



شکل (۲-۳) نمایی از مش‌بندی و حجم کنترل

## ۳-۲- معادلات اساسی

۳-۲-۱- معادله بقای جرم<sup>۱</sup> یا پیوستگی

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 می‌گردد.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (۱-۳)$$

یا به شکل برداری زیر :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (۲-۳)$$

که در این روابط:

$\rho$ : چگالی سیال

<sup>۱</sup> - Conservation of Mass

U: بردار سرعت

برای سیال غیر قابل تراکم، چگالی ثابت است و رابطه به شکل زیر در می‌آید:

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

شکل برداری معادله بالا به صورت زیر است (Anderson and et al, 1995):

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4-3)$$

### ۳-۲-۲- معادله ناویر-استوکس

معادله اساسی که پایه این نرم‌افزار است معادله ناویر - استوکس است. معادله ناویر-استوکس جامع‌ترین معادله‌ای است که تغییرات خواص سیال را بیان می‌کند.

معادله ناویر-استوکس شامل: معادله پیوستگی جریان، معادله ممنتوم (که می‌تواند به ۱ تا ۳ معادله، بر حسب بعد مسأله، تبدیل شود) و معادله انرژی است، یعنی معادله ناویر-استوکس می‌تواند ۳ تا ۵ معادله دیفرانسیلی باشد.

طبق قانون دوم نیوتون:

$$\frac{dP}{dT} = \sum F \quad (5-3)$$

می‌توان نوشت:

$$\rho \frac{DV}{DT} = \sum F_{body} + \sum F_{surfaces} \quad (6-3)$$

$$\sum F = -\nabla p + \nabla T^* \quad (7-3)$$

که در آن  $T^*$  ماتریس تانسور تنش است.

$$T^* = \begin{pmatrix} [2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + k\nabla.V] & \mu(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) & \mu(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}) \\ \mu(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}) & [2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + k\nabla.V] & \mu(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}) \\ \mu(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}) & \mu(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}) & [2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + k\nabla.V] \end{pmatrix} \quad (۸-۳)$$

در نهایت با جایگذاری ماتریس تانسور تنش در معادله ۱۲ معادله اصلی ناویر استوکس به صورت سه معادله زیر حاصل می‌شود:

$$(۱۱،۱۰،۹-۳)$$

$$\begin{aligned} \rho(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}) &= \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + k\nabla.V] + \frac{\partial}{\partial y} [\mu(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] + \frac{\partial}{\partial z} [\mu(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x})] \\ \rho(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}) &= \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} [\mu(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y})] + \frac{\partial}{\partial y} [2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + k\nabla.V] + \frac{\partial}{\partial z} [\mu(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y})] \\ \rho(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}) &= \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} [\mu(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z})] + \frac{\partial}{\partial y} [\mu(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z})] + \frac{\partial}{\partial z} [2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + k\nabla.V] \end{aligned}$$

### ۳-۲-۳- معادله مرکب<sup>۱</sup> (گونه‌ها)

اساس این معادله بسیار شبیه قانون بقای جرم، که مولکول‌های هر گونه (منظور همان گاز) در حجم کنترل ایجاد یا نابود نمی‌شود. اما این معادله بر خلاف معادله قانون بقای جرم دارای استثنایی است؛ به این طریق که اگر در درون حجم کنترل یک واکنش شیمیایی رخ دهد امکان تغییر غلظت گونه‌ها وجود دارد.

اگر کسر مولی یک گونه  $i$ ، و به وسیله  $Y_i$  توصیف شود؛ معادله مرکب به صورت زیر بیان می‌شود:

<sup>۱</sup> - species

$$\rho \frac{DY_i}{Dt} = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \quad (۱۲-۳)$$

که در آن  $J_i$  بردار شار انتشار جرمی (توده‌ای)،  $R_i$  نرخ جرمی تشکیل یا نابودی،  $S_i$  نرخ جرمی جذب سطحی برای حجم کنترل و به ازای یک گونه است.

معادله مرکب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$J_i \frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla (\rho V Y_i) = -\nabla \cdot J_i + R_i + S_i \quad (۱۳-۳)$$

برای جریان آرام به صورت زیر است:

$$J_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (۱۴-۳)$$

که در آن  $D_{i,m}$  ثابت کسر مولی،  $D_{T,i}$  ثابت انتشار حرارتی نرم‌افزار (فلوئنت) است.

و برای جریان مغشوش:

$$J_i = -\left( \rho D_{i,m} \nabla + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T} \quad (۱۵-۳)$$

که در آن  $\mu_t$  ویسکوزیته اغتشاش،  $D_{T,i}$  عدد اشمیت نرم‌افزار است.

اگر انتقال انرژی واکنش به صورت زیر بیان شود:

$$\nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^N h_i J_i \right) \quad (۱۶-۳)$$

که در آن  $h_i$  آنتالپی واکنش است.

در نهایت معادله انتقال مرکب بدون واکنش شیمیایی به صورت زیر است:



$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho ku)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho kv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = - \left[ -\rho D_{i,m} \left( \frac{\partial Y_i}{\partial x} + \frac{\partial Y_i}{\partial y} + \frac{\partial Y_i}{\partial z} \right) \right] - D_{T,i} \frac{1}{T} \left( \frac{\partial T_i}{\partial x} + \frac{\partial T_i}{\partial y} + \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) \quad (17-3)$$

### ۳-۲-۴- معادله انرژی<sup>۱</sup>

بر اساس قانون اول ترمودینامیک، تغییر انرژی در یک سیستم برابر است با گرمای اضافه شده به سیستم به علاوه کار انجام شده بر روی سیستم یعنی:

$$\frac{dpE_t}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (18-3)$$

که در آن  $E_t$  انرژی کل سیستم،  $Q$  گرمای اضافه شده به سیستم،  $W$  کار انجام شده بر روی سیستم است.

انرژی کل سیستم برابر است با:

$$E_t = \sum_{i=1}^N h_i Y_i - \frac{P}{\rho} + \frac{[V]^2}{2} \quad (19-3)$$

که در آن  $p$  برابر فشار است.

قانون اول ترمودینامیک را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$\rho \frac{DE_t}{Dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (20-3)$$

در نهایت معادله انرژی به صورت زیر بیان می‌شود:

<sup>۱</sup> - Energy Equation

$$\text{که } \frac{\partial}{\partial t}(\rho E_t) + \nabla \cdot (V(\rho E_t + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff,c} \nabla T - \sum_{i=1}^N h_i J_i + (T.V) \right) + S_h \quad (۳-۲۱)$$

در آن  $S_h$  جمله<sup>۱</sup> منبع حرارتی حجمی،  $k_{eff,c} \nabla T$  متناظر است با انتقال (رسانایی) در سیال،  $\sum_{i=1}^N h_i J_i$

متناظر است با انتقال آنتالپی به وسیله انتشار (Diffusion)،  $T.V$  متناظر است با اتلاف ویسکوزیته توسط

میدان جریان (Worrall, 2012).

### ۳-۲-۵- آشفتگی<sup>۲</sup> (اغتشاش)

عدد رینولدز یک جریان نسبت اندازه‌ی نیروی اینرسی به نیروی لزجت را می‌دهد. در آزمایش‌های روی سیستم‌های سیال مشاهده شده است که در عدد رینولدز پایین‌تر از به اصطلاح بحرانی (۲۳۰۰) جریان صاف و لایه‌های هم‌جوار سیال روی یکدیگر می‌لغزند. اگر شرایط مرزی با زمان تغییر نکند جریان دائمی است این منطقه جریان آرام نامیده می‌شود. در مقادیر عدد رینولدز بالاتر از بحرانی (۲۳۰۰) یکسری حوادث اتفاق می‌افتد که نهایتاً سبب تغییرات جدی در رفتار جریان می‌شود. در نهایت رفتار جریان تصادفی و نامنظم شده و حتی با شرایط مرزی ثابت حرکت کاملاً غیردائمی می‌شود. سرعت و سایر خواص جریان به صورت تصادفی و نامنظم تغییر می‌کند. این منطقه ناحیه جریان آشفته نامیده می‌شود. مشخصه اصلی جریان مغشوش، نوسانی بدون میدان سرعت آن است. این نوسانات سرعت باعث به هم ریخته شدن کمیت‌های انتقالی مثل مومنتوم، انرژی و غلظت (در ترکیبات شیمیایی) می‌شود و در نتیجه این کمیت‌های انتقالی نیز مثل سرعت به صورت نوسانی در می‌آیند، چون این نوسانات دارای مقیاس‌های (اندازه-های) کوچک و فرکانس‌های بالا می‌باشند، لذا شبیه‌سازی آنها به طور مستقیم و با محاسبات کاربردی مهندسی قابل انجام نیست و در عوض باید از میانگین‌گیری زمانی در معادلات استفاده نمود و سعی کرد این مقیاس‌های کوچک را از معادلات حذف کرد تا بتوان معادلات اصلاح شده‌ای داشته باشیم که هزینه

<sup>۱</sup> - Term

<sup>۲</sup> - Turbulence

کمتری برای حل داشته باشند. اما برای بیان این نوسانات در این معادلات اصلاح شده نیاز به تعریف متغیرهای جدیدی خواهد بود البته می‌توان این متغیرهای جدید را با شیوه‌ها و روش‌های مختلفی تعیین و سپس محاسبه نمود که به این روش‌ها، مدل‌های مغشوش گفته می‌شود (Ndenguma, 2011).

در حالت کلی می‌توان مدل‌های آشفتگی را به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- مدل‌های جبری آشفتگی:

○ مدل طول اختلاط پرانتل

○ مدل کبکی-اسمیت

○ مدل بالدوین-لوماکس

- مدل‌های تک معادله‌ای آشفتگی:

○ مدل اسپالارات-آماراس

○ مدل بالدوین-بارس

- مدل‌های دو معادله‌ای آشفتگی:

مدل‌های دو معادله‌ای، به عنوان زیربنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریان‌های آشفتگی، به خصوص در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ساده‌ترین مدل‌های کامل آشفتگی (که در عین قابلیت‌های بالا، دارای معادلات نسبتاً ساده‌ای نیز می‌باشند) مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آنها، حل دو معادله انتقال جداگانه باعث تعیین شدن جداگانه مقیاس سرعت و آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی می‌شوند. مهم‌ترین اختلاف بین مدل‌های دو معادله‌ای و سایر معادله‌های ویسکوزیته ادی آن است که مدل‌های دو معادله‌ای مدل‌های کاملی هستند یعنی از آنها می‌توان برای پیش‌بینی خواص یک جریان آشفتگی بدون آگاهی قبلی از ساختار جریان و یا هندسه جریان استفاده نمود.

○ مدل کا-اِپسیلون

○ مدل کا - امگا

○ مدل کا - تاو

- مدل تنش‌های رینولدز

مدل‌های جبری جواب‌های دقیقی برای جریان‌های ساده مانند جریان بر روی صفحه صاف و جت‌ها می‌دهند. همچنین دارای سرعت حل بالا هستند؛ اما به‌صورت عمومی نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد، برای شبیه‌سازی جدایش مناسب نیستند و معمولاً نیاز به اطلاعاتی راجع به لایه مرزی دارند. در مقابل مدل‌های یک معادله‌ای و دو معادله‌ای با داشتن سرعت حل کمتر، دقت بالاتر را دارا می‌باشند تاکنون صدها مدل آشفتگی ارائه شده است که هر یک برای رژیم‌های خاص جریانی و حتی در ناحیه‌ای خاص از میدان جریان معتبر و دقیق می‌باشند. هدف نهایی تمام مدل‌های آشفتگی، محاسبه اندازه تنش رینولدز  $-\overline{\rho u_i' u_j'}$  در نقاط مختلف جریان میباشد.

در نرم‌افزار Fluent، مدل‌های مغشوش زیر موجود است:

- مدل اسپالارت - آلماراس

- مدل‌های  $K - \varepsilon$  که خود شامل:

۱. مدل  $K - \varepsilon$  استاندارد

۲. مدل RNG  $K - \varepsilon$

۳. مدل Realizable  $K - \varepsilon$

- مدل‌های k-w

- مدل  $u^2 - f$

- مدل تنش رینولدز (RSM)

- مدل شبیه‌سازی ادی‌های منفصل (DES)

- مدل شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ (LES)

### ۳-۲-۵-۱- معادله $K-\varepsilon$

مدل آشفتگی کا اِپسیلون، این مدل یکی از مدل‌های آشفتگی متداول است. مدل کا اِپسیلون یک مدل دو معادله‌ای است، به عبارتی شامل دو معادله انتقالی اضافی برای محاسبه خواص آشفتگی جریان است. از این معادلات می‌توان برای محاسبه تأثیرات جابجایی و پخش در انرژی آشفتگی بهره برد. اولین متغیر انتقالی، انرژی آشفتگی جنبشی یا همان  $K$  است و دومین متغیر انتقالی در این مدل، اتلاف آشفتگی یا همان اِپسیلون است. به عبارتی می‌توان گفت که  $K$ ، انرژی را در آشفتگی و اِپسیلون مقیاس آشفتگی را معین می‌کند (Ansys Fluent 17 manual, 2016).

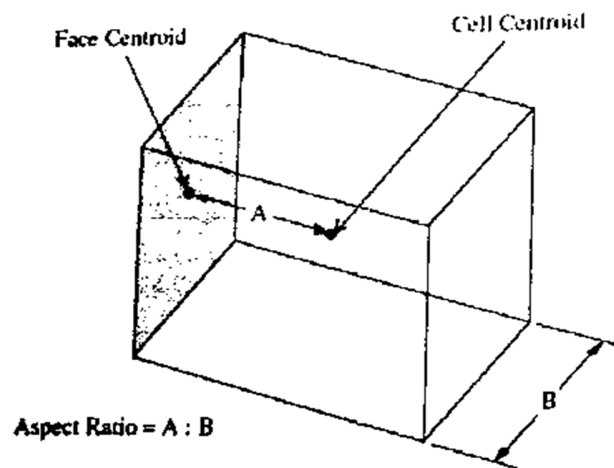
### ۳-۳- مش

پس از ساخت مدل هندسی برای حل، محیط به بخش‌های کوچکتری تقسیم می‌شود که هر کدام از این بخش‌ها مش نام دارند. در واقع در هر مش معادلات حاکم بر مسأله حل می‌شود، بنابراین هر چه اندازه مش کوچکتر باشد دقت حل بالا می‌رود اما در عوض هزینه و زمان محاسبات افزایش می‌یابد در نتیجه باید تعداد مش به مقداری باشد که جواب مسأله با تغییر در اندازه مش تغییر نکند؛ در واقع استقلال جواب مسأله از اندازه مش اثبات شود.

نکته دیگری که در مش اهمیت دارد کیفیت شبکه مش‌بندی است. کیفیت شبکه نقش عمده‌ای در دقت و پایداری محاسبات عددی دارد. چگونگی توزیع نقاط گره‌ها، همواری و مورب بودن شبکه مواردی هستند که در کیفیت شبکه نقش دارند. صرف نظر از نوع شبکه به کار گرفته شده، بررسی کیفیت شبکه ضروری است.

نرم‌افزار Gambit نیز دارای ابزاری برای بررسی کیفیت شبکه مش است؛ از جمله:

- ضریب منظر<sup>۱</sup>، اندازه کشیدگی یک سلول است و به صورت نسبت بین بیشترین فاصله بین مرکز سلول و مرکز وجه سلول به کمترین فاصله بین گره‌های هر سلول تعریف می‌شود (شکل ۳-۳).
- مورب بودن<sup>۲</sup>، به صورت اختلاف بین شکل واقعی سلول و شکل سلولی متقارن و متساوی‌الاضلاع با همان حجم تعریف می‌شود. جدول (۱-۳) محدوده مجاز این پارامتر را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳): چگونگی تعیین ضریب منظر (دهقانی، ۱۳۸۷).

جدول (۱-۳): محدوده مجاز مورب بودن (Gilmore, 2015)

کیفیت سلول	میزان مورب بودن
بسیار بد	۱
بد	$0.9 < 1$
ضعیف	$0.75 - 0.9$
نسبتاً خوب	$0.5 - 0.75$
خوب	$0.25 - 0.5$
عالی	$0 - 0.25$
متساوی‌الاضلاع	۰

<sup>۱</sup> - Aspect ratio

<sup>۲</sup> - Skewness

به طور کلی در صورتی که مقدار میانگین این پارامتر در کل شبکه از  $0/4$  کمتر باشد می‌توان از کیفیت شبکه اطمینان حاصل نمود (دهقانی سانج، ۱۳۸۷).

### ۳-۴- شرایط مرزی

برای حل عددی فرم گسسته معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای، تعیین شرایط مرزی و اولیه الزامی است. این موضوع در بحث ریاضی یک اصل محسوب می‌شود. در شبیه‌سازی عددی جریان سیال نیز علاوه بر مطرح بودن بحث ریاضی حل معادلات، باید نوع و فیزیک جریان نیز در مرزهای دامنه محاسباتی به حلگر شناسانده شود. بنابراین هدف از تعریف شرایط مرزی در دینامیک سیالات عددی، مقید ساختن فرم گسسته معادلات برای حل آن در یک چهارچوب خاص و نیز تعریف ویژگی جریان در مرزهای دامنه محاسباتی است. فرمهای متعددی از شرایط مرزی برای شبیه‌ساز جریان وجود دارد. بعضی از شرایط مرزی حالت خاص داشته و بعضی از آن نیز به‌طور گسترده‌ای برای آنالیز انواع جریان استفاده می‌شود. استفاده از شرط مرزی مناسب تابعی از نوع رژیم جریان، اطلاعات موجود در ورودی و خروجی جریان و نیز سازگاری نوع حلگر و الگوریتم عددی استفاده شده با شرط مرزی است. در صورت انتخاب نامناسب شرط مرزی، نه تنها دقت شبیه‌سازی کاهش می‌یابد بلکه در مواقعی نیز موجب همگرایی کند و یا حتی واگرایی در روند حل می‌شود.

شرایط مرزی، متغیرهای حرارتی و جریان سیال را روی مرزهای دامنه محاسباتی را مشخص می‌کند. بنابراین تعیین شرایط مرزی یک موضوع حساس در شبیه‌سازی عددی جریان سیال بوده و تعریف مناسب آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. به‌طور کلی شرایط مرزی در نرم‌افزار فلوئنت به چند دسته زیر تقسیم می‌شود (جدول ۳-۲):

- مرزهای ورودی و خروجی جریان؛ عبارت است از شرایط مرزی فشار ورودی، سرعت ورودی، دبی جرمی ورودی، دریچه ورودی، فن ورودی، فشار خروجی، فشار در بی‌نهایت<sup>۱</sup>، جریان خروجی<sup>۲</sup>، دریچه خروجی و فن خروجی.
- مرزهای دیواره، تکرار و قطبی؛ عبارت است از شرایط مرزی دیواره، پریودیک، تقارن<sup>۳</sup> و شرط مرزی تقارن محوری<sup>۴</sup>
- نواحی داخلی؛ عبارت است از نواحی سیال، جامد (در نرم‌افزار فلونت، نواحی متخلخل نیز جزء نواحی سیال در نظر گرفته شده است).
- سطوح داخلی؛ عبارت است از شرایط مرزی فن، رادیاتور، پرش متخلخل<sup>۵</sup>، دیواره و درونی<sup>۶</sup>

جدول (۳-۲): دسته‌بندی انواع شرایط مرزی در فلونت

Category	Zone Types
Faces	axis, outflow, mass flow inlet, pressure far-field, pressure inlet, pressure outlet, symmetry, velocity inlet, wall, inlet vent, intake fan, outlet vent, exhaust fan
Double-Sided Faces	fan, interior, porous jump, radiator, wall
Periodic	periodic
Cells	fluid, solid (porous is a type of fluid cell)

خلاصه توضیح موارد کاربرد هریک از این شرایط مرزی عبارت است از:

- 
- 1 - Pressure Far Field
  - 2 - Outflow
  - 3 - Symmetry
  - 4 - Axis
  - 5 - Porous Jump
  - 6 - Interior



- شرط مرزی سرعت ورودی؛ برای تعیین سرعت و خواص اسکالر جریان در مرزهای ورودی استفاده می‌شود.
- شرط مرزی فشار ورودی؛ برای تعیین فشار سکون و دیگر کمیت‌های جریان در مرز ورودی استفاده می‌شود.
- شرط مرزی دبی جرمی ورودی؛ در جریان‌های تراکم پذیر برای تعیین نرخ دبی جرمی ورودی جریان استفاده می‌شود. باید توجه داشت، استفاده از این شرط مرزی برای جریان‌های تراکم ناپذیر لازم نیست، چراکه با ثابت بودن چگالی، شرط مرزی سرعت ورودی، دبی جرمی ورودی جریان را ثابت نگه می‌دارد.
- شرط مرزی فشار خروجی؛ برای تعیین فشار استاتیک و سایر متغیرهای اسکالر جریان در مرز خروجی استفاده می‌شود. استفاده از این شرط مرزی بجای شرط مرزی جریان خروجی، اغلب موجب بهتر شدن نرخ همگرایی در زمانیکه جریان برگشتی در طول مراحل تکرار اتفاق می‌افتد، می‌گردد.
- شرط مرزی فشار در بی‌نهایت؛ برای تعیین عدد ماخ جریان آزاد و شرایط استاتیک مشخص شده، در جریان‌های تراکم پذیر خارجی استفاده می‌شود. از این مرز تنها برای شبیه‌سازی جریان تراکم پذیر خارجی استفاده می‌شود.
- شرط مرزی جریان خروجی؛ برای شبیه‌سازی جریان‌هایی که جزئیات خصوصیات جریان در خروجی مشخص نیست استفاده می‌شود. این شرط مرزی برای حالت‌هایی که جریان در خروجی کاملاً توسعه یافته باشد (نظیر جریان در داخل لوله‌های بلند) مناسب است. همچنین برای محاسبه جریان‌های تراکم پذیر استفاده از این شرط مرزی در خروجی به هیچ عنوان مناسب نیست.

- شرط مرزی دریاچه ورودی؛ برای مدل‌سازی یک دریاچه ورودی با ضریب افت، جهت جریان و فشار و دمای سکون محیط مشخص، استفاده می‌شود.
- شرط مرزی فن ورودی؛ برای مدل‌سازی یک فن ورودی (که در قبل از ورود به قلمرو فیزیکی قرار گرفته) با پرش فشار، جهت جریان و فشار و دمای سکون محیط مشخص، استفاده می‌شود.
- شرط مرزی دریاچه خروجی؛ برای مدل‌سازی یک دریاچه خروجی با ضریب افت، فشار و دمای استاتیک مشخص، استفاده می‌شود.
- شرط مرزی فن خروجی؛ برای مدل‌سازی یک فن خروجی با پرش فشار، جهت جریان و فشار و دمای سکون محیط مشخص، استفاده می‌شود (دهقانی سانج، ۱۳۷۸) و (<http://cfid.iut.ac.ir>).

### ۳-۵- ساده‌سازی‌ها

ابتدا با توجه ویژگی‌های معدن طبس مدل فیزیکی مسأله در نرم‌افزار Gambit ساخته می‌شود، سپس با مقدار مناسبی مشبندی و شرایط مرزی برای زون‌های مختلف تعیین می‌شود. سپس این مدل به نرم‌افزار Fluent منتقل شده و با توجه به شرایط معدن، مدل و شرایط حل مناسب تعیین می‌شود. در یک معدن زغال‌سنگ مسائلی مانند گرد زغال (بیشتر در ناحیه سینه‌کار)، آزاد شدن گاز (عمدتاً متان)، خودسوزی زغال و گرمایش خودبه‌خودی ناشی از آن وجود دارد. عملاً با توجه به امکانات موجود و اطلاعات قابل اندازه‌گیری در معدن امکان ساختن مدلی که شامل تمامی این موارد باشد نیست. پس ساده‌سازی‌هایی زیر صورت انجام می‌گیرد:

- ۱- گردزغال از مدل حذف شده است (زیرا وارد کردن این ویژگی به معادلات باعث سنگین شدن محاسبات می‌شود و نیاز به کامپیوتر بسیار سریعی و زمان محاسباتی زیادی دارد).
- ۲- از مدل‌سازی خودسوزی زغال و گرمایش ناشی از آن صرف نظر شده، زیرا به تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته و زمان کافی برای آزمایش‌ها نیاز دارد که خارج از دسترس است.

۳- تنها منبع گاز متان منطقه تخریب در نظر گرفته شده است و از گاز تولیدی سینه‌کار استخراجی صرف نظر می‌شود؛ بنابراین مدل‌سازی صورت گرفته در زمانی است که پیشروی و استخراج صورت نگیرد.

۴- معدن در حالت غیرفعال (عمل استخراج صورت نمی‌گیرد) در نظر گرفته می‌شود.

۵- مدل هندسی برای یک طول مشخص (میزان ابعاد کارگاه و ... در زمان برداشت اطلاعات) در نظر گرفته می‌شود که با توجه به میزان پیشروی در طول روز به نسبت ابعاد مدل قابل قبول است.

۶- خواص منطقه تخریب در هر سه جهت مختصات یکسان است و به صورت ایزوتروپ در نظر گرفته خواهد شد.

### ۳-۶- مدل‌سازی اولیه

#### ۳-۶-۱- مشخصات کلی مدل‌سازی‌ها

۱- معادلات مستقل از زمان در نظر گرفته شده است، زیرا میزان پیشروی در طول روز به نسبت طول پانل کم و قابل صرف نظر است.

۲- سیال به صورت تک‌فازی (تنها فاز گاز) انتخاب شده و فاز گاز مخلوط گاز متان و هوا است که از

پایگاه داده خود نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است (این مخلوط شامل ۲۱ درصد اکسیژن و ۷۹

درصد نیتروژن است و از سایر گازها صرف نظر شده و در مناطق خروجی گاز متان، لایه بالایی و

پایینی پانل، ۱۰۰ درصد گاز متان در نظر گرفته شده است).

۳- دما در تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شده است.

۴- مدل اغتشاش، کا - افسیلون استاندارد انتخاب شده است (تقریباً اکثر مدل‌سازی‌های انجام شده مشابه این پایان‌نامه از این مدل اغتشاش استفاده کرده‌اند و از مناسب بودن آن برای این مدل-سازی اطمینان حاصل شده است).

۵- اثر زبری دیواره<sup>۱</sup> و تأثیر آن در افت فشار با توجه به مقاله‌ای از لوین<sup>۲</sup> و همکاران ارتفاع زبری برای راهروها ۰/۰۵ متر و برای کارگاه استخراج ۰/۰۷۵ متر در نظر گرفته شده است (Levin et al 2002).

۶- مشخصات منطقه تخریب از مدل ساخته شده توسط یوان<sup>۳</sup> و همکاران در نظر گرفته شده است.

### ۳-۶-۲- مدل‌سازی

برای رسیدن به یک مدل‌سازی مناسب و صحیح در CFD نیاز است که مدل هندسی ساخته شده (بخش هندسی و مش)، شرایط مرزی مناسب و تنظیمات حل‌گر مناسب و متناسب با واقعیت انتخاب شود. بنابراین در این پایان‌نامه در مرحله اول یک مدل‌سازی اولیه با شرایط متفاوت (حتی دور از واقعیت یا با شرایط غیرواقعی) برای رسیدن به مدل مطلوب انجام خواهد شد و در مرحله دوم با توجه به نتایج مدل‌سازی اولیه، مدل‌سازی ثانویه انجام خواهد شد.

### ۳-۶-۳- فیزیک کلی مسأله

مسأله مورد نظر در این پایان‌نامه، سیستم تهویه کارگاه W<sub>2</sub> است که شامل ۳ راهرو هوا MG، TG و راهرو کارگاه استخراج است. هوای تمیز تهویه از طریق راهرو MG وارد کارگاه شده و از طریق خروجی انتهایی راهرو هوای کثیف خارج می‌شود. دقیقاً پشت کارگاه استخراج منطقه تخریب وجود دارد که ارتفاع

<sup>1</sup> - Roughness

<sup>2</sup> - Levin

<sup>3</sup> - Yuan

کلی آن ۴۷ متر است. دلیل انتخاب این ارتفاع، وجود ۲ لایه زغال‌سنگ یکی در بالای لایه استخراجی، لایه زغالی C<sub>2</sub> به فاصله ۱۲ متر و دیگری در پایین لایه استخراجی، لایه زغالی B<sub>2</sub> به فاصله میانگین ۳۵ متر است (لایه بالا و پایین لایه استخراجی منبع ورود گاز متان به سیستم تهویه است).

هوای تهویه با منطقه تخریب در ۲ قسمت ابتدا و انتهای کارگاه استخراج با منطقه تخریب تماس مستقیم دارد.

یعنی در ابتدا و انتهای کارگاه استخراج به اندازه ابعاد راهرو TG و MG فضایی وجود دارد که سیستم تهویه به طور مستقیم با منطقه تخریب ارتباط دارد. منطقه تخریب در اثر استخراج لایه زغال‌سنگ به وجود آمده و محیطی تخریب شده با تخلخل و نفوذپذیری متغییر است. محل ارتباط لایه زغال‌سنگ بالا و پایینی منع اصلی ورود گاز متان به سیستم تهویه، به واسطه محیط منطقه تخریب، است. درزه‌های موجود در روی شیلدها (به علت آب‌بندی نبودن شیلدها) می‌تواند به عنوان محل دیگر ارتباط مستقیم سیستم تهویه با منطقه تخریب باشد (مهندسين تهویه معدن عنوان کرده‌اند که شیلدها دارای درز نیستند که با توجه به نحوه استفاده و عمر شیلدها غیرمنطقی است). در راهرو TG، جرزبندی برای سیستم نگه‌داری و داکت هوایی برای ترقیق گاز متان و خنک کردن موتور محرک ناوزنجیری وجود دارد.

### ۳-۶-۴- مدل‌سازی اولیه

برای مدل کردن محیط، شرایط خاصی، جسم یا وسیله‌ای در دینامیک سیالات محاسباتی (به خصوص با نرم‌افزار فلوئنت و در ابعاد بزرگ و پیچیده) نیاز است که شرایط و ویژگی‌های مسأله از قبیل نوع شرایط مرزی، خصوصیات و ویژگی‌های سیال و اجسام، نوع مش، نحوه ارتباط اجسام و محیط‌ها و ... در مدلی به نام مدل اولیه تست و آزمایش شود (اصطلاحاً مدل قلق‌گیری شود). سپس با استفاده از نتایج به دست آمده مدل‌سازی نهایی انجام شود. ایجاد تغییر در مدل‌های بزرگ و پیچیده مشکل است و مدت زمان

زیادی برای رسیدن به نتیجه لازم دارد و حتی گاهی نیاز است که چندین بار تغییرات اساسی در مدل ایجاد شود. با انجام مدل‌سازی اولیه بسیاری از این تغییرات بر روی مدل اعمال شده و مدل نهایی بهتر و کامل‌تری ساخته می‌شود.

با توجه به مطالب ارائه شده در فصل‌های قبل؛ در مدل‌سازی اولیه سعی بر آن است که مشخصات راهروهای تهویه TG، MG، کارگاه استخراج، جرزبندی موجود در راهرو TG، داکت هوای تهویه در راهرو TG و ناحیه تخریب و هم‌چنین نحوه مدل کردن گاز متان، محل خروج گاز متان در مدل‌سازی اولیه مورد بررسی قرار گیرد و از نتایج حاصل مدل ثانویه مناسب ساخته شود. بنابراین در مدل‌سازی اولیه، مدل‌هایی ساخته و نتایج آن بررسی خواهد شد. در مدل‌سازی اولیه استقلال مدل از میزان مش نیاز نیست و مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

به دلیل حجم هندسی زیاد مدل‌ها هر مدل به مش زیادی برای رسیدن به جواب مناسب نیاز دارد، نرم‌افزار گمبیت قابلیت استفاده بیش از ۲ گیگابایت (GB) از رم کامپیوتر را ندارد در نتیجه این نرم‌افزار توانایی مش زدن یک‌باره کل حجم هر مدل را ندارد. بنابراین بنابراین هر مدل به قسمت‌های مختلف تقسیم شده (در بعضی از مدل‌ها به ۳۳ قسمت تقسیم شده است) و پس از مش‌بندی مناسب و تولید شرایط مرزی مناسب، مدل تولید شده با نرم‌افزار فلوئنت حل شود.

در مدل‌سازی اولیه تعداد زیادی مدل (بیش از ۳۰ مدل) ساخته شده و موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

### منطقه تخریب

منطقه تخریب در ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن به صورت خلاصه ارائه می‌شود.

- با توجه به نوع سیستم تهویه، طول حدود ۱۸۰ متر برای مدل‌سازی کافی است.

- هوای تهویه با منطقه تخریب در دو قسمت انتهایی راهرو TG و MG ارتباط مستقیم دارد؛ به این صورت که دیواره‌ای مماس بر شیلد انتخاب شده و به صورتی در مدل تعریف گرفته خواهد شد، که با توجه به فشار هوای کارگاه، هوا می‌تواند به عنوان ورودی هوا و یا خروجی گاز عمل کند.
- منطقه تخریب به چندین قسمت و اشکال مختلف و با ویژگی‌های متفاوت مدل شده که بهترین مدل، مدل الگو شده از مدل ساخته شده یوان و همکاران (Yuan et al, 2006) است.
- محل خروج گاز متان در دو قسمت، سقف و کف منطقه تخریب (محل لایه زغال سنگ بالایی و پایینی) و مساحت آن به اندازه مساحت آن قسمت از منطقه تخریب و با میزان نرخ سرعت ثابت مناسب است.
- شیب منطقه تخریب با شیب کارگاه استخراج یکسان در نظر گرفته خواهد شد.
- به علت محدودیت نرم‌افزار Gambit در تعداد مش یک حجم واحد و همین‌طور، یکسان نبودن ویژگی‌های قسمت‌های مختلف منطقه تخریب، منطقه تخریب به چندین حجم کوچک تقسیم خواهد شد.

### مدل اغتشاش

- مدل‌های اغتشاش مختلفی در نظر گرفته شده که با توجه به نتایج مدل اغتشاش کا - اپسیلون استاندارد، مناسب‌ترین مدل اغتشاش مناسب‌ترین مدل (مدل‌های دیگر در همگرا شدن نمودار مقدار خطا، داشتن ثبات در مقدار خطا و مقدار دارای اشکال بوده و بهترین نتیجه برای مدل کا - اپسیلون استاندارد بوده است) است.
- به دلیل سرعت بسیار کم سیال در منطقه تخریب، جریان در این منطقه به صورت آرام در نظر گرفته خواهد شد.

### شرایط مرزی

- شرط مرزی velocity inlet برای خروجی گاز متان در نظر گرفته خواهد شد.
- با توجه به نوع سیستم تهویه که از نوع مکشی است، شرط مرزی خروجی هوا در قسمت راهرو TG velocity inlet در نظر گرفته می‌شود. که اعداد وارد شده برای اندازه سرعت در این شرط مرزی برای این قسمت، به صورت منفی وارد خواهد شد.
- شرط مرزی ورودی هوا در ابتدای هوای راهرو MG و همچنین ورودی هوا داکت تهویه در راهرو TG، هر دو velocity inlet (اعداد به صورت مثبت وارد می‌شود) در نظر گرفته خواهد شد.
- برای ساخت جرزبندی، ابتدا حجم راهرو TG ساخته و در مرحله جرزبندی ساخته می‌شود، سپس حجم جرزبندی از حجم راهرو TG کم و کل راهرو TG به عنوان یک حجم (در صورت نیاز به چندین قسمت مختلف تقسیم خواهد شد) در نظر گرفته خواهد شد.
- درزه‌های روی شیلد به صورت یک دیواره مماس بر شیلد در نظر گرفته خواهد شد، که با توجه به مکان هر درزه، هوا یا گاز می‌تواند به صورت ورودی و یا خروجی به منطقه تخریب باشد.

### هوای تهویه

- هوا از چندین گاز تشکیل شده است که با توجه به ویژگی‌های مدل و همین‌طور خواسته‌های مورد انتظار از مدل‌سازی، هوای تهویه متشکل از ۲ گاز اکسیژن با درصد ۲۱ و گاز نیتروژن با درصد ۷۹ در نظر گرفته خواهد شد. گازهای دیگر فقط باعث سنگین‌تر شدن مدل و افزایش زمان پردازش (گاهی تا چندین برابر) می‌شود، هم‌چنین نیاز به تحلیل این گازها نیز نیست.
- گاز خروجی از دو قسمت کف و سقف منطقه تخریب متان خالص در نظر گرفته خواهد شد.



### ضریب زبری دیواره‌ها

- اثر زبری دیواره ۱ با توجه به مقاله‌ای از لوین (Levin et al 2002) و همکاران ارتفاع زبری برای راهروها ۰/۰۵ متر و برای کارگاه استخراج ۰/۰۷۵ متر، مناسب است.

مش

- نوع مش در راهروهای TG و MG و کارگاه استخراج، نوع مش منظم و برای منطقه تخریب، نوع مش نامنظم مناسب است.

- میزان مش در راهرو، TG در محل اتصال با کارگاه استخراج، بیشترین مش و راهرو MG بیشترین اندازه مش دارا خواهد بود.

- میزان مش در منطقه تخریب، در قسمت نزدیک شیلد و کناره‌های منطقه تخریب کمترین اندازه مش و بیشترین اندازه مش قسمت مرکزی منطقه تخریب است. قسمت‌های بین این نقاط نیز اندازه مشی بین بزرگترین و کوچکترین اندازه مش این نقاط، را دارا خواهند بود.

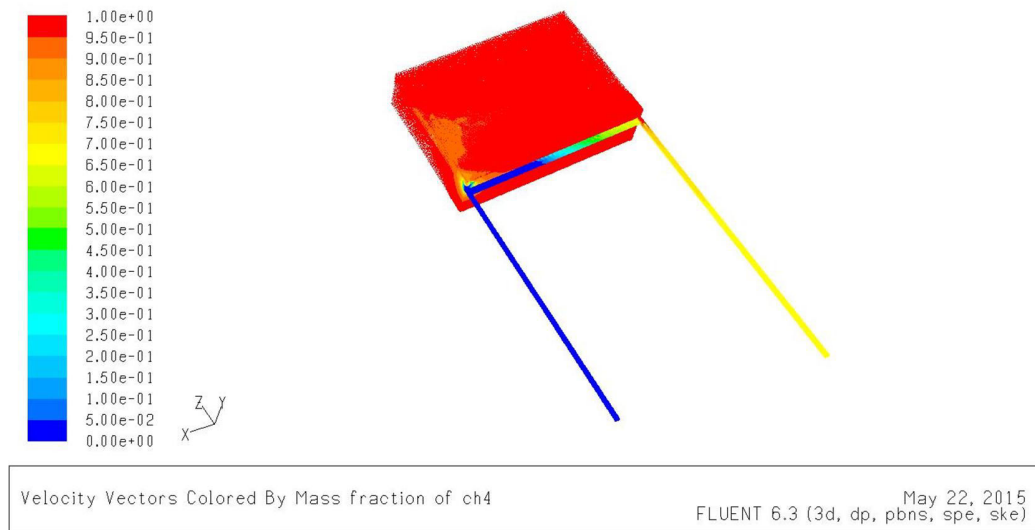
- برای مش زدن بخش منطقه تخریب بایستی مش زدن از داخلی‌ترین قسمت شروع و به ترتیب به خارجی‌ترین قسمت منطقه تخریب ختم شود.

در ادامه تصاویری از نمونه این مدل‌های اولیه ارائه خواهد شد.

تأثیر تخلخل و نفوذپذیری در میزان گاز متان ورودی به سیستم و افزایش بسیار زیاد و غیرعادی درصد عیار گاز متان در راهرو TG (شکل (۳-۴) و (۳-۵)).

---

<sup>1</sup> - Roughness



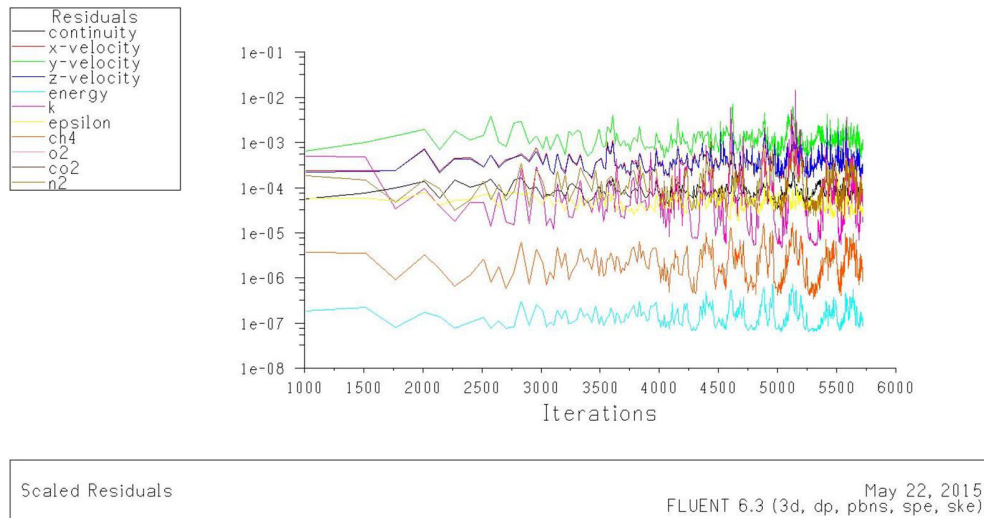
شکل (۳-۴): تأثیر تخلخل و نفوذپذیری در میزان انتشار گاز متان در منطقه تخریب (محدوده عیار گاز ۱۰ تا ۱۰۰ درصد)



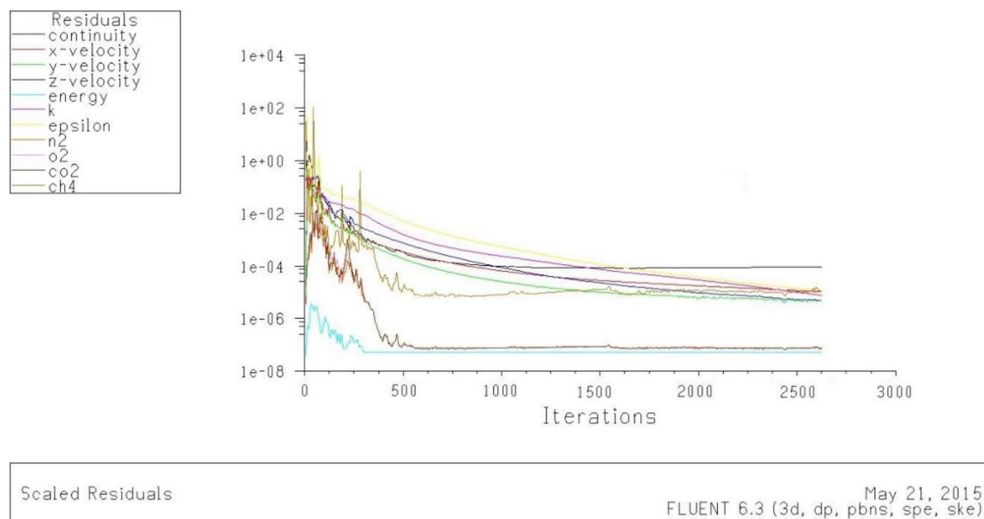
شکل (۳-۵): تأثیر تخلخل و نفوذپذیری در میزان انتشار گاز متان در منطقه تخریب (محدوده عیار گاز ۲ تا ۹۰ درصد)

تأثیر تنظیمات حلگر در واگرایی مدل در شکل‌های (۳-۶) و (۳-۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود

که تنظیمات صحیح حلگر تأثیر بسیار زیادی در همگرایی و ثبات معادلات دارد.



شکل (۳-۶): تأثیر تنظیمات نامناسب حلگر در واگرایی مدل



شکل (۳-۷): تأثیر تنظیمات مناسب حلگر در همگرایی مدل

### ۳-۷- نتیجه‌گیری

CFD امروزه در صنایع مختلفی که با سیال مواجه هستند، به دلیل سرعت و دقت بالا، کاربرد زیادی پیدا کرده است. سیال دارای محیطی پیوسته است؛ در CFD برای این که معادلات قابل حل باشد، معادلات از حالت پیوسته (انتگرالی) به حالت جبری تبدیل و سپس با استفاده از سرعت بالای کامپیوتر

حل می‌شود. برای مدل‌های بزرگ و پیچیده قبل از مدل‌سازی نهایی، مدل‌سازی با عنوان مدل‌سازی اولیه انجام، و از نتایج آن در مدل‌سازی نهایی استفاده می‌شود. هدف از مدل‌سازی اولیه تعیین شرایط مرزی مناسب، اندازه‌گیری مناسب برای مدل‌سازی و ... است. تعیین این ویژگی‌ها در مدل اصلی بسیار مشکل و زمان‌بر است.

## فصل چهارم

مدل سازی ثانویه (نهایی)

## ۴-۱- مقدمه

پس از انجام مدل سازی اولیه، از خروجی (تجربیات) آن برای ساخت مدل نهایی استفاده می شود. ساختن مدلی جامع که تمامی ویژگی های مطالعه موردی را داشته باشد بسیار پیچیده و نیاز به سیستم کامپیوتری بسیار قوی را دارد، حتی ممکن است ساخت این چنین مدلی با فناوری امروزی غیر ممکن باشد، بنابراین نیاز است که مدل نهایی برای بررسی ویژگی ها و شرایط خاص به مدل های ساده تری تقسیم شود، تا امکان پردازش مدل با سیستم کامپیوتری موجود وجود داشته باشد.

## ۴-۲- مدل سازی ثانویه

این مدل سازی، مدل نهایی و نتیجه تمامی داده ها و نتایج است. مدل سازی نهایی شامل ۴ مدل به صورت زیر است.

- مدل شماره ۱: بررسی منطقه تخریب
- مدل شماره ۲: بررسی تأثیر گازکشی بر مدل نهایی
- مدل شماره ۳: بررسی تأثیر درزه های روی شیلد بر سیستم تهویه
- مدل شماره ۴: بررسی تأثیر جرزبندی بر روی سیستم تهویه

در هر ۴ مدل شرایط و ویژگی کلی مدل ها (از قبیل: شرایط مرزی، مش و شرایط محیطی مسأله) یکسان است.

## ۴-۲-۱- مدل شماره ۱

این مدل نشان دهنده شرایط و ویژگی های کارگاه  $W_2$  است. در این مدل راهروهای TG و MG،

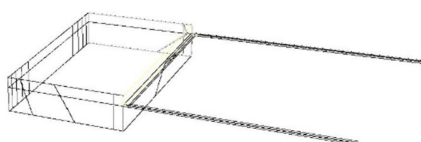
کارگاه استخراج، قسمت بالا و پایینی منطقه تخریب و داکت هوای موجود در راهرو TG مدل می شود (شکل (۱-۴)).

#### ۴-۲-۱-۱- مشخصات مدل

مشخصات کلی مدل به صورت خلاصه در جداول زیر آمده است. جدول (۱-۴) نشان دهنده مشخصات کلی راهروهای MG, TG و کارگاه استخراج است.

جدول (۱-۴): مشخصات راهروها و کارگاه استخراج

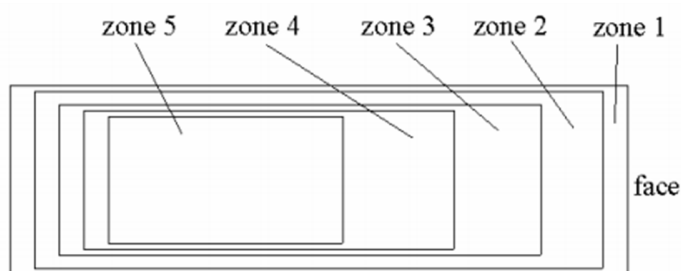
کارگاه استخراج	راهرو TG	راهرو MG	محل
۲۱۳/۵	۳۳۶	۲۹۷	طول
۷	۴/۲	۴/۲	عرض
۲.۶ متر سمت شیلدها و ۳ متر در سمت منطقه تخریب	۳	۳	ارتفاع
+۱۲ (از MG به TG)	+۳	+۳	شیب
۰/۰۷۵	۰/۰۵	۰/۰۵	ضریب زبری دیواره



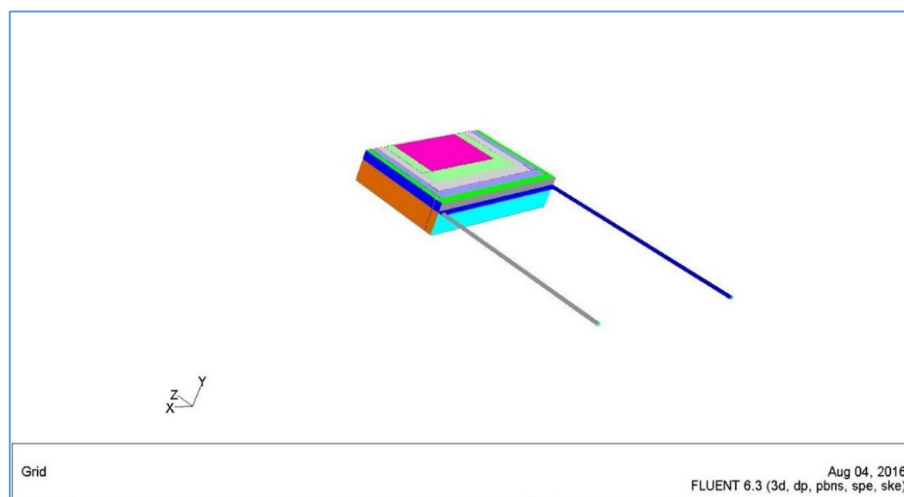
شکل (۱-۴): هندسه کلی مدل شماره ۱

با توجه به این که تخلخل و نفوذپذیری در منطقه تخریب بسیار متغیر است و تابع عوامل زیادی است و بدون مطالعات آزمایشگاهی و آزمایشات برجا نمی توان آن را به درستی مدل کرد بنابراین در این پایان نامه

از مدل و اطلاعات مربوط به منطقه تخریب ساخته شده توسط یوان و همکاران (Yuan et al, 2006) استفاده می شود. این مدل منطقه تخریب را به ۵ زون با تخلخل و نفوذپذیری مختلف تقسیم کرده است. در هر زون میزان تخلخل و نفوذپذیری در ۳ جهت دستگاه مختصات یکسان است. شکل های (۲-۴) و (۳-۴) نمایی از این تقسیم بندی منطقه تخریب را نشان می دهد.



شکل (۲-۴): ترتیب زون های مختلف منطقه تخریب



شکل (۳-۴): هندسه مدل شماره ۱ با تفکیک منطقه تخریب

بر این اساس مقدار این نفوذپذیری به صورت جدول (۲-۴) است.



جدول (۲-۴): میزان نفوذپذیری در منطقه تخریب

شماره زون	میزان نفوذپذیری (میلی داری)
۱	$1 \times 10^{-6}$
۲	$2 \times 10^{-5}$
۳	$7 \times 10^{-4}$
۴	$1 \times 10^{-4}$
۵	$5 \times 10^{-3}$

با توجه به نوع سیستم تهویه کارگاه W<sub>2</sub> و همچنین نقاط ارتباط مستقیم هوای تهویه با منطقه تخریب و میزان این ارتباط، کم است بنابراین نیازی نیست تمام طول منطقه تخریب مدل شود. در مدل سازی های انجام شده طولی در حدود ۱۸۰ متر مدل شده است (بر اساس مطالعات انجام شده این طول منطقه تخریب مناسب است).

جدول (۳-۴): مشخصات منطقه تخریب

قسمت بالا	زون ۱	زون ۲	زون ۳	زون ۴	زون ۵
طول قسمت مرکز	۲۱۳/۴	۱۹۶	۱۷۵	۱۴۹/۳۵	۱۱۶/۵۵
طول قسمت کناره	۱۸۰	۱۶۶	۱۴۸	۱۲۵	۹۴
عرض قسمت مرکز	۱۴	۱۸	۲۳	۳۱	زون شماره ۵ به صورت مستطیل است.
عرض قسمت کناره	۸/۴	۱۰/۵	۱۳/۱۲۵	۱۶/۴	
ارتفاع قسمت بالا	۱۴/۶	۱۴/۶	۱۴/۶	۱۴/۶	۱۴/۶
ارتفاع قسمت پایین	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵

جدول (۴-۴): مشخصات هوای تهویه و گازهای

محل	سرعت (متر بر ثانیه)	میزان درصد گازها
ورودی راهرو MG	۴	O <sub>2</sub> =۲۱ N <sub>2</sub> =۷۹
داکت هوای راهرو TG	۷/۸۶	O <sub>2</sub> =۲۱ N <sub>2</sub> =۷۹
لایه بالایی و پایینی منطقه تخریب	$1 \times 10^{-6}$	CH <sub>4</sub> =۱۰۰

## ۴-۲-۱-۲- بررسی استقلال از مش

سیال دارای محیطی پیوسته است، به همین علت در نرم افزار Fluent برای انجام محاسبات، مدل هندسی ساخته شده برای مدل سازی به قسمت هایی تقسیم می شود، این قسمت ها مش نام دارد. با توجه به حجم و خواسته ها از مدل، نوع مش و تراکم مش متفاوت است.

نوع و تراکم مش تأثیر بسیاری در نتایج مدل دارد؛ بنابراین نیاز است که استقلال مدل از مش بندی اثبات شود. به این صورت که با به کارگیری میزان مختلف تراکم و نوع مش بر روی مدل و تحلیل اثر آن بر روی نتایج، بهترین ابعاد و نوع مش انتخاب شود.

بررسی ابعاد مش به این صورت است که مش زدن مدل را با بزرگترین ابعاد مش آغاز کرده و ابعاد مش را تا جایی که خروجی های مدل (در نقاط ثابت) تغییر زیادی نکند کوچک کرد.

بررسی نوع مش با استفاده از نمودار خطا و از نتایج مدل در نقاط خاص است. نمودار خطا بایستی به نحوی باشد که:

۱. میزان خطا به حد قابل قبولی کاهش یابد.

۲. نمودار خطا همگرا شود.

۳. نمودار خطا دارای ثبات باشد.

جدول (۴-۵) نشان دهنده میزان تغییر اعمال شده بر روی اندازه مش کارگاه استخراج و راهروهای MG و TG است.

جدول (۴-۵): ابعاد مش‌های مورد آزمایش بر روی مدل در قسمت‌های کارگاه استخراج و راهروهای MG و TG

اندازه مش به متر						
۰/۳۷۵	۰/۵	۰/۶۳	۰/۸۴	۱/۱۲۵	۱/۵	بیشترین اندازه مش
۰/۰۳۷۵	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۲۲۵	۰/۳	کمترین اندازه مش

ابعاد مش بین ۰/۵ تا ۰/۵ متر برای مدل رضایت‌بخش بوده است. بیشترین اندازه مش مربوط به راهرو MG است که فقط ورودی هوا است و هیچ گازی وجود ندارد. کوچکترین اندازه مش مربوط به نقطه انتهایی کارگاه استخراج و نقطه اتصال راهرو TG با کارگاه استخراج است (به علت غلظت بالای گاز متان در این مکان).

جدول (۴-۶) نشان‌دهنده میزان تغییرات اعمال شده بر روی اندازه مش در منطقه تخریب است.

جدول (۴-۶): ابعاد مش‌های مورد آزمایش بر روی مدل در قسمت منطقه تخریب

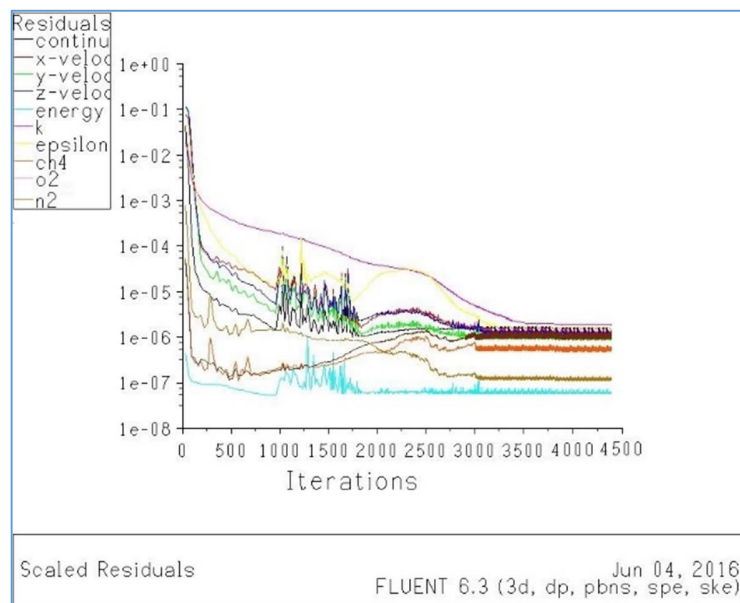
اندازه مش به متر				
۱/۱۲۵	۱/۵	۲/۲۵	۳	بیشترین اندازه مش
۰/۳۷۵	۰/۵	۰/۷۵	۱	کمترین اندازه مش

ابعاد مش ۰/۵ تا ۱/۵ متر برای مدل رضایت‌بخش بوده است. بیشترین اندازه مش مربوط به قسمت مرکزی و پایین منطقه تخریب است (کمترین میزان تخلخل و نفوذپذیری در این نقطه است).

کوچکترین ابعاد مش منطقه تخریب مربوط به قسمت‌های نزدیک به شیلدها است.

## ۴-۱-۲-۴- نمودار خطا

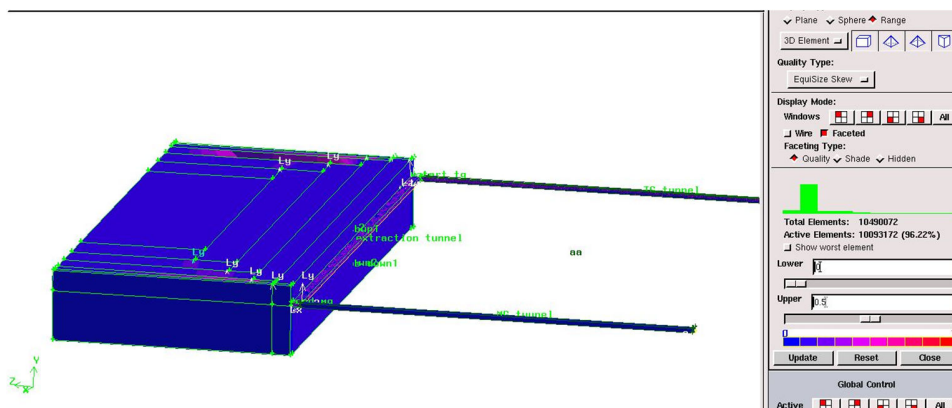
شکل (۴-۴) نشان دهنده نمودار خطای مدل است. با توجه نمودار خطا، بعد از انجام حدود ۳۰۰۰ پردازش نمودار خطا همگرا شده و میزان خطا به حد قابل قبولی رسیده و بعد از آن نیز به تعادل رسیده است.



شکل (۴-۴): نمودار خطا

## ۴-۱-۲-۴- بررسی کیفیت مش

بر اساس معیار ضریب مورب، ۹۶/۲۲ درصد کل مش‌ها در محدوده عالی تا خوب قرار می‌گیرد (شکل ۴-۵).



شکل (۴-۵): محاسبه ضریب منظر با استفاده از نرم افزار Gambit

بر اساس ضریب منظر،  $83/17$  درصد کل مش‌ها در محدوده  $0$  تا  $2/5$  است.

#### ۴-۲-۱-۵- اعتبارسنجی مدل

اعتبارسنجی برای مدل شماره ۴ انجام شده است. این مدل بحرانی ترین حالت از لحاظ میزان تغییر سرعت در محیط را دارا است؛ بنابراین صحت نتایج در این مدل قابل تعمیم به بقیه مدل‌ها است.

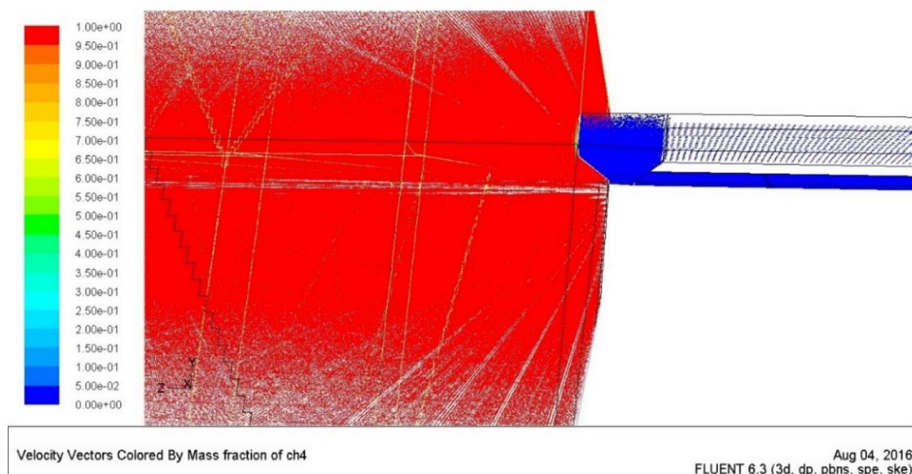
#### ۴-۲-۱-۶- بررسی عیار گاز متان

شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) نشان دهنده عیار کلی با محدوده  $0$  تا  $100$  درصد در مدل است.

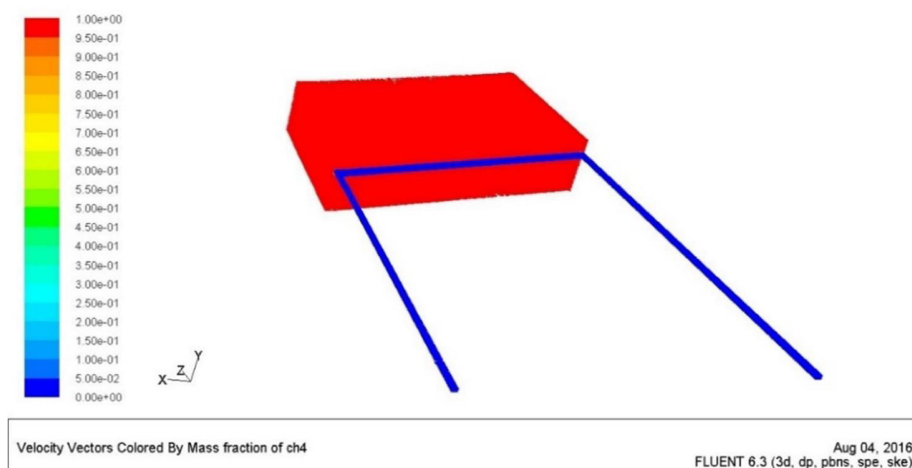
با توجه به نتایج مدل نتیجه می‌شود که تقریباً در کل منطقه تخریب عیار گاز متان بالای  $95$  درصد است. علت میزان عیار گاز به دلایل زیر می‌تواند باشد:

۱- در مدل ساخته منطقه تخریب در ۲ قسمت بالایی و پایینی لایه زغال وجود دارد و خروجی گاز متان به منطقه تخریب در آن نقاط است. کل منطقه تخریب به صورت مخزنی عمل می‌کند که گاز متان از لایه زغال با نرخ ثابتی وارد این مخزن شده و با توجه میزان تخلخل و نفوذپذیری این مخزن در آن ذخیره

شده با توجه به فشار سیستم تهویه با نرخى از مخزن وارد سیستم تهویه شود. با توجه به مکشی بودن نوع سیستم تهویه این خود نیز باعث می شود که میزان نفوذ اکسیژن به مخزن کم در نتیجه میزان عیار گاز متان در منطقه تخریب (مخزن) بالا باشد.



شکل (۴-۶): میزان غلظت گاز متان با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد (a)

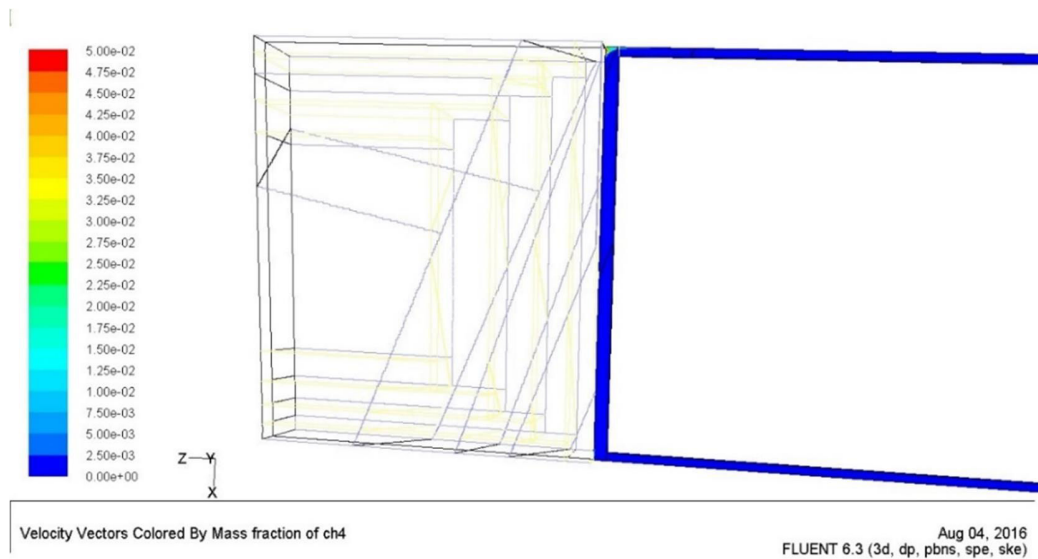


شکل (۴-۷): میزان غلظت گاز متان با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد (b)

۲- میزان تماس مستقیم منطقه تخریب با هوای تهویه در ۲ نقطه با ابعاد  $4/2$  در  $2/6$  متر است که میزان کمی است.

#### ۴-۲-۱-۶-۱ در ناحیه انتهایی کارگاه استخراج

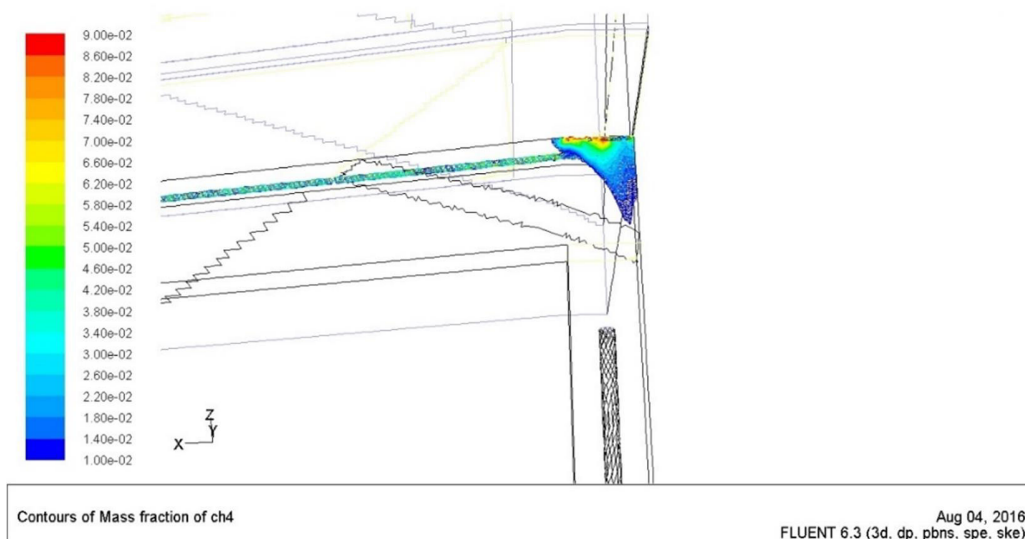
شکل‌های (۸-۴) تا (۱۸-۴) نشان‌دهنده میزان عیار گاز متان در قسمت انتهایی کارگاه استخراج با محدوده عیار متفاوت است.



شکل (۸-۴): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۰ تا ۵ درصد



شکل (۴-۹): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۱۰ درصد

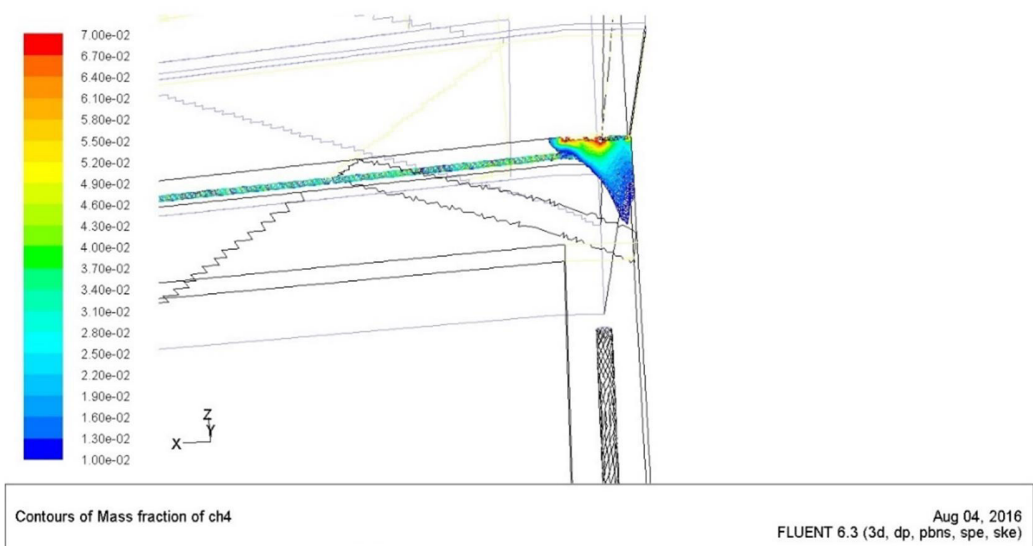


شکل (۴-۱۰): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۹ درصد





شکل (۴-۱۱): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۸ درصد



شکل (۴-۱۲): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۷ درصد



شکل (۴-۱۳): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۶ درصد



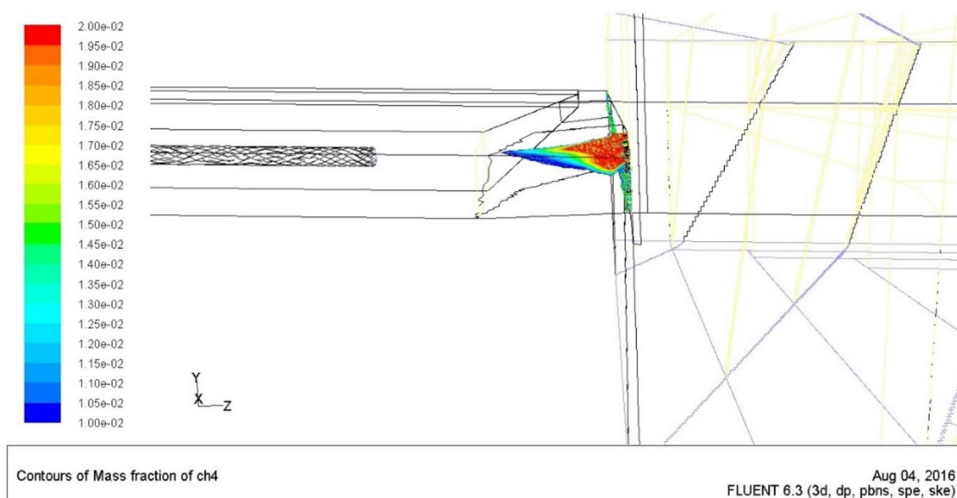
شکل (۴-۱۴): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۵ درصد



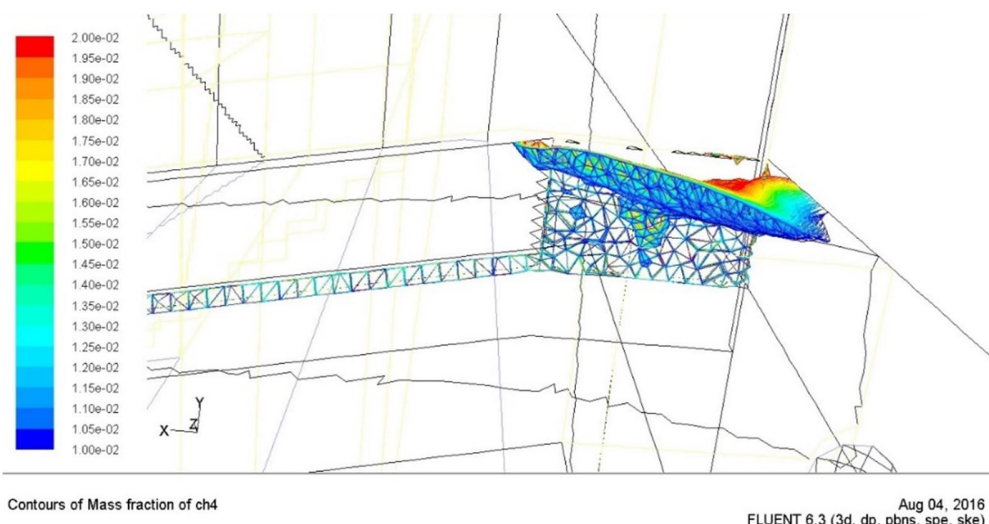
شکل (۴-۱۵): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۴ درصد



شکل (۴-۱۶): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۳ درصد



شکل (۴-۱۷): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۲ درصد (a)



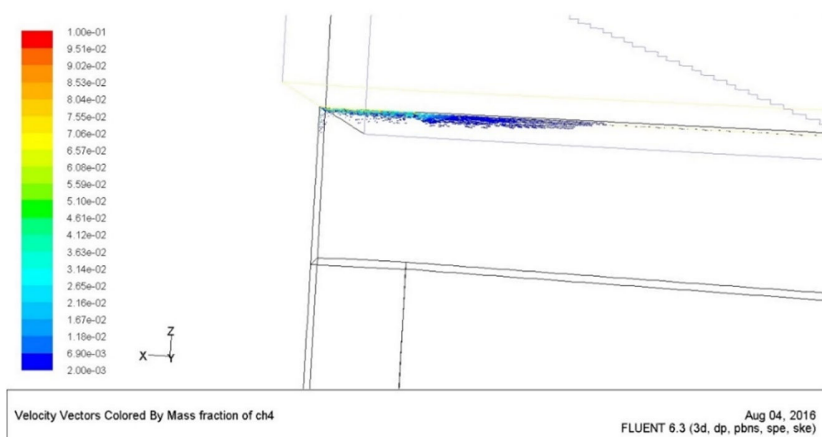
شکل (۴-۱۸): میزان غلظت گاز متان در انتهای کارگاه استخراج با محدوده ۱ تا ۳ درصد (b)

با توجه به کنتورهای عیار گاز متان، عیار گاز در داخل کارگاه استخراج در حدود ۰/۲۵ درصد است. در ناحیه اتصال راهرو TG با کارگاه استخراج این عیار به ۱۰ درصد نیز می‌رسد (در نزدیکی شیلد). عیار گاز متان از ۱۰ درصد شروع (نزدیک شیلد) در ورودی راهرو TG به ۱ درصد می‌رسد. به علت چگالی پایین گاز متان، متان در قسمت بالای راهرو تجمع پیدا می‌کند (۴-۱۸). در این قسمت بر روی موتور محرک

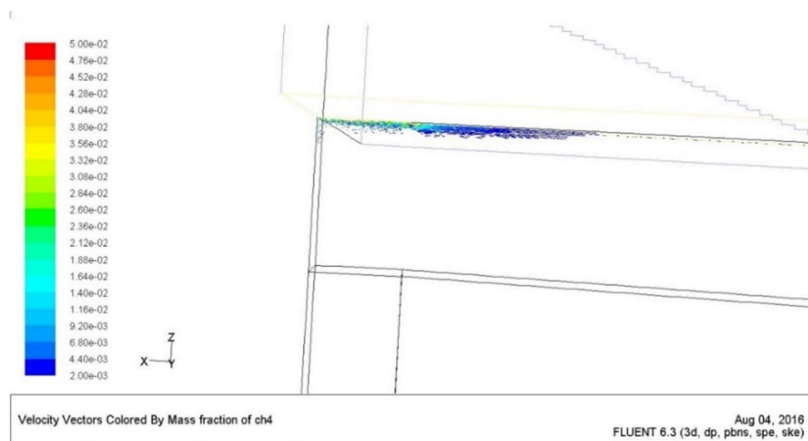
ناوزنجیری سنسور گاز متان وجود دارد اما به علت این که این سنسور در نزدیکی سطح زمین قرار دارد قادر به تشخیص این عیار از گاز متان نیست.

#### ۴-۲-۱-۶-۲-۴- در ناحیه ابتدایی کارگاه استخراج

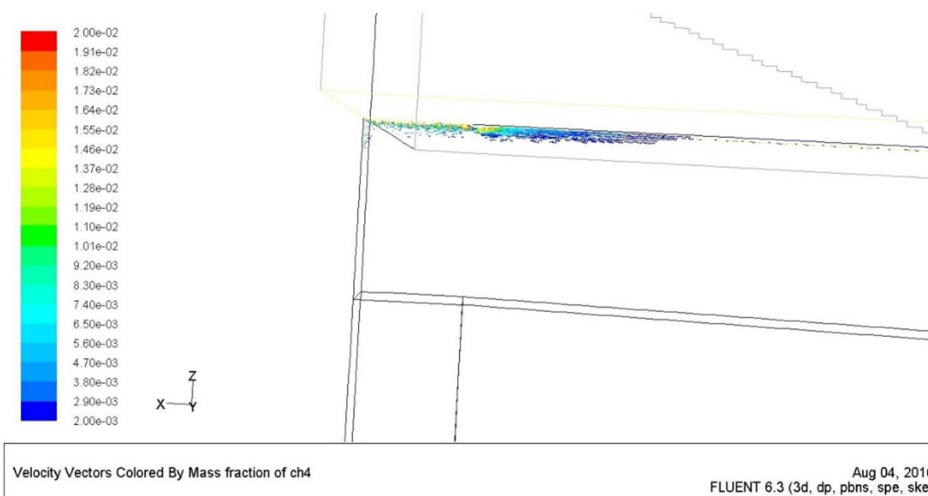
شکل‌های (۴-۱۹) تا (۴-۲۱) نشان‌دهنده میزان عیار گاز متان در قسمت ابتدایی کارگاه استخراج با محدوده عیار متفاوت است.



شکل (۴-۱۹): میزان غلظت گاز متان در ابتدای کارگاه استخراج با محدوده ۰/۲ تا ۱۰ درصد



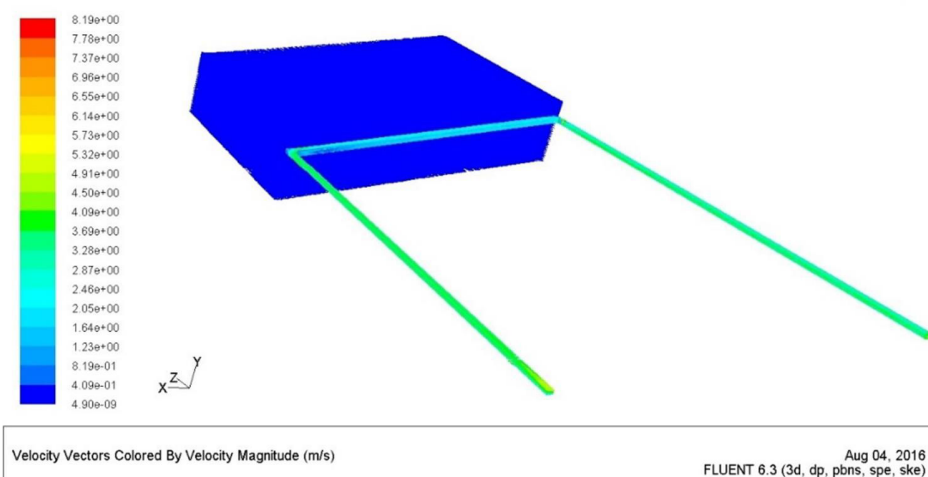
شکل (۴-۲۰): میزان غلظت گاز متان در ابتدای کارگاه استخراج با محدوده ۰/۲ تا ۵ درصد



شکل (۴-۲۱): میزان غلظت گاز متان در ابتدای کارگاه استخراج با محدوده ۰/۲ تا ۲ درصد

میزان گاز در این منطقه بین ۰/۲ تا ۱۰ درصد است؛ این عیار در فاصله حدود ۰/۵ متری شیلد و به طول حدود عرض راهرو MG از نقطه اتصال راهرو MG با کارگاه استخراج است.

۴-۲-۱-۷- سرعت

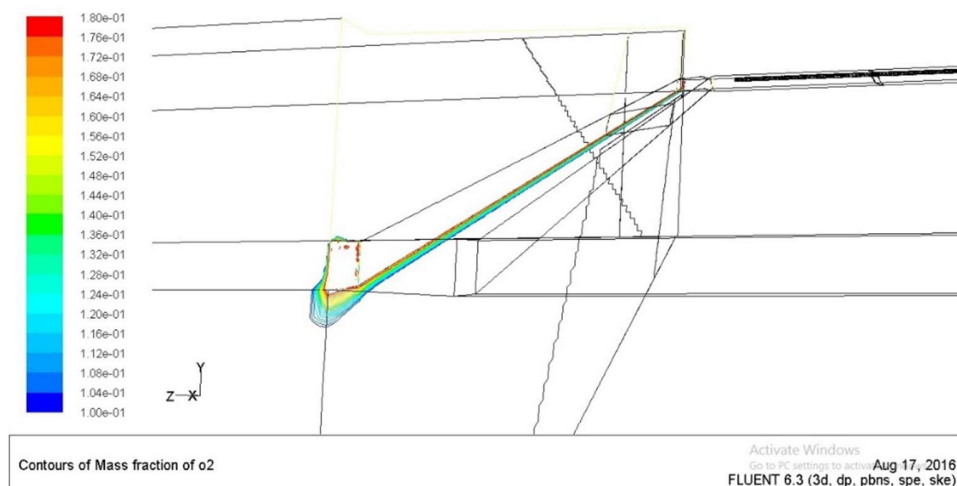


شکل (۴-۲۲): سرعت کل سیال (هوا و گاز متان) در کارگاه W<sub>2</sub>

میانگین سرعت در طول کارگاه استخراج در حدود  $2/5$  متر بر ثانیه است. از ابتدای شروع راهرو کارگاه استخراج تا فاصله  $15$  برابر عرض راهرو MG بعد یک زون بندی سرعت با اختلاف زیاد وجود دارد که در سمت سینه کار کمترین سرعت و در سمت مخالفش بیشترین سرعت مشاهده می شود، این حالت امکان تشکیل چرخش هوا را در این ناحیه به وجود می آورد، که می تواند در هنگام کار شیرر باعث پخش شدن گرد زغال و طولانی شدن زمان ته نشینی آن شود (شکل ۴-۲۲).

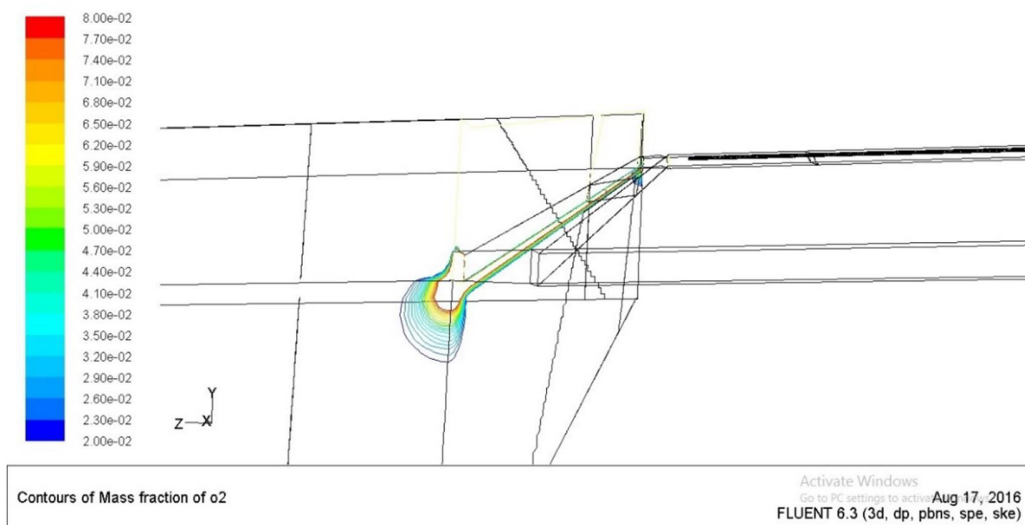
#### ۴-۲-۱-۸- بررسی اکسیژن

میزان درصد بهینه برای خودسوزی زغال سنگ بین  $10$  تا  $18$  درصد است (Hetao et al, 2016).

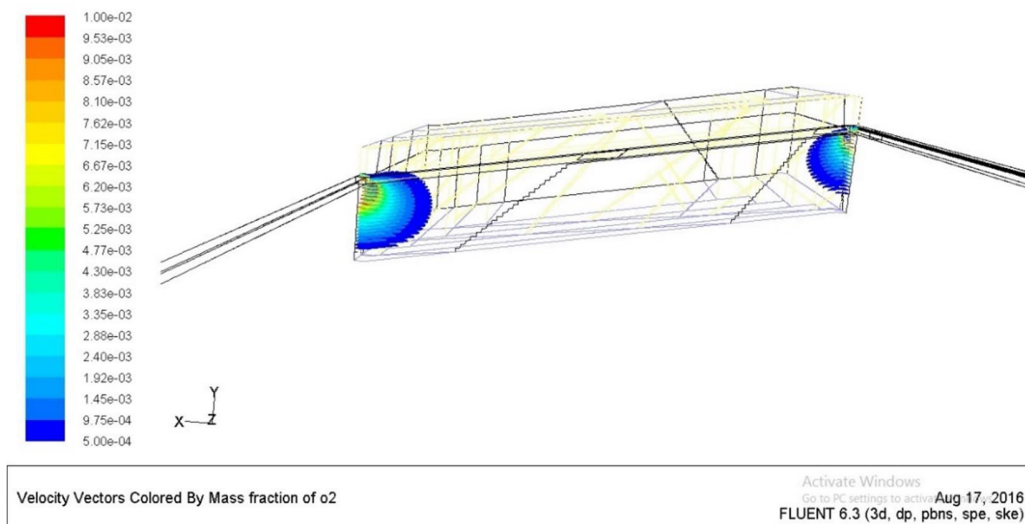


شکل (۴-۲۳): کنتور غلظت اکسیژن با غلظت  $10$  تا  $18$  درصد

این محدوده غلظت اکسیژن در منطقه تخریب موازی نقطه اتصال راهرو MG و کارگاه استخراج است. تقریباً به عمق نصف ارتفاع راهرو MG و به اندازه ارتفاع راهرو MG در زیر کارگاه استخراج است که با شیبی ملایم تا  $0/33$  ارتفاع راهرو به انتهای راهرو استخراج ادامه می یابد (شکل ۴-۲۳).

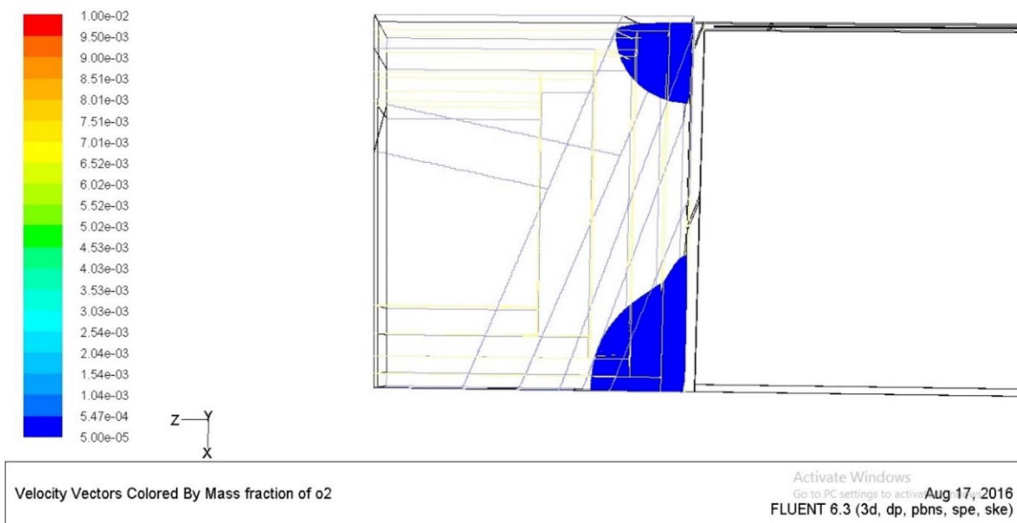


شکل (۴-۲۴): کنتور غلظت اکسیژن با غلظت ۲ تا ۸ درصد

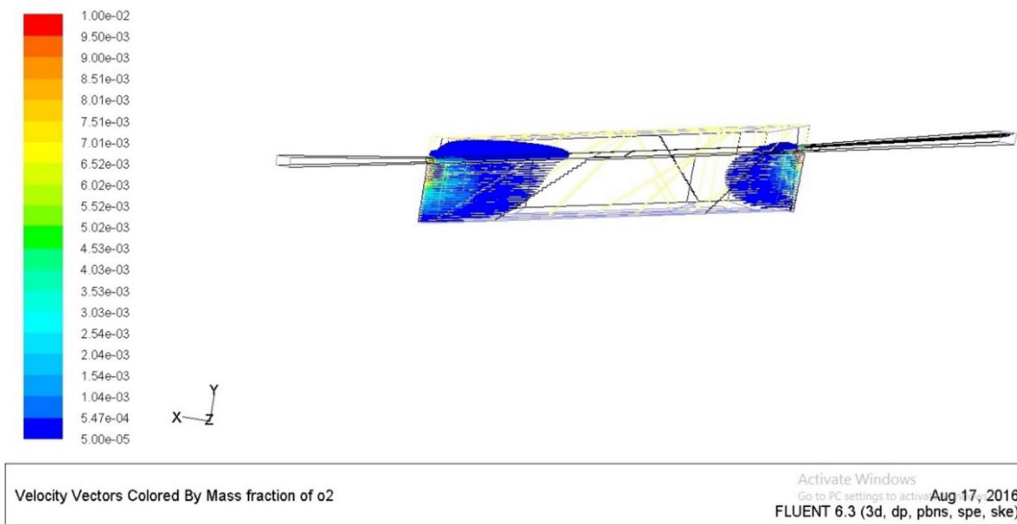


شکل (۴-۲۵): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۵ تا ۱ درصد

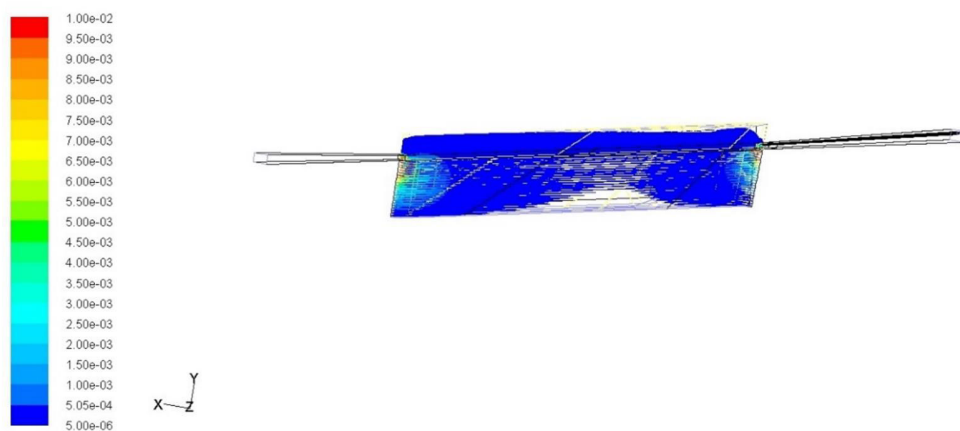




شکل (۴-۲۶): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۵ تا ۱ درصد (a)



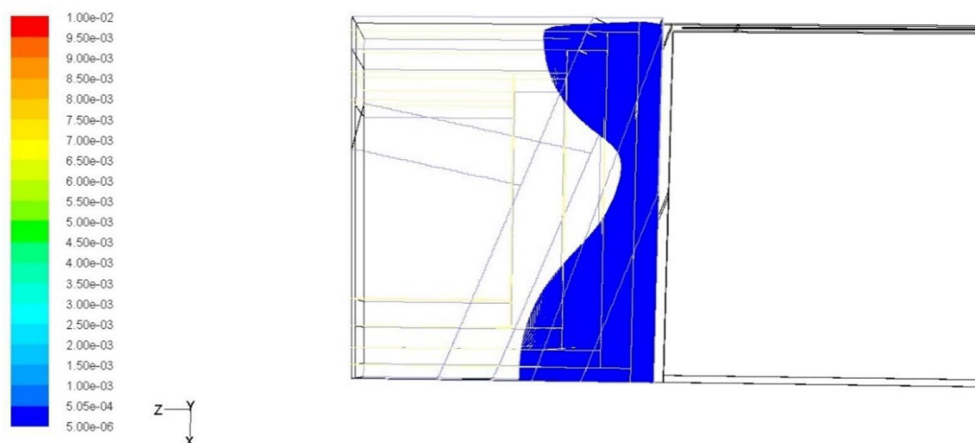
شکل (۴-۲۷): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۵ تا ۱ درصد (b)



Velocity Vectors Colored By Mass fraction of o2

Activate Windows  
Go to PC settings to activate Aug 17, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, spe, ske)

شکل (۴-۲۸): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۰۵ تا ۱ درصد (a)



Velocity Vectors Colored By Mass fraction of o2

Activate Windows  
Go to PC settings to activate Aug 17, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, spe, ske)

شکل (۴-۲۹): غلظت اکسیژن با غلظت ۰/۰۰۰۵ تا ۱ درصد (b)

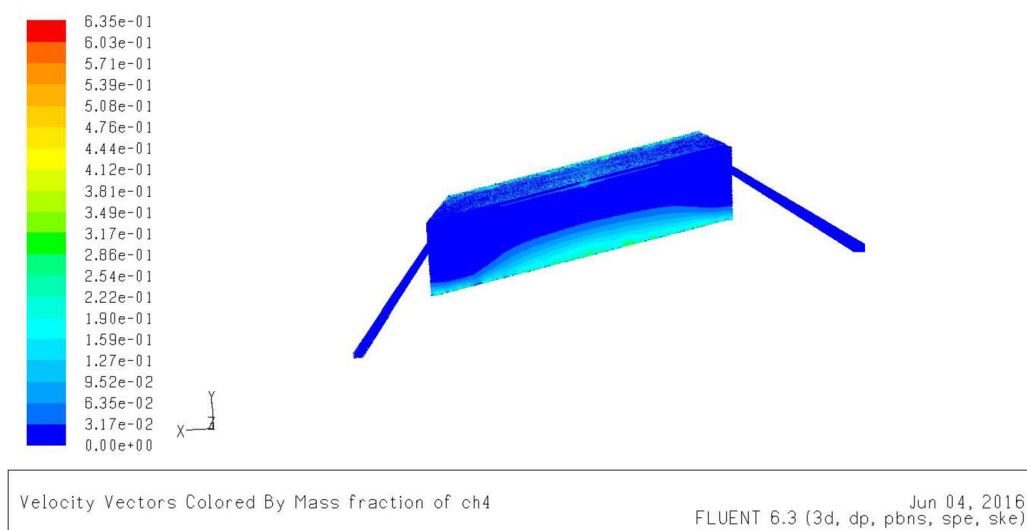
شکل های (۴-۲۴) تا (۴-۲۹) دیدی از نحوه توزیع اکسیژن در منطقه تخریب را می دهد.

مشاهده می شود که میزان عمق نفوذ اکسیژن در منطقه تخریب از سمت راهرو MG بیشتر است و علت

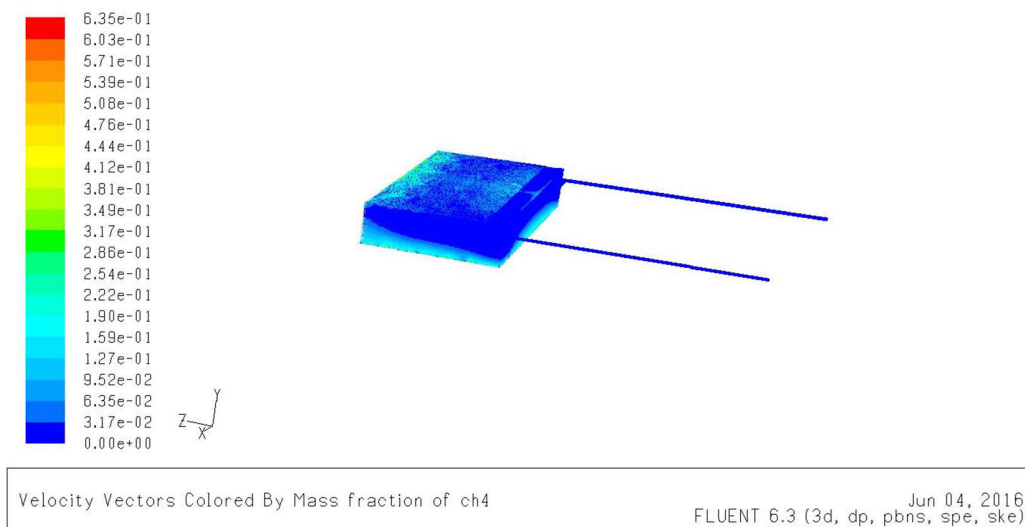
آن می تواند مکشی بودن نوع سیستم تهویه باشد.

## ۴-۲-۲- مدل شماره ۲

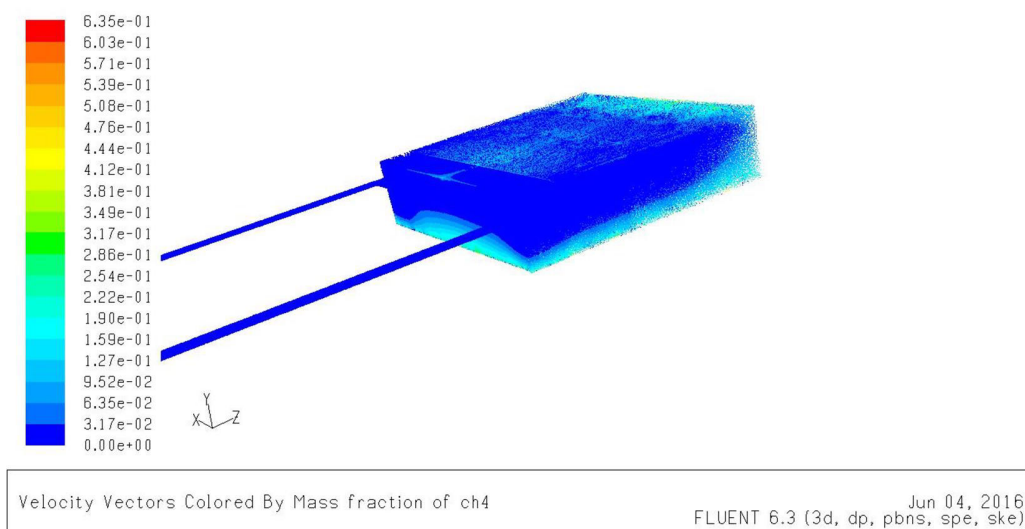
در این مدل سعی بر آن است تا تأثیر گازکشی بر روی مدل ساخته شده بررسی شود. در حدود ۱۲ چال، ۳ ردیف ۴ تایی به موازات شیلدها مدل شده است. اولین ردیف در فاصله ۳۰ متری شیلد و بقیه در فاصله ۵۰ متری نسبت به ردیف چال قبلی قرار دارند. فاصله چالها در یک ردیف از دیواره ۲۷ متر و از یکدیگر ۵۳ متر است. ارتفاع هر چال نیز ۱۲ متر است (از لایه بالایی زغال شروع می‌شود). شعاع هر چال نیز ۱۰ سانتی‌متر و دیواره چال به صورت کاملاً متخلخل در نظر گرفته شده است. هر چال با سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه به صورت مکشی عمل می‌کند و گاز متان را از منطقه تخریب خارج می‌کند.



شکل (۴-۳۰): غلظت گاز متان (a)



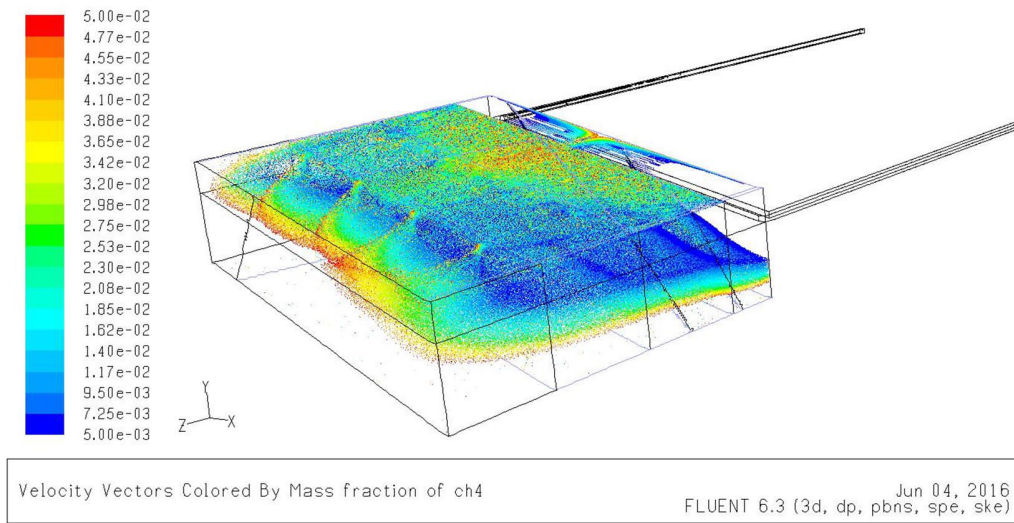
شکل (۴-۳۱): غلظت گاز متان (b)



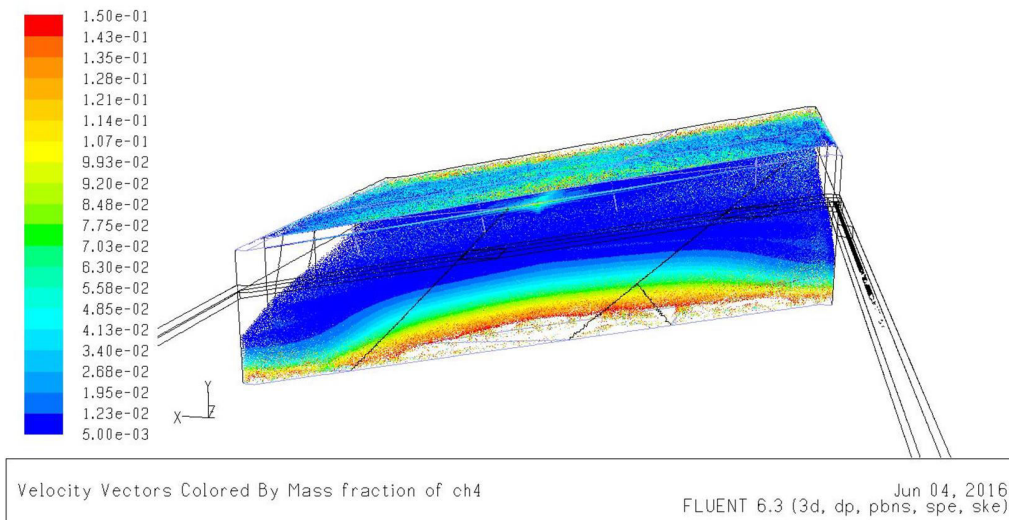
شکل (۴-۳۲): غلظت گاز متان (c)

مشاهده می شود که گازکشی تأثیر بسیار خوبی بر میزان درصد گاز متان منطقه تخریب گذاشته است.

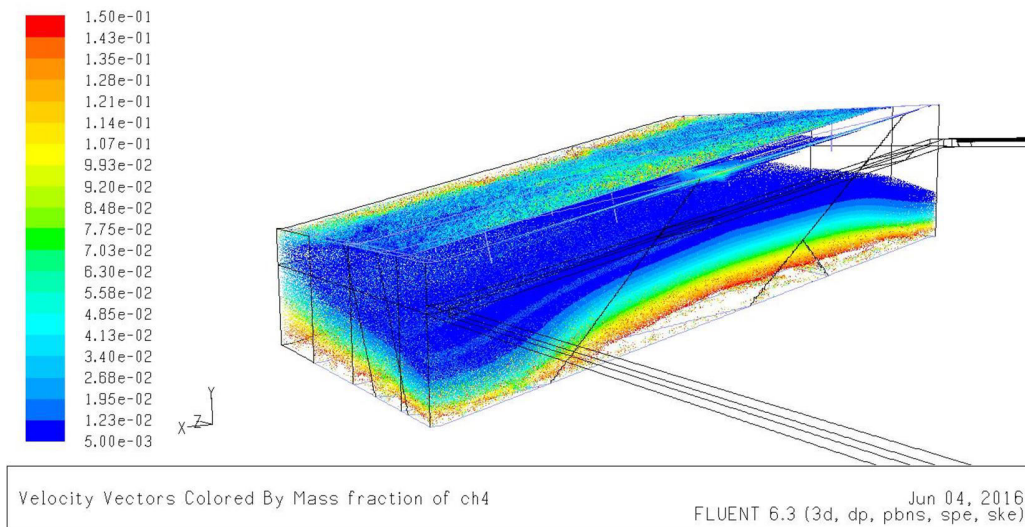
عیار گاز متان حداکثر به ۶۳/۵ درصد در نزدیکی لایه زغال کاهش پیدا کرده است (شکل های (۴-۳۰) تا (۴-۳۲)).



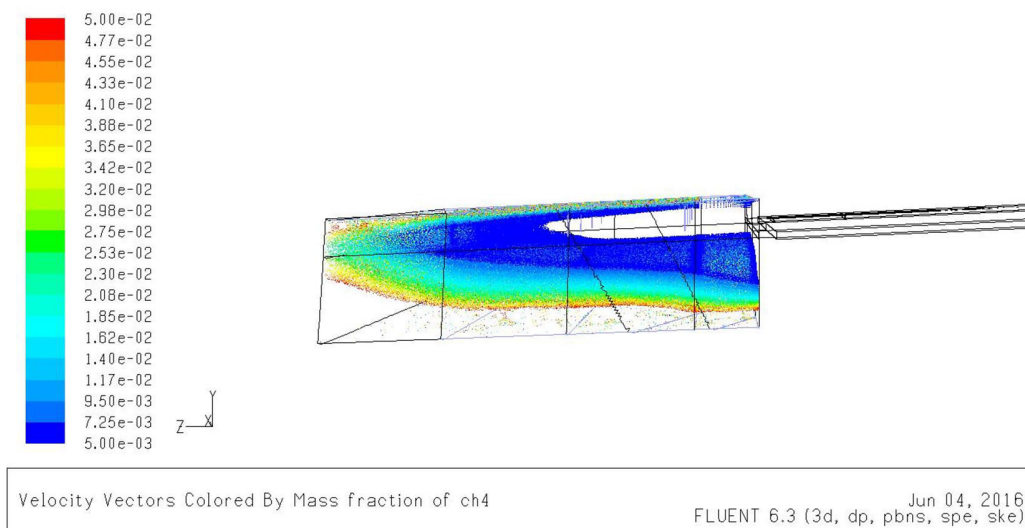
شکل (۴-۳۳): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد



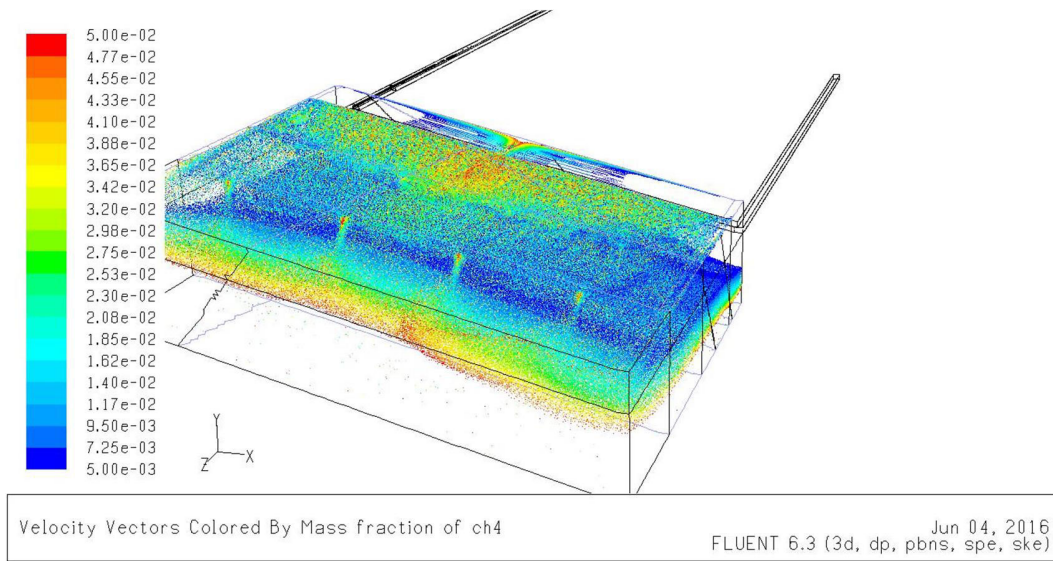
شکل (۴-۳۴): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (a)



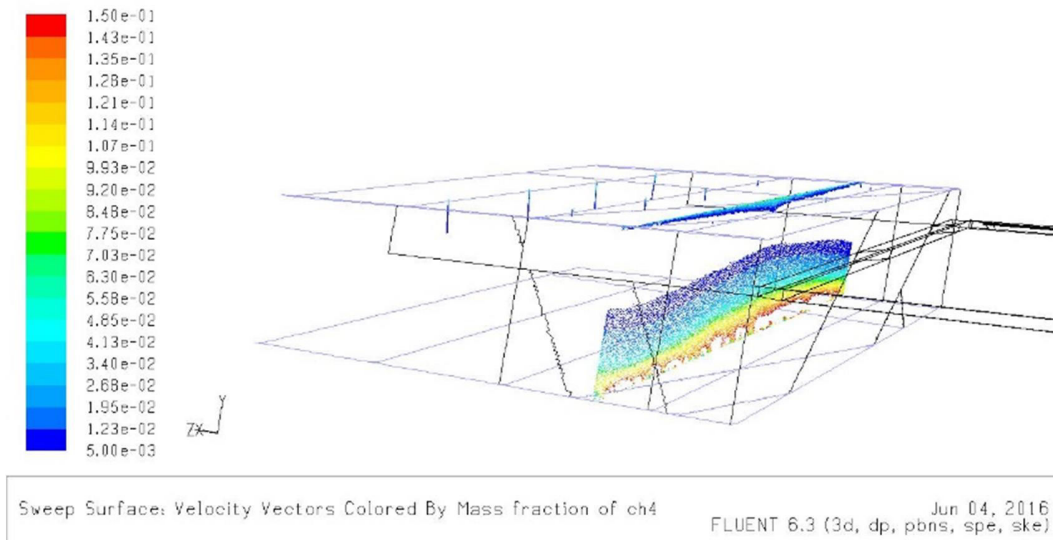
شکل (۴-۳۵): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (b)



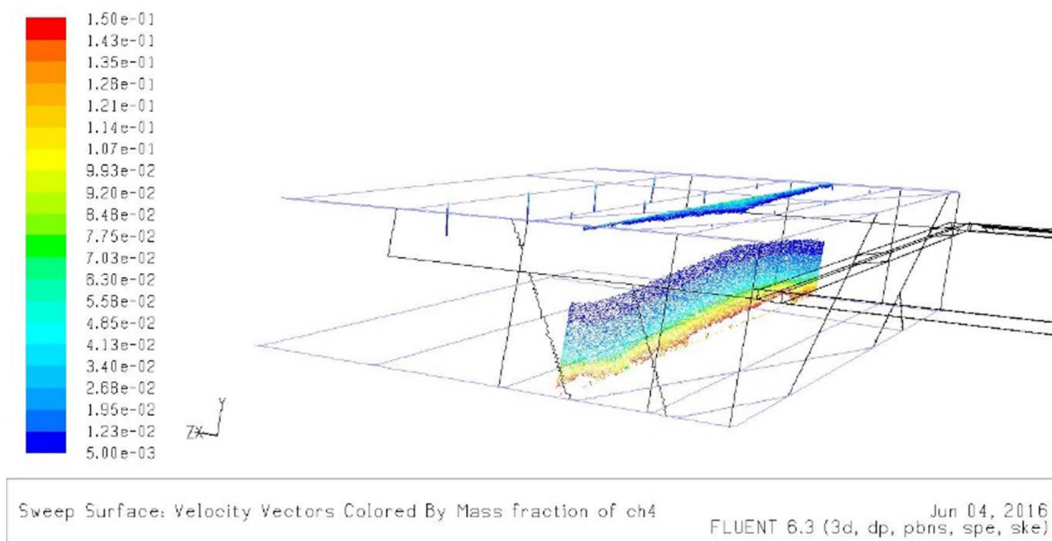
شکل (۴-۳۶): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (a)



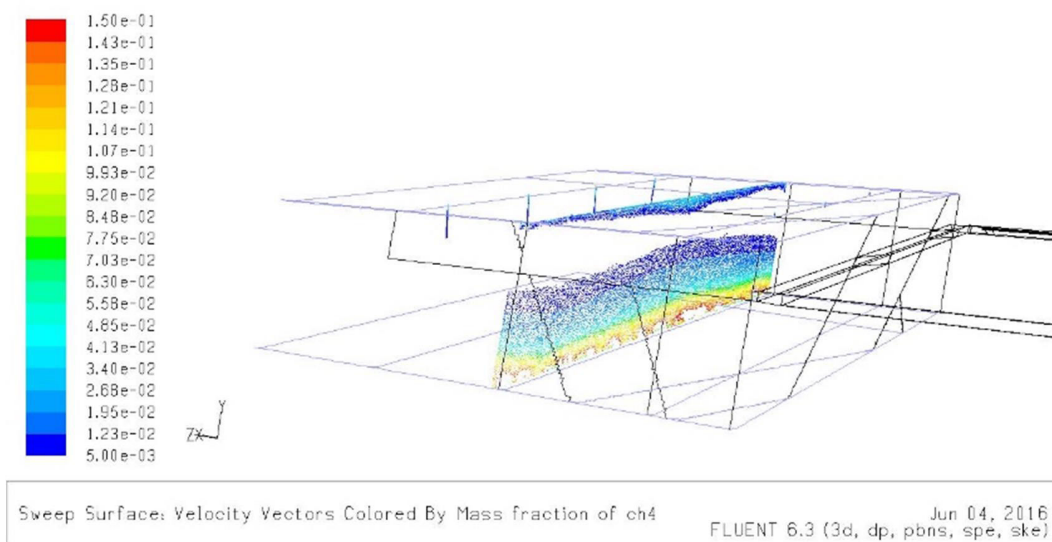
شکل (۴-۳۷): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (b)



شکل (۴-۳۸): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (a)

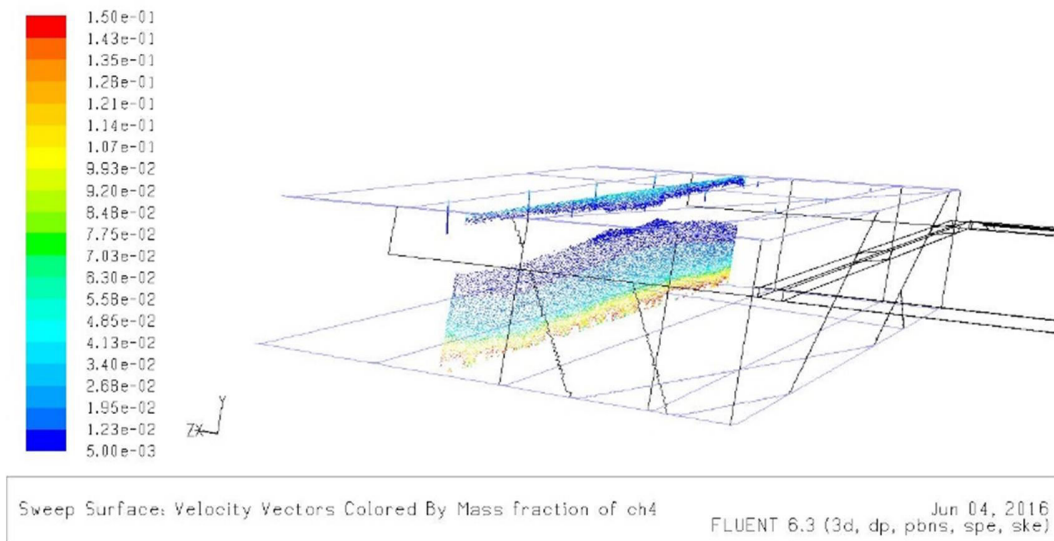


شکل (۴-۳۹): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (b)

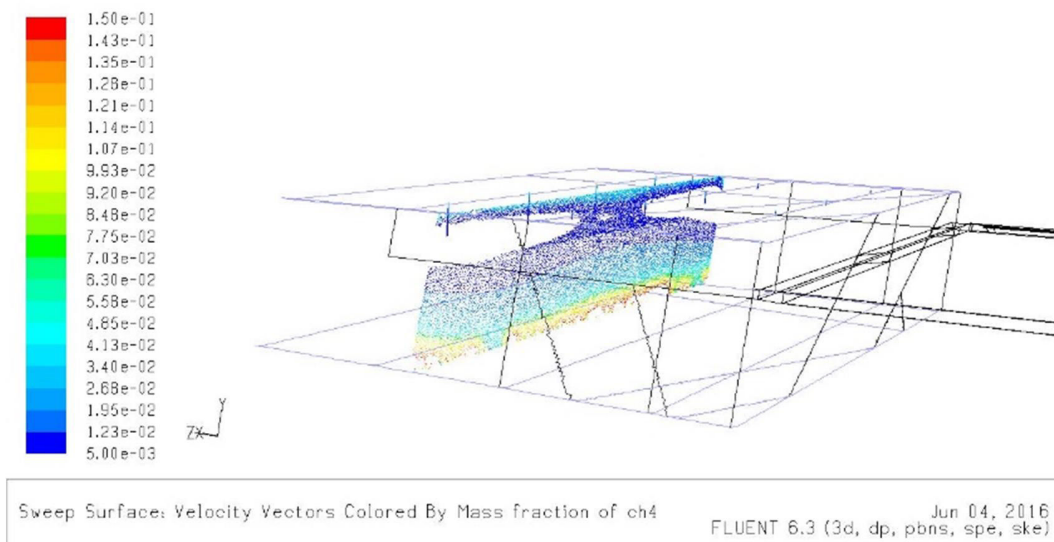


شکل (۴-۴۰): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۵ درصد (c)

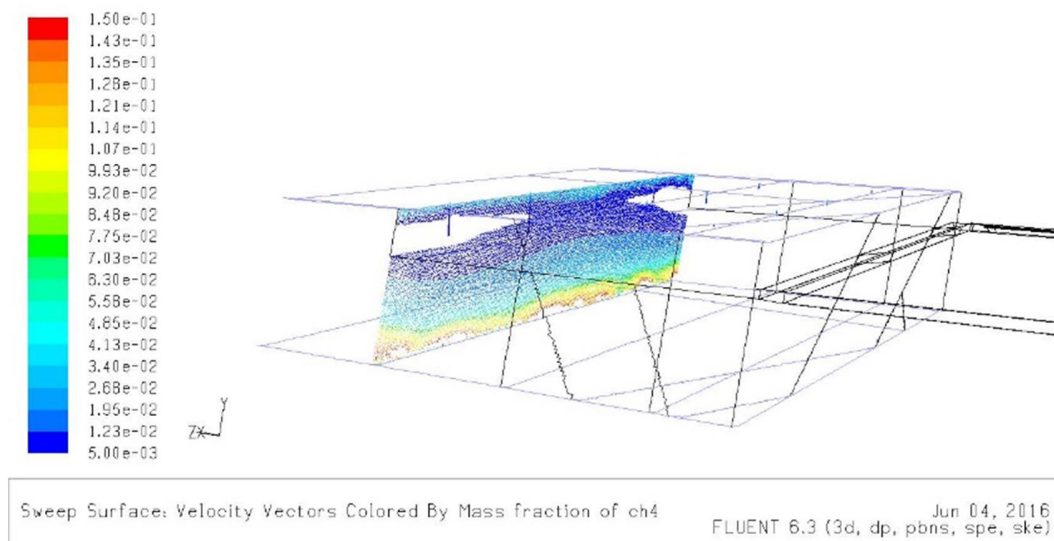




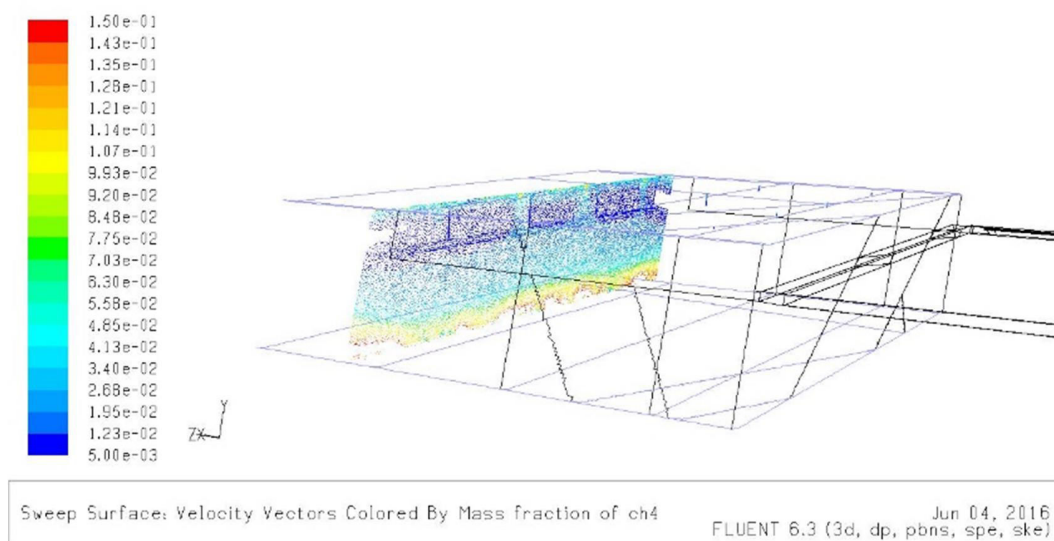
شکل (۴-۴۱): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (d)



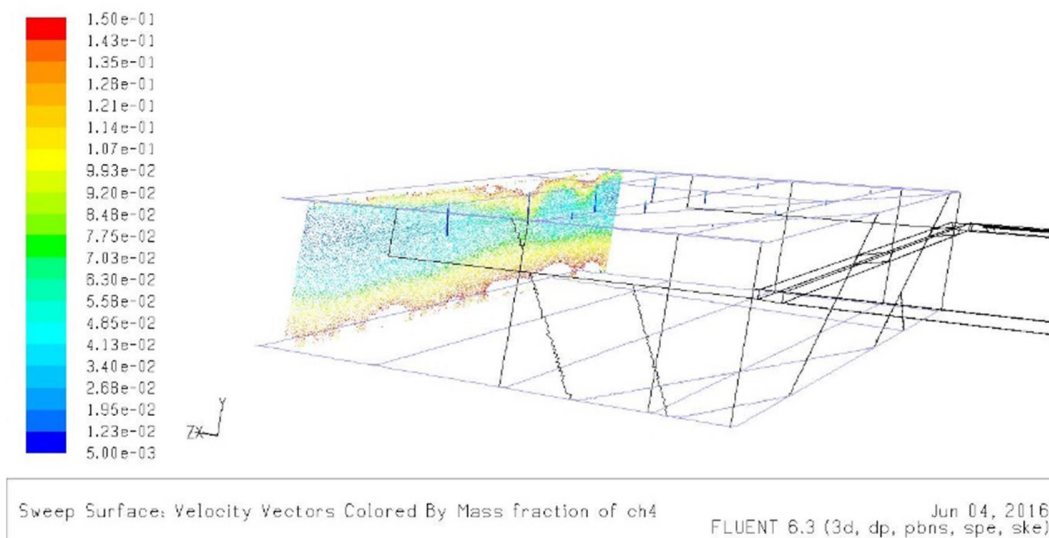
شکل (۴-۴۲): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (e)



شکل (۴-۴۳): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (f)



شکل (۴-۴۴): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (g)



شکل (۴-۴۵): غلظت گاز متان در منطقه تخریب با عیار ۰/۵ تا ۱۵ درصد (h)

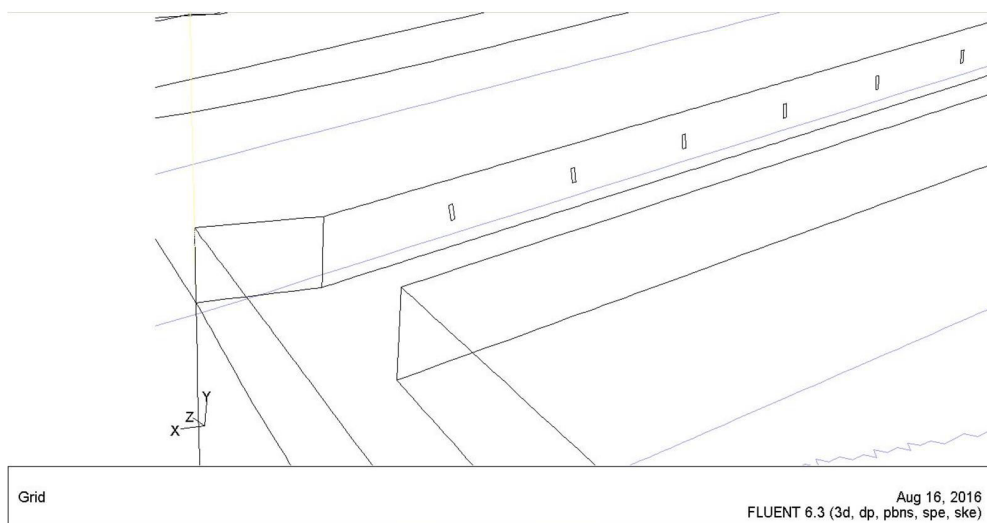
#### ۴-۲-۳- مدل شماره ۳

شیلدهای مورد استفاده در نگهداری سینه کار پس از گذشت زمان از آببندی خارج شده و هوای تهویه از طریق درزه‌های به وجود آمده به منطقه تخریب نشت می‌کند. البته طبق اظهار نظر مسئولین فنی معدن شیلدها آببندی بوده و هوایی از شیلدها به منطقه تخریب نشت نمی‌کند.

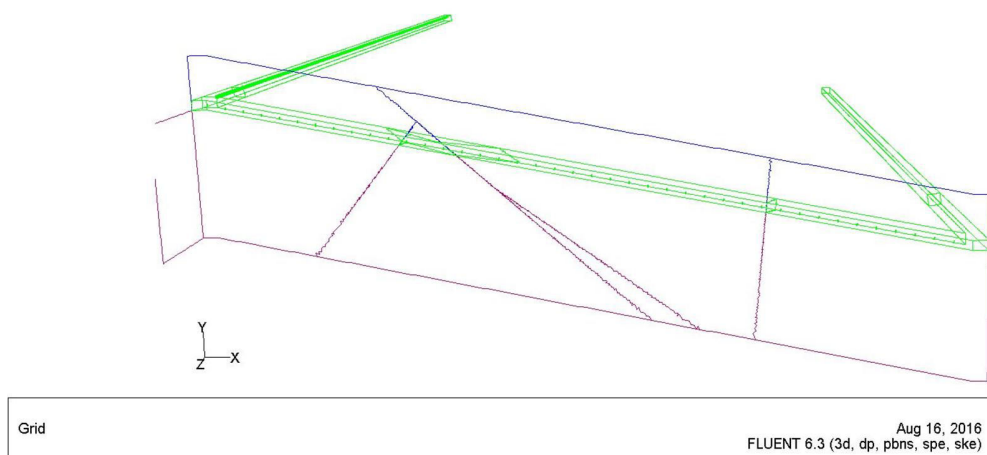
در این پایان‌نامه مشخصات این درزه‌ها، از قبیل ابعاد، فاصله و تعداد، الگویی از پایان‌نامه (Gilmor, 2015) بوده است.

برای طول ۲۰۵ متر شیلدهای سینه کار، ۴۰ عدد درزه به ابعاد به ترتیب ارتفاع و عرض ۰/۱۵ در ۰/۰۵ متر در فاصله ۴/۸۵ متری از هم و در وسط ارتفاع شیلد (ارتفاع در سمت سینه کار ۲/۶ متر است) قرار دارند.

شکل (۴-۴۶) نمایی از هندسه این درزه‌ها، و شکل (۴-۴۷) هندسه کلی مدل شماره ۳ را نشان می‌دهد.

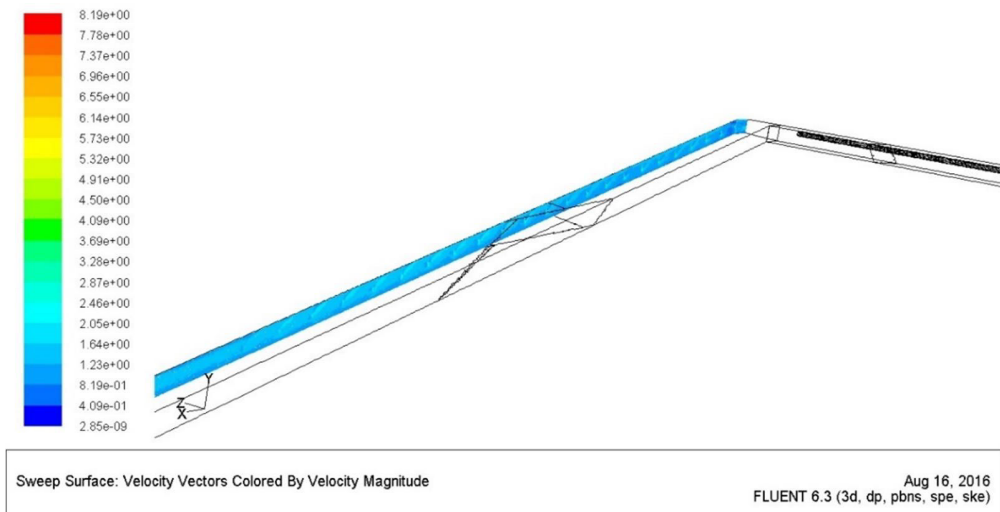


شکل (۴-۴۶): هندسه درزه های روی شیلد

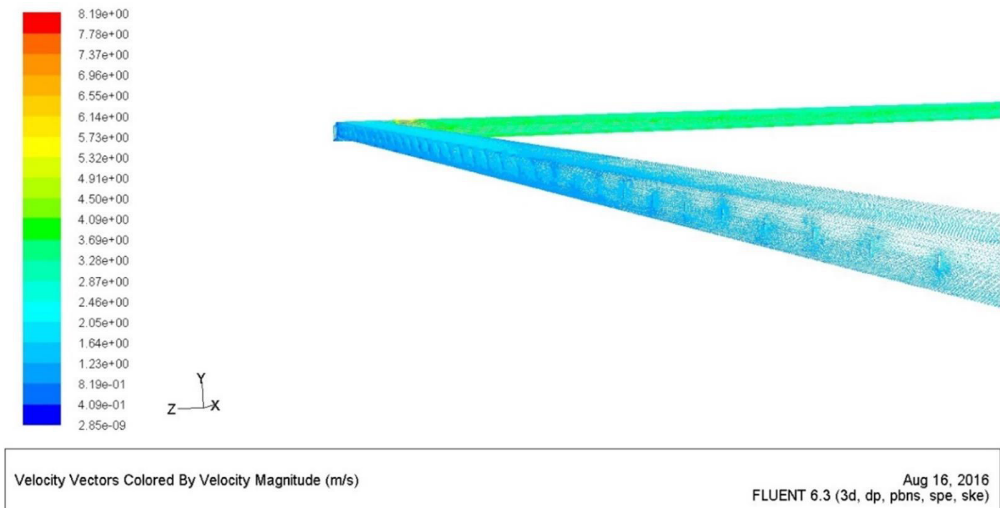


شکل (۴-۴۷): هندسه کلی مدل ۳

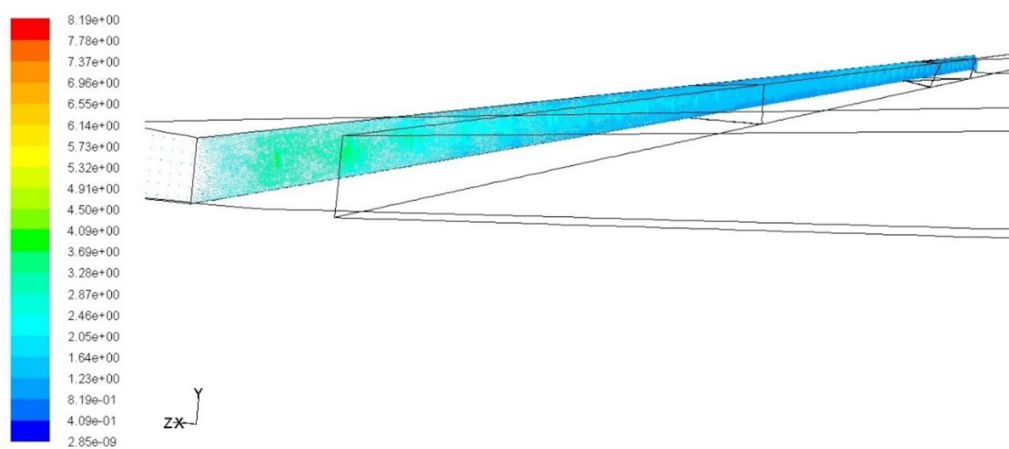
شکل های (۴-۴۸) تا (۴-۵۲) نشان دهنده ی تأثیر درزه ها سینه کار بر سرعت است.



شکل (۴-۴۸): سرعت در نیمه دوم کارگاه استخراج (a)

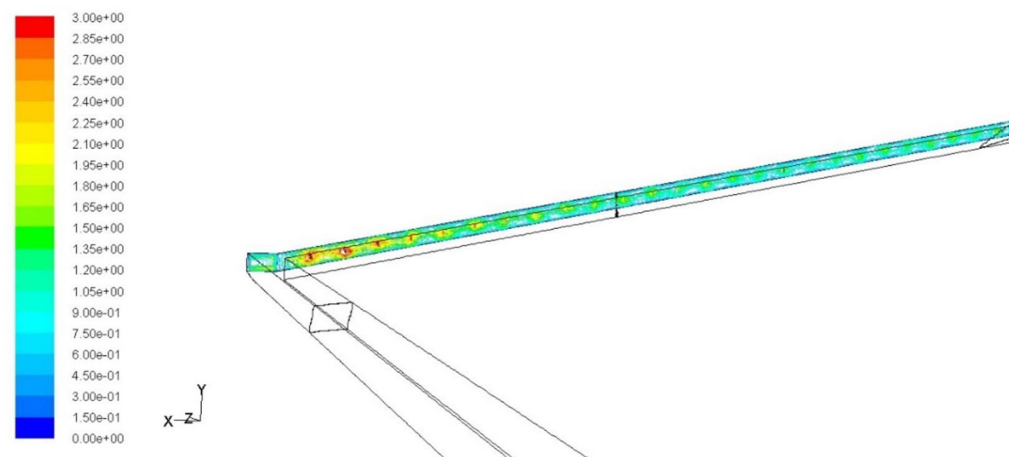


شکل (۴-۴۹): سرعت در نیمه دوم کارگاه استخراج (b)



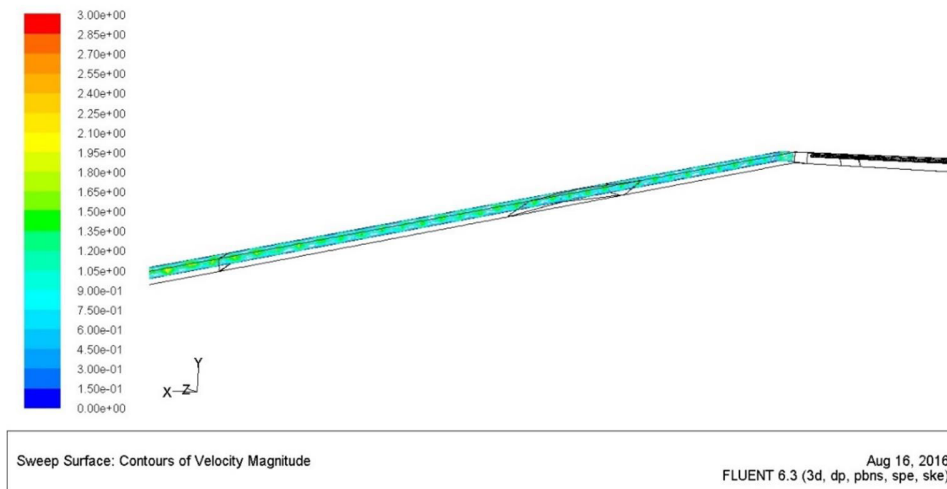
Sweep Surface: Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude Aug 16, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, spe, ske)

شکل (۴-۵۰): سرعت در نیمه اول کارگاه استخراج



Sweep Surface: Contours of Velocity Magnitude Aug 16, 2016  
FLUENT 6.3 (3d, dp, pbns, spe, ske)

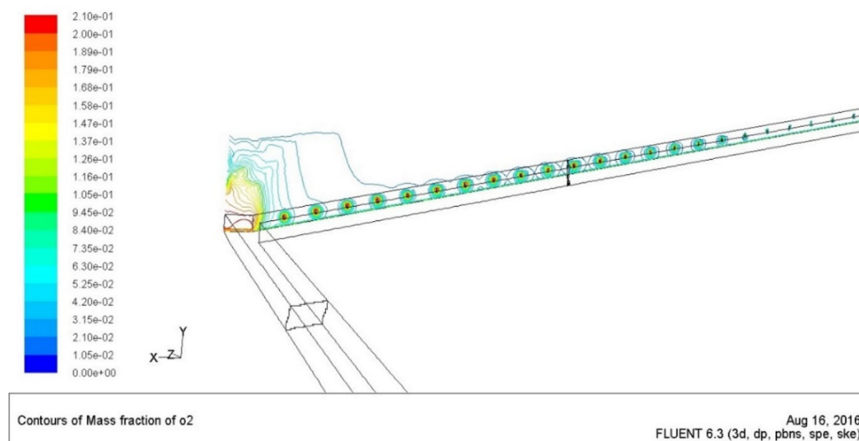
شکل (۴-۵۱): سرعت در نیمه اول کارگاه استخراج با محدوده ۰ تا ۳ متر بر ثانیه



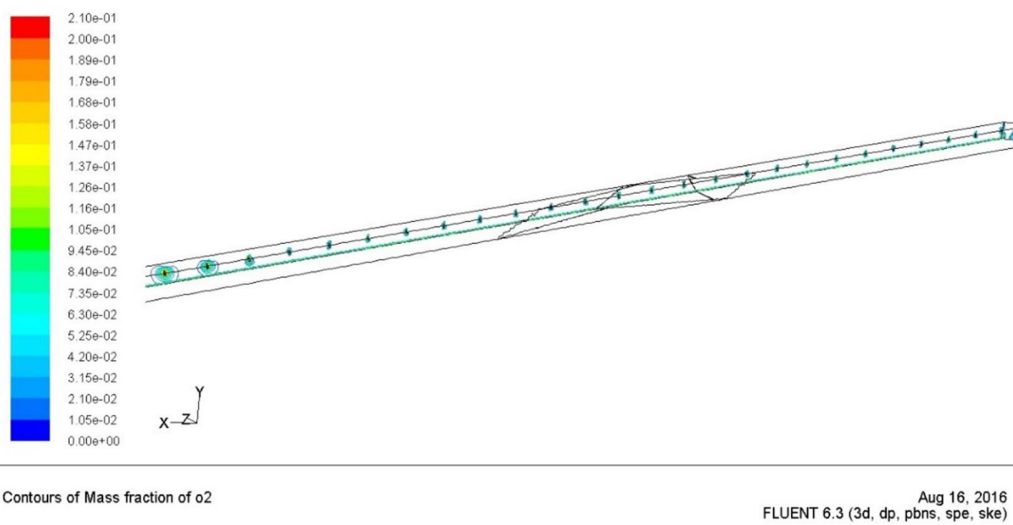
شکل (۴-۵۲): سرعت در نیمه دوم کارگاه استخراج با محدوده ۰ تا ۳ متر بر ثانیه

با توجه به نتایج مدل، سرعت هوا در درزه‌های ابتدایی کارگاه استخراج بیشترین حد خود، حدود ۳ متر بر ثانیه، است و به تدریج تا انتهای کارگاه کاهش می‌یابد.

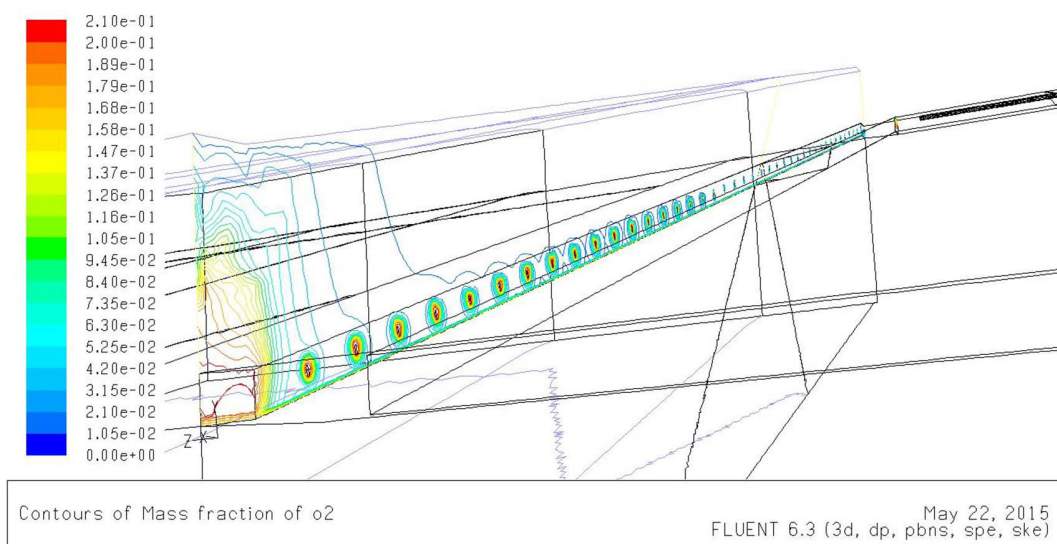
شکل‌های (۴-۵۳) تا (۴-۵۶) نشان دهنده کنتور غلظت اکسیژن بر روی دیواره شیلدها است.



شکل (۴-۵۳): کنتور غلظت اکسیژن در نیمه دوم کارگاه استخراج بر روی دیواره شیلد با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد

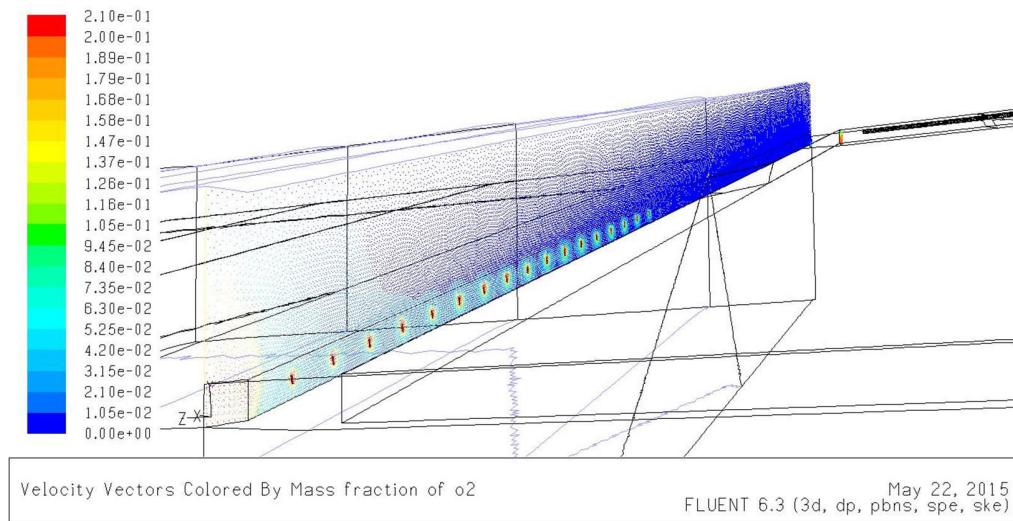


شکل (۴-۵۴): کنتور غلظت اکسیژن در نیمه دوم کارگاه استخراج بر روی دیواره شیلد با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد



شکل (۴-۵۵): کنتور غلظت اکسیژن در کارگاه استخراج بر روی قسمت ابتدایی منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد





شکل (۴-۵۶): غلظت اکسیژن در کارگاه استخراج بر روی قسمت ابتدایی منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد

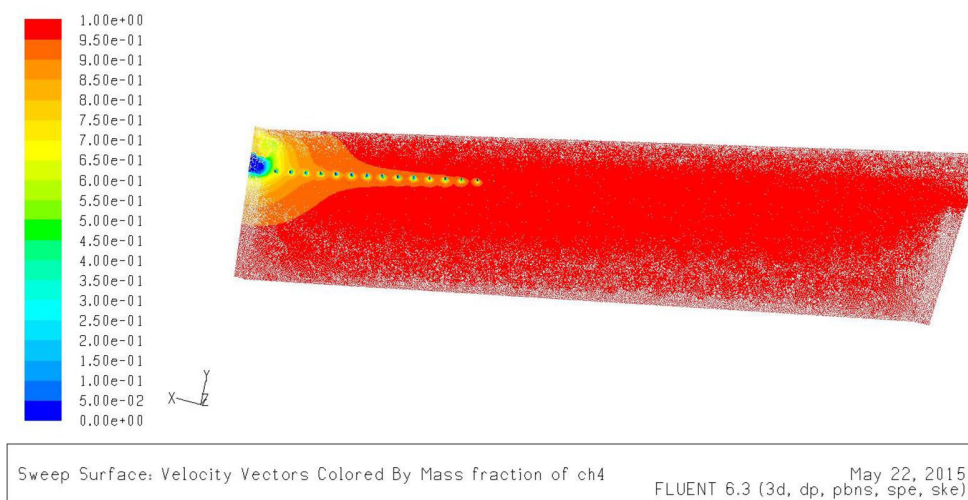
مشاهده می شود که تقریباً در نیمه اولیه درزه ها، اکسیژن به داخل منطقه تخریب نفوذ کرده و در درزه های بعدی به همراه گاز متان از منطقه تخریب خارج شده است.



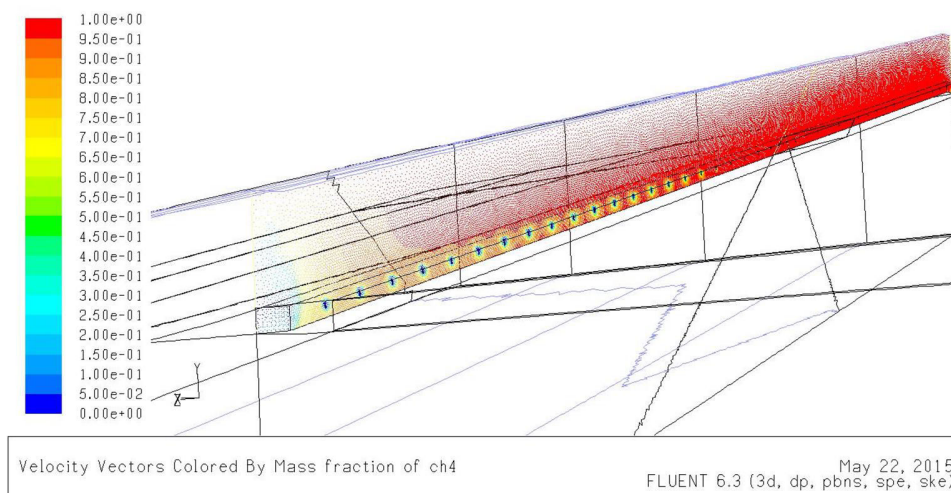
شکل (۴-۵۷): غلظت اکسیژن در روی قسمت راست دیواره راهرو MG و منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۲۱ درصد

با توجه به شکل (۴-۵۷) حداکثر میزان عمق نفوذ اکسیژن ۷ برابر ارتفاع راهرو MG است.

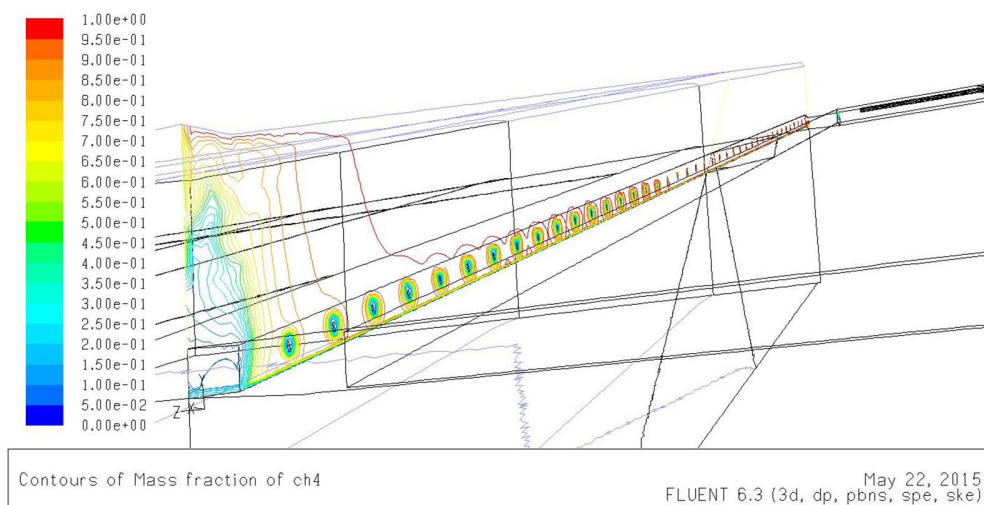
شکل های (۴-۵۸) تا (۴-۶۰) نشان دهنده غلظت گاز متان در شیلدها است.



شکل (۴-۵۸): غلظت گاز متان در روی قسمت ابتدایی کارگاه استخراج و منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد



شکل (۴-۵۹): غلظت گاز متان در روی قسمت ابتدایی کارگاه استخراج و قسمت بالایی منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد



شکل (۴-۶): کنتور غلظت گاز متان در روی قسمت ابتدایی کارگاه استخراج و قسمت بالایی منطقه تخریب با محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد

همان طور که مشاهده می شود، نیمه اول شیلدها غلظت گاز متان کم و در ادامه بیشتر می شود.

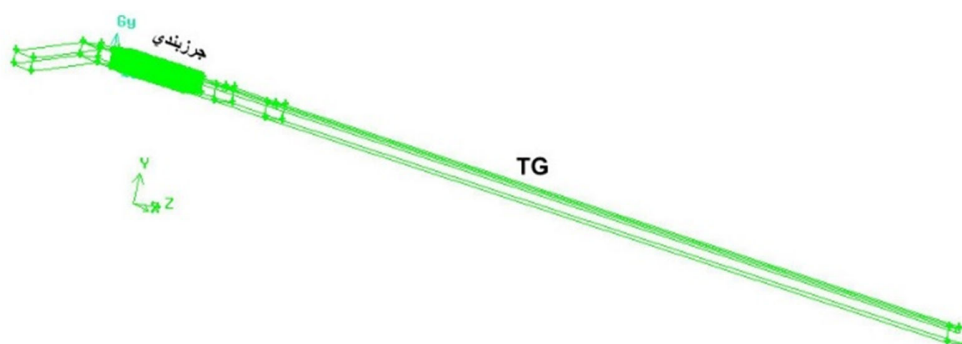
با توجه به مدل ساخته شده برای شیلدها نتیجه می شود که هوای تهویه از نیمه اول شیلدها وارد منطقه تخریب شده و در قسمت نیمه دوم شیلدها به همراه گاز متان وارد سیستم تهویه شده است.

#### ۴-۲-۴- مدل شماره ۴

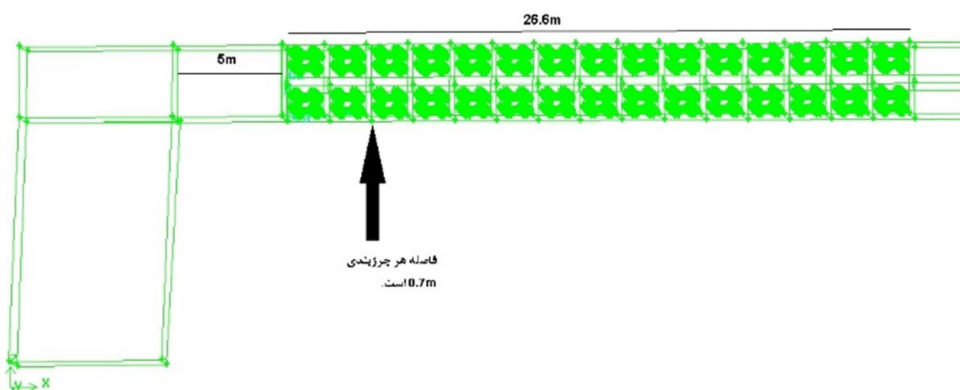
در این مدل تأثیر جرزبندی بر سرعت هوای راهرو TG مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این مدل شامل دو بخش است؛ بخش اول مدل، ساخته شده بر اساس جرزبندی نوع ۱ (جرزبندی مورد استفاده در کارگاه) و بخش دوم مدلی بر اساس جرزبندی نوع ۲ (نوع دیگری از جرزبندی) است. در تمامی مدل های ساخته شده از منطقه تخریب و همچنین انتشار گاز زغال صرف نظر شده است. در تمامی جرزبندی ها، فاصله جرزها در طول راهرو ۰/۷ متر و جرزبندی ها با استفاده از الوار به قطر ۰/۱۵ متر ساخته شده است.

۴-۲-۴-۱- بخش اول: بر اساس جرزبندی نوع ۱

این مدل شامل ۱۵ متر انتهایی راهرو کارگاه استخراج و کل راهرو TG با استفاده از جرزبندی نوع ۱ (شکل (۴-۶۱) و (۴-۶۲)) در ناحیه TG ساخته شده است.

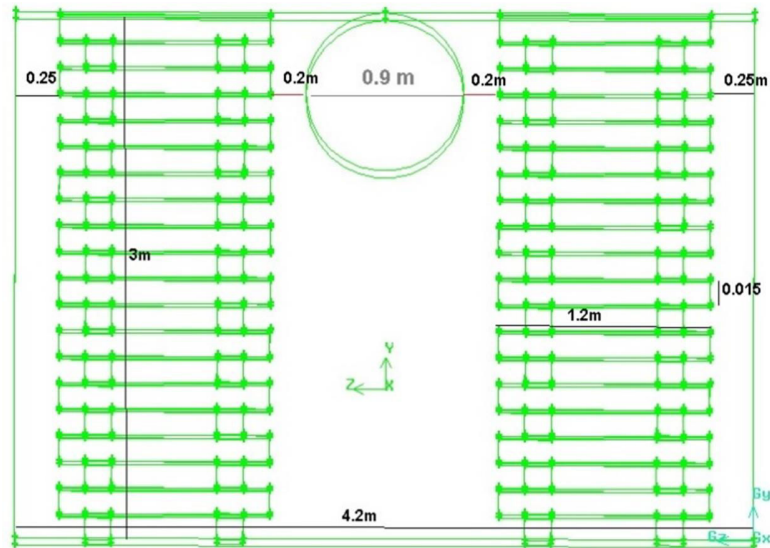


شکل (۴-۶۱): نمای هندسی با استفاده از جرزبندی نوع ۱



شکل (۴-۶۲): نمای هندسی از مختصات جرزبندی نوع ۱

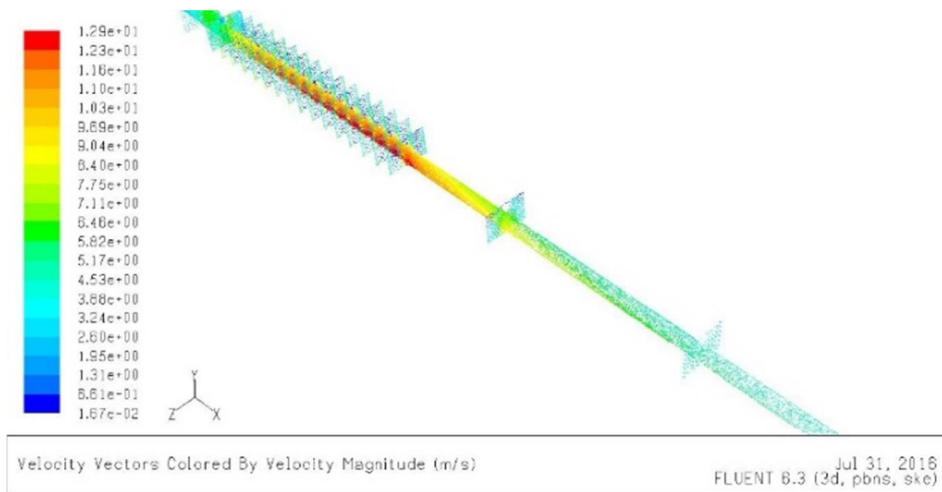
شکل (۴-۶۳) نشان دهنده مشخصات جرزبندی نوع ۱ است.



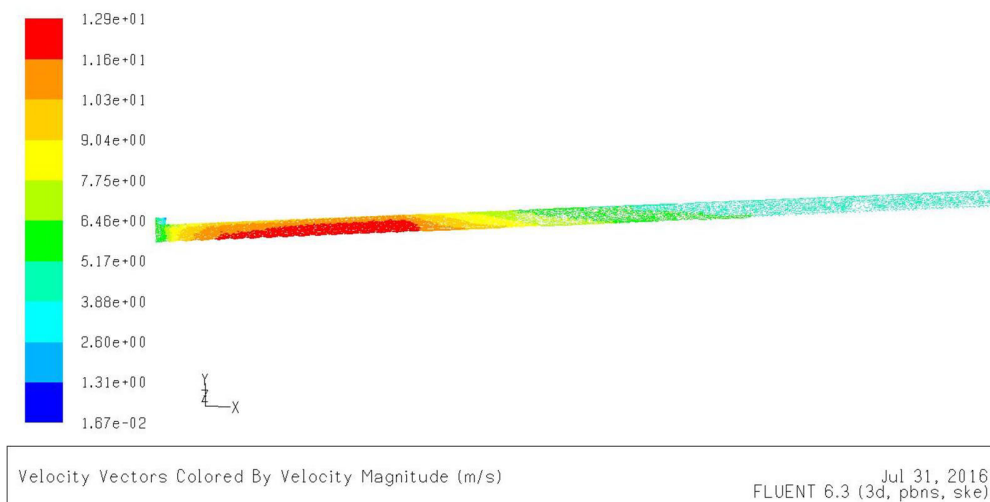
شکل (۴-۶۳): مشخصات هندسی جرزبندی نوع ۱

#### ۴-۲-۴-۱-۱- بررسی سرعت

شکل های (۴-۶۴) تا (۴-۶۶) نمایانگر میزان سرعت مدل شماره ۴ با نوع جرزبندی نوع ۱ است.



شکل (۴-۶۴): سرعت هوا در راهرو TG



شکل (۴-۶۵): وضعیت سرعت هوا در مدل ۴، جرزبندی نوع ۱(a) (جهت هوا از سمت چپ به راست است).

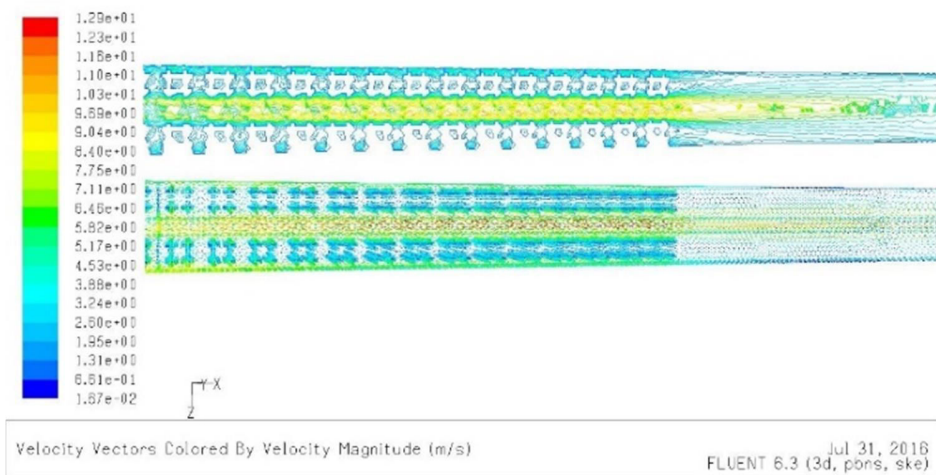
#### ۴-۲-۱-۴-۲- نتایج مدل ۴، جرزبندی مدل نوع ۱

در قسمت وسط راهرو (بین دو جرزبندی) از محل شروع جرزبندی در راهرو TG سرعت هوا افزایش می-یابد تا در انتهای جرزبندی به سرعت ۱۲/۹ متر بر ثانیه می-رسد (شکل ۱۰). وضعیت سرعت هوا در راستای جرزبندی در جدول (۴-۷) خلاصه شده است.

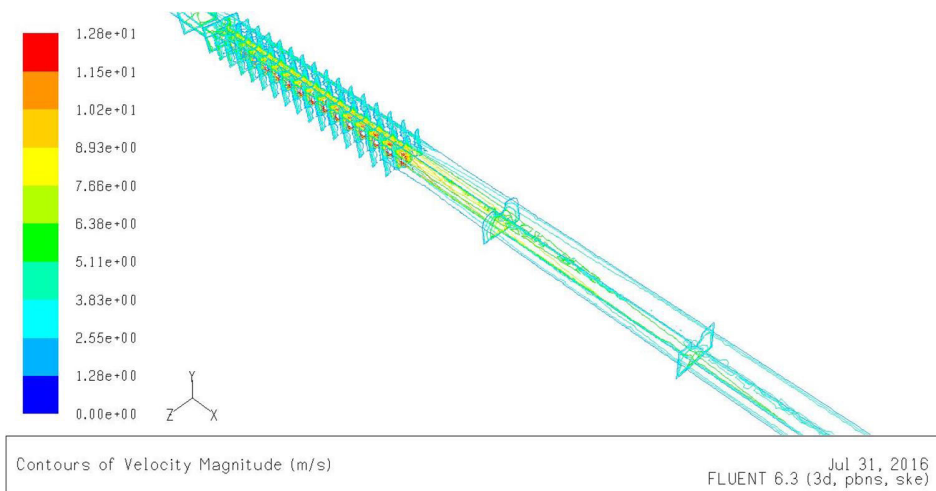
جدول (۴-۷): توزیع وضعیت سرعت در طول جرزبندی

سرعت (متر بر ثانیه)			محل
انتهای جرزبندی	وسط جرزبندی	ابتدای شروع جرزبندی	
۱۱ تا ۱۲/۹	۱۰	۸/۴ تا ۵/۸۲	وسط راهرو TG بین دو جرزبندی
۴/۵۲ تا ۶/۶۴	۴/۵۳ تا ۶/۶۴	۷/۵۲ تا ۵/۸۲	کناره‌های راهرو TG

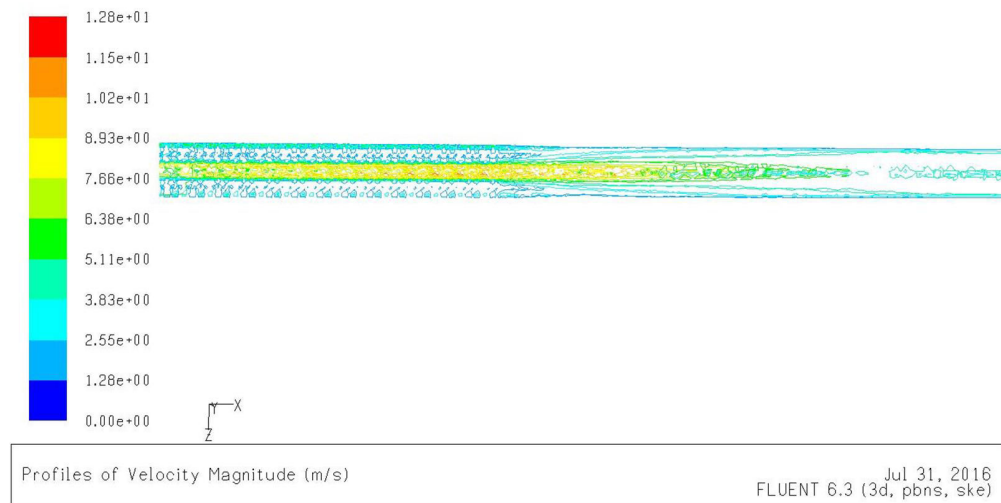
این نحوه توزیع سرعت پس از پایان جرزبندی به حالتی مخروطی شکل کاهش می یابد و پس از آن تقریباً در کل سطح مقطع راهرو یکسان می شود. در قسمت بین دو جرزبندی در طول راهرو و در داخل جرزبندی چرخش هوا مشاهده می شود (شکل های (۴-۶۷) تا (۴-۶۹)).



شکل (۴-۶۶): توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۱ (جهت حرکت هوا از سمت چپ به راست است).



شکل (۴-۶۷): کنتور توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۱ (a) (جهت حرکت هوا از سمت چپ به راست است).



شکل (۴-۶): کنترل توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۱ (b) (جهت حرکت هوا از سمت چپ به راست است).

#### ۴-۲-۴-۳-۱-۳- اعتبار سنجی مدل

سرعت در انتهای جرزبندی اندازه گرفته شده است. که نتایج آن به صورت خلاصه در جدول (۴-۸) آورده شده است.

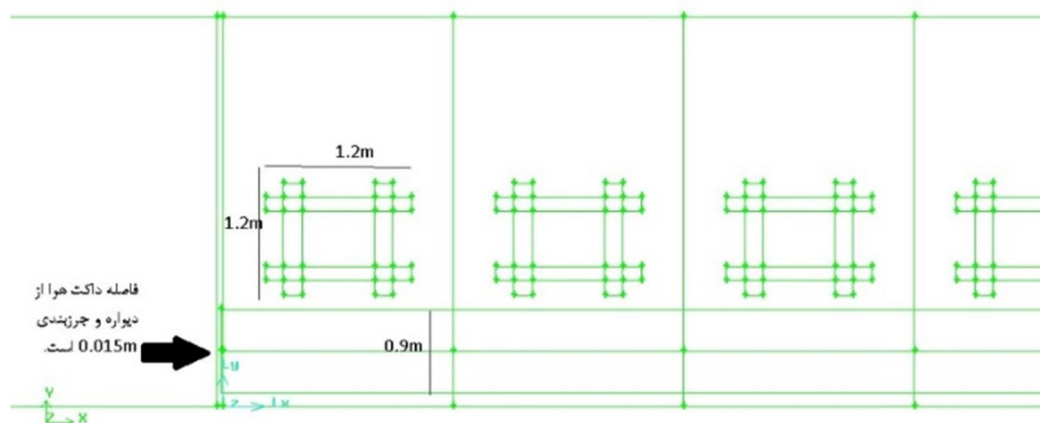
جدول (۴-۸): میزان سرعت اندازه گیری شده در قسمت انتهایی جرزبندی

ارتفاع از سطح زمین (متر)	موقعیت	میانگین سرعت اندازه گیری شده (متر بر ثانیه)	سرعت به دست آمده از مدل سازی شده (متر بر ثانیه)	اختلاف (متر بر ثانیه)
۰/۶	جرزبندی سمت راست	۱۳/۴	۱۲/۹۱	۰/۴۹
۱/۳۵	جرزبندی سمت راست	۱۱/۵	۱۱/۴	۰/۱
۲/۰۳	مرکز راهرو	۹/۸۵	۹/۸۹	-۰/۰۴
۰/۶	جرزبندی سمت چپ	۱۲/۵	۱۱/۹۵	۰/۰۵۵
۱/۳۵	جرزبندی سمت چپ	۱۳/۱	۱۲/۸۵	۰/۲۵



## ۲-۴-۲-۴- بخش دوم: بر اساس جرزبندی مدل نوع ۲

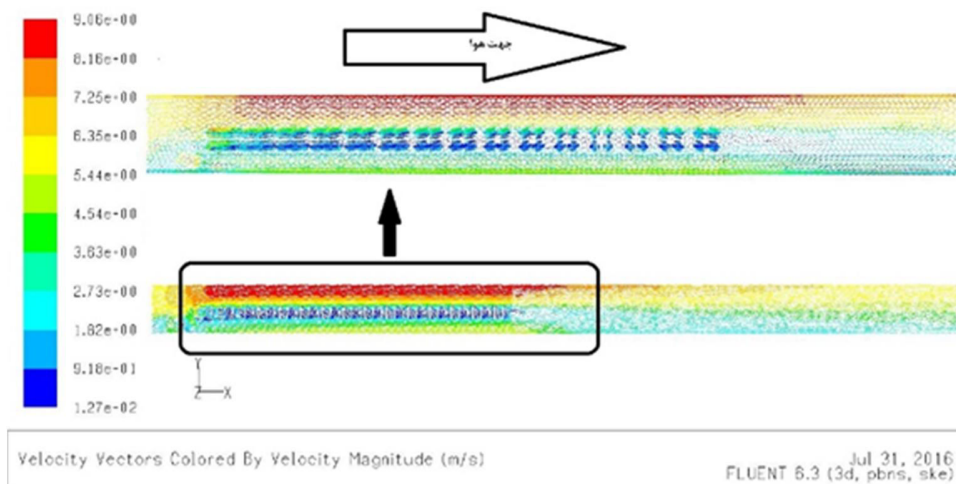
در این مدل ۱۵ متر انتهایی راهرو کارگاه استخراج و کل راهرو TG با استفاده از جرزبندی نوع ۲ (شکل (۶۹-۴)) ناحیه TG ساخته شده است.



شکل (۶۹-۴): مشخصات هندسی جرزبندی نوع ۲

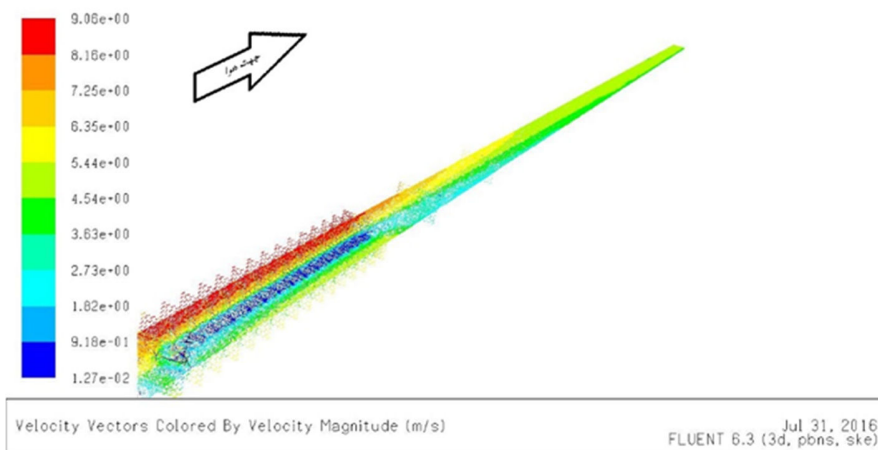
## ۲-۴-۲-۴-۱- نتایج مدل

سرعت در راهرو TG به دو زون تقسیم شده است. در کناره راهرو TG از ابتدای شروع جرزبندی سرعت ۸/۶ تا ۹ متربرثانیه و بین جرزبندی، داکت و دیواره راهرو TG سرعت در حدود ۳/۶۳ تا ۵/۴۴ متربرثانیه است (شکل (۷۰-۴)).



شکل (۴-۷۰): توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۲ (a)

پس از اتمام جرزبندی از شدت سرعت زون پرسرعت کاسته و به وسعت آن افزوده می شود و تا انتهای راهرو TG ادامه می یابد (شکل (۴-۷۱)).



شکل (۴-۷۱): توزیع سرعت در راهرو TG در مدل ۴، جرزبندی نوع ۲ (b)

## ۴-۲-۴-۲-۲- نتیجه گیری مدل شماره ۴

استفاده از جرزبندی سطح مقطع مؤثر تهویه را کاهش می دهد، که باعث تشکیل زون بندی سرعت هوا با اختلاف سرعت بالا در جریان هوای تهویه، چرخش هوا در محل اتمام جرزبندی و داخل جرزبندی می شود. استفاده از دو ردیف جرزبندی باعث افزایش سرعت در حدود ۱۳ متر بر ثانیه در بین مرکز دو جرزبندی راهرو TG می شود. استفاده از یک ردیف جرزبندی باعث کاهش حداکثر سرعت افزوده ناشی از تغییر سطح مقطع می شود اما زون بندی سرعت در ادامه راهرو TG تولید می شود این زون بندی دارای دو سرعت است که میزان اخلاف آن به تدریج تا انتهای کارگاه کاهش می یابد و به مقدار ناچیزی می رسد.

## ۴-۳- نتیجه گیری

مدل سازی نهایی با استفاده از نتایج مدل سازی اولیه به ۴ مدل ساده تر برای بررسی: تاثیر جرزبندی بر

سرعت تهویه، تاثیر درزه بر روی شیلدها و تاثیر گارکشی بر منطقه تخریب تقسیم شد.



## فصل پنجم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه وضعیت تهویه کارگاه  $W_2$  مدل‌سازی شد، با استفاده از نرم‌افزار GAMBIT مدل هندسی ساخته و با نرم‌افزار FLUENT پردازش شده است. برای رسیدن به مدلی مطلوب مدل‌سازی به دو قسمت اولیه و ثانویه تقسیم شد. در مدل‌سازی اولیه شرایط مرزی انواع مختلف مش، نحوه ارتباط احجام و ... مورد بررسی و نتایج در مدل‌سازی ثانویه استفاده شد.

با توجه به امکانات موجود در زمان برداشت اطلاعات از معدن (در دسترس بودن یک سرعت‌سنج دستی)، اعتبارسنجی مدل ثانویه بر اساس سرعت در قسمت خاصی از کارگاه صورت گرفته است. به دلیل حجم بسیار بالای مدل ثانویه، این مدل به ۴ مدل تقسیم شده و در هر کدام شرایط خاصی مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج این مدل‌ها به صورت خلاصه در زیر آورده شده است:

- عیار گاز متان در داخل کارگاه استخراج در حدود ۰/۲۵ درصد است. در قسمت ابتدایی راهرو استخراج به طول حدود عرض راهرو MG از نقطه اتصال راهرو MG با کارگاه استخراج، میزان گاز بین ۰/۲ تا ۱۰ (میزان عیار بین ۱ تا ۱۰ درصد بسیار اندک است) درصد است؛ این عیار در فاصله حدود ۰/۵ متری شیلد است.
- در ناحیه اتصال راهرو TG و کارگاه استخراج تا ورودی راهرو TG عیار گاز بین ۱ تا ۱۰ درصد است که این میزان در سمت شیلدها ۱۰ درصد و تا قسمت ابتدایی راهرو TG به ۱ درصد می‌رسد، به دلیل چگالی پایین گاز متان در قسمت بالای کارگاه استخراج قرار می‌گیرد.
- بر روی دیواره شیلدها حدود ۴۰ درزه با ابعاد ۰/۰۵ در ۰/۱۵ متر در وسط ارتفاع شیلدها مدل شد، که از حدود ۱۸ درزه ابتدایی هوا وارد منطقه تخریب شده و از باقی درزه‌ها به همراه گاز متان وارد سیستم تهویه می‌شود.

- محدوده غلظت اکسیژن بهینه برای خودسوزی زغال‌سنگ، غلظت بین ۱۰ تا ۱۸ درصد است؛ این میزان غلظت در منطقه تخریب به عمق تقریبی نصف ارتفاع راهرو MG در قسمت بالایی منطقه تخریب و به اندازه ارتفاع راهرو MG در قسمت پایینی منطقه تخریب قرار دارد که با شیبی ملایم تا ۰/۳۳ ارتفاع به سمت راهرو استخراج ادامه می‌یابد (در قسمت پایینی منطقه استخراج).
- بیشترین سرعت هوا در قسمت انتهایی جرزبندی (مدل شماره ۴) با میزان ۱۲/۹ متر بر ثانیه است. در قسمت وسط راهرو (بین دو جرزبندی) از محل شروع جرزبندی در راهرو TG سرعت هوا افزایش می‌یابد تا در انتهای جرزبندی به سرعت ۱۲/۹ متر بر ثانیه می‌رسد. این نحوه توزیع سرعت پس از پایان جرزبندی به حالتی مخروطی شکل کاهش می‌یابد و پس از آن تقریباً در کل سطح مقطع راهرو یکسان می‌شود. در قسمت بین دو جرزبندی در طول راهرو و در داخل جرزبندی چرخش هوا مشاهده می‌شود.
- میانگین سرعت در طول کارگاه استخراج در حدود ۲/۵ متر بر ثانیه است و در طول راهرو MG حدود ۴ و در راهرو MG ۴/۴۵ متر بر ثانیه است.
- گاز کشی تأثیر بسیار مطلوبی بر روی منطقه تخریب گذاشته است و می‌تواند یکی از مطلوب‌ترین روش‌ها برای رفع میزان غلظت بالای گاز متان در منطقه تخریب باشد.

## پیشنهادات

- مدل کردن شیرر در حالت فعال (با استفاده از مش لغزنده).
- مدل‌سازی گرد زغال در نقاط بحرانی ابتدای کارگاه استخراج و ورودی راهرو TG.
- مدل‌سازی حرکت و جابه‌جایی شیلدها و تاثیر آن بر روی وضعیت تهویه.
- مدل‌سازی خودسوزی زغال‌سنگ و اثرات آن بر روی سیستم تهویه (نیاز به مطالعات آزمایشگاهی و اطلاعات دقیق از منطقه تخریب دارد).
- انجام آنالیز حساسیت مدل نسبت به نوع مش (خصوصاً منطقه تخریب).
- طراحی الگوی چال‌های گازکشی و مدل‌سازی آن.
- مدل‌سازی روش‌های مختلف تهویه و تاثیر آن بر روی مدل.
- با توجه انقضای لایسنس نرم افزار Fluent6.3 پیشنهاد می‌شود از نرم‌افزار Ansys برای مدل‌سازی استفاده شود. هر دو عمل ساختن مدل هندسی و اجرای آن در خود مجموعه نرم‌افزار Ansys انجام می‌شود. تنها برتری نرم‌افزار Fluent6.3 نسبت به Ansys قابلیت پرتابل بودن آن است.
- منطقه تخریب در این پایان‌نامه بر اساس مدل‌سازی‌های گذشته ساخته شد، بهتر است مدل آزمایشگاهی ساخته شده و با استفاده از آن مدل‌سازی نمود (ساخت مدل آزمایشگاهی نیازمند هزینه و زمان زیادی است در مدت زمان کارشناسی ارشد قابل اجرا نیست).



۱. دهقانی سانج، محمدامین؛ (۱۳۸۷)؛ شبیه‌سازی عددی با نرم‌افزار Fluent 6.3؛ ناشر: شرکت ناقوس اندیشه؛ چاپ اول.
۲. عطایی، محمد؛ (۱۳۹۰)؛ معدن‌کاری زیرزمینی؛ جلد اول؛ ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود؛ صفحات ۴۴۳ تا ۴۵۱؛ چاپ سوم.
۳. عطایی، محمد؛ (۱۳۹۰)؛ معدن‌کاری زیرزمینی؛ جلد دوم؛ ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود؛ چاپ سوم.
۴. استریتر، ویکتور لایلی؛ مترجم: موناپی، هدایت؛ (۱۳۷۹)؛ مکانیک سیالات؛ ناشر: انتشارات دانیال؛ صفحات ۲۳۰ تا ۲۳۸؛ چاپ اول.
۵. مدنی، حسن؛ (۱۳۹۳)؛ تهویه در معادن؛ مرکز نشر دانشگاهی.
۶. امیر صفاری، فرهنگ سرشکی، محمد عطایی؛ (۱۳۹۳)؛ خودسوزی زغال‌سنگ.
۷. گزارش عملیاتی معدن زغال‌سنگ پروده طبس؛ (۱۳۹۱).
۸. قانون معادن ایران؛ (۱۳۹۱)؛ آیین‌نامه حفاظت و ایمنی فصل تهویه، بند پ مقررات ویژه معادن گازدار و گرد زغال‌دار، ماده ۳۱۵.
9. Boleslav Taraba, Zdenek Michalec. "Effect of longwall face advance rate on spontaneous heating process in the gob area – CFD modelling. " Journal of Fuel volume 90 (2011). pp 2790 – 2797.
10. Dan M. Worrall, Jr. "Modeling gas flows in longwall coal mines using computational fluid dynamics. " Colorado School of Mines. (2012).
11. Dickson Daniel Ndenguma. "Computational Fluid Dynamics Model for Controlling Dust and Methane in Underground Coalmine. " Faculty of Engineering, Built Environment and Information Technology University of Pretoria. September (2010).

12. Ian S. Lowndes, Amanda J. Crossley, Zhi-Yuan Yang. "The ventilation and climate modelling of rapid development tunnel drivages. " *Tunnelling and Underground Space Technology* Volume 19 (2004). pp 139–150.
13. K. Tanguturi, R. Balusu. "CFD Modeling of Methane Gas Distribution and Control Strategies in a Gassy Coal Mine. " *Journal of Computational Multiphase Flows* Volume 6 (2014). pp 65 – 77.
14. L. Zhou, G. Goodman, and A. Martikainen. "Computational fluid dynamics (CFD) investigation of impacts of an obstruction on airflow in underground mines. " *Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc* January (2013), 332. pp 505–513.
15. Liu Guan-nan, Gao Feng, Ji Ming Liu Xing-guang. "Investigation of the ventilation simulation model in mine based on multiphase flow. " *Procedia Earth and Planetary Science* Volume 1 (2009). pp 491–496.
16. Miles Stephens. "Laboratory and numerical modeling used to characterize leakage in underground coal mines. " *Doctoral dissertation, Department of Mining Engineering The University of Utah*. May (2011).
17. Mitchell, G. W. "Longwall mining." *Australasian Coal Mining Practice* (2009): 340-373.
18. Samuel Atta Lolon. "Computational fluid dynamics simulation study On hot spot location in a longwall mine gob. " *Doctoral dissertation, Department of Mining Engineering The University of Utah* December (2008).
19. Ting Ren, R. Balusu. "CFD Modelling of Goaf Gas Migration to Improve the Control of Spontaneous Combustion in Longwalls. " *Coal Operators' Conference* (2005). pp 259 – 264.
20. Ting Ren, Rao Balusu. "The use of CFD modelling as a tool for solving mining health and safety problems. " *10th Underground Coal Operators' Conference*. (2010). pp 339-349.
21. Versteeg, H. K., and W. Malalasekera. "An introduction to computational fluid dynamics–The finite volume method." (1995). pp 1-8.

22. Yuan, Liming, Alex C. Smith, and Jürgen F. Brune. "Computational fluid dynamics study on the ventilation flow paths in longwall gobs." Proceedings of the 11th US/North American Mine Ventilation Symposium. 2006.
23. Hartman, Howard L., et al. Mine ventilation and air conditioning. John Wiley & Sons, 2012.
24. Darling, Peter, ed. SME mining engineering handbook. Vol. 1. SME, 2011.
25. Ren, Ting, and Rao Balusu. "The use of CFD modelling as a tool for solving mining health and safety problems." (2010).
26. Edwards, J. S., T. X. Ren, and R. R. Jozefowicz. "Simulation of methane flow through strata along longwall coalfaces." Report to the European Coal and Steel Community (ECSC). ECSC Project (1996).
27. Heerden, J., and Peter Sullivan. "The application of CFD for evaluation of dust suppression and auxiliary ventilation systems used with continuous miners." Proceedings of the Sixth US Mine Ventilation Symposium (Salt Lake City, UT. 1993).
28. Yuan, Liming, and Alex C. Smith. "CFD modeling of spontaneous heating in a large-scale coal chamber." Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22.4 (2009).
29. Yuan, Liming, and Alex C. Smith. "Numerical study on effects of coal properties on spontaneous heating in longwall gob areas." Fuel 87.15 (2008).
30. Thomas, Larry J., and Larry P. Thomas. Coal geology. John Wiley & Sons, 2002.
31. Theodor Grewer. Thermal hazards of chemical reactions. Vol. 4. Elsevier Science, 1994.
32. Levin, Lev Yu, Mikhail A. Semin, and Yuri A. Klyukin. "Estimation of wall roughness functions acceptability in CFD simulation of mine ventilation networks." Proceedings of Summer School-Conference "Advanced Problems in Mechanics. Vol. 2014. 2014.
33. Gilmore, Richard Christopher. Computational fluid dynamics modeling of underground coal longwall gob ventilation systems using a developed meshing approach. Colorado School of Mines, 2015.

34. Worrall Jr, Dan M. Modeling gas flows in longwall coal mines using computational fluid dynamics. Colorado School of Mines, 2012.
35. Versteeg, H. K. "W., Malalasekera." An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method Approach (1995).
36. Anderson, John David, and J. Wendt. Computational fluid dynamics. Vol. 206. New York: McGraw-Hill, 1995.
37. Ndenguma, Dickson Daniel. Computational fluid dynamics model for controlling dust and methane in underground coalmines. Diss. 2011.
38. Hetao, Su, et al. "Risk analysis of coal self-ignition in longwall gob: a modeling study on three-dimensional hazard zones." Fire Safety Journal 83 (2016): 54-65.
39. Fluent6.3 user's manual (2006).
40. Ansys fluent 17 manual (2016).
41. [http//cfd.iut.ac.i](http://cfd.iut.ac.i), 28 september 2016

## Abstract

Ventilation is one of the most important issues in underground mining. Which directly effects on the health of mine workers. In underground coal mines, due to the presence of toxic, flammable and combustion of coal, ventilation become more important issue and designing an appropriate method is required. There are several methods for design and modeling air conditioning, that with advancement of computer technology, Computational Fluid Dynamic (CFD) has become more reliable and most widely used. In this research, the simulation and modeling of air condition in W<sub>2</sub> stope of Parvade Tabas coal mine has been studied by CFD approach. In order to modeling, an initial model was made and its results was used in final model. The final model consists of 4 simple models with different characteristics. According to results, highest velocity with 12.9 value is in the middle of cribbing area. Methane gas content is gathered at the end of extraction stope and the entrance of TG panel on upper part of stope (ceiling). Also, there is a susceptible of coal combustion in the upper part of abandoned area and half of height in TG panel. Approximately 40 discontinuities were modeled along the Shield wall during the stope extraction that about 11 discontinuities are open routes for entering methane and enter to ventilation tunnel. Gasification has a very good effect on high concentration of abandoned area and eliminate this high concentration.

Keywords: Computational Fluid Dynamic, Ventilation, Tabas coal mine, simulation, Methane gas.



**Shahrood University of Technology**

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Exploitation Engineering

**Computational Fluid Dynamics (CFD) Approach to Modeling Panel and adjacent Tunnels Ventilation in LongWall Underground Coal Mines.**

**Case Study: Tabas Coal Mine.**

**By: Mehdi mohammadi**

Supervisors

Dr. Farhang Sereshki

Prof. Reza KhaloKakaie

Advisors

Dr.Ali Khleghi

**September 2017**