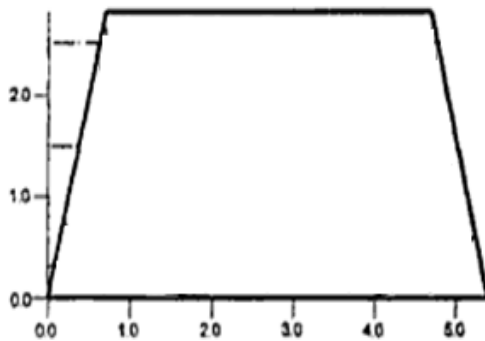


1-مقدمه

پیشروی معدن مایکی بررسی شد. همچنین نتایج حاصل از مدل سازی با استفاده از اندازه گیری های برجای انجام شده در معدن مایکی [7] اعتبار سنجی شده است.

2- معدن مایکی و هندسه مدل

در شکل 1 نیمرخ عرضی جبهه کار پیشروی معدن مایکی نشان داده شده است. مدل ساخته شده، همانند جبهه کار پیشروی معدن مایکی 15 متر طول، 5/8 متر عرض، 2/8 متر ارتفاع و 12/7 متر مربع سطح مقطع دارد، (شکل 2). لوله تهویه با قطر 75 سانتی متر در 40 سانتیمتری زیر سقف و نزدیک یکی از گوشه های جبهه کار با فاصله 6/8 متری از انتهای جبهه کار قرار گرفته است. حجم گاز متان خروجی از جبهه کار به درون کارگاه (m^3/min) 0/16 است که برای رقیق کردن آن (m^3/min) 266 هوای تازه بوسیله بادبزن وارد کارگاه می شود [7].



شکل 1. سطح مقطع جبهه کار پیشروی معدن مایکی [7]

شبکه بندی مدل با استفاده از نرم افزار *Gambit*⁵ انجام شد بدین منظور از سلول های مربعی با اندازه 5 سانتی متر در محل سینه کار، دهانه خروجی و محل بادبزن و سلول های شش وجهی با اندازه 20 سانتی متر در سایر قسمت های

برای رقیق کردن و خروج هوای آلوده از جبهه کار های معدنی تهویه مکانیکی لازم است اما تجربه نشان داده است که طراحی سیستم تهویه برای فضاهای پیچیده زیر زمینی کار آسانی نیست. در سال های اخیر، جهت طراحی و محاسبه دقیق سیستم تهویه معادن از دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان یک ابزار نیرومند استفاده شده است برای نمونه، ون هردن¹ از دینامیک سیالات محاسباتی برای ارزیابی و بهبود شرایط کاری در اطراف ماشین حفار بازوئی و تیغه های برنده استفاده کرد. هر چند که وی نتایج حاصل از مدل سازی خود را اعتبار سنجی نکرد اما نتایج حاصل دید بسیار مناسبی از حرکت گرد و غبار و جریان گاز متان ارائه داد [1]. برونر² با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی تاثیر آهنگ جریان هوا بر چگونگی حرکت دود حاصل از آتش سوزی در زیر سقف تونل معدنی پرداخت [2]. والا³ انتخاب اندازه سلول برای شبکه بندی مدل و مدل اغتشاش را برای مدل سازی و بررسی رفتار جریان هوا در جبهه کار های معدنی، در استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بسیار مهم و ضروری دانست [3]. سیلوستر⁴ برای مدل سازی سیستم تهویه معدن در فضای سه بعدی از مدل *k-e* استاندارد استفاده کرد [4]. ناکامورا با استفاده از کد *LASAR95* به مدل سازی توزیع گاز متان در جبهه کار های معدنی پرداخت و نتایج حاصل از مدل سازی خود را با استفاده از داده های حاصل از مدل آزمایشگاهی و اندازه گیری های برجای اعتبار سنجی کرد [5]. ناکایاما نیز با استفاده از این نرم افزار به مدل سازی سه بعدی توزیع گاز متان و تاثیر سیستم تهویه بر رفتار گاز متان در جبهه کار های معدنی پرداخت وی نیز نتایج حاصل از مدل سازی خود را با استفاده از داده های آزمایشگاهی و اندازه گیری های برجای اعتبار سنجی کرد [6]. در این مقاله رفتار و حرکت گاز متان در جبهه کار

شکل 2. هندسه و شبکه بندی مدل ساخته شده

$$\frac{\partial}{\partial t}(rk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(rku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(m + \frac{m_t}{s_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + (2)$$

$$+ p_k + p_b - re$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(re) + \frac{\partial}{\partial x_i}(reu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(m + \frac{m_t}{s_e} \right) \frac{\partial e}{\partial x_j} \right] (3)$$

$$+ C_{e1} \frac{e}{k} p_k - C_{e2} r \frac{e^2}{k}$$

که در آن:

C_{e1}, C_{e2} : ضرایب ثابت مدل

k : انرژی جنبشی جریان مغشوش ($m^2 s^{-2}$)

p_b : تولید انرژی k در اثر نیروی شناوری (pas^{-1})

p_k : تولید انرژی k در اثر تنش جریان مغشوش (pas^{-1})

e : آهنگ زوال انرژی جنبشی جریان مغشوش

m : ضریب گرانی دینامیکی ($pa.s$)

m_t : ضریب گرانی دینامیکی جریان مغشوش ($pa.s$)

r : چگالی هوا ($kg.m^{-3}$)

S : عدد پراندل جریان مغشوش (-)

t : زمان (s)

4- مدل سازی عددی

حل مستقیم معادلات حاکم بر جریان سیال امکان پذیر نیست (شکل مدل سازی به صورت حل غیر خطی معادلات دیفرانسیل جزئی است). در واقع باید معادلات را به شکل ریاضی ساده درآورد تا بتوان آنها را به شکل عددی حل کرد. این روش را گسسته سازی می گویند. زیرا در آن، پارامترهای پیوسته نظیر f به پارامتر گسسته نظیر f' کاهش می یابند و

مدل استفاده شد (شکل 2). دیواره ها، ورودی، بادبزن و خروجی مدل به ترتیب با استفاده از شرایط مرزی دیواره⁶، جرم ورودی⁷، سرعت ورودی⁸ و فشار خروجی⁹ تعریف شد.

3- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال با استفاده از معادله انتقال به صورت زیر بیان می شود [8]:

$$\frac{dr_t f_t}{dt} + \nabla \left(r_t \vec{V}_t f_t \right) - \nabla \left(\Gamma_{f_t} grad f_t \right) = S_{f_t} \quad (1)$$

که در آن، f_t متغیر مورد نظر، r_t چگالی سیال، Γ_{f_t} ضریب زوال و S_{f_t} آهنگ منبع به ازای هر واحد از حجم کنترل است. از سمت راست به چپ این معادلات، نشانگر عبارات هدایت، زوال و منبع هستند. مدل سه بعدی مسئله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی ساخته شد. در این مدل می توان به بررسی توزیع، حرکت و رفتار گاز متان در جبهه کار معدنی پرداخت. برای مدل سازی جریان مغشوش از معادلات $k-e$ استاندارد و تابع دیواره به صورت لگاریتمی استفاده می شود. برای حل معادلات وابسته به زمان، روش حل مرتبه دوم صریح مورد استفاده قرار گرفت. در روابط 2 و 3 معادلات انتقال مربوط به مدل $k-e$ استاندارد ارایه شده است [8]. برای مدل سازی گاز متان نیز از ترکیب متان-هوا استفاده شد.



$$\frac{df}{dt} = \frac{3f^{n+1} - 4f^n + f^{n-1}}{2\Delta t} \quad (7)$$

ر این روابط:

$$f^n: \text{مقدار } f \text{ در زمان } t_n$$

$$f^{n+1}: \text{مقدار } f \text{ در آینده}$$

$$f^{n-1}: \text{مقدار متغییر } f \text{ در گذشته}$$

$$f^n: \text{مقدار متغییر } f \text{ در حال حاضر}$$

$$\Delta t: \text{اندازه گام زمانی}$$

برای رسیدن به جواب چندین سری معادله ریاضی باید پشت سر هم حل شوند. تعداد زیادی از معادلات را نمی توان به صورت مستقیم حل کرد. از این رو در بسیاری از کدهای محاسباتی مسئله به صورت غیر مستقیم حل می شود. با توجه به معادلات انرژی، ممنتوم، انتقال جرم و چگونگی حل آن در یک زمان یا جدا از هم، در کدهای دینامیک سیالات محاسباتی از روش حل جداگانه¹⁴ یا ترکیبی¹⁵ استفاده می کنند. اگر چه تشخیص نوع حل نیازمند دید ماهرانه ای است اما پیوستگی بین معادلات سرعت و فشار (پیوستگی و ممنتوم) نشانگر حل هم زمان معادلات برای رسیدن به همگرایی سریع و مطلوب است [8]. با توجه به غیر خطی و هم زمان بودن معادلات، بهتر است معادلات را به صورت مرحله به مرحله حل کرد. برای اطمینان از پایداری حل، فاکتور زیر تخفیف a به کار می رود:

$$f_{n+1} = f_n + a\Delta f \quad (8)$$

که در آن، Δf تغییرات f در مرحله مفروض است. برای رسیدن به همگرایی مطلوب، باید فاکتور زیر تخفیف a بهینه باشد. مقدار بهینه از حالتی به حالت دیگر و بین متغیرها

دیفرانسیل ها و انتگرال ها از حاصل جمع این مقادیر گسسته به دست می آیند [8].

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_i \Rightarrow \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \quad (4)$$

$$\int f dx \Rightarrow \sum_i f_i \Delta x \quad (5)$$

مقادیر گسسته در مرکز سلول های شبکه بندی قرار می گیرند و نسبت به مرکز صفحه، انتقال داده می شوند. برای گسسته سازی متغییرها روش های مختلفی وجود دارد برای مسایل ناپایدار، فضای محاسباتی به گام های زمانی با اندازه معین گسسته می شود. اگر مقدار f در گام محاسباتی با توجه به مقدار آن در گام زمانی قبلی به دست آید، در آن صورت، روش گسسته سازی زمانی صریح¹⁰ نامیده می شود. اگر مقدار f با توجه به گام زمانی قبلی و حال محاسبه شود در آن صورت روش حل را ضمنی¹¹ می نامند. روش حل صریح زمانی پایدار است که عدد کورانت¹² آن در فضای محاسباتی کمتر از یک باشد اما برای کاربرد های خاص نظیر جریان موجی، همگرایی مطلوبی دارد. روش ضمنی، به گام زمانی وابسته نیست و پایدار است از این رو در بسیاری از موارد به کار می رود مگر آن که پیچیدگی مسئله زیاد شود. طرح گام زمانی¹³ ممکن است به صورت مرتبه اول یا دوم باشد. (اصلی ترین عیب روش مرتبه دوم، افزایش زمان محاسباتی و حافظه مورد نیاز برای حل مسئله است) [8].

گام زمانی مرتبه اول:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t} \quad (6)$$

گام زمانی مرتبه دوم:

تغییر می کند و به روش حل و نیروی متوسط وارد بر جریان وابسته است [8].

5- نتایج حاصل از مدل سازی

بردار های سرعت و توزیع گاز متان در صفحه ای به موازات سقف مدل، در امتداد طولی با فاصله سی پنج سانتی متری از سقف در شکل 3 الف و ب ارایه شده اند. با توجه به شکل 3 الف، جریان هوا از انتهای لوله تهویه خارج و پس از برخورد به جبهه کار جهت آن عوض شده به سمت سطح آزاد حرکت می کند. در شکل 3 ب توزیع گاز متان در صفحه افقی با فاصله 35 سانتی متری از زیر سقف ارایه شده است با توجه به شکل گاز متان با تجمع بالا در محل برخورد جبهه کار به دیواره سمت راست در بالای شکل مشاهده می شود. دلیل این امر کاهش سرعت جریان هوا در اثر تغییر جهت جریان و موقعیت قرار گیری گوشه جبهه کار نسبت به لوله تهویه است. ناحیه دیگر با تجمع بالای گاز در نیمه سمت راست دیده می شود که دلیل این امر وجود جریان برگشتی هوا با سرعت بالا است.

شکل های 4 الف و ب توزیع بردار های سرعت و توزیع گاز متان در صفحه قائم در امتداد خط مرکزی لوله تهویه را نشان می دهند. در شکل 4 الف، جریان هوا از لوله تهویه با فشار خارج شده و به سمت جبهه کار ادامه می یابد و به صورت عرضی نیروی ممنتیم خود را با هوای اطراف مبادله می کند. با توجه به شکل 4 ب، تجمع بالای گاز متان در محل تقاطع جبهه کار با سقف و کف اتفاق می افتد. هر چند که درصد تجمع گاز متان در زیر لوله تهویه بالا است، اما می توان دید که گاز متان در اطراف جبهه کار به حدی رقیق شده است که با راندمان مناسب تخلیه شود. در شکل های 5 الف و ب نیمرخ سرعت و توزیع گاز متان در صفحه ای به موازات جبهه کار با فاصله 4/75 متری ارایه شده است. در شکل 5 الف جریان بازگشتی با سرعت بالا در کنار دیواره سمت چپ مشاهده می شود. با بررسی شکل 5 ب می توان دریافت که نواحی با تجمع بالای گاز متان در این شکل، منطبق با نواحی

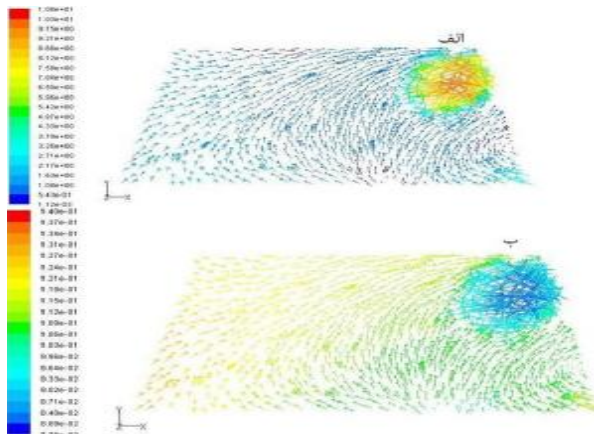
جریان برگشتی شکل 5 الف است. این امر نشان دهنده رابطه نزدیکی بین شکل جریان بازگشتی و تجمع گاز متان است.

6- اعتبار سنجی نتایج

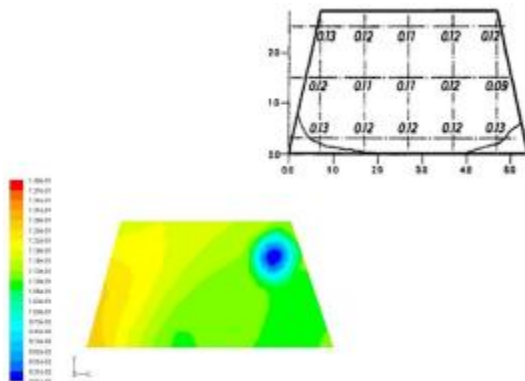
در شکل 6 به ترتیب نتایج حاصل از اندازه گیری برجا و مدل سازی عددی در فاصله 6/6 متری از جبهه کار معدن مایکی ارایه شده است. با توجه به این اشکال می توان دریافت که گاز متان با تجمع کمتری در نزدیکی لوله تهویه در سمت راست جبهه کار و گاز متان با تجمع بالا در سمت چپ جبهه کار قرار دارد که این امر به دلیل وجود درصد بالای هوای پاک در سمت راست جبهه کار نسبت به سمت چپ آن و وجود جریان برگشتی هوا با سرعت بالا در کنار دیواره سمت چپ است. در شکل 7 نتایج حاصل از مدل سازی در امتداد عرض جبهه کار، در ارتفاع های 0/2، 1/5، 2/5 متری و در فاصله 6/6 متری از جبهه کار با اندازه گیری برجا انجام شده در معدن مایکی مقایسه شد. با توجه به شکل 7 همگرایی مطلوبی بین نتایج حاصل از مدل سازی و اندازه گیری برجا وجود دارد به طوری که در ارتفاع 1/5 و 2/5 متری، نتایج حاصل از مدل سازی تقریباً با داده های تجربی برابر است اما در ارتفاع 0/2 و در فواصل 2 تا 5 متری عرض تونل بین نتایج حاصل از مدل سازی و اندازه گیری برجا اختلافی وجود دارد که این اختلاف نیز بسیار پائین بوده و می توان همگرایی بین داده های حاصل از مدل سازی و اندازه برجا را مطلوب دانست.

7- نتیجه گیری

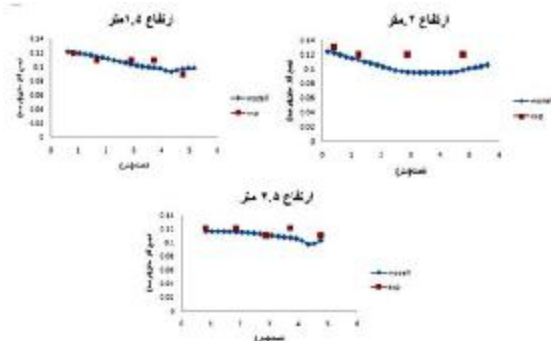
برای بهینه سازی شرایط کاری در جبهه کار های معدنی شناخت دقیق از رفتار سه بعدی گاز متان بسیار ضروری است. مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی عددی با اندازه گیری های برجا نشان می دهد که دینامیک سیالات محاسباتی ابزار توانمندی است که از آن می توان داده های مورد نیاز برای کنترل جریان هوا و توزیع گاز در سینه کارهای معدنی را استخراج کرد. نتایج زیر با توجه به مدل سازی های انجام گرفته با



شکل 5. نیمرخ سرعت و توزیع گاز متان در فاصله 4/75 متری از سینه کار



شکل 6. مقایسه اندازه گیری برجا با نتایج حاصل از مدل سازی



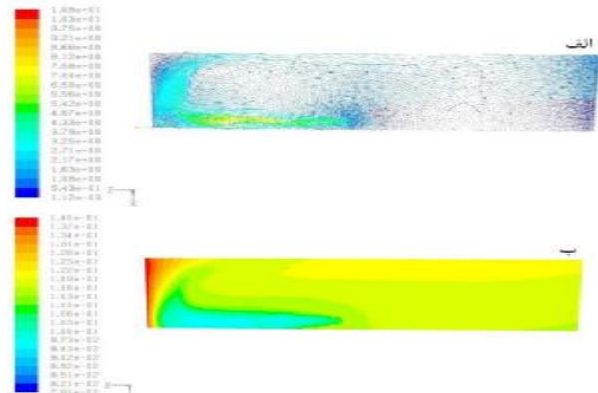
شکل 7. مقایسه نتایج حاصل از مدل سازی با اندازه گیری های برجا انجام شده در معدن مایکی در امتداد عرضی جبهه کار و در ارتفاع های مختلف

منابع

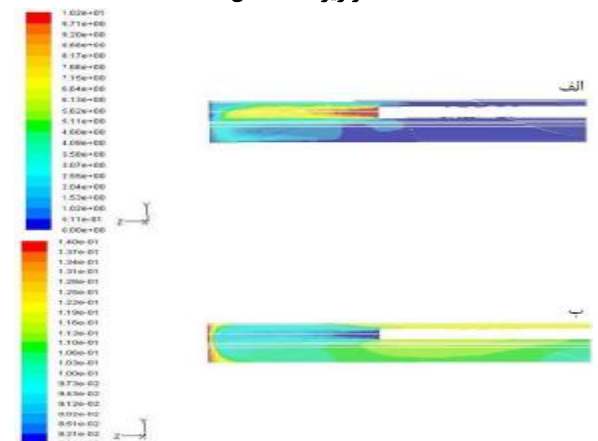
- [1] Heerden, V., (۱۹۹۳). "Application of CFD for evaluation of dust suppression and auxiliary ventilating systems used with continuous mines". In *Proceedings of the US Mine Ventilation Symposium*, pp ۲۸۰-۲۹۰.
- [2] Brunner, D., (۱۹۹۵). "Examples of the application of computational fluid dynamics simulation to mine and tunnel ventilation". in, Lexington, KY, USA, pp ۴۷۹-۴۸۴.
- [3] Wala, A., (۲۰۰۳). "New approaches to mine-face ventilation", *journal of the mining Engineering*, pp ۲۵-۳۰.

استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای حرکت هوا و توزیع گاز متان به دست آمد.

رابطه مستقیمی بین جریان بازگشتی گاز های خروجی و درصد تجمع گاز متان که باید از جبهه کار خارج گردد وجود دارد. به ویژه اینکه درصد تجمع بالای گاز متان در نواحی با جریان برگشتی سرعت بالا دیده می شود. در محل برخورد دیواره جبهه کار به کف و سقف کارگاه، گوشه و در زیر لوله تهویه گاز متان با درصد تجمعی بالا دیده می شود.



شکل 3. بردار های توزیع گاز متان و سرعت در صفحه افقی 35 سانتی متر زیر سقف مدل



شکل 4. بردار های سرعت و توزیع گاز متان در امتداد صفحه گذرنده از مرکز لوله تهویه

- 3.Wala
- 4.Silvester
- 5.لیسانس نرم افزار فلوئنت توسط دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیر کبیر خریداری شده است.
- 6.wall
- 7.Mass flow inlet
- 8.Velocity inlet
- 9.Pressure outlet
- 10.explicit
- 11.Implicit
- 12.Courant Number
- 13.Time step
- 14.Segregated
- 15.Coupled

[۴] Silvester S. A, (۲۰۰۴). "The ventilation of an underground crushing plant", Mining Technology pp ۲۰۱-۲۱۴.

[۵] Nakayama S. (۱۹۹۸). "simulation of methane gas distribution at heading face "journal of the mining and materials processing pp ۱۷-۲۳.

[۶] Nakayama. S, (۱۹۹۵). "Analysis of ventilation air flow at heading face by Computational Fluid Dynamics" journal of the mining and materials processing pp ۲۷-۳۲.

[۷] Ichinose. M, (۱۹۹۸) "In-situ Measurement and simulation by CFD of methane gas distribution at heading face . journal of the mining and materials processing pp ۳۲-۴۰.

[8] نیکنام، بهزاد (1388). "طراحی سیستم تهویه تونل البرز (آزاد راه تهران - شمال)"، پایان نامه کارشناسی ارشد استخراج معدن دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

زیرنویس

1.Van Heerden

2.Brunner