

بررسی سرعت جریان هوا در پراکنش گاز متان و نقاط مرده در کارگاه استخراج پلکانی معکوس معادن زغال سنگ

مقاله پژوهشی

محمد رضا قزوینی^{۱*}؛ فرهنگ سرشکی^۲؛ محمد عطائی^۳

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، m.ghazvini@shahroodut.ac.ir

۲- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، farhang@shahroodut.ac.ir

۳- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ataei@shahroodut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۴۰۵/۰۲/۱۴؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

شماره صفحات: ۵۷ تا ۷۰

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2026.17665.1509

واژگان کلیدی	چکیده
تهویه کارگاه استخراج گام تخریب پلکانی معکوس نرم افزار <i>Ansys Fluent</i>	تهویه یکی از خدمات اصلی در کارگاه‌های استخراج معادن زیرزمینی زغال سنگ است. به منظور ایجاد یک محیط امن کاری برای کارگرها و تجهیزات؛ کمیت و کیفیت جریان هوا در تهویه باید طبق استانداردهای لازم باشد تا گازها ترقیق شوند، گرد و غبار از بین برود و دمای هوا کنترل شود. یک مدل سه بعدی به منظور بررسی رفتار جریان و سرعت هوا در داخل کارگاه استخراج زغال سنگ به روش پلکانی معکوس و با گام تخریب ۸ متر در این تحقیق با استفاده از نرم افزار <i>Ansys Fluent</i> مطالعه شده و نتایج نشان می‌دهد مناطق مرده در مسیر تردد پرسنل وجود دارد که سرعت هوا در آن از سایر قسمت‌های کارگاه استخراج کمتر است. این منطقه مرده می تواند محل تجمع گازهای خطرناک، گرد و غبار و سایر آلاینده ها باشد. در این تحقیق با در نظر گرفتن سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه در ورودی کارگاه استخراج، حجم منطقه‌ای که سرعت آن کمتر از ۰/۲۵ متر بر ثانیه است نسبت به کل حجم کارگاه استخراج ۸۷/۱۴ درصد محاسبه شده است. پس از افزایش سرعت هوای ورودی به ۴ متر بر ثانیه حجم منطقه مرده به کل حجم کارگاه استخراج به ۵۵/۸۵ درصد کاهش یافته است. پس از افزایش سرعت هوای ورودی به ۶ متر بر ثانیه حجم منطقه مرده به کل حجم کارگاه استخراج به ۳۲/۵۲ درصد کاهش یافت. در نهایت با افزایش سرعت هوای ورودی به ۸ متر بر ثانیه حجم منطقه مرده به کل حجم کارگاه استخراج به ۸/۹۹ درصد کاهش یافت.

۱- پیش‌گفتار

برای رقیق کردن آلودگی‌های شیمیایی و فیزیکی (گازها، گرد و غبار، گرما و رطوبت) لازم است. در سراسر نقاط جهان، تهویه معادن به شدت کنترل می‌شود. این مساله برای معادن زغال سنگ که دارای گاز هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بیش‌ترین میزان خسارت محسوس در معادن زغال سنگ به سبب انفجار گازهای قابل احتراق مانند متان

سامانه تهویه معدن به‌طور مستقیم روی فرایند تولید فراورده‌های معدنی مؤثر نیست، اما فقدان تهویه مناسب غالباً باعث پایین آمدن کارایی کارگران و کاهش بهره‌وری، افزایش نرخ تصادفات، افزایش مخاطرات ایمنی و حتی غیبت کارکنان می‌شود. هوا در معادن نه تنها برای تنفس بلکه

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ طبقه سوم؛ کدپستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۳۰۰؛ دورنگار: ۰۲۳-۳۲۳۰۰۲۸۰

مطالعه دیگری توسط بنت و همکاران در سال ۲۰۰۳ انجام شده که قابلیت پیش‌بینی غلظت هوای آلوده را در محیط‌های کاری نشان می‌دهد اگرچه در این تحقیق به‌صورت مستقیم به فعالیت‌های معدنی و تونلی اشاره نشده است، با این حال این مطالعات تایید می‌کند که دینامیک سیالات محاسباتی برای تحلیل و شبیه‌سازی انتشار گاز و گرد و غبار در فضاهای زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد (Bennett et al., 2003).

در سال ۲۰۰۶ یوان و همکاران بر روی الگوهای جریان سیال در ناحیه تخریب بر اساس مدل‌سازی 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).

والا و همکاران در ادامه مطالعات خود در سال ۲۰۰۸ توزیع گاز متان را در کارگاه استخراج جبهه کار طولانی در حضور یا عدم حضور ماشین حفاری پیوسته مقایسه کردند. در این پژوهش از نرم‌افزار *Ansys Fluent* و روش حل مدل مغشوش انتقال تنش برشی استفاده شده است. نتیجه مدل‌سازی اغلب با اطلاعات تجربی مقایسه شده که اطلاعات همدیگر را تصدیق کرده‌اند (Wala et al., 2008).

در سال ۲۰۰۸ امین الساداتی و هومن یک مدل دوبعدی دینامیک سیالات محاسباتی را برای بررسی تاثیر طول پرده هوابند بر رفتار جریان سیال در سرعت‌های مختلف جریان هوا مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش از نرم‌افزار تجاری *CFD-GEOM* به‌منظور تولید شبکه محاسباتی و از نرم‌افزار *CFD-ACE* و مدل $K-\epsilon$ استاندارد به‌منظور تحلیل جریان سیال استفاده شده است. نتایج این تحقیق توسط نرم‌افزار تجاری *Ansys Fluent* نیز بررسی شده است (Aminosadati & Hooman, 2008).

در سال ۲۰۱۶ میشرای و همکاران با استفاده از روش مطالعه دینامیک سیالات محاسباتی در یک معدن زغال‌سنگ در هند بر روی پراکندگی گاز متان در سرمیله روش استخراج جبهه کار طولانی پسرو تحقیق کردند. مطالعه نشان داد که تهویه نقش مهمی بر روی پراکندگی گاز متان در معدن زغال‌سنگ زیرزمینی دارد (Mishra et al., 2016).

است. علاوه بر این استنشاق گرد و غبار و گازهای سمی ممکن است باعث تلفات انسانی و نیز بروز بیماری‌های تنفسی، انواع سرطان و دیگر بیماری‌های مزمن در بین کارگران شود. بدین لحاظ، باید هوای تازه همواره به شکلی اصولی به تمام قسمت‌های مورد نیاز در معدن انتقال یابد.

تاکنون مطالعات زیادی به منظور مدل‌سازی توزیع جریان هوا، پراکنش گرد و غبار، انتشار گاز، انتقال حرارت و مشکلات آتش سوزی در فضاهای زیرزمینی انجام شده است. با این حال تحقیق جامعی پیرامون مدل‌سازی توزیع جریان هوا در کارگاه استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ به روش پلکانی معکوس انجام نشده است. هدف اصلی این تحقیق مدل‌سازی سه‌بعدی توزیع جریان هوا و پراکنش گاز متان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و بر پایه استفاده از نرم افزار *Ansys Fluent* می‌باشد.

۲- مرور ادبیات

مطالعه جریان هوا با کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در تمام قسمت‌های فعالیت‌های زیرزمینی معدنی و تونل‌سازی توسعه داده شده است. اغلب این مطالعات بر روی گردوغبار و پراکنش گاز متان در جبهه کار متمرکز شده است. در زیر به برخی از مهمترین و کاربردی ترین تحقیقات انجام شده در این حوزه اشاره می‌شود.

در سال ۱۹۹۷ والا و همکاران کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی را به‌منظور ارزیابی جریان‌های هوا در فضاهای زیرزمینی نشان دادند. توجه بیشتر آن‌ها در به‌کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی برای گاز (از جمله متان) و پراکنش گردوغبار بوده و آن‌ها منابع مختلفی را برای امکان‌پذیر بودن ارزیابی جریان هوا در فضاهای زیرزمینی گزارش کرده‌اند. به‌عنوان نمونه آن‌ها با به‌کارگیری نرم‌افزار *CFD2000* نسخه ۲،۲، الگوهای جریان هوا را که توسط بردارهای سرعت جریان هوا نشان می‌دهند؛ در فضاهای زیرزمینی و چاه‌های تهویه مطالعه کرده‌اند. این الگو با اندازه‌گیری‌های فشار و سرعت اعتبارسنجی شده است (Wala et al., 1997).

والا و همکاران در سال ۲۰۰۱ روش اندازه‌گیری جدیدی به نام تصویربرداری سرعت ذره را بکار گرفتند (Wala et al., 2001).

۳- روش‌شناسی

تهویه به علت ارتباط مستقیم با سیستم تنفسی افراد، یکی از تاثیرگذارترین عوامل بر روی سلامت کارگران است. خصوصاً در معادن زغال‌سنگ به سبب وجود گرد زغال و انواع گازها، تهویه اهمیت ویژه‌ای دارد. در معادن زغال‌سنگ عملکرد و وضعیت سیستم تهویه باید به نحوی باشد که غلظت گازها در حد استاندارد قرار گیرد، به‌ویژه 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 به‌صورت صحیح و در زمان مناسب حل نشود امکان دارد خطرات بسیار جدی در طول زمان استخراج ایجاد کند و فرآیند استخراج را با مشکل روبرو سازد و حتی باعث شود که عملاً دیگر امکان پیشروی و استخراج وجود نداشته باشد.

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 و روش‌های آزمایشگاهی.

۳-۱- ساخت مدل شبیه‌سازی عددی گاز آلاینده در کارگاه استخراج پلکانی معکوس

دینامیک سیالات محاسباتی (*CFD*) به عنوان شاخه‌ای از علم مکانیک سیالات، به طور گسترده در مطالعات انتقال و توزیع گازهای آلاینده و مضر به کار می‌رود. گازهای سمی حاصل از عملیات استخراج در کارگاه استخراج باعث تجمع گازهای آلاینده در مناطق دارای تهویه غیرعادی می‌شوند. *CFD* می‌تواند از طریق شبیه‌سازی‌های عددی، گازهای آلاینده و مضر در کارگاه استخراج را تحلیل و پیش‌بینی کند. برای شبیه‌سازی عددی میدان جریان گاز آلاینده در کارگاه استخراج واقعی، می‌توان از نرم‌افزار *Ansys Fluent* استفاده کرد تا به سرعت و به طور موثر تغییرات وضعیت

در سال ۲۰۲۰ لولون و همکاران به بررسی نحوه توزیع متان و جریان هوا به کمک مدل‌سازی *CFD* در یک تونل معدنی که از نقاط متعدد و متفاوتی متان به داخل تونل نفوذ می‌کند پرداختند. حالات مختلف شبیه‌سازی و بررسی گردید و در بخش نتیجه‌گیری بیان شد که توزیع و غلظت متان به تعداد و محل نقاطی که از آن‌ها متان وارد تونل می‌شود، بستگی دارد (*Lolon et al., 2020*).

در سال ۲۰۲۱ گائو و همکاران در مطالعه خود به مدل‌سازی *CFD* بخشی از سیستم تهویه پرداخته و رفتار گرد و غبار در معادن زیرزمینی را بررسی کردند. هدف از انجام این مطالعه پیدا کردن روشی برای بهبود شرایط تنفسی کارکنان حاضر در محیط کار است. بر اساس نتایج مدل‌سازی دو راه‌حل ممکن برای کنترل گرد و غبار پیشنهاد شد، یکی اصطلاح سیستم تهویه برای رقیق کردن ذرات گرد و غبار قابل استنشاق، و از سوی دیگر با استفاده از مه آب برای کنترل ذرات گردوغبار پیشنهاد گردید (*Gao et al., 2021*).

در سال ۲۰۲۲ جوگاندا و همکاران مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انفجار گاز متان در یک معدن زغال‌سنگ زیرزمینی جبهه کار طولانی در مقیاس کامل را انجام دادند (*Juganda et al., 2022*).

در سال ۲۰۲۵ تانگوتوری و همکاران بر روی مدل‌سازی انتشار گرد و غبار در جبهه‌کار *LTCC* کار کرده‌اند. استخراج جبهه‌کار طولانی با تخریب زغال‌سنگ سقف (*LTCC*)، یک فناوری معدنکاری است که با هدف افزایش نرخ تولید زغال‌سنگ از طریق عملیات تخریب زغال سقف (*TCC*) در لایه‌های ضخیم معرفی شده است. (*Tanguturi et al., 2025*).

تاکنون مطالعات زیادی پیرامون مدل‌سازی توزیع جریان هوا و پراکنش گرد و غبار و گاز در تونل‌ها انجام شده است ولی به مدل‌سازی جریان هوا و توزیع آلاینده‌ها در کارگاه استخراج معدن زغال‌سنگ زیرزمینی که برای تولید زغال‌سنگ از روش‌های غیرمکانیزه استفاده می‌شود، کمتر پرداخته شده است لذا تصمیم بر آن شد که درخصوص این موضوع تحقیق شود.

$S_f, \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ترم اتلاف لزجت است (Xie et al., 2022).
(۴) معادله اجزاء

نفوذ گاز در محیط اتمسفر باید قانون بقای جرم اجزا را ارضا کند که بیان آن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho C_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nabla C_z) = \nabla \cdot (D_z \nabla (\rho C_z)) + F_z \quad (۴)$$

که در آن C_z غلظت حجمی جزء، Z غلظت جرمی جزء برحسب $\frac{g}{m^3}$ ، DZ ضریب نفوذ جزء Z و F_z نرخ تولید واکنش شیمیایی بر حسب $g/(s \cdot m^3)$ است (Xie et al., 2022).
فرضیات مدل:

در این تحقیق شبیه‌سازی با فرضیات زیر همراه خواهد بود:

- هوای معدن تراکم ناپذیر است
- در مدل کارگاه استخراج فقط دمای دیوارها ثابت است و در میدان حل معادله انرژی حل می‌شود.
- جریان در کل دامنه پایدار و کاملاً آشفته است.
- گرد زغال سنگ از مدل حذف می‌گردد.
- از مدل‌سازی خودسوزی زغال سنگ و گرمایش ناشی از آن صرف‌نظر می‌گردد.
- خواص منطقه تخریب در هر سه جهت مختصات یکسان است و به‌صورت ایزوتروپ در نظر گرفته خواهد شد.
- سیال به‌صورت تک فاز (تنها فاز گاز) انتخاب می‌گردد.

در شبیه‌سازی انتشار گاز متان در کارگاه استخراج زیرزمینی زغال سنگ، انتخاب نرم‌افزار *ANSYS Fluent* از این جهت موجه است که این محیط توانایی حل عددی جریان‌های آشفته، سه‌بعدی و چندجزئی را دارد و برای تحلیل هم‌زمان میدان سرعت هوا و توزیع غلظت متان در هندسه‌های پیچیده معدن مناسب است. در مطالعات مرتبط نیز از *Fluent* برای بررسی رفتار جریان تهویه و انتشار متان در کارگاه‌ها و راهروهای معدن استفاده شده است، زیرا این نرم‌افزار امکان مدل‌سازی انتقال گونه‌ها، اثرات تهویه و تغییرات مکانی غلظت آلاینده را فراهم می‌کند (Daloglu et al., 2021).

از سوی دیگر، جریان تهویه در معادن زیرزمینی عموماً در رژیم آشفته قرار دارد؛ بنابراین استفاده از مدل آشفستگی

سرعت جریان هوا به دست آید، مناطق تجمع گاز تعیین شده و راهنمایی‌های علمی برای پیشگیری‌های بعدی از گازهای آلوده و حفاظت از محیط زیست ارایه شود (Xu & Han, 2021).

۳-۲- معادله کنترل نفوذ غلظت

جریان سیال در کارگاه استخراج از معادله ناویر-استوکس پیروی می‌کند و باید با قوانین عمومی حرکت مکانیکی و قوانین مکانیک سیالات شامل بقای جرم، بقای تکانه (مومنوم) و بقای انرژی مطابقت داشته باشد. معادلات حاکم بر غلظت و نفوذ به شرح زیر است (Houda et al., 2017).

(۱) معادله پیوستگی

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) \quad (۱)$$

که در آن ρ چگالی گاز، v_i نشان‌دهنده سرعت (v_x, v_y, v_z) در جهت محورهای مختصات x, y و z است (Xie et al., 2022).

یک سیال در طول فرآیند جریان از قانون بقای جرم پیروی می‌کند (Zhou & Yang, 2022).

(۲) معادله بقای تکانه (مومنوم)

نیروهای مختلفی که از دنیای خارج بر میکروالمان وارد می‌شوند، به طور مشترک بر حرکت آن تأثیر می‌گذارند، به طوری که میکروالمان با زمان تغییر می‌کند. معادله بقای تکانه آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + (\rho - \rho_a) g_i \quad (۲)$$

که در آن ρ چگالی سیال، P فشار استاتیک، μ لزجت (ویسکوزیته) دینامیکی سیال، ρ_a چگالی مرجع و g_i بردار شتاب گرانش می‌باشد.

(۳) معادله بقای انرژی

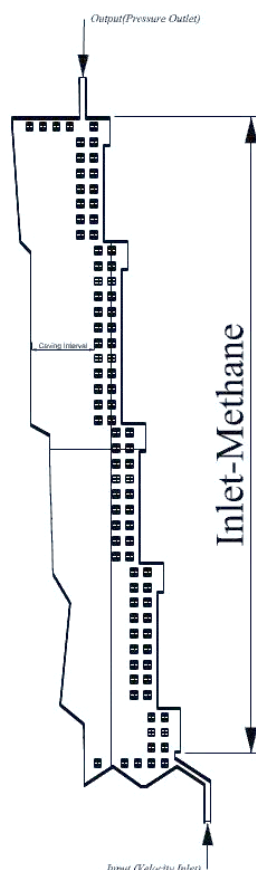
انتقال انرژی در فرآیند جریان گاز آلاینده در کارگاه استخراج از قانون اول ترمودینامیک پیروی می‌کند و بیان آن به صورت زیر است (Guo & Wang, 2016):

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nabla T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (۳)$$

که در آن C_p ظرفیت گرمایی ویژه بر حسب $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ، T دما، k ضریب انتقال حرارت سیال بر حسب

کمک جت فن یا ونتیلاتور و از طریق لوله برزنتی نصب شده در سقف تونل و یا هواراه حفر شده به داخل شبکه معدن ارسال می‌شود. هوای ورودی به داخل تونل از طریق لوله تهویه یا هواراه پس از عبور از شبکه معدنی به داخل کارگاه استخراج هدایت می‌شود و در مسیر حرکت خود هوای آلوده را به خارج از کارگاه استخراج منتقل می‌نماید.

محدوده مورد نظر برای مدل‌سازی کل کارگاه استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ به روش پلکانی معکوس است که هندسه مدل برای سه گام تخریب ۸ متر در نرم افزار *Solidworks* و شبکه توری در نرم افزار *Ansys Fluent* ساخته شده است. در شکل ۱، ساخت هندسه مدل با گام تخریب ۸ متر در نرم افزار *solidworks* نشان داده شده است.



شکل ۱- ساخت هندسه مدل با گام تخریب ۸ متر در نرم افزار *Solidworks*

یک انتخاب رایج و علمی محسوب می‌شود. این مدل به دلیل پایداری عددی مناسب، هزینه محاسباتی کمتر نسبت به برخی مدل‌های پیچیده‌تر، و توانایی قابل قبول در پیش‌بینی میانگین سرعت، شدت آشفته‌گی و الگوی اختلاط، در مسائل تهویه معدن کاربرد گسترده‌ای دارد (*Janoszek & Krawczyk, 2022*). همچنین در پژوهش‌های مرتبط با توزیع متان در معادن زیرزمینی، مدل به‌عنوان یکی از مدل‌های معتبر و متداول برای شبیه‌سازی پخش گاز و تحلیل رفتار جریان تهویه گزارش شده است (*Torno & Torano, 2023*).

بنابراین، استفاده از *ANSYS Fluent* در این تحقیق به دلیل قابلیت آن در مدل‌سازی *CFD* جریان هوا و انتقال متان در شرایط واقعی معدن است، و انتخاب مدل نیز به علت تعادل مناسب میان دقت، پایداری و سرعت حل در جریان‌های آشفته تهویه‌ای انجام شده است.

در این مدل سرعت‌های ۱/۲، ۴، ۶ و ۸ متر بر ثانیه به‌عنوان سرعت ورودی به کارگاه استخراج در نظر گرفته شده است. درصد گاز متان در هوای ورودی به کارگاه استخراج صفر در نظر گرفته شده است.

گاز متان از جبهه‌کار و دیواره‌های کارگاه استخراج به داخل کارگاه استخراج ورود می‌کند. فرض شد که تمامی گاز متان ورودی به کارگاه استخراج از این قسمت وارد می‌شود و همچنین به ازای هر تن زغال‌سنگ استخراجی حداکثر ۵ مترمکعب گاز متان آزاد می‌شود. میزان زغال‌سنگ استحصالی از کارگاه استخراج نیز در هر شیفت نیز ۲۰ تن در نظر گرفته شد. سطح مقطع قسمت ورود گاز متان به داخل کارگاه استخراج حدود ۷۲ مترمربع مساحت دارد.

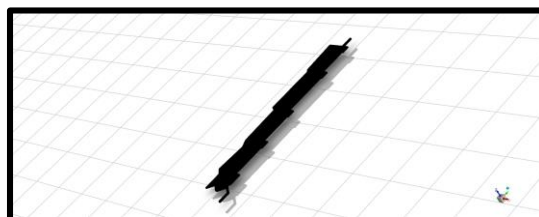
با توجه به موارد فوق شدت جریان گاز متان ورودی به داخل کارگاه استخراج ۰/۰۰۶۹ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شد. حاصل تقسیم این عدد بر مساحت نیز سرعت گاز متان ورودی به داخل کارگاه استخراج می‌باشد که ۰/۰۰۰۰۸۹ متر بر ثانیه محاسبه شد. لذا اعداد ورودی به نرم افزار *Ansys Fluent* به شرحی که ذکر شد تعیین گردید.

۳-۳- ساخت مدل شبیه‌سازی

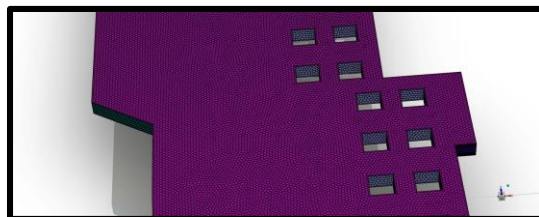
طبق آیین نامه ایمنی در معادن سال ۱۳۹۱، جهت جریان هوا در کارگاه استخراج معادن زغال‌سنگ باید به صوت صعودی باشد. به این ترتیب که هوای تازه از خارج تونل به

می‌شود که این قسمت‌ها مش نام دارد. با توجه به حجم و خواسته‌ها 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 به‌کارگیری 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 خروجی‌های 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 باید به نحوی باشد که میزان خطا به حد قابل قبولی کاهش یابد.

مطابق جدول ۱، نتایج در همگی مدل‌ها قابل قبول و مدل معتبر شناخته شد. لذا پس از تایید اعتبار مدل نسبت به تهیه خروجی اقدام شد.



الف) نمای دور



ب) نمای نزدیک

شکل ۲- ساخت شبکه توری کارگاه استخراج پلکانی

معکوس با گام تخریب ۸ متر در نرم افزار *Ansys Fluent*

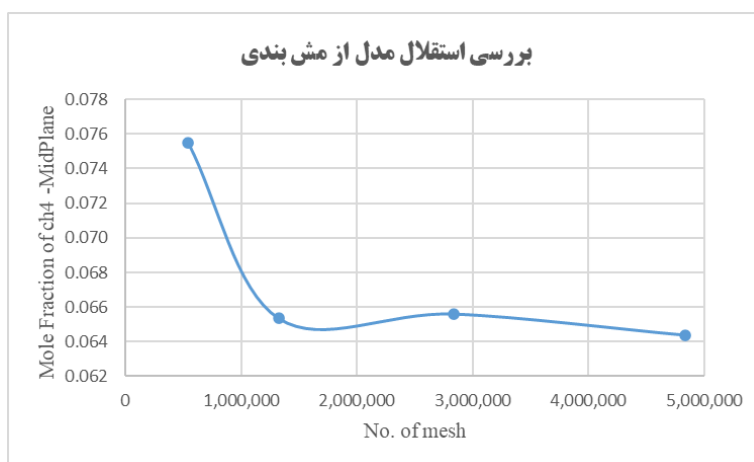
سیال دارای محیطی پیوسته است به همین علت در

نرم‌افزار *ANSYS FLUENT* برای انجام محاسبات، مدل

هندسی ساخته شده برای مدل‌سازی به قسمت‌هایی تقسیم

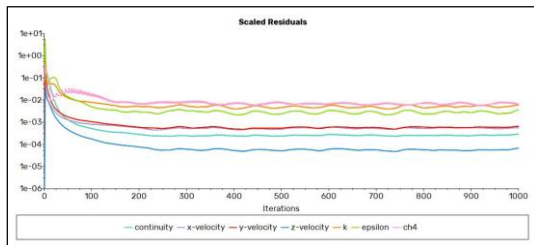
جدول ۱- بررسی استقلال مدل از مش بندی

No. of mesh	Area Weighted Average			Volume Average	
	Velocity - Mid Plane	Mole Fraction of ch4 - MidPlane	Mass Fraction of Ch4 - Mid Plane	Mole Fraction of ch4	Mass Fraction of Ch4
543,207	0.137	0.075	0.049	0.075	0.048
1,322,941	0.140	0.065	0.041	0.065	0.040
2,838,288	0.139	0.066	0.043	0.065	0.043
4,836,607	0.139	0.064	0.042	0.064	0.041



شکل ۳- بررسی استقلال مدل از مش بندی

جریان هوای (سیال) مدل‌سازی شده سه بعدی، نامتراکم، لزج، نیوتنی، پایدار و آشسته در نظر گرفته شده است. از حرارت ایجاد شده به واسطه کار سیال لزج در کارگاه استخراج چشم پوشی شده و دیوارها عایق و تهویه به صورت هم‌دما انجام شده است. از انتقال حرارت تشعشعی و تاثیر شیب کارگاه استخراج بر تهویه چشم پوشی شده است. سرعت سیال در هنگام ورود به کارگاه استخراج ۱/۲، ۴، ۶ و ۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. برای حل مساله از مدل $K-\epsilon$ استفاده شده است. مساله پس از ۱۰۰۰ حل همگرا شد که در شکل ۵، نتایج آن ارائه شده است.



شکل ۵- همگرایی مساله پس از ۱۰۰۰ مرحله در مدل‌سازی با گام تخریب ۸ متر و سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه

۴- نتایج و بحث

در این مدل‌سازی کارگاه استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ با روش پلکانی معکوس به طول ۱۰۰ متر با گام تخریب ۸ متر در نظر گرفته شده است. جریان هوا با سرعت‌های ۱/۲، ۴، ۶ و ۸ متر بر ثانیه از قسمت پایین کارگاه استخراج به داخل کارگاه استخراج وارد می‌شود. جریان گاز متان از جبهه‌کار استخراج و بر اساس میزان گازدهی حداکثر ۵ مترمکعب به ازای هر تن وارد کارگاه استخراج می‌گردد. نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل ۶، ارائه شده است. سرعت جریان هوا به طور متوسط در داخل کارگاه استخراج پلکانی معکوس با گام تخریب ۸ متر به شرح جدول ۲، است.

جدول ۲- محاسبه سرعت توسط و درصد گاز متان میانگین و خروجی در کارگاه استخراج پلکانی معکوس زیرزمینی زغال‌سنگ

Area Weighted Average			
Velocity (m/s)	Velocity - Mid Plane	Mole Fraction of CH4 - MidPlane	Mole Fraction of CH4 - Outlet
1.2	0.1400	0.0170	0.0100
4	0.4600	0.0058	0.0030
6	0.7036	0.0042	0.0021
8	0.9460	0.0029	0.0016

موهانتی و همکاران یک مدل CFD برای پخش متان از خط لوله مدفون ارائه و با داده‌های تجربی اعتبارسنجی کردند. ایشان سه مش با اندازه‌های مختلف را بررسی کرده و گزارش می‌کنند که اختلاف در حداکثر غلظت متان و طول ناحیه قابل اشتعال بین دو مش ریز کمتر از چند درصد است و آن را به‌عنوان مش مستقل در نظر گرفتند (Mohanty et al., 2024).

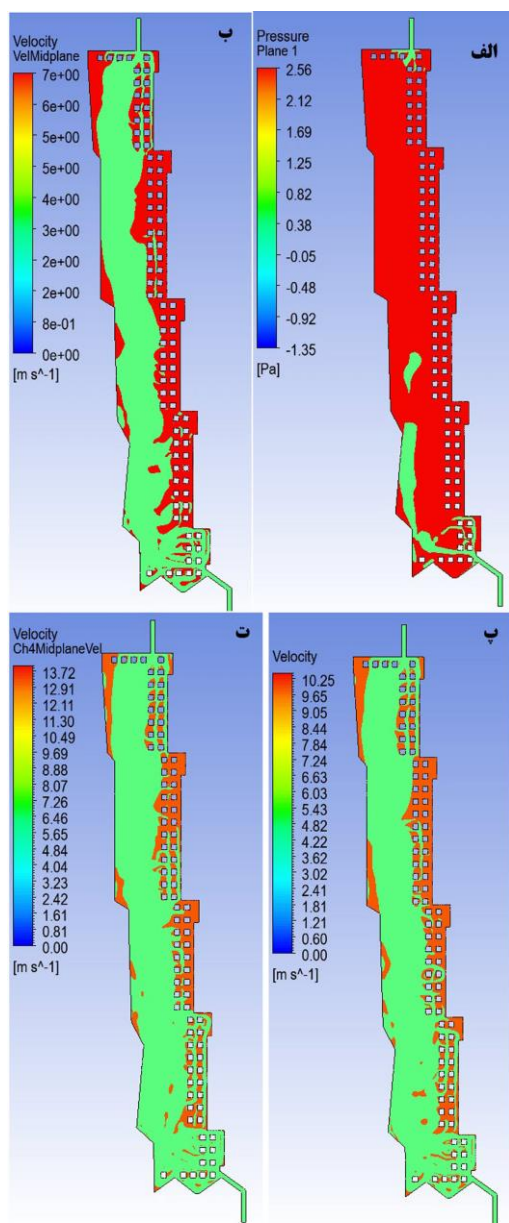
در سال ۲۰۱۹ و در مقاله‌ای روش سیستماتیک مطالعه شبکه با استفاده از چند مش و محاسبه GCI ارائه گردید و نشان داد که اختلاف بین دو مش ریز به حدود ۱ تا ۲ درصد برای ضرایب آیرودینامیکی کاهش یافته است؛ نویسندگان مقاله این سطح اختلاف را به‌عنوان مش مستقل پذیرفتند (Seeni et al., 2019).

با توجه به اینکه در این مطالعه اختلاف مش شماره ۳ نسبت به مش شماره ۲ حدود ۰/۴ درصد است لذا این اختلاف نشان‌دهند این است که مدل مستقل از مش‌بندی است.

پس از ایجاد ساختمان هندسی و شبکه توری، پروژه در پودمان سیالاتی نرم افزار *Ansys Fluent* در مرحله تحلیل عددی سیالاتی قرار گرفت. با تعریف پروژه در محیط این پودمان، قرار دادن شرایط مرزی بر روی مدل و تعریف کردن اهداف پروژه، محاسبات آغاز شد. مراحل انجام پروژه در شکل ۴، ارائه شده است.



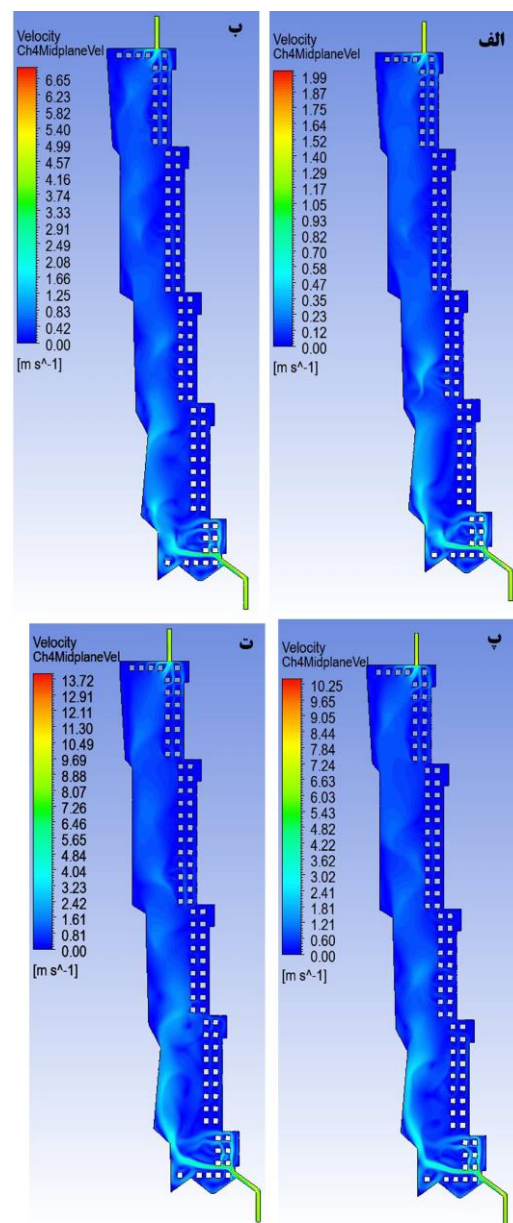
شکل ۴- مراحل انجام پروژه در پودمان سیالاتی *Ansys Fluent*



شکل ۷- نمایش مناطقی که سرعت هوا در آن کمتر از ۰/۲۵ متر بر ثانیه است (برای سرعت ورودی الف) (الف ۱/۲، ب) (پ ۴، ت ۶، ۸ متر بر ثانیه)

۵- نتیجه گیری

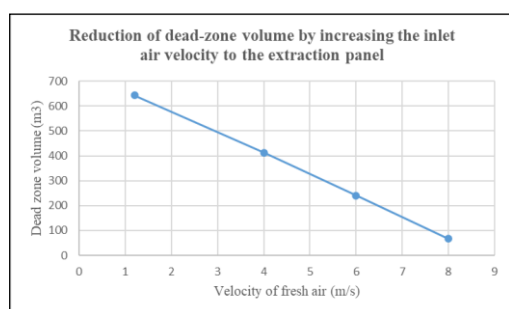
هوای ارسالی به درون کارگاه استخراج باید ضمن داشتن کیفیت مناسب برای تنفس پرسنل، در رقیق کردن یا حذف گاز متان ورودی به کارگاه استخراج موثر باشد. این پژوهش، مطالعه پیرامون وضعیت سرعت هوا در کارگاه استخراج



شکل ۶- نحوه توزیع جریان هوا در سرعت ورودی الف) (الف ۱/۲، ب) (پ ۴، ت ۶، ۸ متر بر ثانیه در کارگاه استخراج پلکانی معکوس)

با توجه به اینکه حداقل سرعت مجاز در معدن ۰/۲۵ متر بر ثانیه است لذا برای هر چهار مدل این سرعت در کارگاه استخراج بررسی و مناطقی که سرعت هوا در آن کمتر از میزان بود به عنوان نقاط مرده و با رنگ قرمز مشخص گردید. نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۷، نشان داده شده است.

با توجه به حساسیت کارگاه استخراج زیرزمینی زغال‌سنگ و وجود نیروی انسانی در آن، حجم منطقه‌ای که در آن سرعت هوا کمتر از $0/25$ متر بر ثانیه باشد از اهمیت زیادی برخوردار است. لذا برای کاهش بیشتر حجم منطقه مرده سرعت هوای ورودی به کارگاه استخراج ۸ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به این سرعت، حجم منطقه‌ای از کارگاه استخراج که سرعت آن کمتر از حد مجاز ($0/25$ متر بر ثانیه) است به حدود ۶۶ مترمکعب رسید و حجم این منطقه نسبت به حجم کل کارگاه استخراج به حدود ۹ درصد کاهش یافت. با توجه به این که حجم این منطقه کمتر از ۱۰ درصد کل حجم کارگاه استخراج است لذا نیاز به افزایش سرعت ورودی کارگاه استخراج نمی‌باشد و مشاهده گردید با افزایش سرعت هوا در قسمت ورودی، از میزان حجم مناطق مرده کاسته تا کیفیت و کمیت هوای مورد نیاز پرسنل افزایش یابد و ترقیق گاز متان نیز صورت پذیرد.



شکل ۸- کاهش منطقه با سرعت هوای کمتر از $0/25$ متر بر ثانیه با افزایش سرعت هوای ورودی به کارگاه استخراج

زغال‌سنگ به روش پلکانی معکوس با گام تخریب ۸ متر صورت گرفته است. حجم کل کارگاه استخراج در نرم افزار *Ansys Fluent* ۷۳۸ مترمکعب محاسبه شده است. مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهند در بعضی قسمت‌های فضای کاری که نیروی انسانی مشغول فعالیت است برآیند سرعت کمتر از $0/25$ متر بر ثانیه است که ممکن است مشکلاتی از قبیل تجمع گرد و غبار و افزایش درصد گاز متان در این ناحیه به وجود آید.

در ابتدا سرعت هوای ورودی به کارگاه استخراج $1/2$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به این سرعت، حجم منطقه‌ای از کارگاه استخراج که سرعت آن کمتر از حد مجاز ($0/25$ متر بر ثانیه) بود ۶۴۳ مترمکعب محاسبه شد که حجم این منطقه نسبت به حجم کل کارگاه استخراج حدود ۸۷ درصد بود.

برای کاهش حجم منطقه مرده سرعت هوای ورودی به کارگاه استخراج ۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به این سرعت، حجم منطقه‌ای از کارگاه استخراج که سرعت آن کمتر از حد مجاز ($0/25$ متر بر ثانیه) بود ۴۱۲ مترمکعب محاسبه شد که حجم این منطقه نسبت به حجم کل کارگاه استخراج به حدود ۵۶ درصد رسید.

جهت کاهش بیشتر حجم منطقه مرده سرعت هوای ورودی به کارگاه استخراج ۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. با توجه به این سرعت، حجم منطقه‌ای از کارگاه استخراج که سرعت آن کمتر از حد مجاز ($0/25$ متر بر ثانیه) بود ۲۴۰ متر مکعب محاسبه و حجم این منطقه نسبت به حجم کل کارگاه استخراج $32/52$ درصد برآورد شد.

۶- مراجع

- Aminossadati, S. M., & Hooman, K. (2008). Numerical simulation of ventilation air flow in underground mine workings .
- Bennett, J. S., Feigley, C. E., Khan, J., & Hosni, M. H. (2003). Comparison of emission models with computational fluid dynamic simulation and a proposed improved model. *AIHA Journal*, 64(6), 739-754 .
- Daloğlu, G., Önder, M., & Parra, T. (2021). Modeling of methane and air velocity behavior in an auxiliary ventilated coal heading. *Archives of Mining Sciences*, 66 .(۱)
- Gao, K., Li, S., Liu, Y ,Jia, J., & Wang, X. (2021). Effect of flexible obstacles on gas explosion

- characteristic in underground coal mine. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 362–369 .
- Guo, Y., & Wang, M. (2016). Thermodynamic analysis of gas flow and heat transfer in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103, 773–782 .
- Houda, S., Belarbi, R., & Zemmouri, N. (2017). A CFD Comsol model for simulating complex urban flow. *Energy Procedia*, 139, 373–378 .
- Janoszek, T., & Krawczyk, J. (۲۰۲۲). Methodology development and initial results of CFD simulations of methane distribution in the working of a longwall ventilated in a short “Y” manner. *Archives of Mining Sciences*, 67. (۱)
- Juganda, A., Strebinger, C., Brune, J. F., & Bogin Jr, G. E. (2022). Computational Fluid Dynamics Modeling of a Methane Gas Explosion in a Full-Scale, Underground Longwall Coal Mine. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 39(3), 897–916 .
- Lolon, S. A., Brune, J. F., Bogin, G. E., & Juganda, A. (2020). Study of methane outgassing and mitigation in longwall coal mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37, 1437–1449 .
- Mishra, D. P., Kumar, P., & Panigrahi, D. C. (2016). Dispersion of methane in tailgate of a retreating longwall mine: a computational fluid dynamics study. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–10 .
- Mohanty, S., Brennan, S., & Molkov, V. (2024). CFD modelling of methane dispersion from buried pipeline leaks: Experimental validation and hazard distance estimation. *Process Safety and Environmental Protection*, 187, 154 .
- Seeni, A., Rajendran, P., & Mamat, H. (2019). A CFD mesh independent solution technique for low Reynolds number propeller. *CFD letters*, 11(10), 15–30 .
- Tanguturi, K., Balusu, R., Qin, J., & Belle, B. (2025). Interpretation of transient caving dust patterns during sequential caving operation in LTCC face. *Podzemni radovi*, 1(46), 1–15 .
- Torno, S., & Torano, J. (2023). Methane emission outbursts in the mine face of two galleries: computational fluid dynamics analysis and on-site calibration. *Energies*, 16(21), 7298 .
- Wala, A., JR Stoltz, J., & Jacob, J. (2001). Numerical and experimental study of a mine face ventilation system for CFD code validation .
- Wala, A., Vytla, S., Huang, G., & Taylor, C. (2008). Study on the effects of scrubber operation on the face ventilation. Proceedings of the 12th US/North American Mine Ventilation Symposium ,
- Wala, A., Yingling, J., Zhang, J., & Ray, R. (1997). Validation study of computational fluid dynamics as a tool for mine ventilation design. Proceedings of the 6th international mining ventilation congress, Pittsburgh ,

- Xie, C., Xiong, G., & Chen, Z. (2022). Using CFD to simulate the concentration of polluting and harmful gases in the roadway of non-metallic mines reveals its migration law. *Sustainability*.
- Xu, C., & Han, L. (2021). Quality evaluation method of water isolating curtain in roadway of Gushan Iron Mine and its application. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(9), 769 .
- Yuan, L., Smith, A. C., & Brune, J. F. (2006). Computational fluid dynamics study on the ventilation flow paths in longwall gobs .
- Zhou, Y., & Yang, D. (2022). Multiple hydraulic fractures growth from a highly deviated well: A XFEM study. *Mechanics of Hydraulic Fracturing: Experiment, Model, and Monitoring*, 225–249 .

Investigation of Airflow Velocity on Methane Dispersion and Dead Zones in the Reverse Bench Mining Method of Coal Mines

M.Ghazvini^{1*}; F.Sereshki²; M. Ataei³

1- Ph.D. student; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, m.ghazvini@shahroodut.ac.ir

2- Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, shahroodut.ac.ir@ farhang

3- Professor; Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, ataei@shahroodut.ac.ir

Received: 4 May 2026; Accepted: 23 Sep 2026
DOI: 10.22044/tuse.2026.17665.1509

Keywords	Extended Abstract
Ventilation Stope Caving step Reverse bench mining method Ansys Fluent	Ventilation is a fundamental requirement in underground coal mining stopes. To ensure a safe working environment for both personnel and equipment, the quantity and quality of airflow must adhere to regulatory standards, primarily to dilute hazardous gases, suppress dust, and regulate thermal conditions. In this research, a 3D computational model was developed using Ansys Fluent to investigate airflow behavior and velocity distributions within a coal stope employing the Reverse Bench Mining method with an 8-meter caving step. The results reveal the presence of significant dead zones along personnel access paths, where airflow velocity is markedly lower than in other regions of the stope. These dead zones pose a critical risk as accumulation points for hazardous gases, dust, and other airborne pollutants. Quantitatively, with an inlet airflow velocity of 1.2 m/s, the region where velocity falls below 0.25 m/s accounts for 87.14% of the total stope volume. Increasing the inlet velocity to 4 m/s, 6 m/s, and 8 m/s reduces this dead zone ratio to 55.85%, 32.52%, and 8.99%, respectively. These findings underscore the direct impact of inlet velocity on ventilation efficiency.

Summary

This study investigates airflow distribution and methane dispersion characteristics within a coal face operated under the reverse bench mining method, utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling. The research evaluates the impact of varying inlet air velocities—ranging from 1.2 m/s to 8 m/s—with an 8-meter caving step on methane concentration levels and the formation of stagnant aerodynamic zones. The numerical simulations demonstrate that increasing the inlet air velocity significantly enhances ventilation efficiency by mitigating methane accumulation and minimizing the volume of dead zones.

Introduction

Mine ventilation is critical for underground coal mine safety, primarily for diluting hazardous gases (such as methane), suppressing dust, and controlling thermal conditions. While the reverse bench mining method is utilized in specific seam inclinations and geological conditions, it has received limited attention in existing numerical ventilation literature. This study addresses this gap by evaluating airflow patterns and methane behavior within a stope under the reverse bench mining method, explicitly accounting for the caving step to optimize ventilation safety parameters.

Methodology and Approaches

Numerical simulations were conducted using Ansys Fluent, based on the governing Navier-Stokes equations (conservation of mass, momentum, energy, and chemical species). Key methodological aspects include:

- Turbulence Model: The RNG $k-\epsilon$ model was implemented to accurately capture turbulent airflow phenomena.
- Flow Conditions: Assumptions of steady-state, incompressible, and turbulent airflow were applied.
- Geometry and Mesh: A 100-meter stope utilizing the reverse bench mining method with an 8-meter caving step was modeled.
- Operational Scenarios: Ventilation performance was simulated across multiple inlet velocities: 1.2, 4, 6, and 8 m/s.

Results and Conclusions

The results demonstrate a direct correlation between inlet airflow velocity and the dilution of hazardous gases within the stope. As the inlet velocity increases from 1.2 m/s to 8 m/s across the caving step intervals, the methane molar fraction at the stope outlet decreases substantially (from approximately 0.0100 to 0.0016). Furthermore, the extent of aerodynamic dead zones decreases markedly. The study concludes that the precise control of inlet airflow velocity in reverse bench mining stopes is essential for preventing gas accumulation, eliminating stagnant zones, and ensuring full compliance with underground mine safety standards.
