

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی انتشار گاز زغال بر اساس عدم قطعیت گازخیزی در معادن زغال‌سنگ

شکوفه رحیمی^۱، مجید عطایی‌پور^{۲*}، حسن مدنی^۳

۱. دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، rahimi.shokofe@aut.ac.ir

۲. دانشیار مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، map60@aut.ac.ir

۳. استادیار مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، hmadani@aut.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۱ - پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۰)

چکیده

پیش‌بینی انتشار گاز زغال قبل از استخراج بسیار دشوار است زیرا به عواملی از جمله زمین‌شناسی، جغرافیا و بهره‌برداری (عملیاتی) بستگی دارد. گازخیزی، یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی انتشار گاز در لایه زغال‌سنگ در طول استخراج و پس از آن است. مهمترین هدف از بررسی مطالعات گازخیزی، تعیین حجم گازی است که در اعماق مختلف، به هنگام استخراج زغال از آن متصاعد می‌شود زیرا محاسبات مربوط به حجم هوای لازم برای تهویه معادن زغال، به طور عمده بر این اساس انجام می‌گیرد. مقادیر زیاد گاز آزاد شده در طول استخراج معدن موجب نگرانی در مورد جریان هوای کافی برای تهویه و ایمنی کارگران می‌شود. از این رو، عملکرد سیستم تهویه برای یک معدن زیرزمینی بسیار مهم است. در این مقاله، ابتدا عدم قطعیت گازخیزی در یک لایه زغال‌سنگ بررسی می‌شود که از داده‌های مرکزی ۶۴ گمانه اکتشافی استفاده شده است. بعد از شناسایی لایه‌های مهم زغال‌سنگ از نظر انتشار گاز، مدل‌سازی واریوگرام برای گازخیزی انجام شد تا توزیع تعریف شود. شبیه‌سازی‌های متوالی برای ارزیابی تصادفی گازخیزی انجام شدند. سپس روشی برای پیش‌بینی انتشار گاز بر اساس روش شبیه‌سازی تصادفی، مونت کارلو ارائه شده است. برای بهبود صحت و اطمینان از پیش‌بینی انتشار گاز، عوامل مختلفی که بر میزان انتشار گاز تأثیرگذارند، مورد تحقیق قرار گرفتند و عامل اصلی تعیین‌کننده میزان انتشار گازها با داده‌های معدن و تحلیل حساسیت تعیین شد. به این منظور شش عامل برای پیش‌بینی انتشار گاز انتخاب شده که شامل گازخیزی لایه اصلی، ضخامت لایه اصلی، آهنگ پیشروی، آهنگ تولید، گازخیزی لایه‌های مجاور، ضخامت لایه‌های مجاور است. خطای نسبی این روش ۲ درصد و خطای میانگین ۰/۵۷ است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ارائه شده، برای استفاده در یک معدن زیرزمینی زغال برای تعیین مقدار گاز منتشر شده و تهویه مناسب دقت کافی دارد. همچنین مقدار پیش‌بینی شده اساساً با مقدار واقعی سازگار و روش پیش‌بینی انتشار گاز بر اساس تئوری عدم قطعیت قابل اعتماد است و همچنین روشی مناسب برای پیش‌بینی و ارزیابی انتشار گاز زغال‌سنگ در آینده است.

کلمات کلیدی

انتشار گاز زغال، شبیه‌سازی مونت کارلو، پیش‌بینی، شبیه‌سازی زمین‌آماري، عدم قطعیت گازخیزی.

۱- مقدمه

معدنکاری در زغال‌سنگ به ویژه استخراج زیرزمینی لایه زغال، یکی از پر مخاطره‌ترین فعالیت‌های صنعتی هر کشور است. مساله گاز در لایه زغال سبب وجود مشکلات جدی در استخراج زغال‌سنگ در سراسر جهان شده است و این امر منجر به تلاش‌های تحقیقاتی فشرده و جدی برای بهبود تکنیک‌های تهویه و زهکشی گاز شده است. گاز زغال در معدن زغال‌سنگ منجر به ایجاد آتش سریع، انفجار و رویدادهای دیگر می‌شود. این مخاطرات، به حجم گازی که به فضای معدن وارد می‌شود بستگی دارد.

پیش‌بینی انتشار گاز، مبنای مهمی برای طراحی سیستم تهویه است و نقش مهمی در کاهش انفجار گاز و اطمینان از ایمنی در تولید زغال ایفا می‌کند [۳۶]. از این رو صحت پیش‌بینی، مستقیماً بر شاخص‌های اقتصادی- فناوری معدن به ویژه برای معادن بزرگ تاثیر می‌گذارد [۹]. محاسبه گازخیزی لایه‌های زغال‌سنگ و پیش‌بینی انتشار گاز از سنگ‌های اطراف آن در معدن زغال‌سنگ بسیار اساسی است. انتشار گاز سیستم پیچیده‌ای دارد که هنوز مقدار متغیرهای تاثیرگذار آن به طور دقیق مشخص نیست و همچنین نمی‌توان مدل مشخصی را برای پیش‌بینی دقیق انتشار گاز تعیین کرد [۱۰].

مهمترین فاکتور تاثیرگذار بر روی میزان انتشار گاز، ویژگی گازخیزی لایه‌های زغال‌سنگ و سنگ‌های اطراف آن است. فاکتورهایی مانند عوامل زمین‌شناسی و عملیاتی هنگامی که زغال در حال استخراج است، انتشار گاز موجود در معدن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. سهم هر یک از این عوامل در کل میزان انتشار، متفاوت و در اکثر موارد، تفکیک از یکدیگر دشوار است [۲۹].

گاز ممکن است، از منابع گازی و یا از لایه اصلی، قبل و یا حین استخراج خارج شود. انتشار گازهای زیاد و نامنظم در روش استخراج جبهه‌کار طولانی، نیاز به بهینه‌سازی روش‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی این میزان گاز و تهویه مورد نیاز برای رقیق‌سازی گاز را فراهم آورده است.

در دهه ۵۰ میلادی، برخی از روش‌ها و فرآیندهای اندازه‌گیری گازخیزی لایه‌های زغال‌سنگ ارایه و از روش آماری برای محاسبه و پیش‌بینی میزان گازخیزی و انتشار گاز در معادن زغال‌سنگ استفاده شده است. در دهه ۸۰، روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی انتشار گاز پیشنهاد و ارایه شد. از آن زمان به بعد روش آنالوژی^۱، مدل ریاضی زمین‌شناسی^۲، روش

سرعت^۳ و سایر روش‌های پیش‌بینی انتشار گاز مطرح شده و به کار گرفته می‌شود. تمام روش‌ها و فناوری‌های جدید یک پایه علمی برای طراحی و ساخت مجدد معدن ارایه می‌دادند [۲۱]. بعضی از روش‌های جدید برای پیش‌بینی انتشار گاز در لایه زغال عبارتند از: رگرسیون خطی چند متغیره^۴ [۳۰]، نظریه سیستم خاکستری^۵ [۳۳]، شبکه عصبی^۶ [۳۶]، ماشین بردار پشتیبان^۷ [۷-۱۱]، روش خوشه‌بندی [۱۴]، تئوری شواهد^۸ [۶]، تئوری آشوب^۹ [۳۱]، تئوری فراکتال^{۱۰} [۱۲] و تئوری ناهمواری^{۱۱} [۳۲] است.

برای پیش‌بینی توزیع ضخامت زغال‌سنگ [۱۷-۲۴]، کیفیت زغال [۲۲-۱۶-۱۵-۱۳-۴-۳]، تناژ زغال‌سنگ [۱۵] و گازخیزی [۳۴] از روش شبیه‌سازی متوالی گاوسی و روش کریجینگ معمولی استفاده می‌شود [۳] سپس می‌توان از این توزیع‌ها برای ارزیابی عدم قطعیت در برآورد انتشار گاز استفاده کرد [۳۷].

در دهه اخیر برای پیش‌بینی دقیق انتشار گاز در معادن زغال‌سنگ، از روش داده‌های خود سازماندهی شده^{۱۲} استفاده شده است [۲۱]. نتایج نشان می‌دهد که روش داده‌های خود سازماندهی شده می‌تواند به طور خودکار رابطه غیرخطی بین انتشار گاز و عوامل تاثیرگذار را تجزیه و تحلیل کند. در روند استخراج در این معدن زغال‌سنگ، عوامل زیادی در مورد ایمنی و بلایا در نظارت جامع برای کنترل موثر بلایای گازی انجام شده است. برای راحتی تجزیه و تحلیل، گازخیزی، ضخامت زغال‌سنگ، سرعت پیشروی، تولید زغال، گازخیزی لایه مجاور، ضخامت لایه، فاصله لایه مجاور برای پیش‌بینی انتشار گاز انتخاب شد. تاثیر ضخامت لایه مجاور در بین این هفت عامل نسبتاً ضعیف‌تر از سایر عوامل است، نتایج مدل‌سازی اساساً مطابق با وضعیت واقعی است [۲۱].

با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی^{۱۳} با داده‌های تجربی شناخته شده به پیش‌بینی مقدار انتشار گاز پرداخته شده است. گازخیزی، عمق لایه‌های زغال‌سنگ، ضخامت، زمین‌بستر

2- Gas geology mathematical model

3-Velocity method

4- Multivariate regression linear

5- Grey system theory

6- Neural network

7- Support vector machine

8- Evidence theory

9- Chaos theory

10- Fractal theory

11- Rough set theory

12- self-organizing data mining method

13- Artificial neural network

1- Analogy method

زغال سنگ^۱، ضخامت جبهه کار، طول جبهه کار، سرعت پیشروی، نسبت بازیابی، گازخیزی در لایه مجاور، ضخامت در لایه مجاور، فاصله لایه‌ها از هم، سنگ‌شناسی لایه بین لایه، شدت استخراج به عنوان متغیرهای مستقل در حالی که مقدار انتشار گاز به عنوان متغیرهای وابسته مورد مطالعه گرفته است. با تجزیه و تحلیل ۱۸ گروه داده با استفاده از شبکه عصبی رگرسیون عمومی^۲ و شبکه عصبی چند لایه^۳، نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی رگرسیون عمومی با خطای ۰/۵ بهترین مدل برای پیش‌بینی مقدار انتشار گاز است [۲۳].

مدل‌سازی انتشار گاز متان با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو توسط محققان بسیار انجام و با مدلسازی آماری مقایسه و نتایج قابل قبولی ارائه شده است [۳۸]. در این مطالعات برای پیش‌بینی انتشار گاز متان از داده‌های مربوط به ساختار زغال سنگ، ضخامت زغال سنگ، کیفیت زغال سنگ و گازخیزی استفاده شده است [۳۸].

مدل پیش‌بینی میزان انتشار گاز با الگوریتم شبکه عصبی بهینه‌سازی شده، با استفاده از داده‌های تاریخی واقعی معدن برای آزمایش و تجزیه و تحلیل ارائه شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی المان بهینه‌سازی شده با خوشه‌بندی کلنی مورچه دارای توانایی تعمیم بهتر و دقت پیش‌بینی بیشتر، برای دستیابی به پیش‌بینی پویای انتشار گاز است [۸].

مقدار انتشار گاز متان با استفاده از ترکیب روش خاکستری- زمین‌شناسی^۴ گاز پیش‌بینی شده است. فاکتورهای اصلی تعیین‌کننده در این مطالعه، شامل گازخیزی، عمق لایه‌های زغال، ضخامت لایه زغال، تولید روزانه زغال، ساختار جغرافیایی، ضخامت لایه‌های مجاور که با تئوری زمین‌شناسی گاز تعیین شد. نتایج آزمون نشان داد که مدل دقت بالایی دارد و نتیجه پیش‌بینی قابل اطمینان است [۳۹].

در حال حاضر، محققان کارهای تحقیقاتی زیادی در زمینه پیش‌بینی انتشار گاز موجود در زغال سنگ انجام داده‌اند اما از آنجا که گاز زغال پدیده پیچیده‌ای است، تحقیقات لازم برای پیش‌بینی گازخیزی و انتشار گاز تا به امروز به یک اجماع نرسیده و تاکنون هیچ نظریه بالغ و روش محاسبه دقیق به رسمیت شناخته نشده است.

برای ارزیابی دقیق و پیش‌بینی انتشار گاز زغال سنگ،

۲- پیش‌بینی انتشار گاز

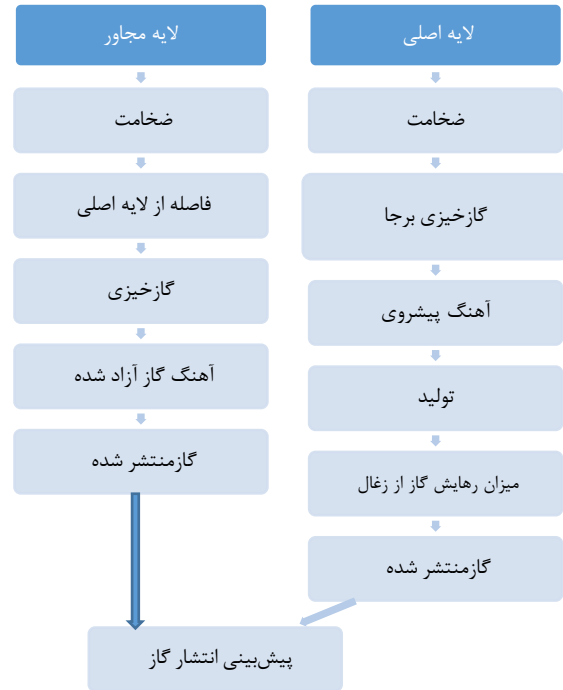
میزان انتشار گاز از جمله شاخص‌های اصلی طراحی سیستم تهویه معدن است، بنابراین پیش‌بینی دقیق انتشار گاز برای طراحی معدن و ایمنی تولید اهمیت اساسی دارد. پیش‌بینی انتشار گاز فرآیندی بسیار پیچیده است [۱۸].

این تحقیق بر مبنای شرایط موجود در معدن زغال واقع در منطقه طبس انجام شده است. شکل ۱ روند پیش‌بینی انتشار گاز را نمایش می‌دهد.

- 1- coal bed pitch
- 2- Regression neural network
- 3- Multilayer feedforward neural network
- 4- Grey- gas geology method

همکاران در سال ۱۹۷۳ ارونند معادلات مشابهی را برای معادن زغال‌سنگ ایالات متحده مشاهده کردند و نشان دادند که انتشار گاز از معادن زغال‌سنگ به مراتب بیش از (تقریباً هفت برابر) از مقدار مورد انتظار گازخیزی زغال‌سنگ به تنهایی است [۱۹]. این تمایز همچنین به تغییرات در شرایط استخراج استرالیا و ایالات متحده و تفاوت در زمین‌شناسی مربوط می‌شود.

به طور کلی مقدار گاز آزاد شده از لایه‌های اصلی و مجاور به ازای یک تن زغال استخراج شده در حدود ۶ تا ۹ برابر گازخیزی برجا است. این اختلاف به دلیل انتشار گاز از لایه‌های مجاور، مناطق مرده و جبهه‌کارهای قبلی است و همچنین به گذشت زمان نیز بستگی دارد. بخش قابل توجهی از گازی که وارد محیط استخراج شده زیرزمینی می‌شود از لایه‌های زغال‌سنگ اطراف آن سرچشمه می‌گیرد. تعداد، فاصله از لایه اصلی و ضخامت کل لایه‌های مجاور اهمیت حیاتی دارد.

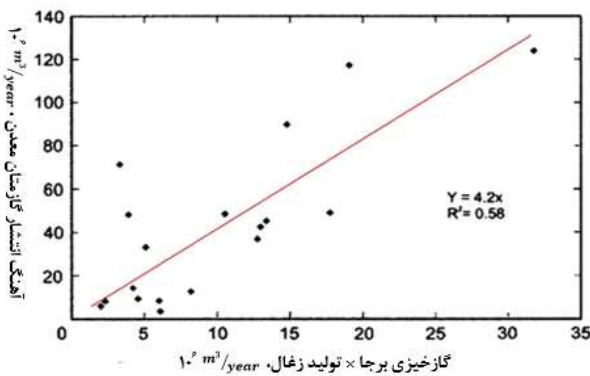


شکل ۱- روند پیش‌بینی انتشار گاز در معدن زغال‌سنگ

فاکتورهای تاثیرگذار بر روی پیش‌بینی انتشار گاز به شرح زیر است:

- گازخیزی لایه زغال‌سنگ و لایه‌های مجاور: گازخیزی را به صورت حجم گاز آزاد شده که به ازای استخراج یک تن زغال در فضای کارگاه یا تونل دنباله‌رو پراکنده می‌شود، تعریف می‌کنند که معمولاً برحسب مترمکعب بر تن بیان می‌شود [۱]. تعیین دقیق گازخیزی نقش مهمی در دقت نهایی پیش‌بینی انتشار گاز دارد. وقتی مقدار گازخیزی در لایه‌های زغال‌سنگ افزایش یابد، مقدار انتشار گاز به داخل کارگاه‌های استخراج نیز افزایش می‌یابد. در یک کلمه، گازخیزی لایه زغال‌سنگ اهمیت بسیار برای تعیین میزان انتشار گاز دارد.

مقدار انتشار گاز با افزایش گازخیزی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، مقدار انتشار گاز در کارگاه استخراج بیش از مقدار گازخیزی موجود در لایه زغال‌سنگ است، این اثبات می‌کند که منبع انتشار مقدار گاز فقط از لایه زغال نیست بلکه از سنگ‌های اطراف لایه زغال‌سنگ نیز گاز متصاعد می‌شود. رابطه بین انتشار گاز و گازخیزی معدن زغال‌سنگ را برای معادن استرالیا در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۸]. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان انتشار گاز بیش از چهار برابر میزان گازخیزی زغال‌سنگ است. کیسل^۱ و



شکل ۲- انتشار گاز معدن در مقابل گازخیزی زغال‌سنگ معدن [۲۵]

- ضخامت لایه زغال: لایه زغال ضخیم مقدار گاز بیشتری در خود دارد و در نتیجه باعث افزایش مقدار انتشار گاز می‌شود [۲۵].
- تولید روزانه زغال: میزان تولید روزانه تاثیر مشخصی بر میزان انتشار گاز دارد، بنابراین هرچه میزان تولید روزانه بیشتر باشد، میزان انتشار گاز بیشتر می‌شود [۲۹].
- ضخامت لایه‌های مجاور: وجود لایه‌های مجاور اطراف لایه اصلی زغال بر روی انتشار گاز تاثیر می‌گذارد. با افزایش ضخامت لایه‌های مجاور، میزان انتشار گاز نیز افزایش می‌یابد. بررسی ستون چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که ناحیه مورد نظر عمدتاً از شیل‌های خاکستری، سیلت‌سنگ و ماسه‌سنگ با میان لایه‌های از لایه‌های زغال‌سنگ تشکیل شده است (شکل ۳).

1- Kissel

گاز منتشر شده در جبهه کار زیرزمینی به عنوان ترکیبی از مقدار گاز رها شده از لایه زغال استخراج شده و لایه‌های مجاور تعریف شده است (رابطه ۱) [۲۰].

$$Q(y) = Q_m + \sum \frac{GC_A \times T_A}{T_M} \quad (1)$$

که در آن:

$Q(y)$: مقدار گاز منتشر شده در معدن به ازای یک تن زغال استخراج شده (مترمکعب در دقیقه)؛

Q_m : مقدار گاز منتشر شده از لایه زغال استخراج شده (مترمکعب در دقیقه)؛

T_A : ضخامت لایه مجاور (متر)؛

GC_A : گازخیزی لایه مجاور (مترمکعب در تن)؛

T_M : ضخامت لایه زغال اصلی (متر).

مقدار گاز منتشر شده از لایه اصلی تابعی از گازخیزی لایه اصلی، ضخامت لایه زغال، آهنگ تولید و پیشروی است که به صورت رابطه ۲ بیان می‌شود [۲۱].

$$Q_m = \frac{b \times T_M \times GC \times \gamma \times R}{1440} \times C_0 \quad (2)$$

که در آن:

b : عرض جبهه کار (متر) که در این تحقیق عرض جبهه کار ۲۲۰ متر در نظر گرفته شده است؛

GC : گازخیزی لایه اصلی زغال (مترمکعب در تن)؛

R : آهنگ پیشروی (متر در روز)؛

γ : وزن مخصوص نسبی زغال سنگ برابر ۱٫۳۷؛

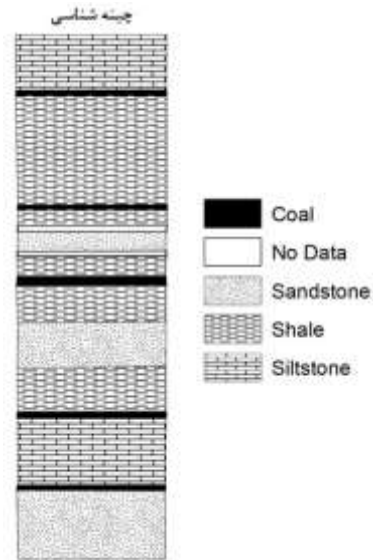
C_0 : ضریب انتشار گاز که برابر با ۰٫۱۳ در نظر گرفته می‌شود [۲۰].

معادن زغال سنگ از جمله معادنی‌اند که در آن‌ها تهویه اهمیت بیشتری نسبت به سایر معادن زیرزمینی دارد. هدف از اجرای تهویه در معادن زغال سنگ رقیق‌سازی و خارج کردن گاز زغال با به گردش درآوردن هوای درون شبکه معدن است. بنابراین می‌توان گفت بادبزن‌های معادن زغال سنگ بر اساس شدت جریان مورد نیاز شبکه معدن، شدت جریان مورد نیاز بر اساس گاز منتشر شده و میزان گاز منتشر شده بر اساس گازخیزی، ضخامت لایه زغال، آهنگ تولید، آهنگ پیشروی، ضخامت لایه‌های مجاور و گازخیزی لایه‌های مجاور تعیین می‌شود.

در نتیجه شدت جریان هوا برای رقیق‌سازی گازهای حاصل از گازخیزی به صورت رابطه ۳ بیان می‌شود [۲].

$$Q = \frac{100 Q(y)}{D - D_0} \quad (3)$$

که در آن:



شکل ۳- ستون چینه‌شناسی منطقه طبس

با توجه به فاکتورهای تاثیرگذار بر میزان انتشار گاز در جبهه کار معدن و همچنین بر اساس مطالعات انجام شده، پس از انتخاب پارامترها تحلیل حساسیت برای محاسبه همبستگی میزان انتشار گاز با گازخیزی R_1 ، ضخامت زغال R_2 ، آهنگ پیشروی R_3 ، آهنگ تولید R_4 ، گازخیزی لایه مجاور R_5 و ضخامت لایه مجاور R_6 انجام شده است که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- نتیجه محاسبه درجه همبستگی

R_6	R_5	R_4	R_3	R_2	R_1	درجه همبستگی
۰٫۶۵	۰٫۶۹	۰٫۷۳	۰٫۶	۰٫۷	۰٫۷۵	

با توجه به نتیجه تحلیل حساسیت، همبستگی میزان انتشار گاز با عوامل تاثیرگذار، بالای ۰٫۶ بسیار قوی است. این پارامترها مهم‌ترین فاکتورهای تاثیرگذار بر روی میزان انتشار گازند اما میزان گازخیزی، ضخامت زغال، آهنگ تولید نقش بسزایی در میزان انتشار گاز ایفا می‌کند که شایسته است در هنگام ساخت مدل پیش‌بینی انتشار گاز مورد توجه قرار گیرد. در این معدن نرخ پیشروی تاثیر کمتری بر روی میزان انتشار گاز دارد.

میزان انتشار گاز در طیف گسترده‌ای از شرایط زمین‌شناسی و معدن به طور قابل توجهی متفاوت است. در طی فرآیند استخراج، گاز آزاد شده از لایه‌های اصلی زغال و لایه‌های مجاور با هوای تهویه مخلوط می‌شود و مقدار هوای ناکافی در سیستم تهویه باعث انباشت گاز در معدن و در شرایط خاص ممکن است منجر به انفجار ناگهانی شود. بنابراین، پیش‌بینی دقیق آهنگ جریان گاز به داخل جبهه کار و در نهایت به سیستم تهویه به دلیل تعداد زیاد متغیرهایی که درگیر منابع انتشار گازند، پیچیده است.

مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار بر روی انتشار گاز بر اساس اهمیت آن و اسناد بررسی شده در پژوهش‌های قبلی عبارت از گازخیزی، ضخامت زغال، آهنگ پیشروی، آهنگ تولید، گازخیزی لایه مجاور و ضخامت لایه مجاور است. فاکتورهای تاثیرگذار به عنوان متغیر مستقل و انتشار گاز به عنوان متغیر وابسته‌اند. ابتدا عدم قطعیت گازخیزی برجا با استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماري محاسبه و به عنوان تابع ورودی وارد شبیه‌سازی مونت کارلو می‌شود. بقیه پارامترهای تاثیرگذار به صورت ثابت وارد فرآیند شبیه‌سازی می‌شوند. شبیه‌سازی مونت کارلو برای تولید یک لیست نمونه‌های تصادفی برای آنالیزهای مستقل و ترکیبی پارامترهای ورودی و تاثیر آن برای متغیر خروجی استفاده می‌شود. خروجی شبیه‌سازی مونت کارلو، پیش‌بینی گاز منتشر شده و نیز هوای مورد نیاز برای تهویه است.

Q: شدت جریان هوای مورد نیاز (مترمکعب در دقیقه)؛

Q(y): مقدار گاز منتشرشده در معدن به ازای یک تن زغال

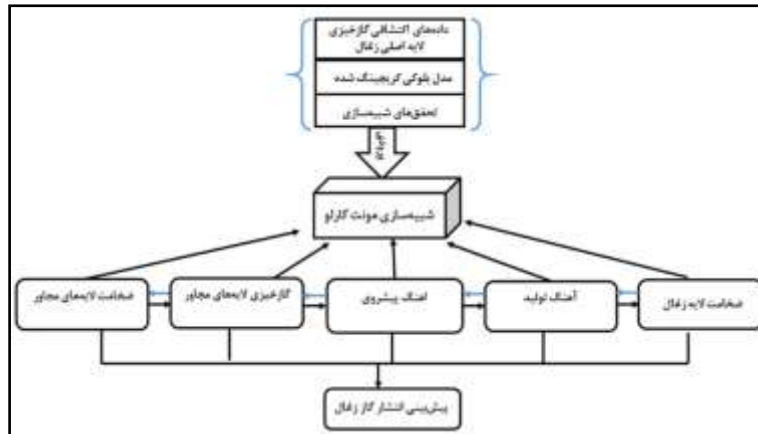
استخراج شده (مترمکعب در دقیقه)؛

D: عیار مجاز گاز منتشرشده؛

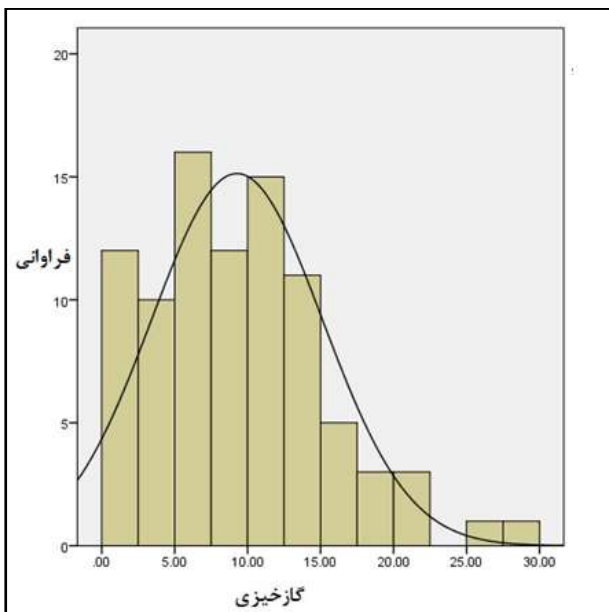
D₀: عیار مجاز گاز منتشرشده در مسیر ورودی هوا.

۳- روش کار

در این بخش، تعریفی از مراحل کار که شامل روش شبیه‌سازی مونت کارلو همراه با روش‌های زمین‌آماري ارایه شده است. شکل ۴ فرآیند روش تحقیق را در قالب یک فلوچارت نشان داده است. هدف از این تحقیق، ترکیب دو مفهوم شبیه‌سازی، یعنی شبیه‌سازی زمین و شبیه‌سازی مونت کارلو است. در این روش، تحقیق بر پایه شبیه‌سازی زمین آماری به عنوان ورودی برای فرآیند شبیه‌سازی مونت کارلو است.



شکل ۴- فلوچارت فرآیند روش تحقیق.



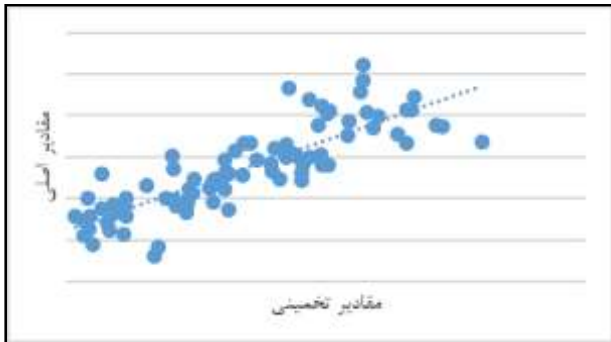
شکل ۵- نمودار توزیع فراوانی داده‌های گازخیزی.

۳-۱- روش زمین‌آماري

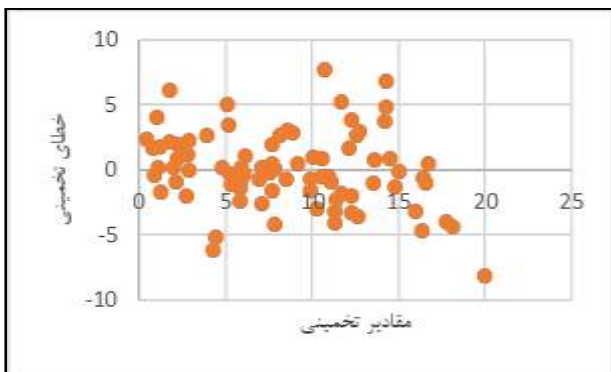
در این مطالعه، برای پیش‌بینی گازخیزی زغال‌سنگ، داده‌های ۶۴ حفره اکتشافی گردآوری شده است. باید قبل از انجام هرگونه مدل‌سازی فضایی، نرمال بودن بررسی شود. گازخیزی به عنوان متغیر ناحیه‌ای انتخاب و فراوانی نمای آن طبق شکل ۵ رسم شد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود جامعه تقریباً نرمال است. میانگین، کمینه و بیشینه گازخیزی به ترتیب ۸٫۵۲، ۰٫۴۴ و ۲۰ مترمکعب در تن است.

شکل ۶ نمودار تغییرات گازخیزی محدوده طبس را نسبت به عمق نشان می‌دهد. همان‌طور که گفته شد گازخیزی با افزایش عمق افزایش می‌یابد [۲۶]. با توجه به اینکه داده‌های گازخیزی نسبت به عمق روند خاصی دارند، بنابراین نمی‌توان از کریجینگ معمولی استفاده کرد و باید روش کریجینگ عمومی را به کار برد.

طرح‌های فضایی سازگار با داده‌ها و واریوگرام‌های ورودی تولید می‌کنند. شبیه‌سازی در مقایسه با کریجینگ از نظر ارزیابی عدم قطعیت عملکرد بهتری دارد [۲۷]. در این تحقیق، ۲۰ تحقق برای ارزیابی عدم قطعیت گازخیزی ساخته شده تا از تصادفی بودن آن‌ها اطمینان حاصل شود. در شکل ۹ نمودار عدم قطعیت گازخیزی نمایش داده شده است.

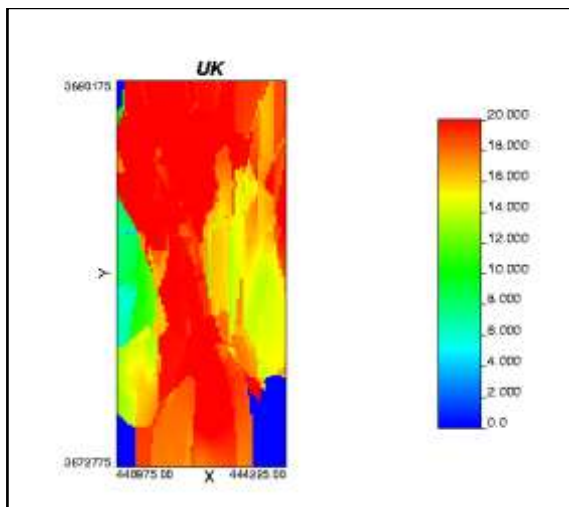


(الف)

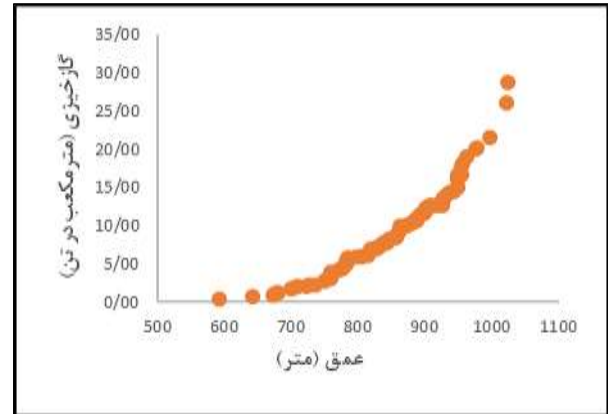


(ب)

شکل ۷- الف- رگرسیون بین مقادیر واقعی و تخمینی ب- رابطه بین خطای تخمینی و مقدار تخمینی.



شکل ۸- مدل بلوکی گازخیزی با استفاده از کریجینگ عمومی.



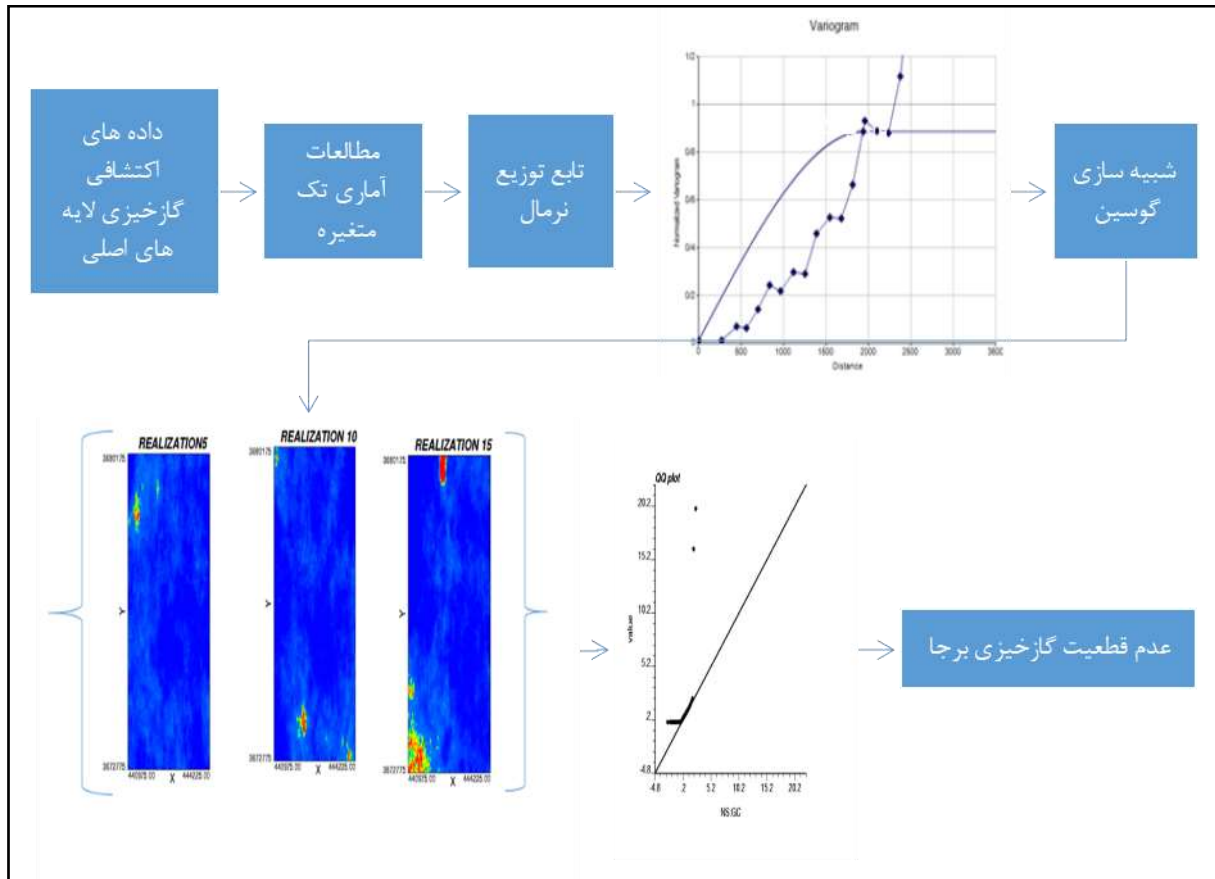
شکل ۶- تغییرات گازخیزی نسبت به عمق.

برای برآورد مناسب و تعیین پارامترهای مربوط به شبیه‌سازی، باید واریوگرافی را ارزیابی کرد. تحلیل واریوگرافی، بررسی همبستگی داده‌ها با فاصله را ممکن می‌سازد. با رسم واریوگرام‌های مختلف در جهات مختلف، ناحیه دارای ناهمسانگري هندسی است. در این مطالعه، سه واریوگرام (کروی، نمایی و گاوسی) برای برازش به واریوگرام تجربی به کار می‌روند. برای انتخاب بهترین مدل واریوگرام، آمار اعتبارسنجی متقابل بعد از کریجینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از ضوابط ارزیابی برآورد، مدل کروی به عنوان مدل بهترین برازش برای واریوگرام داده‌های گازخیزی اندازه‌گیری شده بر حسب مترمکعب در هر تن زغال‌سنگ انتخاب می‌شود.

نتایج اعتبارسنجی متقابل و خطای پیش‌بینی برای مدل کروی، در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود، مدل کروی دقت برآورد قابل‌قبولی دارد و بنابراین به عنوان بهترین مدل برای برازش به داده‌های گازخیزی زغال‌سنگ انتخاب می‌شود.

برای تخمین گازخیزی، کل محدوده به بلوک‌های $50 \times 50 \times 5$ متر تقسیم شده است (۳۳ اندازه هر بلوک است) و میزان گازخیزی هر بلوک با روش کریجینگ عمومی برآورد شده است. در این تحقیق برای مدل‌سازی زمین‌آماري و تخمین میزان گازخیزی به روش کریجینگ عمومی از نرم‌افزارهای دیتامین و Gslib استفاده شده است. شکل ۸، مدل بلوکی گازخیزی را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی متوالی گاوسی (SGSIM)، یک روش شبیه‌سازی مبتنی بر واریوگرام است. نتایج شبیه‌سازی شده به صورت مدل سه‌بعدی با عنوان تحقق ارائه می‌شود و هر تحقق نشان‌دهنده یکی از حالت‌های ممکن برای کانسار مورد نظر است. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، عدم قطعیت برای هر یک از بلوک‌ها به دست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی شده با تحقیقات،



شکل ۹- نمودار روند شبیه‌سازی زمین‌آماري گازخیزی.

۲-۳- شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از کاراترین روش‌های مورد استفاده برای تحلیل مسایل پیچیده و یک الگوریتم محاسبه‌گر است [۵]. اولین قدم برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو، تعیین تابع توزیع برای متغیرهای تصادفی است. شبیه‌سازی مونت کارلو بیشتر برای توصیف روشی به منظور انتشار عدم قطعیت‌های موجود در ورودی مدل به عدم قطعیت‌ها در خروجی مدل، به کار می‌رود. بنابراین مونت کارلو، نوعی شبیه‌سازی است که به طور صریح و کمی، عدم قطعیت را نمایش می‌دهد. شبیه‌سازی مونت کارلو متکی به فرآیند نمایش صریح عدم قطعیت با تعیین ورودی‌ها به عنوان توزیع‌های احتمال است. اگر ورودی‌های توصیف‌کننده یک سیستم، غیرقطعی باشند، آن‌گاه پیش‌بینی عملکرد پیش‌رو به طور قطع غیرقطعی است. پارامترهای زیادی برای ایمنی و کنترل فاجعه در معدن در نظر گرفته شده است. در این تحقیق تحلیل شش فاکتور مهم برای پیش‌بینی گاز مورد بررسی قرار گرفته شده است. این شش فاکتور شامل: گازخیزی m^3/t ، ضخامت زغال m ، آهنگ پیشروی m/d ، آهنگ تولید t/d ، گازخیزی لایه مجاور m^3/t و ضخامت لایه مجاور m است. سپس برای هر پارامتر یک

توزیع احتمالی متناسب با آن انتخاب شد و در گام بعدی، برای هر توزیع یک مقدار تصادفی به دست می‌آید که با تکرار این فرآیند، محتمل‌ترین پاسخ به صورت توزیعی با یک مقدار حداقل و حداکثر به دست می‌آید. گازخیزی، ضخامت لایه زغال، آهنگ پیشروی، آهنگ تولید، گازخیزی لایه‌های مجاور و ضخامت لایه‌های مجاور متغیرهای غیرقطعی یا تصادفی‌اند که آن‌ها بر میزان جریان هوای لازم در جبهه کار تاثیر می‌گذارند. تابع توزیع‌ها با استفاده از اطلاعات تاریخی، مبتنی بر تجربه یا آزمایش انجام می‌شود. برای گازخیزی، تابع توزیع نرمال با میانگین 8.52 و انحراف معیار 4.89 است. پس از فرض توزیع احتمال و پارامترهای توزیع همراه متغیرهای تصادفی، ابتدا شبیه‌سازی مونت کارلو برای 100 بار به مورد اجرا درآمد. برای به دست آوردن سطح خوبی از توزیع احتمال باید تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی مونت کارلو افزایش یابد که در این تحقیق، شبیه‌سازی مونت کارلو برای 1000 بار اجرا شده است.

بنابراین با جاگذاری مقادیر تصادفی در رابطه ۱ و ارزیابی آن، تغییرات خروجی سیستم قابل پیش‌بینی است. مشخصات پارامترهای تاثیرگذار برای پیش‌بینی انتشار گاز در جدول ۲ آورده شده است.

۴- نتایج و بحث

در این تحقیق از ترکیب دو مفهوم شبیه‌سازی، یعنی شبیه‌سازی زمین‌آماری برای گرفتن عدم قطعیت گازخیزی برج‌ها و شبیه‌سازی مونت کارلو، برای پیش‌بینی انتشار گاز زغال بر اساس عدم قطعیت گازخیزی برج‌ها استفاده است که بر این اساس بتوان تهبویه مناسبی برای معدن برنامه‌ریزی کرد.

سیستم تولید معادن زغال‌سنگ یک سیستم پویای بزرگ و پیچیده است که به صورت فضا-زمان به هم پیوسته است، انتشار گاز یک فرآیند غیرخطی پیچیده است [۱۰] که دارای بسیاری از عوامل تاثیرگذار است. داده‌های تاثیرگذار در مورد انتشار گاز همیشه مستقل از یکدیگرند و اغلب درجات غیرخطی مختلفی را نشان می‌دهند که از نظارت در معادن زغال‌سنگ به دست می‌آید. با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی زمین‌آماری (عدم قطعیت گازخیزی برج‌ها) به همراه پنج فاکتور دیگر، پیش‌بینی گاز منتشر شده با شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌سازی شده است. بر این اساس، روش شبیه‌سازی مونت کارلو رابطه بین میزان انتشار گاز و فاکتورهای تاثیرگذار را تحلیل و سپس میزان انتشار گاز را پیش‌بینی

می‌کند. در ضمن گازخیزی، ضخامت لایه زغال سنگ، آهنگ تولید زغال‌سنگ و گازخیزی لایه‌های مجاور نقش زیادی در میزان انتشار گاز دارند که در هنگام ساخت مدل پیش‌بینی میزان انتشار گاز، باید مورد توجه قرار گیرد. جدول ۳ پیش‌بینی میزان انتشار گاز را نشان می‌دهد که میانگین خطای نسبی آن ۲ درصد است، این بدان معناست که دقت پیش‌بینی انتشار گاز بالا بوده است و در نهایت در جدول ۴ میزان هوای مورد نیاز با جاگذاری در رابطه ۳ و با توجه به فاکتور ایمنی ۱/۲ در معدن زغال درج شده است.

بر اساس مقایسه بین نتیجه پیش‌بینی مقدار انتشار گاز و مقدار اندازه‌گیری شده که در جدول ۳ و شکل ۱۰ نشان داده شده است، می‌توان گفت که نتیجه پیش‌بینی تقریباً مشابه اندازه‌گیری واقعی با خطای میانگین ۰/۵۷ و حداکثر خطای ۰/۹ است. همچنین شکل ۱۱ رابطه بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد که صحت مدل پیش‌بینی ساخته شده با سیستم و قابلیت اطمینان نتیجه پیش‌بینی را اثبات می‌کند، مبنایی قابل اطمینان برای پیش‌بینی مقدار انتشار گاز در معدن است.

جدول ۲- پارامترهای تاثیرگذار بر روی انتشار گاز.

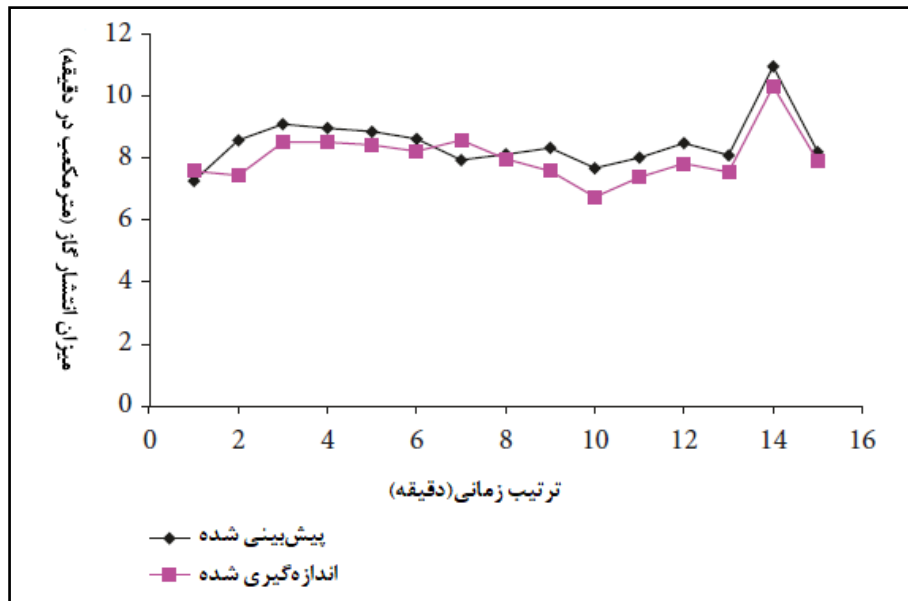
ردیف	گاز منتشر شده (مترمکعب بر دقیقه)	گازخیزی (مترمکعب بر تن)	ضخامت لایه زغال (متر)	آهنگ پیشروی (متر بر روز)	آهنگ تولید (تن بر روز)	گازخیزی لایه‌های مجاور (مترمکعب بر تن)	ضخامت لایه‌های مجاور (متر)
۱	۷،۵۸	۶،۹۵	۲،۵	۳،۴	۷۲۵	۷،۰۴	۲،۵
۲	۷،۴۴	۷،۳۷	۲،۶	۳،۶	۷۲۷	۷،۸۸	۲،۱
۳	۸،۵۱	۷،۵۹	۲،۱	۳،۵	۷۸۹	۷،۶۳	۲،۴
۴	۸،۵۱	۷،۸۴	۲،۵	۳،۸	۷۶۸	۷،۹۱	۲،۱
۵	۸،۴۲	۷،۳۶	۲،۳	۳،۵	۶۳۷	۸،۰۸	۲،۲
۶	۸،۲۲	۷،۶۲	۲،۵	۴،۲	۷۶۹	۸،۳۰	۲،۴
۷	۸،۵۸	۷،۹۴	۱،۹	۳،۷	۶۹۲	۶،۹۲	۲،۵

جدول ۳- تجزیه و تحلیل نتایج پیش‌بینی شده میزان انتشار گاز.

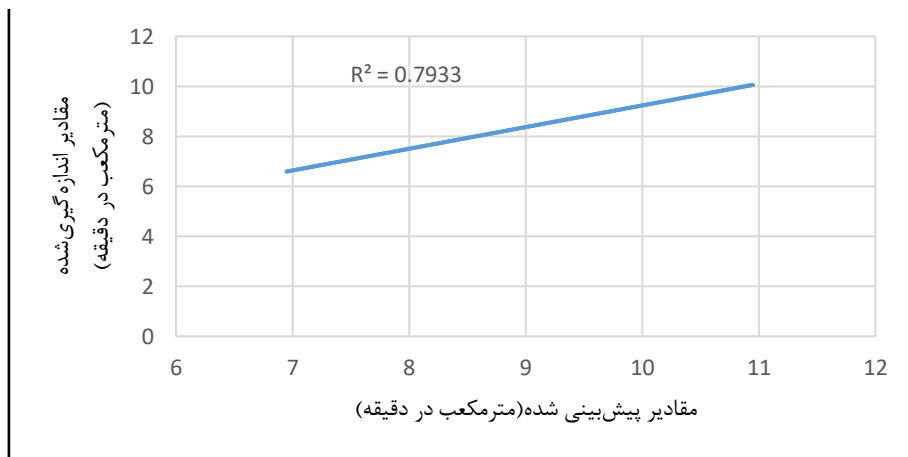
ردیف	گاز منتشر شده اندازه‌گیری شده (مترمکعب بر دقیقه)	گاز منتشر شده پیش‌بینی شده (مترمکعب بر دقیقه)	خطای مطلق	خطای نسبی
۱	۷،۵۸	۷،۲۶	-۰،۳۲	-۰،۰۴۲
۲	۸،۲۷	۸،۵۸	۰،۳۱	۰،۰۳۷
۳	۸،۸۵	۹،۰۹	۰،۲۴	۰،۰۲۷
۴	۸،۶۱	۸،۹۷	۰،۳۶	۰،۰۴۱
۵	۸،۴۲	۸،۵۸	۰،۱۶	۰،۰۱۹
۶	۸،۲۲	۸،۶۲	۰،۴	۰،۰۴۸
۷	۸،۳	۷،۹۴	-۰،۳۶	-۰،۰۴۳

جدول ۴- شدت جریان هوای مورد نیاز با توجه به مدل پیش‌بینی انتشار گاز.

گاز منتشر شده پیش‌بینی شده (مترمکعب بر دقیقه)	جریان هوای مورد نیاز (مترمکعب بر دقیقه)
۷,۲۶	۱۵۸۴
۸,۵۸	۱۹۳۰,۹۰
۹,۰۹	۱۹۸۳,۲۷



شکل ۱۰- تحلیل نتایج پیش‌بینی انتشار گاز.



شکل ۱۱- رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده انتشار گاز.

۵- نتیجه‌گیری

گاز زغال در طول استخراج است. تولید یک معادله برای توصیف دقیق عوامل موثر در انتشار گاز زغال بسیار دشوار است زیرا عوامل زیادی بر انتشار گاز تاثیرگذارند که ویژگی‌های پیچیده‌ای دارند. روش مونت‌کارلو رابطه بین فاکتورهای موثر بر انتشار گاز زغال و خروجی‌ها را با استفاده از داده‌های تجربی شناخته شده برای تولید یک مدل پیش‌بینی، تجزیه و تحلیل می‌کند. با این روش‌ها، تکنیک‌های زیر را می‌توان توسعه داد:

فرضیات مختلفی در انتخاب روش‌های پیش‌بینی شده برای انتشار گاز مورد تحلیل و تجزیه قرار گرفته که در این مقاله با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقدار گاز منتشر شده در معدن زیرزمینی پیش‌بینی شده است. هدف از این مقاله، توسعه و درک تاثیر استخراج و زمین‌شناسی بر روی انتشار و

- emission*”, Fuel, 74(10): 1491-1498.
10. He L; Shi Sh; Song Yi; et al; 2008; “Complexity and measurement of complex degree of gas gush in heading faces of coal mine” Journal of China Coal Society, 33(5): 547-550
 11. He L; Shi Sh; Song Yi; 2009; “Research on Chaotic Forecasting Method for Gas Emission from Working Face Based on SVM Theory”. China Safety Science Journal, 19(9): 42-46.
 12. He J; Pan J; Nie B; 2006; “Research on Fractal Prediction of Severity of Gas Emission” .China Safety Science Journal, 16(5): 22-25.
 13. Hagelskamp, H.H; Eriksson, P.G; Snyman, C.P; 1988; “The effect of depositional environment on coal distribution and quality parameters in a portion of the Highveld coalfield, South Africa.”, International Journal of Coal Geology 10, 51-77.
 14. He, H; et al; 2016; "Prediction of coalbed methane content based on uncertainty clustering method.", Energy Exploration and Exploitation 34(2): 273-281.
 15. Heriawan, M.N; Koike, K; 2008b; “Uncertainty assessment of coal tonnage by spatial modeling of SEAM distribution and coal quality.”, International Journal of Coal Geology 76, 217-226.
 16. Hindistan, A.M; Tercan, E.A; Ünver, B; 2010; “Geostatistical coal quality control in Longwall mining.”, International Journal of Coal Geology 81, 139-150.
 17. Jakeman, L.B; 1980; “The relationship between formation structure and thickness in the Permo-Triassic succession of the Southern coalfield, Sydney Basin, New South Wales, Australia.”, Mathematical Geology 12, 185-212.
 18. Jenkins, C; 2008; “Practices and pitfalls in estimating coalbed methane resources and reserves.”, In: Search and Discovery Article 80011 from Oral Presentation at AAPG Annual Convention, San Antonio, TX.
 19. Kissell, F.N; McCulloch, C.M; Elder, C.H; 1973; “The direct method of determining methane content of coal beds for ventilation design” . Report of Investigations, 7767, US Bureau of Mines, Pittsburgh, PA.
- پیش‌بینی انتشار گاز و تغییر ناگهانی در میزان انتشار.
 - بهبود کنترل انتشار گاز.
 - توانایی پیش‌بینی وسعت منطقه انتشار گاز که در نتیجه باعث استفاده از بهره‌وری بالاتر و به کارگیری فناوری پیشرفته می‌شود.
 - خطای نسبی مدل ارایه شده ۲ درصد و خطای مطلق آن ۰٫۵۷ است.
- همچنین نتایج نشان می‌دهد مدل ارایه شده قابل قبول است و دقت کافی دارد.
- ### منابع
۱. مدنی، حسن؛ ۱۳۸۱؛ «تهویه در معادن»، مرکز نشریه دانشگاهی، جلد اول، شماره صفحات.
 ۲. الهی، ابراهیم؛ ۱۳۹۳؛ (اصول طراحی تهویه در معادن»، دانشگاه سیستان و بلوچستان، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
 3. Beretta, F.S., Costa, J.F., Koppe, J.C; 2010; “Reducing coal quality attributes variability using properly designed blending piles helped by geostatistical simulation.”, International Journal of Coal Geol. 84, 83-93.
 4. Cairncross B; Cadle, A.B; 1988; “Paleo environmental control on coal formation, distribution and quality in the Permian Vryheid formation, East Witbank Coalfield, South Africa”. International Journal of Coal Geology 9, 343-370.
 5. Cheng J; 2016; “Assessment of mine ventilation system reliability using random simulation method”, Environmental Engineering and Management Journal, 15(4): 841-850.
 6. Cheng J; Zhang H; Xiaokun U; 2012; “Combination Forecast of Gas Emission in Coal Mine Based on Evidence Theory”. China Safety Science Journal, 22(1): 106-111.
 7. Fu H; Shi D; 2013; “Study on Gas Emission Prediction Model Based on IGA-LSSVM” .China Safety Science Journal, 23(10): 51-55.
 8. Fu, H; et al; 2014; "Gas emission dynamic prediction model of coal mine based on ACC-ENN algorithm.", Meitan Xuebao, Journal of the China Coal Society 39(7): 1296-1301.
 9. Harpalani S; Chen G; 1995; “Estimation of changes in fracture porosity of coal with gas

- 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, pp. 375–382.
30. SHI Shi; Wu A; 2008; “Application of GM (1, 1) and line regression for prediction amount of mine gas emission in coal mines” , Journal of China Coal Society, 33(4): 415–418.
 31. Shi Shi; Song Yi; He Li; et al; 2006; “Research on determination of chaotic characteristics of gas gush based on time series in excavation working face of coal mine” , Journal of China Coal Society, 31(6): 58–62.
 32. Shao Liangshan; 2009; “Disaster prediction of coal mine gas based on rough set theory” , Journal of China Coal Society, 34(3): 371–375.
 33. Wu A; Tian Y; SONG Yi; et al; 2005; “Application of the grey system theory for predicting the amount of mine gas emission in coalmine”. Journal of China Coal Society, 30(5): 589–595.
 34. Zawadzki, J; et al; 2013; "Estimation of methane content in coal mines using supplementary physical measurements and multivariable geostatistics.", International Journal of Coal Geology 118: 33-44.
 35. Zhang, Z.M; Wu, Y; 2014; “China coalmine gas-geologic laws and mapping”, China University of mining and technology press.
 36. Zhu H; Chang W; Zhang B; 2007; “Different-source gas emission prediction model of working face based on BP artificial neural network and its application” , Journal of China Coal Society, 32(5): 504–508.
 37. Zhou, F; Allison, G; Wang, J; Sun, Q; Xiong, D; Cinar, Y; 2012; "Stochastic modeling of coalbed methane resources: a case Study in southeast Qinshui Basin, China.", International Journal of Coal Geology. 99, 16-26.
 38. Zhou, F; Yao, G; Tyson, S; 2015; “Impact of geological modeling processes on spatial coalbed methane resource estimation.”, International Journal of Coal Geology. 146, 14-27.
 39. Wang W; Peng Lei; Wang X; 2018; “Prediction of Coal Mine Gas Emission Quantity Based on Grey-Gas Geologic Method.”, Mathematical Problems in Engineering Volume 2018, Article ID 4397237, 7 pages.
 20. Lunarzewski, L. L. W; 1998; “Gas emission prediction and recovery in underground coal mines”, *International Journal of Coal Geology*, 35(1-4), 117-14
 21. Li, R; Shi, Sh; Wu, A; Luo, W; Zhu, h; 2014; “Research on prediction of gas emission based on self-organizing data mining in coal mines” , International Symposium on Safety Science and Technology, *Procedia Engineering* 84, 779 – 785.
 22. Liu, G; Zheng, L; Gao, L; Zhang, H; Peng, Z; 2005; “The characterization of coal quality from the Jining Coalfield.”, *Energy* 30, 1903–1914.
 23. Lei, L; et al. 2014; "Prediction of gas emission quantity using artificial neural networks.", *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research* 6(6): 1653-1657.
 24. Mastalerz, M; Kenneth, R.W; 1994; “Variations in SEAM thickness, coal type and coal quality in the Namurian succession of the intrasudetic basin (southwestern Poland).”, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 106, 157–16
 25. Mucho, T.P; Diamond,W.P; Garcia, F; Byars, J.D; Cario, S.L;2000; “Implications of recent NIOSH tracer gas studies on bleeder and gob gas ventilation design”. Proc. Annual Meeting of Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Salt Lake City, UT.
 26. Nolde, J.E; Spears, D; 1998. “A preliminary assessment of in place coalbed methane resources in the Virginia portion of the central Appalachian Basin.”, *International Journal of Coal Geol.* 38, 115e136.
 27. Olea, R.A; 2009; “A Practical Primer on Geostatistics” , U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey, Open-File Report 2009, pp. 346-1104.
 28. Saghafi, A; Williams, D.J; Lama, R.D; 1997; “Worldwide methane emissions from underground coal mining”. In: Ramani, R.V. (Ed.), *Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress*. May, Pittsburgh, PA, pp. 17–22.
 29. Schatzel, S.J; Krog, R.B; Garcia, F; Marshall, J.K; 2006; “Prediction of longwall methane emissions and associated consequences of increasing longwall face lengths: a case study in the Pittsburgh Coalbed”. *Proceedings of*