

## ارزیابی ریسک گازخیزی معدن مکانیزه زغال سنگ طبس با روش کریجینگ شاخص چندگانه

ولی صفری<sup>۱</sup>، وحید وزیری<sup>۲</sup>، سعید سلطانی محمدی<sup>۳\*</sup>، جعفر خادمی حمیدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، vali.safari@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، v.vahid@modares.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، saeedsoltani@kashanu.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، jafarkhademi@modares.ac.ir

(دریافت ۱۸ آبان ۱۳۹۵، پذیرش ۰۹ تیر ۱۳۹۷)

### چکیده

این تحقیق برای پیش‌بینی میزان گازخیزی لایه زغال و ارزیابی ریسک سوانح ناشی از آن در معدن مکانیزه زغال سنگ طبس به کمک تخمینگر زمین‌آماری کریجینگ شاخص چندگانه و بر اساس داده‌های برداشت‌شده در خصوص گازخیزی لایه زغال C<sub>1</sub> از ۴۸ حلقه گمانه انجام شد. نتایج حاصل از نقشه پیش‌بینی گازخیزی نشان داد که تقریباً ۱۲ درصد از کل مساحت محدوده مورد مطالعه، گازخیزی کمتر از ۵ (m<sup>3</sup>/t) (ریسک کم)، ۱۱ درصد از آن گازخیزی ۵-۱۰ (m<sup>3</sup>/t) (ریسک متوسط) و ۱۵ درصد از آن دارای گازخیزی ۱۰-۱۵ (m<sup>3</sup>/t) (ریسک بالا) دارد. در حالی که حدود ۶۲ درصد از کل مساحت مورد مطالعه، گازخیزی بالای ۱۵ (m<sup>3</sup>/t) دارد که دارای ریسک گازخیزی بسیار بالایی است، بنابراین بر اساس تجارب حاصل از پانل‌های استخراج شده، در مناطق با ریسک گازخیزی پایین تا متوسط می‌توان با مدیریت استخراج و اصلاح سیستم تهویه عملیات استخراج را ادامه داد، اما در مناطق با ریسک گازخیزی بالا و خیلی بالا مدیران معدن مجبور به پیاده‌سازی سیستم متان‌زدایی‌اند.

### کلمات کلیدی

گازخیزی، زمین‌آمار، کریجینگ شاخص چندگانه، معدن مکانیزه زغال سنگ طبس

## ۱- مقدمه

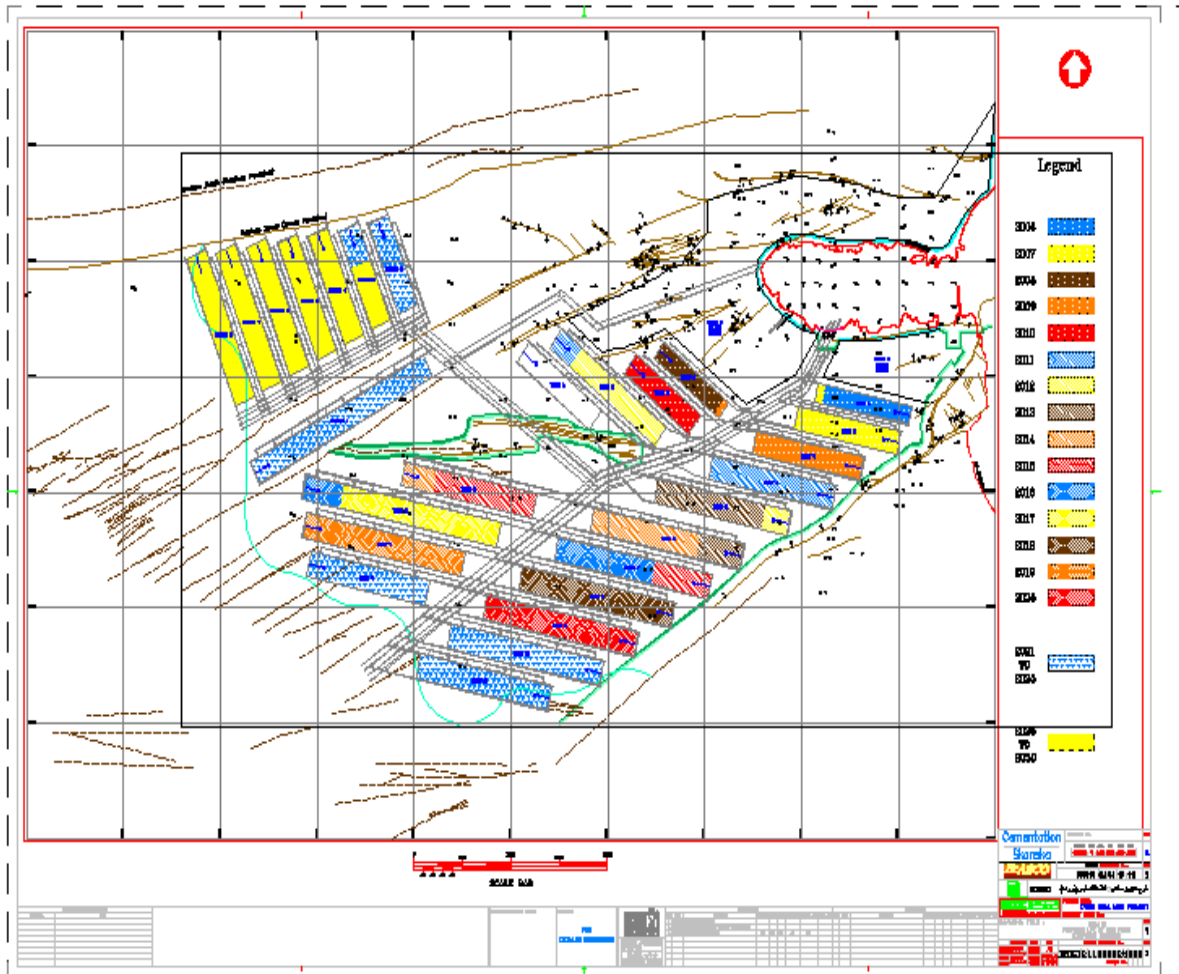
ناحیه پرورده ۱، یکی از مناطق زغال‌دار طبس است که با وسعتی حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در قسمت شرقی ایران مرکزی، حاشیه شمال‌غربی کویر لوت و در ۷۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان طبس واقع شده است. در ناحیه طبس، ۵ لایه زغال (شامل  $B_1$ ،  $B_2$ ،  $C_1$ ،  $C_2$  و  $D$ ) وجود دارد که از میان آن‌ها لایه  $C_1$  با ضخامت متوسط ۲ متر، پتانسیل استخراج مکانیزه را دارد. ناحیه زغال‌دار طبس، ۶ معدن را شامل می‌شود. از میان آن، معدن شماره ۱ به روش جبهه‌کار طولانی مکانیزه در حال استخراج است. در این معدن برای برش سنگ از شیر، برای نگهداری کارگاه از سپر و برای انتقال زغال کنده شده در کارگاه از ناو زنجیری استفاده می‌شود. ظرفیت اسمی سالیانه معدن حدود ۱/۵ میلیون تن است. کل پانل‌های قابل استخراج معدن ۲۷ عدد است که در محدوده عمق ۱۰۰ تا ۸۰۰ متری واقع شده است. از زمان شروع عملیات استخراج در این معدن، تاکنون پانل‌های  $E_1$ ،  $E_2$ ،  $W_1$  و  $W_2$  استخراج شده است و هم‌اکنون پانل  $E_3$  در حال استخراج است. در این مطالعه از ۲۷ پانل طراحی شده برای استخراج، ۹ پانل ابتدایی برای ارزیابی ریسک گازخیزی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱ پلان کارگاه‌های طراحی شده برای استخراج (بخش الف) و محدوده مورد مطالعه (بخش ب) نشان داده شده است. از طرف دیگر، بررسی ستون چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که حوضه زغالی منطقه پرورده طبس از پنج لایه به نام‌های  $C_1$ ،  $C_2$ ،  $B_1$ ،  $B_2$  و  $D$  تشکیل شده است که از این پنج لایه، در این مطالعه فقط میزان گازخیزی لایه  $C_1$  مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۲) [۳۸].

## ۲- روش کار

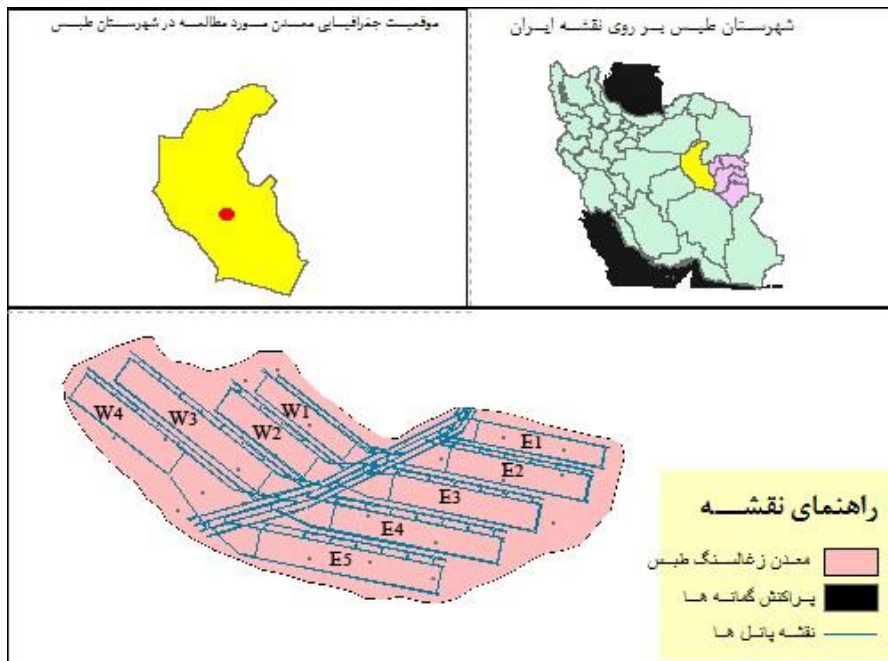
برای پیش‌بینی گازخیزی لایه زغال، ابتدا منابع آماری موجود برای گازخیزی لایه زغال با استفاده از ۴۸ حلقه گمانه حفاری شده در محدوده مورد مطالعه جمع‌آوری و بانک اطلاعاتی داده‌ها تهیه شد. از آنجایی که به دلیل وجود محدودیت‌های عملی، امکان نمونه‌برداری جامع برای تعیین میزان گازخیزی در هر نقطه وجود ندارد، بنابراین می‌توان با استفاده از روش‌های درون‌یابی به عنوان ابزاری برای آنالیز و نمایش مقادیر مربوط به گازخیزی در مکان‌های نمونه‌برداری نشده استفاده کرد.

معدنکاری زغال‌سنگ به ویژه معدنکاری زیرزمینی زغال، یکی از پرمخاطره‌ترین فعالیت‌های صنعتی در هر کشور است. به عنوان مثال با توجه به آمار سالیانه سازمان تامین اجتماعی ترکیه در سال ۲۰۰۵، صنعت معدن زغال‌سنگ ترکیه از نظر بیماری‌های شغلی و از کار افتادگی در رتبه اول، از لحاظ مرگ و میر در رتبه سوم و از لحاظ حوادث شغلی در رتبه پنجم قرار دارد [۱]. این نوع از وقایع در سراسر جهان به عنوان یک خطر بالقوه کشنده است و عمدتاً در طول استخراج زغال‌سنگ گازدار به رسمیت شناخته شده است [۲ و ۳]. بر اساس گزارش سازمان NCMA در سال ۲۰۰۸ حوادث ناشی از انفجار گاز در معدن زغال‌سنگ چین یکی از مخاطرات اصلی بود، به طوری که تعداد حوادث و کشته‌شدگان ناشی از این مخاطرات به ترتیب ۸۲/۵۸ درصد و ۵۰/۵۱ درصد از کل مخاطرات بوده است [۴]، بنابراین در معدنکاری زغال‌سنگ مهم‌ترین کار قبل از عملیات استخراج، ایجاد یک محیط ایمن برای کار است. از این‌رو پیش‌بینی میزان گازخیزی لایه زغال‌سنگ قبل از شروع عملیات استخراج در معادن زیرزمینی تاثیر بسزایی در حفظ ایمنی و رسیدن به بازدهی مورد انتظار دارد. روش‌های مختلفی برای تخمین میزان گازخیزی وجود دارد که در این میان یکی از پرکاربردترین روش‌ها، تخمینگر زمین‌آماری کریجینگ است.

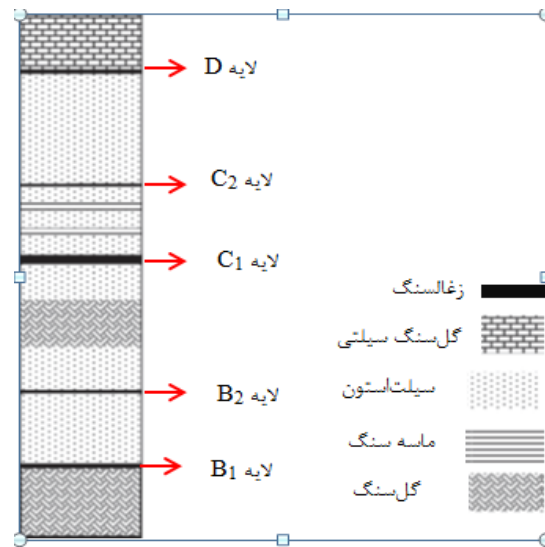
به دنبال وقوع تاخیرهای طولانی و توقف عملیات استخراج در پانل  $W_1$  به خاطر بالا بودن میزان گازخیزی در معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس، راندمان عملیات کاهش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که با پیشروی عملیات استخراج در پانل‌های عمیق‌تر معدن، مشکلات ناشی از گازخیزی به مراتب بیشتر از گذشته باشد. از این‌رو در این مطالعه از روش کریجینگ شاخص چندگانه برای پیش‌بینی میزان گازخیزی در پانل‌های استخراج نشده معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس و ارزیابی ریسک استفاده شده است. دلیل انتخاب روش کریجینگ شاخص چندگانه از میان طیف وسیع روش‌های زمین‌آماری، به عدم پیروی داده‌ها از تابع توزیع نرمال، وجود روند و چند جامعه بودن داده‌ها باز می‌گردد. یکی از مزایای مهم این روش، امکان کاربرد آن بدون توجه به فرضیاتی مانند نرمال بودن داده‌ها است [۵-۳۸].



شکل ۱- الف: پلان کارگاه‌های طراحی شده برای استخراج معدن مکانیزه زغالسنگ طبس و نمایش گمانه‌ها (۲۷ عدد پانل)



شکل ۱- ب: محدوده مورد مطالعه از ۲۷ پانل طراحی شده برای استخراج (۹ پانل)



شکل ۲- ستون چینه‌شناسی حوزه زغالی پرورده طبس

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی پارامترهای آماری داده‌های اصلی

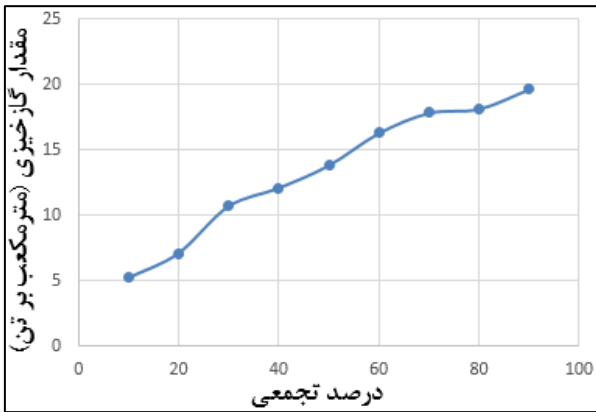
یکی از مهم‌ترین و ضروری‌ترین کنترل‌های مرحله پیش از تخمین زمین‌آماری بررسی نرمال بودن داده‌ها است که تاثیر به سزایی در انتخاب تخمینگر مناسب دارد [۴۰]. از آنجا که بسیاری از تخمینگرهای زمین‌آماري همچون کریجینگ معمولی بر پایه فرض نرمال بودن داده‌ها ارایه شده‌اند، لازمه استفاده از آن‌ها نرمال بودن داده‌ها و یا استفاده از تبدیل و باز تبدیل‌های نرمال‌سازی داده‌ها (همچون خطی، کاکس-باکس و لگاریتمی) قبل و پس از تخمین است. البته کاربرد دسته دیگری از روش‌ها (همچون کریجینگ شاخص و شاخص چندگانه) مستقل از بحث نرمال بودن یا نبودن داده‌ها است. بررسی نرمال بودن داده‌های گازخیزی بر اساس پارامترهای آماری (جدول ۱) و نمودار هیستوگرام (شکل ۳) داده‌های اصلی نشان داد که داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند و امکان کاربرد روش کریجینگ معمولی به عنوان متداول‌ترین روش زمین‌آماري وجود ندارد.

همچنین بررسی داده‌های گازخیزی نشان می‌دهد که داده‌ها چند جامعه دارند. بررسی روند در داده‌های گازخیزی بیانگر وجود روند در داده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش عمق لایه زغال‌سنگ، میزان گازخیزی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بر اساس شرایط داده‌ها، مناسب‌ترین تخمینگر، شاخص چندگانه است. لازمه استفاده از این روش، تبدیل داده‌های کمی به شاخص‌های چندگانه بر

زمین‌آمار با فراهم کردن تخمینگرهای آماری مختلف مانند کریجینگ معمولی، ساده، عام، شاخص، شاخص چندگانه، بیزین، فازی و نظایر آن، شرایطی را فراهم می‌سازد تا با استفاده از اطلاعات حاصل از نقاط نمونه‌برداری شده، میزان گازخیزی در نقاط فاقد نمونه تخمین زده شود. کریجینگ به عنوان بهترین تخمینگر خطی ناریب شناخته می‌شود، بنابراین از این تکنیک برای پیش‌بینی گازخیزی لایه زغال استفاده شد. پس از بررسی آماری داده‌ها و در نظر گرفتن موارد نرمال بودن داده‌ها، تعداد داده‌ها و بود یا نبود روند داده‌های مورد استفاده در ۹ شاخص دسته‌بندی شدند، سپس واریوگرام غیر جهتی به دلیل کمبود اطلاعات برای هر شاخص، ترسیم شد. برای اطمینان از صحت پیش‌بینی، از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. نقشه پیش‌بینی میزان گازخیزی برای هر شاخص به دست آمد، سپس با استفاده از کریجینگ شاخص چندگانه میزان گازخیزی در معدن مورد مطالعه تعیین شد. برای طبقه‌بندی میزان گازخیزی و ارزیابی ریسک در معدن مورد مطالعه از طبقه‌بندی ارایه شده توسط اسکوجینسکی و کمرود در سال ۱۹۹۶ استفاده شد [۳۹]. علاوه بر نقشه پیش‌بینی شده گازخیزی زغال‌سنگ طبس، نقشه واریانس نیز بر اساس ۹ شاخص برای منطقه مورد مطالعه تهیه شد. بررسی نقشه واریانس نشان داد که میزان خطا بسیار پایین است. در نهایت با استفاده از تاخیرهای واقعی ثبت شده ناشی از گازخیزی بالا در حین استخراج پانل  $W_1$  ارزیابی ریسک گازخیزی برای منطقه مورد مطالعه انجام شد و مناطق با ریسک گازخیزی پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا مشخص شد.

جدول ۲- مقادیر آستانه مورد استفاده برای شاخص‌های ۹ گانه

عنوان شاخص	مقدار آستانه (m <sup>3</sup> /t)	معادل درصدی داده‌ها
شاخص اول	۵,۲۴	۱۰
شاخص دوم	۷,۱۲	۲۰
شاخص سوم	۱۰,۷۲	۳۰
شاخص چهارم	۱۲,۱۰	۴۰
شاخص پنجم	۱۳,۸۵	۵۰
شاخص ششم	۱۶,۳۲	۶۰
شاخص هفتم	۱۷,۸۷	۷۰
شاخص هشتم	۱۸,۸۸	۸۰
شاخص نهم	۱۹,۶۹	۹۰



شکل ۵- نمودار چندک - چندک برای داده‌های اصلی گازخیزی

واریوگرام به عنوان یکی از ابزارهای آنالیز ساختاری، این امکان را فراهم می‌کند تا خودهمبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده، بررسی شود. در خودهمبستگی مکانی، فرض بر این استوار است که اشیایی که به یکدیگر نزدیک‌تراند، به یکدیگر شبیه‌ترند [۴۰]. بنابراین واریوگرام می‌تواند برای بررسی ویژگی‌های محلی خودهمبستگی مکانی در یک مجموعه داده مورد استفاده قرار گیرد، به عنوان مثال برای تعیین فاصله بهینه نمونه‌برداری در محدوده‌ای که داده‌ها خودهمبستگی مکانی دارند با در نظر گرفتن تاثیر ناهمسانگردی، استفاده شود [۴۲] و به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود [۳۸]:

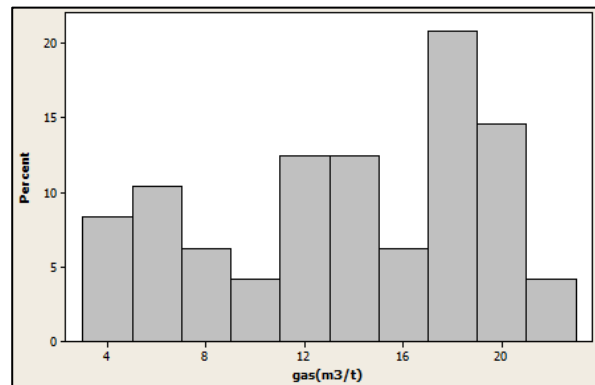
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

که در آن:

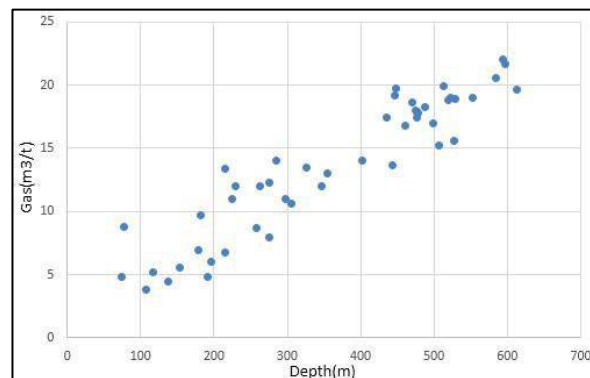
اساس مقادیر آستانه است. در تعریف شاخص‌ها از مقادیر گازخیزی مرتبط با دهک‌های نه‌گانه (جدول ۲) در داده‌های برداشت شده استفاده شد. در شکل ۵ نمودار چندک - چندک برای داده‌های اصلی گازخیزی نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای آماری داده‌های اصلی

پارامترهای آماری	ردیف داده‌ها
تعداد کل داده‌ها	۴۸
مینیمم (m <sup>3</sup> /t)	۳,۸
ماکزیمم (m <sup>3</sup> /t)	۲۲
میانگین (m <sup>3</sup> /t)	۱۳,۶۳
واریانس (m <sup>3</sup> /t) <sup>2</sup>	۲۸,۰۴
انحراف معیار (m <sup>3</sup> /t)	۵,۲۹
چولگی	-۰,۳۲
کشدگی	-۱,۱۳



شکل ۳- توزیع فراوانی داده‌های اصلی گازخیزی



شکل ۴- افزایش میزان گازخیزی با افزایش عمق معدن

## ۲-۲- آنالیز ساختاری

پس از تبدیل داده‌های گازخیزی به شاخص‌های ۹ گانه، برای آنالیز ساختاری این شاخص‌ها، بر روی هر یک به صورت جداگانه واریوگرافی انجام گرفت.

۳-۳- اعتبارسنجی واریوگرافی

برای اطمینان از میزان دقت پیش‌بینی از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. اعتبارسنجی متقابل برای پیش‌بینی مقادیر مجهول، معیار "چگونه خوب بودن" مدل را ارائه می‌دهد.

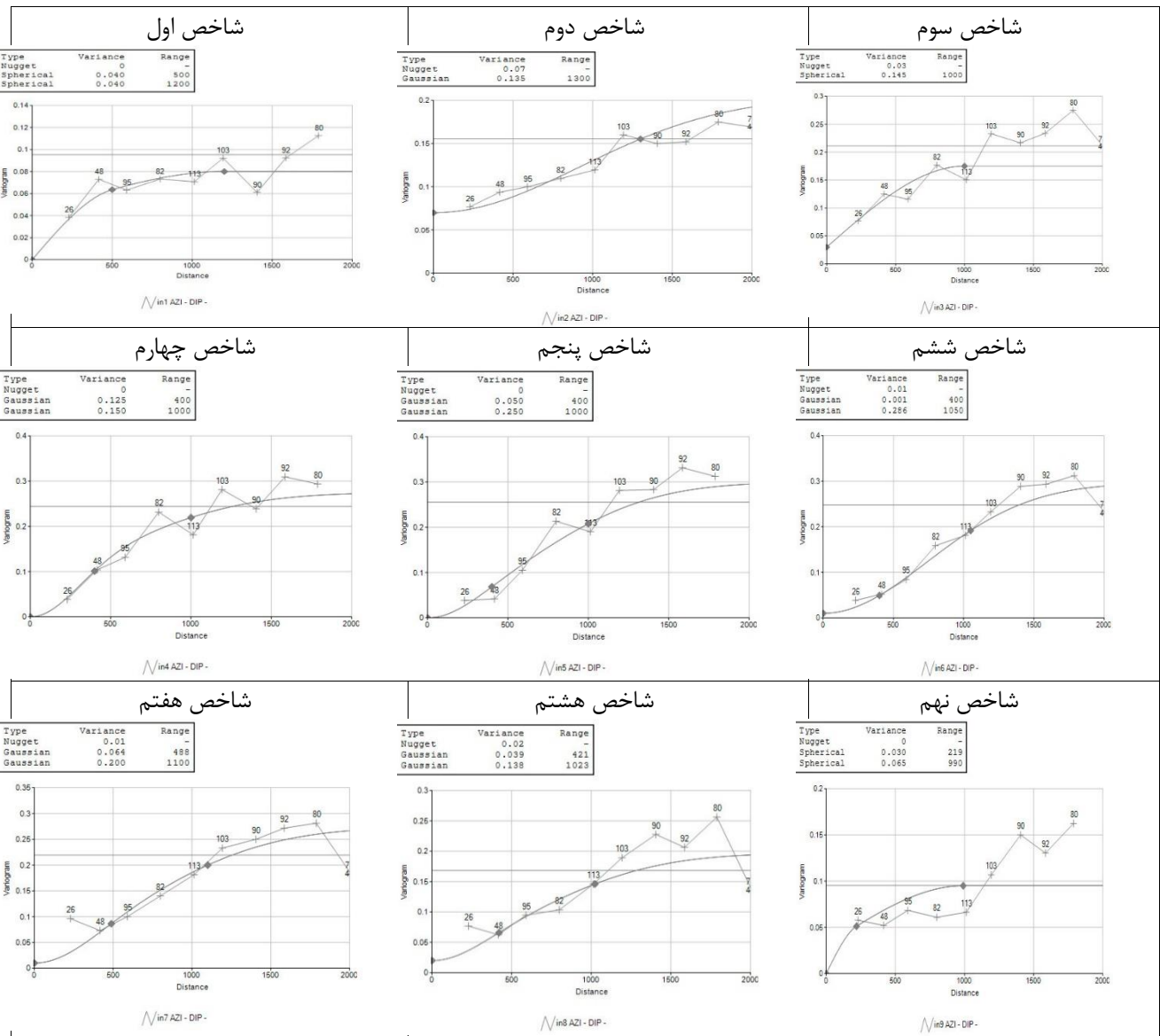
جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده برای واریوگرافی داده‌های گازخیزی (مدل کروی)

نام پارامتر	تلورانس گام (متر)	طول گام (متر)	تعداد گام
مقدار هر پارامتر	۱۰۰	۲۰۰	۱۵

$\gamma(h)$  مقدار واریوگرام برای تعداد  $N$  جفت نمونه که به فاصله  $h$  از یکدیگر قرار گرفته‌اند.

$Z(x)$  مقدار متغیر  $Z$  در نقطه‌ای به مختصات  $x$

در آنالیز ساختاری در صورت امکان با بررسی تغییرات واریوگرام در راستاهای مختلف، وجود ناهمسانگردی در داده‌ها بررسی می‌شود، اما در این مطالعه به خاطر تعداد کم داده‌ها، امکان بررسی ناهمسانگردی داده‌ها فراهم نبوده و در نتیجه تنها به واریوگرام تجربی بدون جهت بر اساس پارامترهای مندرج در جدول ۳ و برازش مدل به آن بسنده شد در شکل ۶ واریوگرام-های شاخص تجربی برای شاخص‌های ۹ گانه ترسیم شده است. در ادامه به هر یک از واریوگرام‌ها یک مدل مناسب برازش داده شد.



شکل ۶- واریوگرام تجربی و مدل‌های ریاضی برازش یافته برای شاخص‌های ۹ گانه

### ۳-۴- به دست آوردن نقشه پیش‌بینی گازخیزی

پس از انجام تحلیل‌های دقیق زمین‌آماری بر روی داده‌های گازخیزی، نقشه پیش‌بینی نهایی میزان گازخیزی معدن مکانیزه زغالسنگ طبس برای هر مقدار آستانه به دست آمد. به طوری که بر اساس هر شاخص، مناطقی که احتمال اینکه مقدار گازخیزی از مقدار آستانه برای آن شاخص به صفر نزدیک است با رنگ آبی پررنگ مشخص شده است و با افزایش مقدار این احتمال و نزدیک شدن به یک با رنگ قرمز پررنگ بر روی نقشه نشان داده شده است (شکل ۱۰).

پس از تخمین احتمال تجاوز از هر یک از حدود آستانه ۹ گانه، مقدار E-Type،  $(z_E^*)$  که تخمینی از مقدار گازخیزی در هر موقعیت نمونه‌برداری نشده بر اساس رابطه ۲ ارائه می‌دهد محاسبه شد:

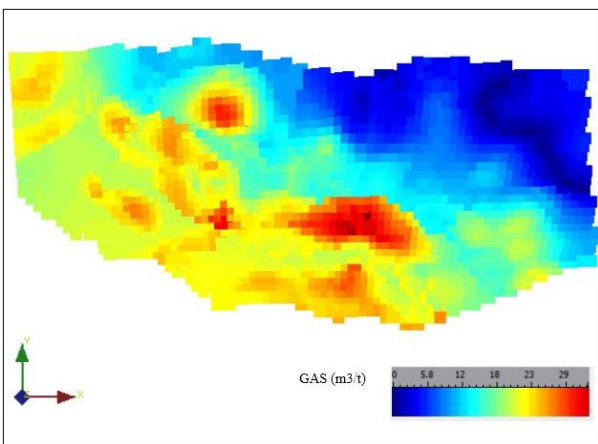
$$z_E^*(x) = \sum_{k=1}^{N+1} \bar{z}_k [I^*(x; z_k) - I^*(x; z_{k-1})] \quad (2)$$

که در آن:

$I^*(x; z_k)$  احتمال تخمینی تجاوز مقدار گازخیزی در موقعیت  $x$  از مقدار آستانه  $k$  ام

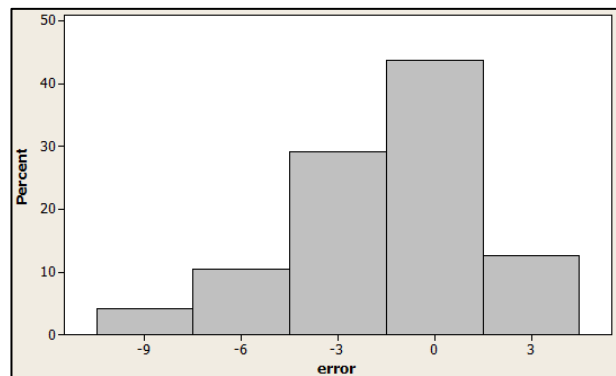
$\bar{z}_k$  مقدار میانه  $k$  امین بازه که مابین مقدار آستانه‌های  $(k-1)$  ام و  $k$  ام واقع شده است.

در شکل ۹ تغییرات E-Type گازخیزی زغالسنگ در این منطقه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق معدن میزان گازخیزی افزایش می‌یابد.

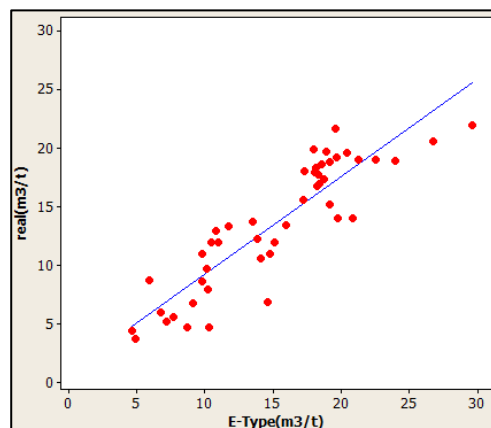


شکل ۹- نقشه پیش‌بینی گازخیزی معدن مکانیزه زغالسنگ طبس

برای همه نقاط اعتبارسنجی متقابل به صورت جداگانه یک نقطه را حذف می‌کند، مقدار آن را با استفاده از داده‌های باقیمانده پیش‌بینی کرده و سپس مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مقایسه می‌شوند [۴۳]. در کل، هدف اعتبارسنجی متقابل کمک به تصمیم‌گیری آگاهانه درباره این است که مدل به کار برده شده تا چه حدی پیش‌بینی دقیق‌تری را ارائه می‌دهد [۴۱]. در شکل ۷ و ۸ به ترتیب توزیع درصد فراوانی خطا و همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی E-Type حاصل از اعتبارسنجی متقابل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که توزیع درصد فراوانی خطا نرمال و میانگین آن نزدیک به صفر است. از طرفی با مقایسه مقادیر تخمینی E-Type با مقادیر اندازه‌گیری شده (شکل ۸)، ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی ۰/۸۹ را نشان می‌دهد که بیانگر مطلوب بودن مدل‌های برازش شده به واریوگرام‌ها و روش مورد استفاده برای تخمین است.



شکل ۷- توزیع فراوانی خطا



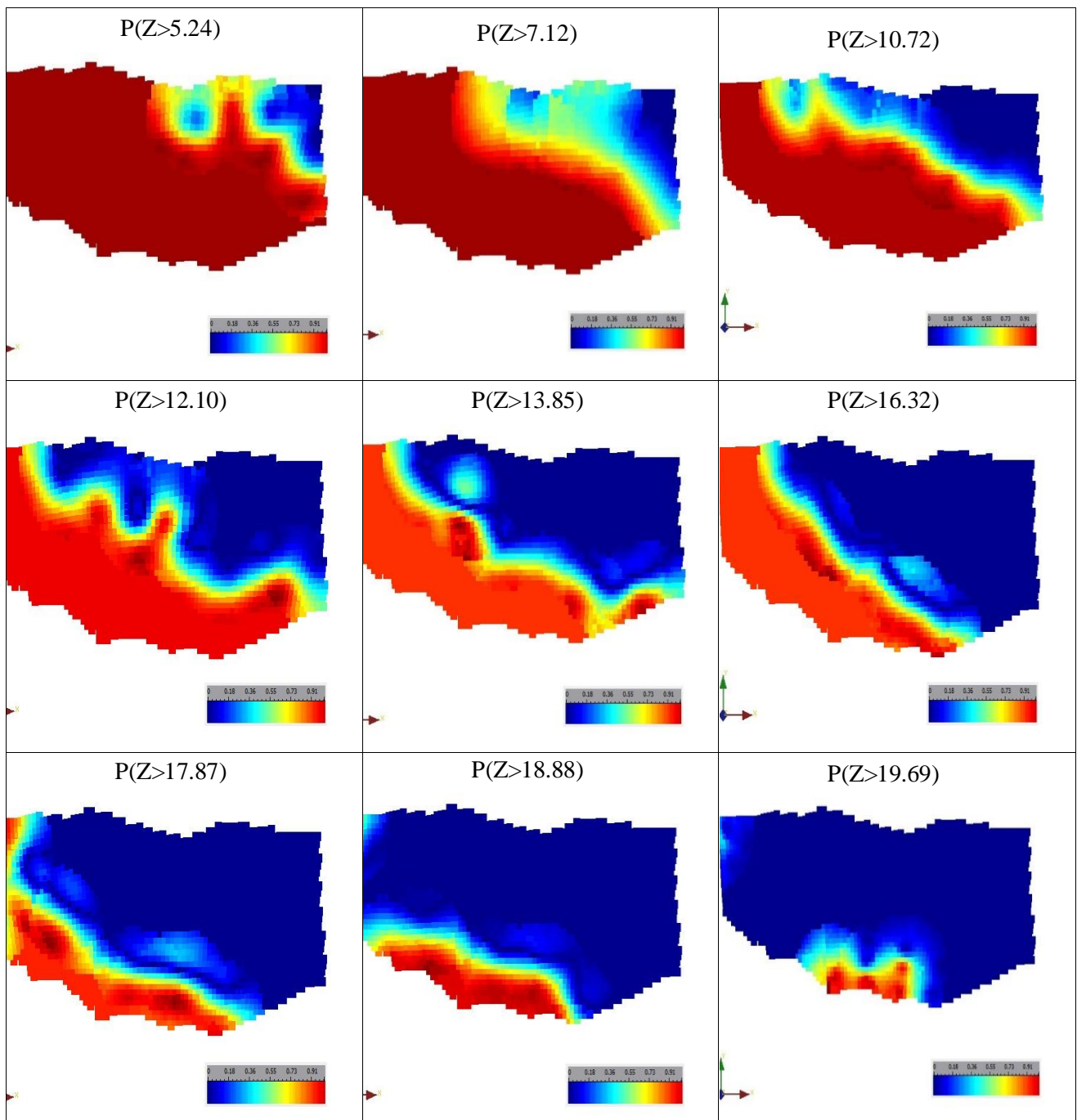
شکل ۸- نتایج حاصل از اعتبارسنجی بین مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی) و تخمینی (E-Type)

$$S_{IK}^2(x) = \sum_{k=1}^{N+1} (\bar{z}_k - z_E^*(x))^2 [I^*(x; z_k) - I^*(x; z_{k-1})] \quad (3)$$

علاوه بر پیش‌بینی یک متغیر، می‌توان تغییرپذیری پیش‌بینی‌ها را از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کرد. به دست آوردن تغییرپذیری صحیح، مهم است.

یکی دیگر از خروجی‌های روش کریجینگ شاخص، مقدار واریانس شرطی است که بر اساس تخمین مقدار احتمال تجاوز برای آستانه‌های ۹ گانه از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

در شکل ۱۱ مقدار واریانس شرطی تخمین‌های آورده شده است. هدف بررسی پراکندگی خطای تخمین است.



شکل ۱۰- نقشه پیش‌بینی احتمال تجاوز گاز خیزی از مقادیر آستانه



بودن ریسک گازخیزی است. اگر گازخیزی ( $m^3/ton$ ) ۵-۱۰ باشد؛ بیانگر متوسط بودن ریسک گازخیزی است و اگر گازخیزی ( $m^3/ton$ ) ۱۰-۱۵ باشد؛ ریسک گازخیزی بالا است که مطمئناً عملیات استخراج را با چالش‌های جدی روبه‌رو خواهد کرد. در نهایت اگر گازخیزی بالای ( $m^3/ton$ ) ۱۵ باشد، بیانگر ریسک بسیار بالا است و بر اساس تجارب کسب شده تا به حال عملیات استخراج در این شرایط امکان‌پذیر نیست و نیازمند تمهیدات خاصی خواهد بود.

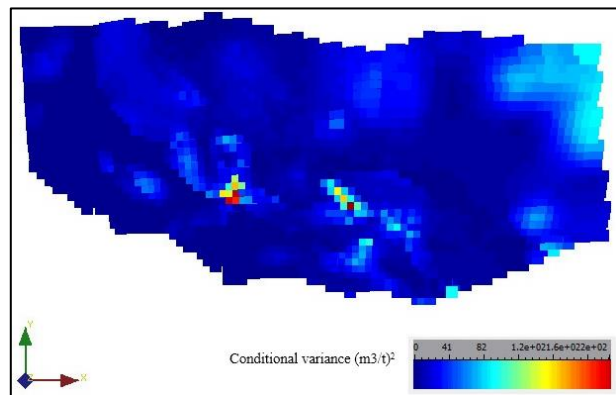
جدول ۴- طبقه‌بندی ارایه شده برای گازخیزی معادن زغال [۳۹]

توصیف	میزان گازخیزی ( $m^3/ton$ )
طبقه اول	۰-۵
طبقه دوم	۵-۱۰
طبقه سوم	۱۰-۱۵
طبقه چهارم	>۱۵

برای اطمینان از صحت عملکرد رویکرد پیشنهادی و ارزیابی ریسک، در ادامه تاخیرهای ناشی از بالا بودن میزان گازخیزی و توقف عملیات استخراج در کارگاه  $W_1$  (شکل ۱۲) با نقشه E-Type به دست آمده برای پیش‌بینی گازخیزی مقایسه شده است. بررسی شکل ۱۲ نشان می‌دهد که میزان تاخیرهای ناشی از بالا بودن گازخیزی در حین استخراج در بعضی از روزها به بیش از ۱۰ ساعت بر روز رسیده است، به عبارت دیگر بیش از یک شیفت از سه شیفت کاری به علت افزایش میزان گاز متان، تاخیر و توقف در عملیات استخراج انجام گرفته است.

بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که اگرچه پانل استخراجی  $W_1$  در منطقه‌ای واقع شده است که از لحاظ گازخیزی، ریسک گازخیزی پایین دارد، اما از طرف دیگر مقایسه شکل ۱۲ با شکل ۱۰ بیانگر این حقیقت است که در سایر پانل‌های استخراج نشده میزان گازخیزی به مراتب بیشتر از پانل استخراجی  $W_1$  است (به‌عنوان مثال می‌توان به پانل‌های  $W_4$ ،  $E_4$  و  $E_5$  اشاره کرد). به طور کلی نتایج حاصل از نقشه پیش‌بینی گازخیزی نشان داد که تقریباً ۱۲ درصد از کل مساحت محدوده مورد مطالعه، گازخیزی کمتر از ( $m^3/ton$ ) ۵، ۱۱ درصد از آن گازخیزی ( $m^3/ton$ ) ۵-۱۰ و ۱۵ درصد از آن دارای گازخیزی ( $m^3/ton$ ) ۱۰-۱۵ دارد. در حالی که حدود ۶۲ درصد از کل مساحت مورد مطالعه، گازخیزی بالای ( $m^3/ton$ ) ۱۵ دارد (جدول ۵).

اگر خطاهای استاندارد میانگین نزدیک به خطاهای پیش‌بینی ریشه میانگین مربعات باشند، در این صورت تغییرپذیری در پیش‌بینی به‌طور صحیح ارزیابی شده است. اگر خطای استاندارد میانگین بزرگ‌تر از خطاهای پیش‌بینی ریشه میانگین مربعات باشد، در این صورت تغییرپذیری در پیش‌بینی‌ها زیاد برآورد شده است [۴۰]. در شکل ۱۱ واریانس شرطی پیش‌بینی برای متغیر گازخیزی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود معمولاً در نقاط خیلی کمی مقدار انحراف از معیار نسبت به سایر نقاط بیشتر است. دلیل این موضوع کم بودن داده در این نقاط است، بنابراین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییرپذیری در پیش‌بینی قابل قبول است.



شکل ۱۱- واریانس شرطی برای پیش‌بینی گازخیزی معدن مکانیزه زغالسنگ طبس

### ۳-۵- ارزیابی ریسک گازخیزی

معدن زغالسنگ طبس اولین معدن مکانیزه جبهه‌کار طولانی در ایران است. از زمان شروع به کار این معدن تاکنون، کار استخراج چهار پانل از ۹ پانل مورد مطالعه در این تحقیق به پایان رسیده است (شکل ۱). تاکنون، یکی از مهم‌ترین چالش‌های موثر بر استخراج این معدن بالا بودن میزان گازخیزی بوده است. نتایج حاصل از بررسی نقشه نهایی پیش‌بینی گازخیزی نشان می‌دهد که مطابق با انتظار، با افزایش عمق میزان گازخیزی نیز افزایش می‌یابد (شکل ۱۰). در ادامه برای ارزیابی ریسک گازخیزی از طبقه‌بندی ارایه شده در سال ۱۹۶۹ استفاده شده است (جدول ۴). این طبقه‌بندی بر اساس قوانین کشور روسیه است و به صورت اجرایی هم در معدن مکانیزه زغالسنگ طبس پیاده می‌شود. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، این طبقه‌بندی در چهار دسته گازخیزی پایین، متوسط، بالا و خیلی بالا طبقه‌بندی شده است. به طور کلی بر اساس این طبقه‌بندی اگر نتایج حاصل از نقشه پیش‌بینی گازخیزی نشان‌دهنده گازخیزی کمتر از ( $m^3/ton$ ) ۵ باشد؛ بیانگر پایین

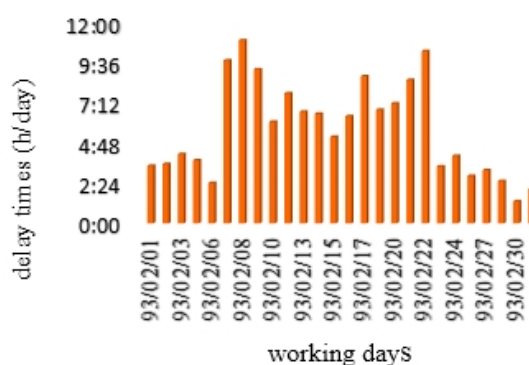
در پانل‌های استخراج‌نشده، استفاده از سیستم گازکشی متان در معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس اجتناب‌ناپذیر است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق میزان گازخیزی معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آماری پیش‌بینی شد. پس از بررسی داده‌ها، به دلیل چند جامعه‌ای بودن داده‌ها، نرمال نبودن و وجود روند، ابتدا داده‌ها شاخص‌بندی شدند سپس برای هر شاخص واریوگرافی انجام گرفت. به دلیل شاخص‌بندی و کم بودن تعداد داده‌ها واریوگرافی به صورت غیر جهتی انجام گرفت. برای بررسی صحت نتایج از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. در نهایت با استفاده از روش کریجینگ شاخص چند متغیره میزان گازخیزی تخمین زده شد. در کل نتایج حاصل از نقشه پیش‌بینی بیانگر بالا بودن گازخیزی لایه زغال و ریسک در معدن مکانیزه طبس است. به طوری که حتی در اعماق کم عمق نیز میزان گازخیزی بالا است و به ازای افزایش هر ۱۰۰ متر از عمق معدن، میزان گازخیزی به اندازه  $2(m^3/ton)$  افزایش می‌یابد. این مقدار از گازخیزی از استاندارد جهانی بالاتر است. در نهایت، بررسی نقشه پیش‌بینی نشان داد که ۶۲ درصد از مساحت محدوده مورد مطالعه، میزان گازخیزی بیشتر از  $15(m^3/ton)$  دارد. در کل برای کاهش ریسک گازخیزی و به دنبال آن کاهش احتمال وقوع حوادث پیش‌بینی نشده، این معدن نیازمند پیاده‌سازی سیستم زهکشی گاز متان است.

#### منابع و مراجع

- [1] US Bureau of Labor Statistics News, 2007, "National Census of Fatal Occupational Injuries in 2006", USDL 07-1202.
- [2] Cao, Y.X., He, D.D., David, C.G., 2001, "Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults", International Journal of Coal Geology 48 (1-2), 47-63.
- [3] Wold, M.B., Connell, L.D., Choi, S.K., 2008, "The role of spatial variability in coal seam parameters on gas outburst behavior during coal mining", International Journal of Coal Geology 75 (1), 1-14.
- [4] State Administration of Coal Mine Safety, 2009, "The 2008 Report of National Coal Mine Accident Analysis", China (in Chinese).



شکل ۱۲- تاخیرهای ناشی از افزایش گاز متان در کارگاه W1

جدول ۵- نتایج حاصل از تخمین گازخیزی برای ارزیابی ریسک

میزان گازخیزی ( $m^3/ton$ )	تعداد بلوک (عدد)	درصد از کل مساحت مورد مطالعه (درصد)	میزان ریسک
۰-۵	۲۸۶	۱۲	پایین
۵-۱۰	۲۵۸	۱۱	متوسط
۱۰-۱۵	۳۷۷	۱۵	بالا
>۱۵	۱۵۱۰	۶۲	خیلی بالا

در حالی که تجارب حاصل از تاخیرهای طولانی اتفاق افتاده ناشی از پانل‌های استخراج شده، دلیل این مشکل را علاوه بر بالا بودن گازخیزی خود لایه استخراجی (لایه  $C_1$ )، نفوذ گاز از لایه‌های  $C_2$  و  $B_2$  به زون تخریب شده از طریق شکاف‌ها و ترک‌های ایجاد شده در این زون، به داخل فضای کارگاه بیان کرده است. در واقع این مساله می‌تواند زنگ خطری برای مدیران این معدن باشد. بطوریکه نتایج به دست آمده بیانگر این حقیقت است که ادامه عملیات استخراج زغال‌سنگ از این معدن بستگی به کنترل میزان گازخیزی دارد. در کل مقایسه نقشه پیش‌بینی با تجربیات به دست آمده از استخراج پانل‌ها بیانگر درستی آن است. همان‌طور که مشاهده شد در حین استخراج پانل  $W_1$ ، به علت هشدار سنسورهای گازسنج، عملیات استخراج چندین بار متوقف شده است. نهایتاً بر اساس مشاهدات می‌توان نتیجه گرفت که با پیشروی استخراج در پانل‌های عمیق‌تر میزان تاخیرهای ناشی از گازخیزی بیشتر از کارگاه  $W_1$  خواهد بود. بطوریکه در مناطق با ریسک گازخیزی پایین می‌توان با مدیریت سیستم تهویه عملیات استخراج را ادامه داد. در حالی که در مناطقی با ریسک گازخیزی بالا و بسیار بالا برای کاهش ریسک گازخیزی

- [16] Knotters, M., Brus, D.J., Oude-Voshaar, J.H., 1995, "A comparison of kriging, co-kriging and kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations", *Geoderma* 67, 227–246.
- [17] Pebesma, E., Kwaadsteniet, J.W., 1997, "Mapping groundwater quality in the Netherlands", *Journal of Hydrology* 200, 364–386 (Amsterdam).
- [18] Goovaerts, P., 1997, "Geostatistics for Natural Resources Evaluation", Oxford University Press, New York.
- [19] Goovaerts, P., 1999, "Geostatistics in soil science: state of the art and perspectives", *Geoderma* 89, 1–46.
- [20] Goovaerts, P., 2000, "Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall", *Journal of Hydrology* 228, 113–129 (Amsterdam).
- [21] Pardo-Ig, U.E., 1998, "Comparison of geostatistical methods for estimating the areal average climatological rainfall mean using data on precipitation and topography", *International Journal of Climatology* 30, 1031–1047.
- [22] Ghahraman, B., Sepaskhah, A.R., 2001, "Autographic rain-gage network design for Iran by kriging", *Journal of Science and Technology* 25 (B4), 653–660.
- [23] Knotters, M., Bierkens, M.F.P., 2001, "Predicting water table depths in space and time using a regionalized time series model", *Geoderma* 103, 51–77.
- [24] Desbarats, A.J., Logan, C.E., Hinton, D.R., 2002, "On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model", *Journal of Hydrology* 255, 25–38 (Amsterdam).
- [25] Shahrokhnia, M.B., Sepaskhah, A.R., Javan, M., 2004, "Estimation of hydraulic parameters for karoon river by cokriging and residual kriging", *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B* 28 (B1), 153–163.
- [26] Shoji, T., Kitaura, H., 2004, "Statistical and geostatistical analysis of rainfall in central Japan", [5] گزارش زمین‌شناسی و طرح توجیهی معدن زغال سنگ طبس، بخش شرکت آدام، دفتر فنی و معاونت پژوهشی طبس، ۱۳۶۱
- [6] Daniela D., Melo, M. T. C., Elisabetta P., Mari Angela S., Daniele P., Luis R., 2016, "Combining natural background levels (NBLs) assessment with indicator kriging analysis to improve groundwater quality data interpretation and management", *Original Research Article Science of The Total Environment, Volumes* 569–570, Pages 569-584.
- [7] Delhomme, J.P., 1978, "Kriging in the hydro sciences", *Water Resources* 1 (5), 251–266.
- [8] Volpi, G., Gambolati, G., 1978, "On the use of a main trend for the kriging technique in hydrology", *Water Resources* 1 (6), 345–349.
- [9] Dunlap, L.E., Spinazola, J.M., 1984, "Interpolating water-table altitudes in west-central Kansas using kriging techniques", *Geological Survey Water-Supply-Paper* 2238, p. 19.
- [10] Aboufirassi, M., Marino, M.A., 1989, "Kriging of water levels in the Sous aquifer", *Journal of Mathematical Geology* 15 (4), 537–551.
- [11] Hoeksema, R.L., Clapp, R.B., Thomas, A.L., Hunley, A.E., Farrow, N.D., Dearstone, K.C., 1989, "Cokriging model for estimation of water table elevation", *Water Resources* 25 (3), 429–438.
- [12] Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1990, "Physical and Chemical Hydrogeology", Wiley, New York.
- [13] Hevesi, J.A., Flint, A.L., Istok, J.D., 1992, "Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics", *Journal of Applied Meteorology* 31, 677–688.
- [14] Takara, K., Oka, A., 1992, "Regionalization of probable rainfall using regression analysis and kriging", *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering* 456 (II-21), 1–10.
- [15] Hudson, G., Wackernagel, H., 1994, "Mapping temperature using kriging with external drift", Theory and an example from Scotland, *International Journal of Climatology* 14 (1), 77–91.

- [35] Ahmadi, S.H., Sedghamiz, A., 2007, "Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level", *Journal of Environmental Monitoring Assessment* 129, 277–294.
- [36] Gundougdu, K.S., Guney, I., 2007, "Spatial analyses of groundwater levels using universal kriging", *Journal of Earth System Science* 116 (1), 49–55.
- [37] Nikroo, L., Zare, K.M., Sepaskhah, A.R., Fallah, S.R., 2010, "Groundwater depth and elevation interpolation by kriging method in Mohr Basin of Fars province in Iran", *Environmental Monitoring and Assessment* 166, 387–407.
- [38] Margaret, A., Carignan, J., 1997, "Geostatistique lineaire application au domain minier", Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- [39] Skochinsky, a., komarov, v., 1996, "Mine ventilation", Mir publishers – Moscow.
- [40] Johnston, K., Jay M., Hoef, V., Krivoruchko, K., Lucas, N., 2003, "Using ArcGIS Geostatistical Analyst", Environmental System Research Institute - USA.
- [41] Burke, S., Chu, G., Heyer, J., Lee, J., Tang, X., Tran, T., Zhang, L., 2013, "Mass Quantification of PCE in Los Angeles Groundwater from the GeoTracker Database", UCLA Institute of the Environment and Sustainability Senior Practicum.
- [42] Kamble, K. H., Aggrawal, P., 2011, "Geostatistical Analyst for Deciding Optimal Interpolation Strategies for Delineating Compact Zones", *International Journal of Geosciences*, PP. 585-596.
- [43] Ahmed, S. S., El Tahlawi, M. R., Rashad, M. Z., Saleem, H. A., 2007, "Kriging techniques and GIS for management of phosphate extraction at hagara district", Egypt, *Journal of Engineering, Sciences, Assiut University*, Vol. 35, No. 6, pp. 1559-15.
- Journal of Computers and Geosciences 32 (8), 1007–1024.
- [27] Cinnirella, S., Buttafuoco, G., Pirrone, N., 2005, "Stochastic analysis to assess the spatial distribution of groundwater nitrate concentrations in the Po catchments Italy", *Journal of Environmental Pollution* 133, 569–580.
- [28] Hu, K., Huang, Y., Li, H., Li, B., Chen, D., White, R., 2005, "Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain", *Journal of Environmental International* 31, 896–903.
- [29] Gerstmann H., Doktor D., Gläber C., Möller M., 2016, "A geostatistical model for the Kriging-based spatial prediction of crop phenology using public phenological and climatological observations", Original Research Article *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 127, Pages 726-738.
- [30] Reis, A., Sousa, A., Silva, E., Fonseca, E., 2005, "Application of geostatistical methods to arsenic data from soil samples of the Cova dos Mouros mine (Vila Verde-Portugal)", *Journal of Environment Geochemical Health* 27, 259–270.
- [31] Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H., Nikbakht-Shahbazi, A.R., 2005 "Geostatistical analysis of sorptivity for a soil under tilled and no-tilled conditions", *Soil and Tillage Research* 83, 237–245.
- [32] Benmostef Lagueche, F.-Z., 2006, "Estimating soil contamination with kriging interpolation method", *American Journal of Applied Sciences* 3 (6), 1894–1898.
- [33] Mercedes R. D., Thomas G. O., Dominique A., Blandine L., Jean-Baptiste P., Christian W., Nicolas P.A., 2016, "Prediction of soil texture using descriptive statistics and area-to-point kriging in Region Centre (France)", Original Research Article *Geoderma Regional*, Volume 7, Issue 3, Pages 279-292.
- [34] Sharda, V.N., Kurothe, R.S., Sena, D.R., Pande, V.C., Tiwari, S.P., 2006, "Estimation of groundwater recharge from water storage structures in a semi-arid climate of India", *Journal of Hydrology* 329, 224–243 (Amsterdam).