

ریزپهنه بندی گازخیزی در معدن زغال سنگ پروده ۱ طبس با رگرسیون و شبیه سازی زمین آماری

حسین ملایمت^۱، فرهاد محمدتراب^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

(دریافت ۱۳۹۹/۰۵/۰۵، پذیرش ۱۴۰۰/۰۴/۲۶)

چکیده

گازخیزی بالا در معادن زغال سنگ مسبب افزایش ریسک انفجار، پرتاب سنگ و سوانج منجر به مرگ است؛ به همین دلیل لازم است تغییرات گازخیزی در سطح لایه‌های مختلف به دقت مدل شود. لایه‌های معدن پروده ۱ طبس با میانگین $14.9 \text{ m}^3/\text{t}$ گازخیزی بالایی دارند. در پروده ۱، لایه C_1 به عنوان هدف اصلی معدنکاری با 134 گمانه مغزه‌گیری اکتشاف شده که از این تعداد، 35 گمانه در مرکز و شرق کانسار مورد مطالعه گازخیزی قرار گرفته‌اند، اما در بخش‌های غربی، گازخیزی اندازه‌گیری نشده است. در این پژوهش، زون‌های خرد شده شناسایی و داده گازخیزی آنها کنار گذاشته شد. در ادامه، مشخص شد که گازخیزی و عمق همبستگی بالایی داشته و در یک خوشه آماری قرار می‌گیرند. همچنین، مقادیر گازخیزی نسبت به عمق، دو جامعه مجزا تشکیل می‌دهند. این دو جامعه بر زون اکسیده (کم‌عمق) و زون متان‌خیز (عمیق) انطباق دارند. با در نظر گرفتن عمق به عنوان داده کمکی، گازخیزی در کل لایه C_1 به روش رگرسیون کریجینگ برای تمام بلوک‌های استخراجی تخمین زده شد. اعتبار این تخمین، به روش جک‌نایف برابر با 94% محاسبه شد. برای دوری از اثر هموارشدگی کریجینگ، احتمال وجود بلوک‌هایی با گازخیزی بحرانی (بیش از $20 \text{ m}^3/\text{t}$) با روش شبیه‌سازی شرطی شاخص پهنه‌بندی شد. نتایج نشان می‌دهد که $1/43$ میلیون مترمربع از لایه C_1 به احتمال 75% و 0.38 میلیون مترمربع به احتمال 100% در بازه گازخیزی بحرانی قرار می‌گیرد. این زون‌های بحرانی گاز در مرکز، جنوب و غرب پروده ۱ قرار دارند و برای بررسی امکان حفر چاه‌های تخلیه پیشنهاد می‌شوند.

کلمات کلیدی

گازخیزی زغال سنگ، زمین‌آمار، پروده ۱ طبس، رگرسیون کریجینگ، شبیه‌سازی زمین آماری.

۱- مقدمه

و ریزپهنه‌بندی گازخیزی لایه اصلی معدن پروده ۱ طیس می‌پردازد.

در ایران غالب معادن زغال‌سنگ به روش زیرزمینی استخراج می‌شوند. پژوهش‌های اولیه مرتبط با گاز لایه‌های زغالی در کشور انجام شده است. از آن جمله، سرشکی و همکاران تکنیک‌های گاززدایی زغال‌سنگ و زهکشی متان را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۵،۳۴]. همچنین ملایمت و همکاران اقدام به مدلسازی آماری گازخیزی و متان‌خیزی در کنسارهای پروده ۱ و ۴ طیس کرده‌اند [۳۷،۳۶]. تاکنون پژوهش‌هایی که به برآورد گازخیزی در کل سطح لایه پردازند در کشور عمومیت نداشته‌اند. لزوم بررسی توزیع فضایی گاز در معادن فعال، انجام پژوهش‌هایی از این دست را اجتناب‌ناپذیر می‌کند.

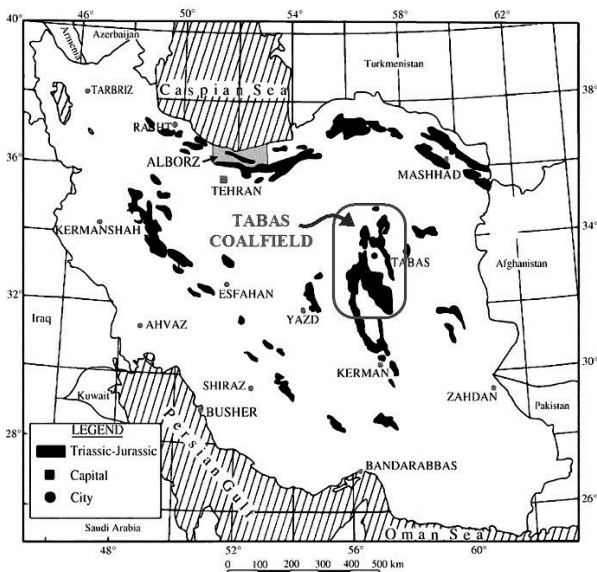
مجموعه معدنی پروده طیس به عنوان تنها معدن زغال‌سنگ تمام مکانیزه کشور با ذخیره احتمالی ۱٫۱ میلیارد تن زغال‌سنگ کک‌شو مورد توجه است [۳۸]. محدوده معدنی پروده با ۵ لایه اصلی در ۶۰ کیلومتری جنوب طیس در زون ایران مرکزی (حوضه زغال‌خیز ایران مرکزی) واقع شده است (شکل ۱). در این پژوهش، تغییرات گازخیزی در کل لایه C₁ کنسار پروده ۱ به عنوان لایه اصلی و تحلیل آماری پارامترهای موثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است.

پارامترهای گوناگونی بر حجم گاز به دام افتاده در لایه‌های زغال‌سنگ تاثیر می‌گذارند [۳۹]. در این پژوهش از

تعداد زیادی از حوادث معادن زغال‌سنگ به دلیل وجود مقادیر قابل ملاحظه گاز در لایه‌ها رخ می‌دهند [۱]. به عنوان مثال، در کشورهای ایالات متحده، چین و ایران به ترتیب ۷۹٪، ۹۵٪ و بیش از ۹۰٪ جان‌باختگان حوادث معادن زغال‌سنگ به نوعی با گازخیزی مرتبط‌اند [۵-۲]. گازخیزی، به صورت حجمی از گاز که در یک تن ماده معدنی سوختی وجود دارد تعریف می‌شود و واحد آن مترمکعب بر تن است. طی سالیان گذشته، مطالعات فراوانی بر روی ژنز و اجزای تشکیل‌دهنده گاز زغال‌سنگ انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که گاز زغال‌سنگ همزمان با نهشته‌گذاری تشکیل می‌شود و به طور کلی در گاز زغال، اجزای متان، کربن دی‌اکسید، هیدروژن، نیتروژن، هیدروژن سولفید، هیدروکربورهای سنگین، گازهای نادر مثل هلیم، نئون و نظایر آن یافت می‌شوند [۱۰-۶]. علاوه بر این، ساز و کار به دام افتادن و تجمع گاز نیز مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده است که گاز به دو صورت آزاد و جذب شده در لایه‌های زغال‌سنگ وجود دارد. گازهای آزاد روزه‌ها را پر می‌کنند و مقدار آنها با تخلخل و فشار پوش‌سنگ نسبت مستقیم دارد. بیشترین مقادیر گاز زغال‌سنگ در عمق‌های زیاد به صورت جذب شده وجود دارد [۱۳-۱۱].

مطالعات رفتار گاز در شرایط مختلف مشخص کرده است که مقدار گاز جذب شده به وسیله زغال‌سنگ با افزایش فشار و کاهش درجه حرارت و رطوبت بیشتر می‌شود. از طرفی، مقدار و ترکیب گاز به پتروگرافی زغال‌سنگ نیز بستگی دارد [۱۷-۱۴]. پژوهش‌هایی که در خصوص عوامل خطر ساز در معادن زغال‌سنگ انجام شده حاکی از آن است که تعامل گاز با محیط‌های مختلف معدنی باید به دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد، لیکن در ابتدا نیاز است حجم گاز برجا در افق‌های مختلف تعیین شود [۲۳-۱۸].

روش‌های مختلفی برای تخلیه ایمن گاز زغال‌سنگ پیشنهاد شده است. از آن جمله می‌توان به حفر چاه‌های پمپاژ گاز به سطح، قبل از شروع عملیات استخراج و یا حفر چاه‌های تخلیه گاز جهت‌دار- افقی اشاره کرد. موفقیت این روش‌ها در گرو شناسایی و رفتارشناسی دقیق گاز در کل لایه است. نتایج تمامی این پژوهش‌ها بر این نکته تاکید دارد که اولین قدم در مطالعات گاز زغال‌سنگ، تخمین آن در کل لایه است تا یک دید اولیه از حجم و محل‌های تمرکز گاز به دست آید [۳۳-۲۴]. در همین راستا، پژوهش حاضر به برآورد حجم



شکل ۱: حوضه زغالدار طیس در ایران مرکزی

در روش کریجینگ عام و کریجینگ با دریافت خارجی، پس از مدل شدن روند، تخمین‌ها به صورت یکجا و با روش کریجینگ انجام می‌شود. در مقابل، می‌توان در ابتدا با یک متغیر کمکی، بخش قطعیت‌پذیر متغیر هدف را با یک معادله رگرسیونی مدل کرد و سپس باقی‌مانده‌ها را به عنوان بخش احتمال‌پذیر، واریوگرافی و تخمین زد (معادله ۱).

$$Z(s) = m(s) + \varepsilon'(s) \quad (1)$$

که در آن:

$Z(s)$: مقدار متغیر هدف

$m(s)$: بخش قطعیت‌پذیر متغیر هدف

$\varepsilon'(s)$: بخش احتمال‌پذیر متغیر هدف است.

در انتها، حاصل جمع معادله رگرسیونی و کریجینگ باقی‌مانده‌ها، مقدار متغیر هدف در نقاط مورد نظر است (معادله ۲) [۴۵،۴۴]. این روش، رگرسیون کریجینگ نام دارد.

$$\hat{z}(s_0) = \hat{m}(s_0) + \hat{e}(s_0) = \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k \cdot q_k(s_0) + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot e(s_i) \quad (2)$$

که در آن:

$\hat{m}(s_0)$: بخش قطعیت‌پذیر برازش شده

$\hat{e}(s_0)$: باقی‌مانده‌های درونیابی شده با کریجینگ معمولی

$\hat{\beta}_k$: ضرایب مدل رگرسیونی

$q_k(s_0)$: ماتریس مقادیر متغیر هدف در نقاط نمونه‌برداری

شده

λ_i : ضرایب کریجینگ به دست آمده از حل معادله

کریجینگ برای باقی‌مانده‌ها

$e(s_i)$: مقادیر باقی‌مانده در نقاط نمونه‌برداری است.

در مقام مقایسه، یکی از نکات منفی روش کریجینگ با دریافت خارجی این است که اگر متغیر کمکی تغییرات شدیدی در فضای تخمین داشته باشد، ماتریس کوواریانس متغیرها ناهمگن شده و خطای تخمین در نقاطی که تغییرات در آن شدید است، افزایش می‌یابد [۴۶]. در شرایط مشابه، رگرسیون کریجینگ ممکن است برای مدل کردن تغییرات شدید متغیر کمکی، روابط رگرسیونی پیچیده‌ای را به کار برده و باقی‌مانده‌هایی با تغییرات نرم برای اجرای کریجینگ به دست دهد. همچنین، روش رگرسیون کریجینگ این امکان را فراهم می‌کند که پژوهشگر رابطه رگرسیونی به دست آمده را بررسی و تفسیر کند.

آنالیز مغزه‌های لایه C_1 در ۳۵ گمانه اکتشافی، پایگاه داده‌ای متشکل از حجم گاز، عمق لایه، ضخامت لایه، خاکستر، گوگرد کل، پلاستومتری در جهت X و Y، ضریب بازتاب نور، فسفر، مواد فرار، رطوبت، بازیابی مغزه و درجه کک‌شوندگی تهیه شد. برای مدل‌سازی گازخیزی در پروده ۱، لازم است در ابتدا روابط آماری متغیرهای بالا با گازخیزی بررسی شود. این کار با تحلیل خوشه‌ای و مطالعه رگرسیونی میسر شد. در ادامه، بر اساس نتایج تحلیل‌های آماری مرحله قبل، تخمین و شبیه‌سازی زمین‌آماری برای مدل کردن گازخیزی در فضای کانسار به کار گرفته شد.

از موارد کاربرد روش‌های زمین‌آماری در ارزیابی ذخایر زغال‌سنگ می‌توان به کار اولئا و همکاران در تخمین ارزش حرارتی یک ذخیره لیگنیت در ایالات متحده اشاره کرد [۴۰]. همچنین، ملایمت و همکاران و اولئا و همکاران با شبیه‌سازی زمین‌آماری، خاکستر، گوگرد و کربن ذخایر زغال‌سنگ را مدل کرده‌اند [۴۲،۴۱].

۲- روش‌شناسی

رگرسیون کریجینگ^۱ روشی زمین‌آماری برای مدل کردن مجزای بعد قطعیت‌پذیر^۲ و احتمال‌پذیر^۳ متغیر مورد نظر است (شکل ۲) [۴۳]. سه روش کریجینگ عام^۴، کریجینگ با دریافت خارجی^۵ و رگرسیون کریجینگ، در اساس مفاهیم مشابهی دارند. در کریجینگ عام، متغیر مورد تخمین تابعی از مختصات در نظر گرفته و روند^۶ در جهت‌های جغرافیایی شناسایی و مدل می‌شود. اگر بخش قطعیت‌پذیر به وسیله یک تابع خطی از یک متغیر کمکی مدل شود، روش را کریجینگ با دریافت خارجی می‌نامیم [۴۳].



شکل ۲: تصویر شماتیکی از نحوه تخمین با روش رگرسیون کریجینگ

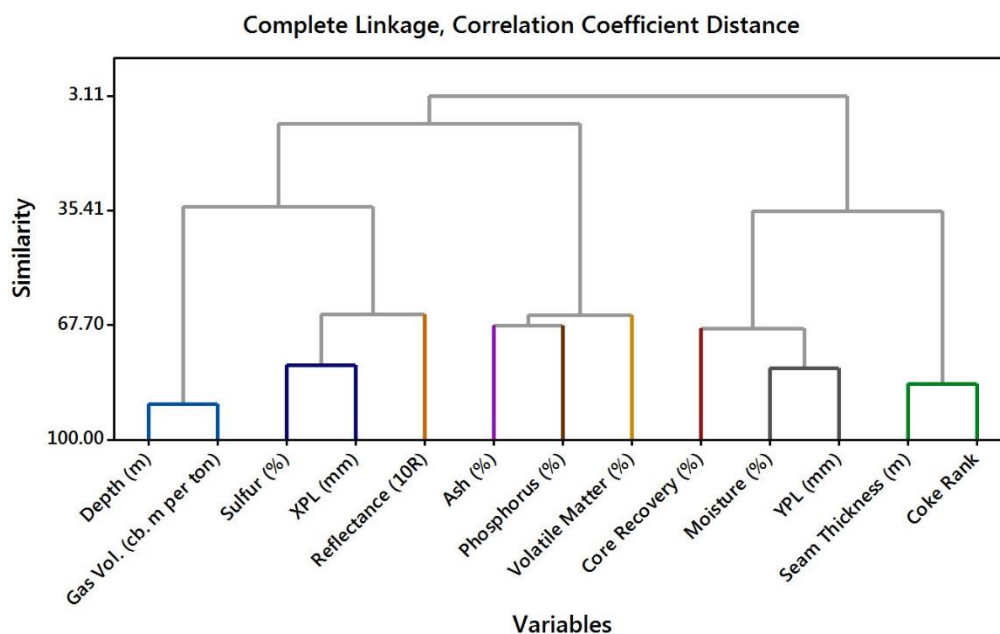
۳- بحث

جدول ۱: پارامترهای آماری داده‌ها

متغیر	تعداد داده	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
گازخیزی (m ³ /t)	۳۵	۱۴٫۹	۵٫۱۸	۱٫۶	۲۲٫۳
عمق (متر)	۳۵	۳۰۶٫۰	۱۹۵٫۴	۷۰٫۲۵	۶۲۶٫۹۵
ریکاوری مغزه (%)	۳۵	۸۳٫۲۳	۱۵٫۳۷	۳۷٫۰۷	۱۰۰٫۰
ضخامت لایه (متر)	۳۵	۱٫۰۱	۰٫۳۰۷	۰٫۴۰	۱٫۴۸
خاکستر (%)	۳۵	۳۴٫۶۳	۲۰٫۸	۹٫۶	۹۱٫۹
رطوبت (%)	۳۵	۰٫۷۱۳	۰٫۲۳۴۱	۰٫۳۰	۱٫۱
کک شوندگی	۳۵	۴۳٫۵	۱٫۲۳	۲٫۰	۶۱۰
مواد فرار (%)	۳۵	۲۱٫۸۶	۱٫۹۶۷	۱٫۸۶	۲۵٫۳
گوگرد (%)	۳۵	۲٫۶۰	۱٫۸۴	۰٫۸۷	۷٫۰۹
فسفر (%)	۳۵	۰٫۱۳۴	۰٫۰۰۵۸	۰٫۰۰۳	۰٫۰۲۳
پلاستومتری X (mm)	۳۵	۱۱٫۵	۳٫۹۲	۶٫۰	۲۰٫۰
پلاستومتری Y (mm)	۳۵	۱۵٫۶۵	۳٫۳۶	۱۲٫۰	۲۴٫۰
انعکاس نور (10R)	۳۵	۱۰۰٫۲۹	۱٫۵۹	۹۸٫۰	۱۰۳٫۰

در ابتدا، مطالعه بازه تغییرات (جدول ۱)، آماده‌سازی و پیش پردازش با بررسی داده‌های خارج از ردیف، بررسی توزیع آماری داده‌ها و انجام تبدیلات لازم انجام پذیرفت. متغیرهای دخیل در تخمین گازخیزی با خوشه‌بندی به روش اتصال کامل^۷ مشخص شدند. همان‌طور که در دندروگرام شکل ۳ مشخص است، تنها عمق لایه با گازخیزی در یک خوشه قرار گرفته است. در نتیجه عمق به عنوان تنها متغیر کمکی در مدلسازی زمین‌آماری گازخیزی در نظر گرفته شد.

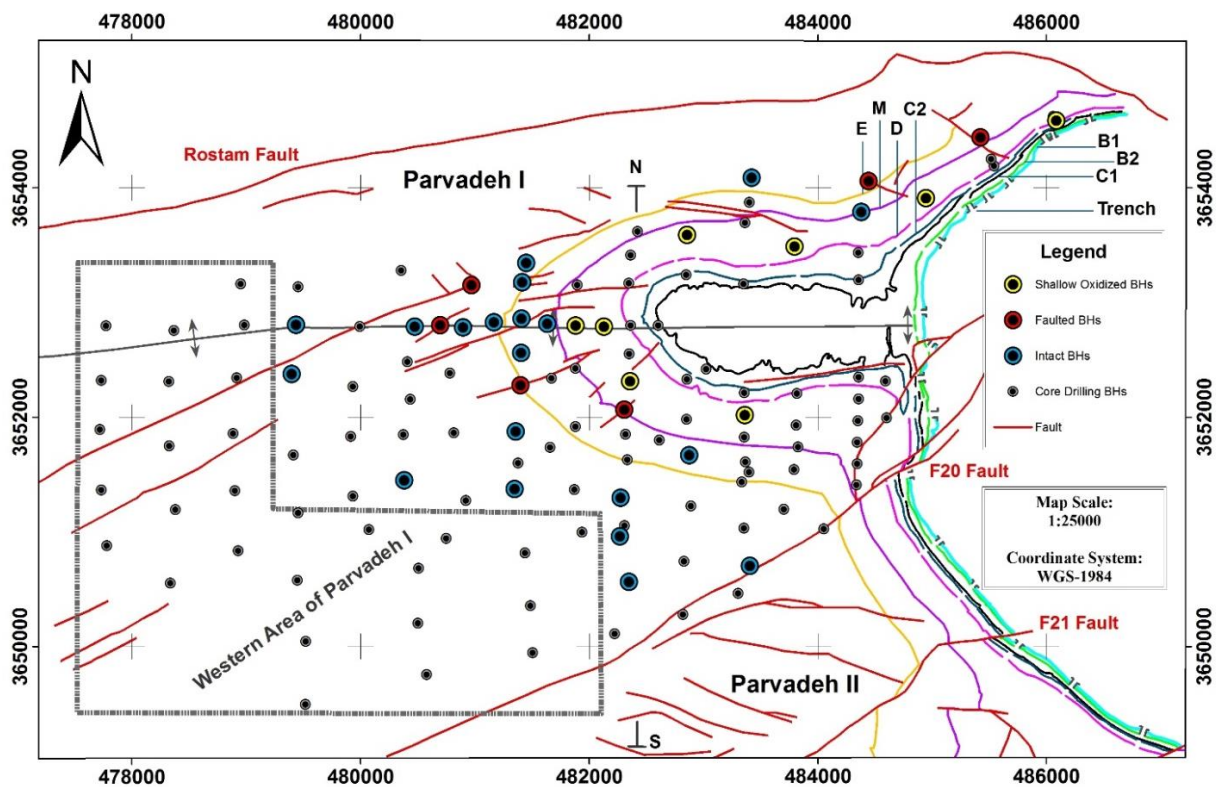
برای مدلسازی ریاضی قابل اعتماد، لازم است داده‌های پرت (خارج از جامعه‌های اصلی) بازبینی شوند چرا که وجود آنها ممکن است همبستگی غیرواقعی در داده‌ها ایجاد کند. در پژوهش حاضر، یکی از مهم‌ترین عواملی که ممکن است به ایجاد داده پرت منجر شود، نمونه‌گیری از زون‌های خرد شده (گسلیده یا محور چین) است. در این زون‌ها گاز از طریق درز و شکاف‌ها از لایه زغال‌سنگ خارج می‌شود. استفاده از داده‌های زون خرد شده در مدلسازی گاز کل لایه باعث کم‌تخمینی و انحراف نتایج به مقادیر کوچک خواهد شد. به همین دلیل، لازم است داده‌های گاز زون‌های خرد شده از فرآیند تخمین کنار گذاشته شوند.

شکل ۳: دندروگرام حاصل از تحلیل خوشه‌ای پارامترهای کمی و کیفی لایه C_۱

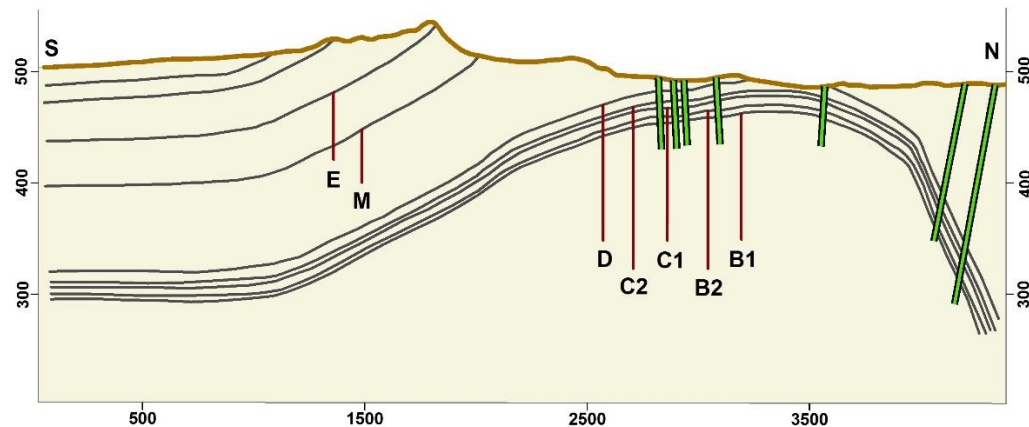
وجود دارند (شکل ۶). بررسی محل این ۶ داده بر روی نقشه زمین‌شناسی مشخص کرد که گمانه‌های مربوطه بر روی گسل قرار دارند. برای جلوگیری از انحراف نتایج تخمین، این داده‌ها کنار گذاشته شدند.

برای انجام هر برآورد معدنی، به یک یا چند روش ریاضی نیاز است. در علوم زمین، این روش‌ها با عنوان تخمین گر شناخته و

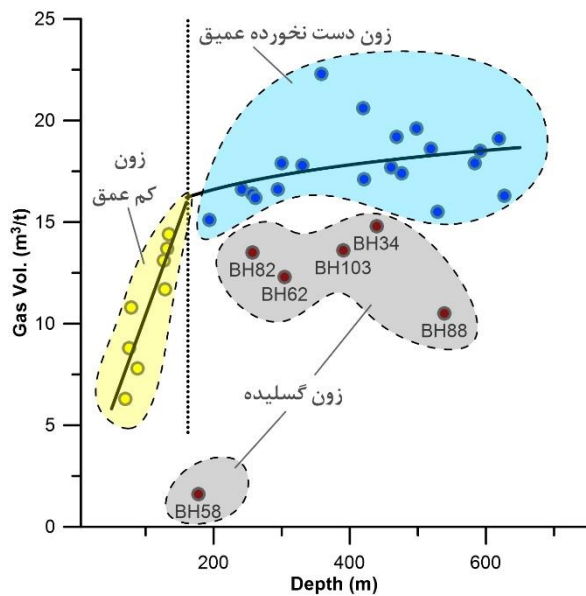
در کانسار پروده ۱، گسل‌های متعددی وجود دارند (شکل ۴). همچنین لایه‌های زغال‌سنگ به شکل یک تاقدیس پلانژدار چین خورده‌اند (شکل ۵). با توجه به تخت بودن نسبی لایه‌ها در محل محور تاقدیس، زون خرد شده تشکیل نشده و گاز فرار نکرده است. نمودار پراکنش عمق-گازخیزی نشان می‌دهد که تعداد ۶ داده پرت با مقادیر گازخیزی کمتر از حد انتظار



شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی خلاصه شده کانسار پروده ۱ (گمانه‌های نزدیک گسل با رنگ قرمز مشخص شده‌اند) [۴۷]



شکل ۵: مقطع زمین‌شناسی مفهومی پروده ۱ در راستای شمالی جنوبی (گمانه‌های اکتشافی به رنگ سبز مشخص شده‌اند) [۴۷]



شکل ۶: نمودار پراکنش عمق - گازخیزی لایه C_1 در پروده ۱ (زون کم عمق با رنگ زرد، زون عمیق (متان خیز) با رنگ آبی و زون خرد شده گسلی با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند).

جدول ۲: دقت مدل‌سازی گازخیزی با معادلات ۳ و ۴

زون	R	MAPE (%)	NMSE (%)
اکسیده	۰٫۸۹	۱۱٫۴	۱۴٫۹
متان خیز	۰٫۷۸	۶٫۴	۱۴٫۵

پس از برآورد رگرسیونی مقادیر گازخیزی در تمام گمانه‌ها، می‌توان از روش‌های ساختاری برای درون‌یابی و تخمین گازخیزی در کلیه بلوک‌های استخراجی لایه C_1 استفاده کرد. قدم اول در تخمین‌های زمین‌آماري محاسبه واریوگرام تجربی در جهت‌های مختلف و ترسیم و تفسیر نقشه ناهمسانگردی است. واریوگرافی گازخیزی در پروده ۱ نشان داد که این متغیر ناهمسانگردی هندسی با فاکتور ۱:۲٫۵ دارد (شکل ۷-الف). واریوگرام‌های تجربی محاسبه شده در جهت قطر بزرگ و کوچک بیضی ناهمسانگردی، با مدل گوسی برازش شدند. مدل گوسی بیانگر مفهوم تغییرات کم در فواصل کم است که از نظر ژنز، با تغییر ملایم پارامترهای کیفی لایه‌های زغال‌سنگ سنخیت دارد. این پدیده، نمود ریاضی تشکیل کانسارهای زغال‌سنگ در یک بستر رسوبی تقریباً همگن است.

شعاع تاثیر محور اصلی ناهمسانگردی برابر با ۲۸۰۰ متر در آزیموت 105° و محور فرعی ۱۱۰۰ متر در آزیموت 15°

به دو دسته کلی روش‌های ساختاری و غیرساختاری تقسیم می‌شوند. در روش‌های غیرساختاری محل نمونه در فضا در فرآیند تخمین لحاظ نمی‌شود (مانند روش‌های رگرسیون پایه) حال آنکه روش‌های ساختاری، علاوه بر متغیرهای هر نمونه، محل قرارگیری آن در فضا را نیز در نظر می‌گیرند (مانند روش‌های عکس فاصله وزن‌دار، کریجینگ، شبیه‌سازی زمین‌آماري و نظایر آن‌ها). در این پژوهش از تلفیق هر دو روش ساختاری (کریجینگ و شبیه‌سازی زمین‌آماري) و غیرساختاری (رگرسیون) استفاده شده است. روش‌های زمین‌آماري در نرم‌افزار SGeMS 2.1 اجرا شده‌اند. واریوگرام تجربی داده‌ها و مدل‌های برازش شده در نرم‌افزار Grapher ترسیم مجدد شده‌اند. مدل رگرسیونی در نرم‌افزار Datafit 8.2 محاسبه شده و کلیه نقشه‌ها و مقاطع زمین‌شناسی در نرم‌افزار ArcMap 9.3c ترسیم شده‌اند.

آن‌گونه که در شکل ۴ مشخص است، بخش بزرگی از کانسار پروده ۱ در غرب مورد مطالعه گازخیزی قرار نگرفته است. برای برآورد گازخیزی در این بخش از کانسار، مدل‌سازی رگرسیونی حاکم بر رفتار گاز در نواحی شرقی و مرکز کانسار که در آنجا داده به میزان کافی موجود است، انجام شد. در ادامه، این مدل ریاضی که در قالب یک معادله رگرسیونی بر حسب عمق لایه نوشته شده است، برای تخمین گازخیزی در محل گمانه‌های غرب کانسار که عمق لایه در آنها معلوم است به کار گرفته شد. بررسی تغییرات گازخیزی نسبت به عمق مشخص می‌کند که گازخیزی از اعماق کم تا انتهای زون اکسیده (عمق ۱۴۰ متر) به سرعت زیاد می‌شود (شکل ۶). پس از گذر از زون اکسیده و با ورود به زون متان‌خیز، گازخیزی نسبت به عمق با شیب ملایم‌تری افزایش پیدا می‌کند. برای انجام یک برازش رگرسیونی صحیح و قابل اعتماد، این دو جامعه به صورت مجزا مدل‌سازی شدند (معادله ۳ برای زون اکسیده و معادله ۴ برای زون متان‌خیز). بررسی صحت و دقت این مدل ریاضی با محاسبه سه فاکتور ضریب همبستگی خطی داده‌های واقعی با داده‌های حاصل از مدل (R)، میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) و میانگین مربعات خطای نرمالایز شده (NMSE) انجام شد. همان‌طور که در جدول ۲ مشخص است، مدل رگرسیونی توانسته است با خطای قابل قبول، تغییرات گازخیزی در عمق‌های مختلف لایه C_1 را برآورد کند.

$$\text{Gas Vol.} = 1.19 + 0.0923 \times (\text{Depth}) \quad (3)$$

$$\text{Gas Vol.} = 7.32 + 1.75 \times \ln(\text{Depth}) \quad (4)$$

نتایج مورد نظارت مفسر قرار گیرد.

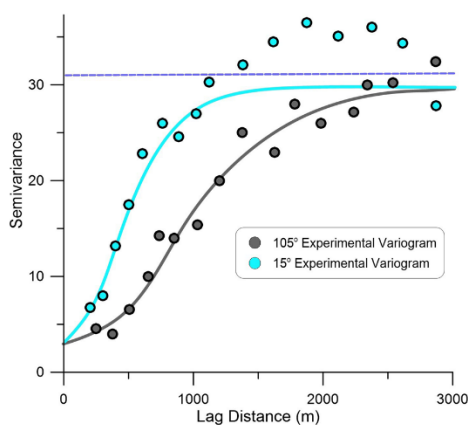
بازبینی نتایج رگرسیون کریجینگ نشان می‌دهد که گازخیزی گمانه ۷۲ کمتر از واقعیت برآورد شده است (شکل ۹). علت آن است که دو گمانه ۱۴۷ و ۱۴۹ با گازخیزی بسیار کمتر در کنار آن واقع شده‌اند. اثر هموارشدگی کریجینگ در اینجا به شدت عمل کرده و خطای بزرگی ایجاد کرده است. این موضوع در مورد گمانه ۱۳۵ هم صدق می‌کند؛ چرا که در نزدیکی گمانه کم‌گاز ۱۰۱ قرار دارد. از دیدگاه ساختمانی، عدم تطابق نتایج رگرسیون کریجینگ با واقعیت به خاطر تغییرات شدید گازخیزی در یال شمالی تاقدیس است. این تغییرات شدید به علت شیب زیاد ماده معدنی (متوسط ۴۵ درجه) است. در شرایط این‌چنینی، کریجینگ به خوبی قادر به برآورد متغیر هدف نیست. برای حذف این اثر نامطلوب، می‌توان ابعاد بلوک‌ها را کاهش داد اما این راهکار به علت محدودیت‌های استخراجی، عملاً امکان‌پذیر نیست و جنبه کاربردی ندارد.

در مقابل، روش شبیه‌سازی زمین‌آماري این خلاء را پر می‌کند و در مناطقی با تغییرات شدید، نتایج بهتری به دست می‌دهد. شبیه‌سازی زمین‌آماري روشی است که در پی معرفی تعدادی تحقق^۱ از واقعیت است و به جای معرفی یک تحقق (مانند کریجینگ)، دسته‌ای از حالات ممکن را به دست می‌دهد. شبیه‌سازی با حفظ پارامترهای ساختاری داده‌ها (هیستوگرام و واریوگرام)، برای آشکارسازی دامنه تغییرپذیری‌های ممکن و محاسبه احتمال یک رخداد معدنی تعریف شده کاربرد دارد. انواع مختلفی از شبیه‌سازی زمین‌آماري وجود دارد که به دو صورت شرطی و غیرشرطی قابل اجرا هستند. در شبیه‌سازی

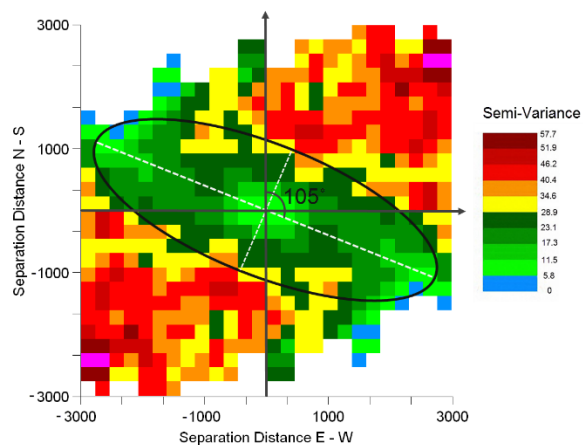
محاسبه شدند (شکل ۷-ب). بیضی ناهمسانگردی مقادیر گازخیزی با آزیموت قطر بزرگ 105° مشخص شده است، بدین معنی که حداکثر پیوستگی مقادیر گازخیزی در جهت تقریبی شرقی-غربی قرار دارد. این امتداد منطبق بر کشیدگی باتلاق تورب تشکیل‌دهنده لایه‌های زغال سنگ در حوضه زغالی پروده است [۴۷]. انطباق تحلیل‌های زمین‌آماري با نتایج مطالعات زمین‌شناسی قبلی، دلیلی بر درستی این تحلیل‌ها است.

ریزپهنه‌بندی گازخیزی به عنوان عامل اصلی ریسک در معدن پروده ۱ با به کارگیری روش رگرسیون کریجینگ برای کلیه بلوک‌های استخراجی با ابعاد 100×100 متر انجام شد. مقدار گازخیزی در شرق کانسار و نزدیک به رخنمون، کم و در محدوده ایمن است (کمتر از $12 \text{ m}^3/\text{t}$). در مقابل، گازخیزترین زون به نام HGZ_۱ با گازخیزی بیش از $21 \text{ m}^3/\text{t}$ در مرکز شمال کانسار قرار دارد (شکل ۸). به علاوه، گازخیزی نیمه غربی و بخش اعظم نیمه جنوبی بیش از $17.5 \text{ m}^3/\text{t}$ برآورد می‌شود.

اعتبارسنجی نتایج با روش جک‌نایف نشان می‌دهد که دقت روش رگرسیون کریجینگ برابر با مقدار قابل قبول ۹۴٪ است (شکل ۹). در تخمین‌های زمین‌آماري، اثر هموارشدگی^۸ یک اثر مضر شناخته شده است. در پژوهش حاضر، این اثر ممکن است به صورت محوکننده زون‌های گازخیز بروز پیدا کرده و باعث افزایش ریسک شود. همچنین، اثر هموارشدگی ممکن است باعث کم‌تخمینی^۹ گازخیزی شود که اثری خطرناک به حساب می‌آید. به همین دلیل لازم است در مرحله تفسیر،

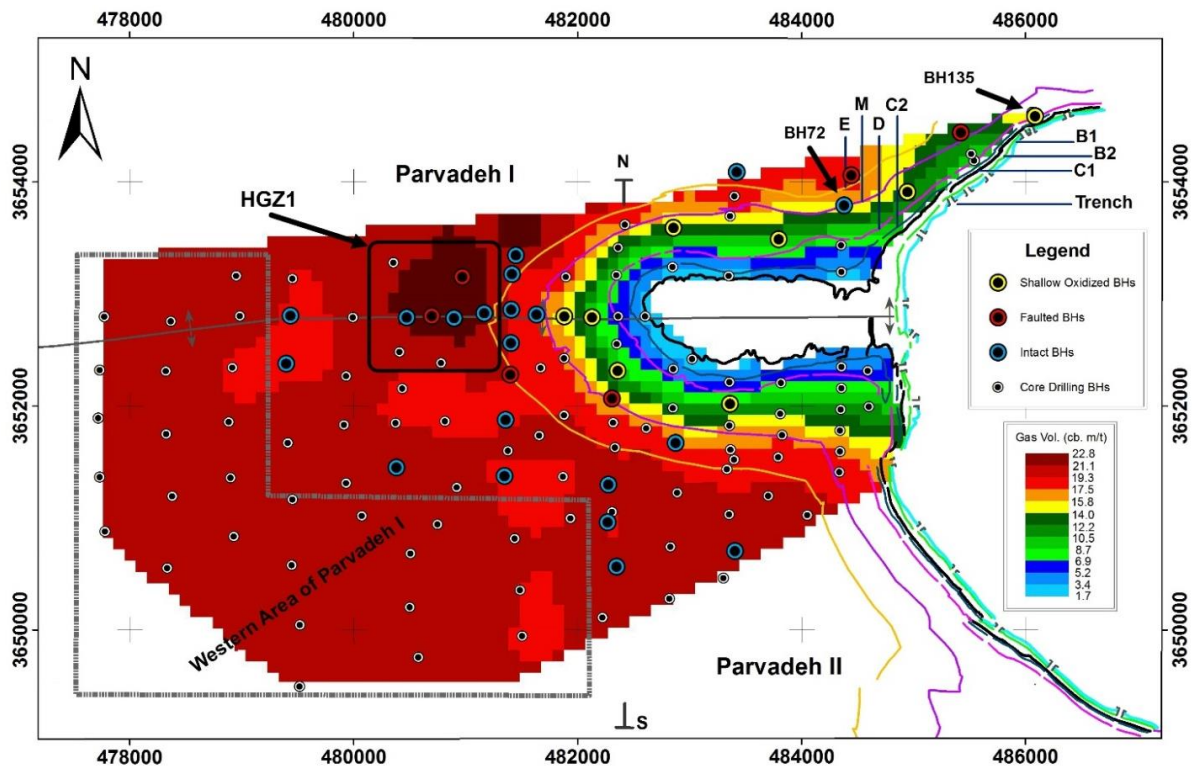


(ب)



(الف)

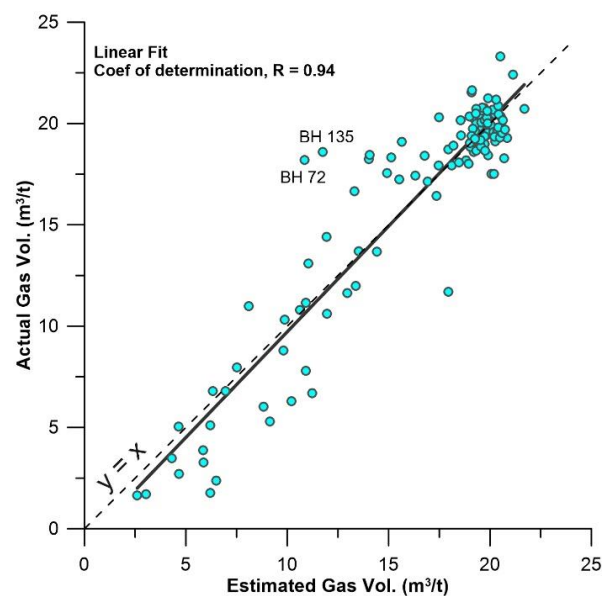
شکل ۷: الف) نقشه ناهمسان‌گردی و بیضی ناهمسانگردی گازخیزی، ب) واریوگرام‌های جهت اصلی و فرعی گازخیزی



شکل ۸: تخمین گاز خیزی بلوک‌های استخراجی به روش رگرسیون کریجینگ

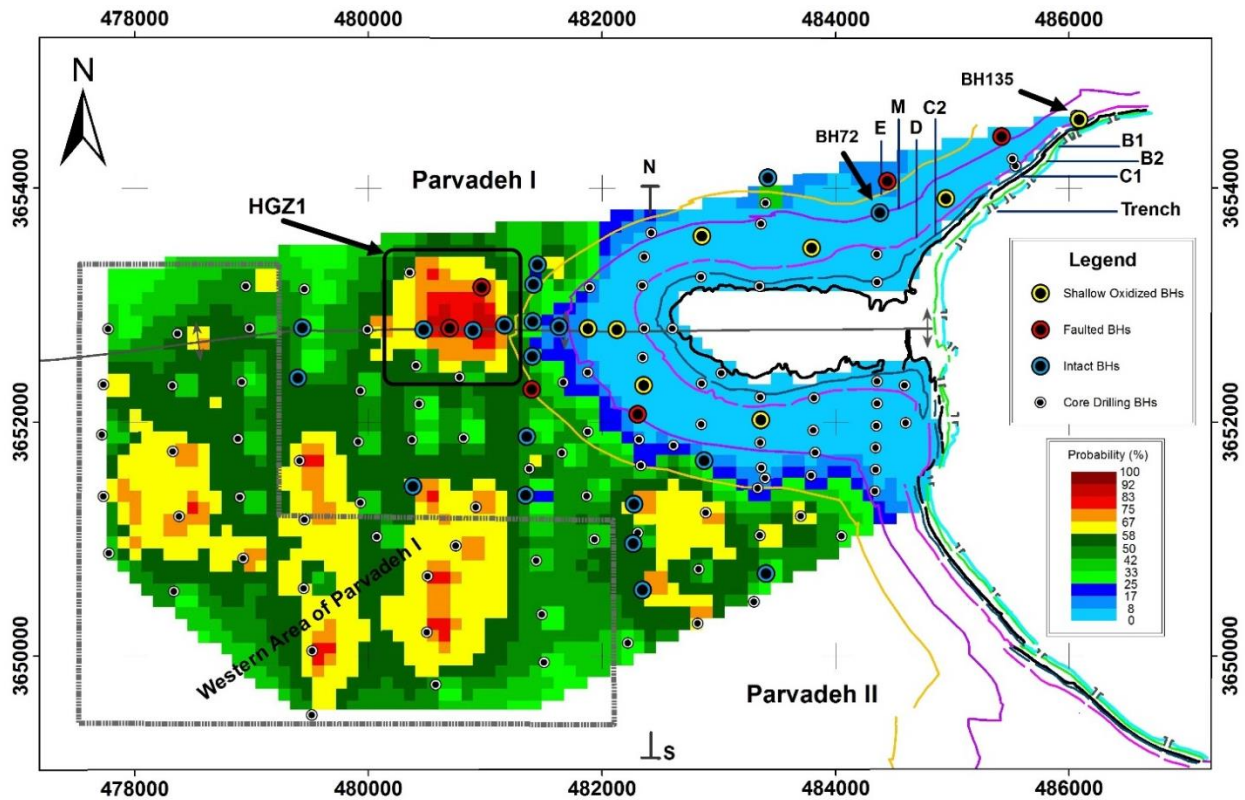
باشد، بلکه باید برای نقاطی که در آنها داده وجود داشته است، مقادیر اولیه بازتولید شود. در این پژوهش برای ریزپهنه‌بندی احتمال وجود زون‌های گاز خیزی بحرانی (بیش از $20 \text{ m}^3/\text{t}$) از روش شبیه‌سازی شرطی شاخص^{۱۱} استفاده شد (شکل ۱۰). داده‌های ورودی و واریوگرام استفاده شده در شبیه‌سازی با کریجینگ یکسان بوده‌اند.

نقشه شکل ۱۰ با میانگین‌گیری از ۲۵۰ تحقق به دست آمده و حاکی از آن است که وجود گاز خیزی بحرانی در بخش شرقی لایه C_1 منتفی است. این احتمال با عمیق شدن لایه بیشتر می‌شود و در نواحی عمیق جنوب غربی و مرکز - شمال به حداکثر می‌رسد. این نواحی به احتمال ۱۰۰٪ گاز خیزی بحرانی خواهند داشت. خطرناک‌ترین زون به نام HGZ_1 مشخص شده است و باید مورد توجه جدی قرار گیرد (شکل ۱۰). مختصات حفر چاه‌های تخلیه گاز بر اساس نقشه شکل ۱۰ پیشنهاد شدند (جدول ۳). هرچند تصمیم نهایی در خصوص جانمایی چاه‌های تخلیه گاز به مطالعات مفصل‌تری از جمله بررسی نفوذپذیری و تخلل لایه‌های زغالی و کمر بالا و کمر پایین آنها نیاز دارد.



شکل ۹: اعتبارسنجی نتایج رگرسیون کریجینگ به روش جک‌نایف

غیرشرطی کافی است متوسط حالات بازتولید شده، پارامترهای آماری و ساختار فضایی مشابهی با داده‌های اولیه داشته باشند. در شبیه‌سازی شرطی، نه تنها لازم است شرایط یاد شده صادق



شکل ۱۰: ریزپهنه‌بندی احتمال وجود زون‌های بحرانی گاز لایه C₁ در پروده ۱ به روش شبیه‌سازی شرطی زمین‌آماری

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، گازخیزی کل لایه C₁ معدن پروده ۱ طبس و احتمال وجود زون‌هایی با گازخیزی بحرانی با تلفیق روش‌های آماری، زمین‌آماری و شبیه‌سازی زمین‌آماری با موفقیت برآورد شد. نکته بسیار مهم این است که در تخمین گازخیزی باید اختصاص‌های ساختمانی لایه زغال سنگ اعم از عمق، چین و گسل خوردگی به دقت تجزیه و تحلیل شده و در روند تخمین در نظر گرفته شوند. با وجود دقت و صحت بالای روش رگرسیون کریجینگ، اثر هموارشدگی کریجینگ باعث بروز پدیده کم‌تخمینی در نقاط محدودی شده است. برای دوری از این اثر، روش شبیه‌سازی شرطی زمین‌آماری به کار گرفته شد و احتمال وجود زون‌های بحرانی به کمک این روش در کل کانسار مدل شد.

از نمودار پراکنش عمق-گازخیزی، حد جدایش زون‌های اکسیده و متان‌خیز برابر با عمق ۱۳۳ متر برداشت می‌شود، حال آنکه بر پایه آنالیز شیمیایی گاز، این حد جدایش، برابر با ۱۴۰ متر تعیین شده است. به علاوه، اثر قطعه‌ای کوچک و رفتار تغییرات گازخیزی به صورت مدل وارپوگرام گوسی،

جدول ۳: مختصات پیشنهادی چاه‌های تخلیه گاز (سیستم مختصات: UTM-WGS 1984)

Well ID	Easting (m)	Northing (m)
HGZ ₁ -W1	۴۸۰۶۴۰	۳۶۵۲۹۴۵
HGZ ₁ -W2	۴۸۰۹۸۰	۳۶۵۲۹۰۵

در مجموع، ۰٫۳۸ میلیون مترمربع از سطح لایه C₁ (معادل ۳۸ بلوک استخراجی) با قطعیت (احتمال ۱۰۰٪) در بازه گازخیزی بحرانی قرار دارد. همچنین ۱٫۴۳ میلیون مترمربع از سطح لایه C₁ (معادل ۱۴۳ بلوک استخراجی) به احتمال ۷۵٪ یا بیشتر در بازه گازخیزی بحرانی قرار دارد. در مورد ریزپهنه‌بندی زون‌های بحرانی ذکر این نکته حیاتی است که زون HGZ₁، منطبق بر دو گمانه زون گسلی (۳۴ و ۱۰۳) است. اگر داده‌های این دو گمانه کنار گذاشته نمی‌شدند، گازخیزی کم برآورد می‌شد و این تخمین اشتباه می‌توانست خطرساز شود.

- [5] Wang, L., Cheng, Y. P., and Liu, H. Y. (2014). "An analysis of fatal gas accidents in Chinese coal mines". Safety Science, 62: 107-113.
- [6] Cai, Y., Liu, D., Zhang, K., Elsworth, D., Yao, Y., and Tang, D. (2014). "Preliminary evaluation of gas content of the No. 2 coal seam in the Yanchuannan area, southeast Ordos basin, China". Journal of Petroleum Science and Engineering, 122(2): 675-689.
- [7] Hamilton, S. K., Esterle, J. S., and Golding, S. D. (2012). "Geological interpretation of gas content trends, Walloon Subgroup, eastern Surat Basin, Queensland, Australia". International Journal of Coal Geology, 101: 21-35.
- [8] Qingming, L. (2011). "Research on the Rapid Measurement Technique of Gas Content". Procedia Engineering, 26: 132-138.
- [9] Strapoć, D., Mastalerz, M., Eble, C., and Schimmelmann, A. (2007). "Characterization of the origin of coalbed gases in southeastern Illinois Basin by compound-specific carbon and hydrogen stable isotope ratios". Organic Geochemistry, 38(2): 267-287.
- [10] William, R. (2002). "Gas content testing for outburst management compliance". Coal Operators Conference, 3(February): 58-64.
- [11] Zhang, Q., and Ma, Q. J. (2015). "Dynamic pressure induced by a methane-air explosion in a coal mine". Process Safety and Environmental Protection, 93(May 2013): 233-239.
- [12] Kędzior, S., Kotarba, M. J., and Pękała, Z. (2013). "Geology, spatial distribution of methane content and origin of coalbed gases in Upper Carboniferous (Upper Mississippian and Pennsylvanian) strata in the south-eastern part of the Upper Silesian Coal Basin, Poland". International Journal of Coal Geology, 105: 24-35.
- [13] Yu-Long, D., Xiang-Lan, L., Xin-Quan, Z., Xu-Sheng, Z., and Qing-Hua, Z. (2011). "Study on Supporting Wood Fire Induced by Mine Methane Explosions". Procedia Engineering, 26: 195-203.
- [14] Sokol, E. V., Novikova, S. A., Alekseev, D. V., and Travin, A. V. (2014). "Natural coal fires in the Kuznetsk Coal Basin: geologic causes, climate, and age". Russian Geology and Geophysics, 55: 1043-1064.
- [15] Si, R., Li, R., and Huang, Z. (2012). "Material Evidence Analysis upon Accident Investigation of Gas and Coal Dust Explosion". Procedia Engineering, 45: 458-463.
- [16] Dubaniewicz, T. H. (2009). "From Scotia to Brookwood, fatal US underground coal mine explosions ignited in intake air courses". Journal of Loss Prevention in the

نشان از ماهیت همگن گازخیزی لایه یاد شده به ویژه در فواصل کم داشته و این موضوع به گونه‌ای به ماهیت همگن زغال‌سنگ‌های منطقه اشاره دارد. بیضی ناهمسانگردی گازخیزی با آزمون محور اصلی 105° مشخص شده است، بدین معنی که حداکثر پیوستگی مقادیر گازخیزی در جهت تقریبی شرقی- غربی است. این امتداد منطبق بر کشیدگی باتلاق تورب تشکیل دهنده لایه‌های زغال‌سنگ در پروده است. تحلیل‌های ریاضی به دست آمده از این پژوهش، همگی به واقعیت‌های زمین‌شناسی اثبات شده در مورد کانسار پروده ۱ اشاره می‌کنند. این انطباق دلیل محکمی بر صحت مدل ریاضی ارایه شده در این پژوهش است.

مدل ریاضی به دست آمده، زون‌های شدیداً گازخیز را در مرکز و غرب لایه آشکار کرده و بر همین اساس، مختصات چاه‌های تخلیه گاز پیشنهاد شده‌اند. همچنین گازخیزی کلیه بلوک‌های استخراجی محاسبه شده است و از نتایج این پژوهش می‌توان در طراحی و به روزرسانی سیستم تهویه و افزایش سطح ایمنی معدنکاری استفاده کرد.

۵- سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله از مدیریت و کارشناسان محترم شرکت زغال‌سنگ پروده طیس، دفتر طراحی معدن پروده طیس و به ویژه جناب آقای مهندس جراحی که مولفین را در انجام این پژوهش یاری کردند صمیمانه سپاس‌گزاری به عمل می‌آید.

۶- مراجع

- [1] Mares, T. E., Moore, T. A., and Moore, C. R. (2009). "Uncertainty of gas saturation estimates in a subbituminous coal seam". International Journal of Coal Geology, 77(3-4): 320-327.
- [2] مرکز آمار ایران؛ ۱۳۹۳؛ "سالنامه آماری ۱۳۹۳، اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی ایران".
- [3] United States Center of disease control and prevention; National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), (2015). "All U.S Mining Disasters: 1839 to Present". U.S. Department of Health & Human Services Yearbook, pp. 761.
- [4] Zheng, Y. P., Feng, C. G., Jing, G. X., Qian, X. M., Li, X. J., Liu, Z. Y., and Huang, P. (2009). "A statistical analysis of coal mine accidents caused by coal dust explosions in China". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22(4): 528-532.

- Giddings, J. R. (2013). "Prediction of confined, vented methane-hydrogen explosions using a computational fluid dynamic approach". International Journal of Hydrogen Energy, 38(0): 6904- 6914.
- [29] Nian, Q., Shi, S., and Li, R. (2012). "Research and Application of Safety Assessment Method of Gas Explosion Accident in Coal Mine based on GRA-ANP-FCE". Procedia Engineering, 45(50774033): 106-111.
- [30] Fan, X., Yi, J., and Bao, Z. (2011). "Research on safety input research model for preventing coal gas explosion". Procedia Engineering, 26: 2012-2017.
- [31] Larry Grayson, R., Kinilakodi, H., and Kecojevic, V. (2009). "Pilot sample risk analysis for underground coal mine fires and explosions using MSHA citation data". Safety Science, 47(10): 1371-1378.
- [32] Li, Z., Lu, Z., Wu, Q., and Zhang, A. (2007). "Numerical Simulation Study of Goaf Methane Drainage and Spontaneous Combustion Coupling". Journal of China University of Mining and Technology, 17(4): 503-507.
- [33] Tarvainen, M. (1999). "Recognizing explosion sites with a self-organizing network for unsupervised learning". Physics of the Earth and Planetary Interiors, 113(1-4): 143-154.
- [۳۴] درمیان، م. ز، جوانشیرگیو، م، سرشکی، ف، شبانی، ع؛ ۱۳۹۲؛ "بازیابی گاز متان در معدن ۱ مکانیزه پروده طبس و قابلیت‌های نوین زهکشی CH_4 ". نهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن ایران.
- [۳۵] توکلی، م، سرشکی، ف؛ ۱۳۸۵؛ "گاز زغال و روشهای کاهش آن (گاززدایی) در معدن پروده طبس". پنجمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن.
- [۳۶] ملایمت، ح، محمدتراب، ف، جراحی، ع؛ ۱۳۹۱؛ "تخمین گاز خیزی در معدن زغال سنگ پروده ۱ طبس با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی". اولین کنگره ملی زغال سنگ ایران.
- [۳۷] ملایمت، ح، محمدتراب، ف، جهانگرد، ش؛ ۱۳۹۳؛ "مدل سازی آماری تغییرات گاز متان در لایه زغال سنگ B_2 کانسار پروده ۴ طبس". سی و سومین گردهمایی علوم زمین.
- [۳۸] ملایمت، ح، محمدتراب، ف؛ ۱۳۹۲؛ "تخمین خاکستر زغال سنگ کانسار پروده ۴ طبس با استفاده از کریجینگ عام و پیشنهاد نقاط بهینه حفاری تکمیلی". نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن ایران، شماره ۲۰، ص ۱۱-۱.
- [39] Flores, R. M., Rice, C. A., Stricker, G. D., Warden, A., and Ellis, M. S. (2009). "Methanogenic pathways of coal-bed gas in the Powder River Basin, United States: The geologic factor". International Journal of Coal Geology, 76: 52-75.
- Process Industries, 22(1): 52-58.
- [17] Cheng, J., and Luo, Y. (2013). "Modified explosive diagram for determining gas-mixture explosibility". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 26(4): 714-722.
- [18] Pang, L., Wang, T., Zhang, Q., Ma, Q., and Cheng, L. (2014). "Nonlinear distribution characteristics of flame regions from methane-air explosions in coal tunnels". Process Safety and Environmental Protection, 92(3): 193-198.
- [19] Bai, C., Gong, G., Liu, Q., Chen, Y., and Niu, G. (2011). "The explosion overpressure field and flame propagation of methane/air and methane/coal dust/air mixtures". Safety Science, 49(10): 1349-1354.
- [20] You, H., Yu, M., Zheng, L., and An, A. (2011). "Study on Suppression of the Coal Dust/Methane/Air Mixture Explosion in Experimental Tube by Water Mist". Procedia Engineering, 26: 803-810.
- [21] Procházka, P. P. (2014). "Rock bursts due to gas explosion in deep mines based on hexagonal and boundary elements". Advances in Engineering Software, 72: 57-65.
- [22] Cao, Y., He, D., and Glick, D. C. (2001). "Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults". International Journal of Coal Geology, 48(1-2): 47-63.
- [23] Li, H. (2001). "Major and minor structural features of a bedding shear zone along a coal seam and related gas outburst, Pingdingshan coalfield, Northern China". International Journal of Coal Geology, 47(2): 101-113.
- [24] Mahdevari, S., Shahriar, K., and Esfahanipour, A. (2014). "Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS". Science of the Total Environment, 488-489(1): 85-99.
- [25] Krause, E., and Skiba J. (2014). "Formation of methane hazard in longwall coal mines with increasingly higher production capacity". International Journal of Mining Science and Technology, 24(3): 403-407.
- [26] Medic Pejic, L., García Torrent, J., Querol, E., and Lebecki, K. (2013). "A new simple methodology for evaluation of explosion risk in underground coal mines". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 26(6): 1524-1529.
- [27] Chen, H., Qi, H., and Feng, Q. (2013). "Characteristics of direct causes and human factors in major gas explosion accidents in Chinese coal mines: Case study spanning the years 1980-2010". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 26(1): 38-44.
- [28] Woolley, R. M., Fairweather, M., Falle, S. A. E. G., and

and regression-kriging". Geoderma, 67(3-4): 215-226.

- [46] Minasny, B., and McBratney, A. B. (2007). "Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function". Geoderma, 140(4): 324-336.
- [47] ADAM consulting Engineers, (1992). "Tabas coal mine geological report (Parvadeh I)". Parvadeh Tabas Coal Co.
- [40] Olea, R. A., and Luppens, J. A. (2015). "Mapping of coal quality using stochastic simulation and isometric logratio transformation with an application to a Texas lignite". International Journal of Coal Geology, 152(PA): 80-93.
- [41] Olea, R. A., Luppens, J. A., Egozcue, J. J., and Pawlowsky-Glahn, V. (2016). "Calorific value and compositional ultimate analysis with a case study of a Texas lignite". International Journal of Coal Geology, 162: 27-33.
- [42] Molayeat, H., Torab, F. M., Pawlowsky-Glahn, V., Hossein-Morshedy, A., and Egozcue, J. J. (2018). "The impact of the compositional nature of data on coal reserve evaluation, a case study in Parvadeh IV coal deposit, Central Iran". International Journal of Coal Geology, 188: 94-111.
- [43] Hengl, T., Bajat, B., Blagojević, D., and Reuter, H. I. (2008). "Geostatistical modeling of topography using auxiliary maps". Computers & Geosciences, 34(12): 1886-1899.
- [44] Ahmed, Sh., and De Marsily, G. (1987). "Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity". Water Resources Research, 23(9): 1717.
- [45] Odeh, I. O. A., McBratney, A. B., and Chittleborough, D. J. (1995). "Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging

¹ Regression Kriging

² Deterministic

³ Probabilistic

⁴ Universal Kriging

⁵ Kriging with external drift

⁶ Trend

⁷ Complete Linkage

⁸ Smoothing effect

⁹ Under-estimation

¹⁰ Realization

¹¹ Conditional indicator simulation



Outlining High Gas-Bearing Sub-Panels in Parvadeh I Coal Mine Using Regression and Geostatistical Simulation

Molayemat H.¹, Torab F.M.^{2*}

1- Ph.D Student, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
h.molayemat@stu.yazd.ac.ir

2- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
fintorab@yazd.ac.ir

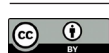
(Received: 26 Jul. 2020, Accepted: 17 Jul. 2021)

Abstract: High gas volume is the main reason of explosion, rock burst and fatal coal mining disasters. In a coal mining project, it is necessary to model the gas volume at all parts of the target seam. Among coal resources of Iran, Parvadeh I has high gas bearing seams with an average of 14 m³/t of gas. C1 coal seam is the main mining target in Parvadeh I and it was explored by 134 core drilling boreholes. Gas study has been carried out for 35 boreholes, in only central and eastern parts of the deposit. Gas volume is not measured at the deep western parts. In this study, fractured zones are identified and their gas data removed from the gas modelling procedure. It is found that gas volume and seam depth are highly correlated and also, two separated populations are evident in the gas vol. – depth cross plot. The first population is related to oxidized shallow, and the second one is interpreted as deep methane bearing zones of the seam. Using the regression kriging method with the seam depth as the auxiliary variable, the gas volume is estimated for the whole mining blocks of the C1 seam. The validity of the estimations is evaluated as 94% by the Jackknife method. In order to avoid the smoothing effect of kriging, the probability of critical gas zones (> 20 m³/t) is modelled by the conditional indicator cosimulation. Results demonstrated that 1.43 million m² of the C1 seam with the probability of 75%, and 0.38 million m² with the probability of 100% fell into the critical category. These critical gas zones are located in central, southern and western Parvadeh I. These zones are considered to be the main targets for the future gas drainage studies.

Keywords: Coal gas volume, Geostatistics, Parvadeh I tabas, Regression kriging, Conditional indicator cosimulation.

INTRODUCTION

Numerous coal mining disasters happens due to high amounts of trapped gas in the coal seams [1-3]. It is previously found that gas volume is related to burial depth, temperature, moisture and petrological properties of the coal [4,5]. Obviously, this relationship is unique for every coal deposit and it needs to be studied accurately [6]. The first step of a gas risk reduction study is to model the in-situ gas volume for the target coal seams. The success of gas drainage plans fully depends on the accuracy and validity of gas



volume estimation [7,8].

The present study, discusses about gas volume of the C_1 coal seam at the Parvadeh I Tabas coal mine in Central Iran. Parvadeh Tabas is the main source of coking coal production and also, is known for high gas volume. Core drilling data of 134 exploratory boreholes and 35 gas data is used to estimate the gas volume at all parts of the C_1 seam. Regression analysis, ordinary kriging and conditional indicator cosimulation are used to jointly build a reliable and generalizable model for unknown western parts of the deposit.

METHODS

Regression Kriging (RK) is a geostatistical method for separate modelling of deterministic and probabilistic parts of the target variable [9]. Kriging with external drift and universal kriging are similar methods which estimation carries out entirely after modelling the trend. In contrast, RK models the deterministic part by regression analysis of an auxiliary variable and then, the residuals are estimated as the probabilistic part [10]. In the end, the target variable can be calculated by summing up the regression and kriging results.

A superiority of RK over kriging with external drift is when the auxiliary variable changes drastically in the estimation domain. In such cases, the covariance matrix will be inhomogeneous and estimation error could be huge near the points with extremely distinct values [11]. Alternatively, RK can be used to model the harsh changes with regression models of arbitrary complexity. In addition, the regression models can be observed and interpreted by the researcher.

FINDINGS AND ARGUMENT

As the first step, the Whisker test showed no outlier for the gas volume values. Among 12 qualitative and quantitative coal variables, only seam depth forms a two-member statistical cluster with the gas volume. Although the Whisker test showed no gas vol. Outlier, it is mandatory to study the location of the gas boreholes to investigate whether they are located in the low pressure zones or not. It is important because the trapped gas can escape from the coal seam through fractures and the entire modelling procedure will be falsified by under-estimation. Faulted and/or folded zones are studied in this research and 6 boreholes identified on the fractured zones and consequently, removed from the modelling (Figure 1).

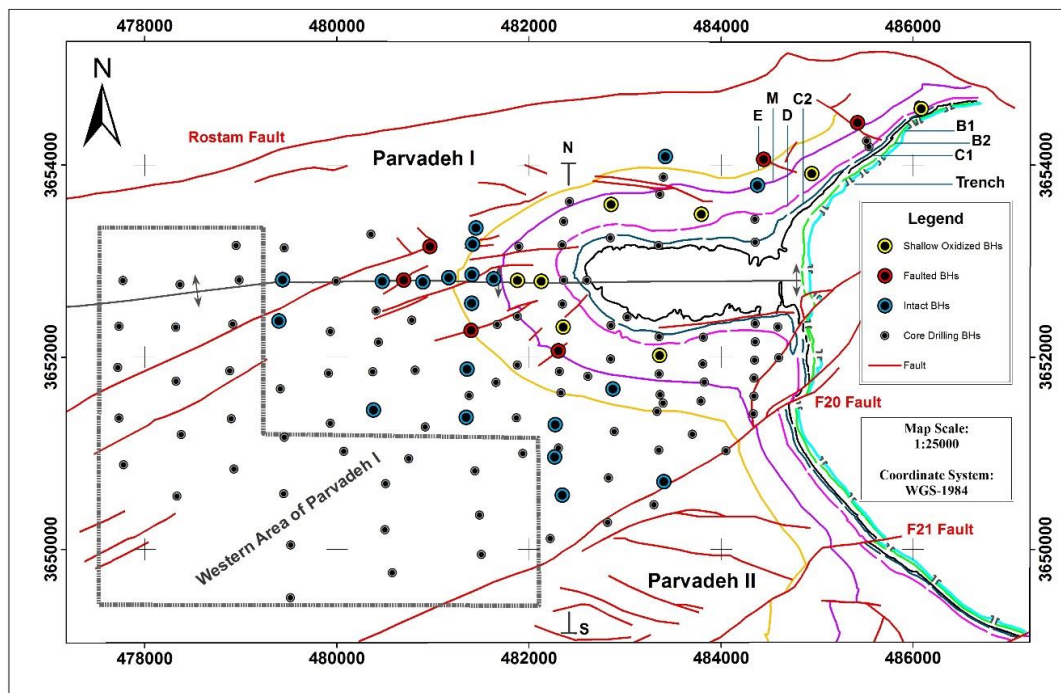


Figure 1. Summarized structural map of the Parvadeh I deposit. Boreholes near the faults are drawn in red

In the second step, the highly correlated depth variable is selected as the auxiliary variable and to perform regression analysis. The gas vol. – depth cross-plot revealed that there are two gas populations versus depth: 1- the shallow oxidized zone and 2- the deep methane bearing zone (Figure 2). As a result, these two populations were analyzed separately to estimate the gas volume at the whole mining blocks, especially at the western deep and not-studied part of the C₁ coal seam (Figure 3).

As expected, low gas volume estimated values are located at the shallow eastern borders, near the C₁ outcrop. A high gas area (HGZ1) is estimated to be located at the central part. This zone contains critical values upto of 21 m³/t of gas. Moreover, a bigger zone is expected to be at the southern parts and to be extended to the western borders.

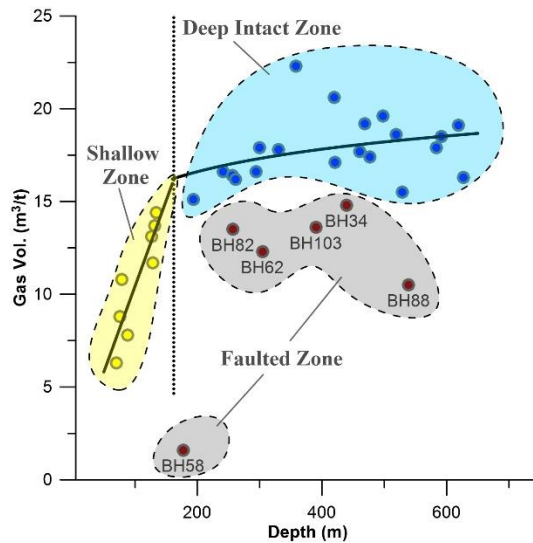


Figure 2. Gas Vol. – depth cross plot showing two populations: 1- yellow: the shallow oxidized zone and 2- blue: the deep methane bearing zone. The faulted zone is illustrated by the grey color

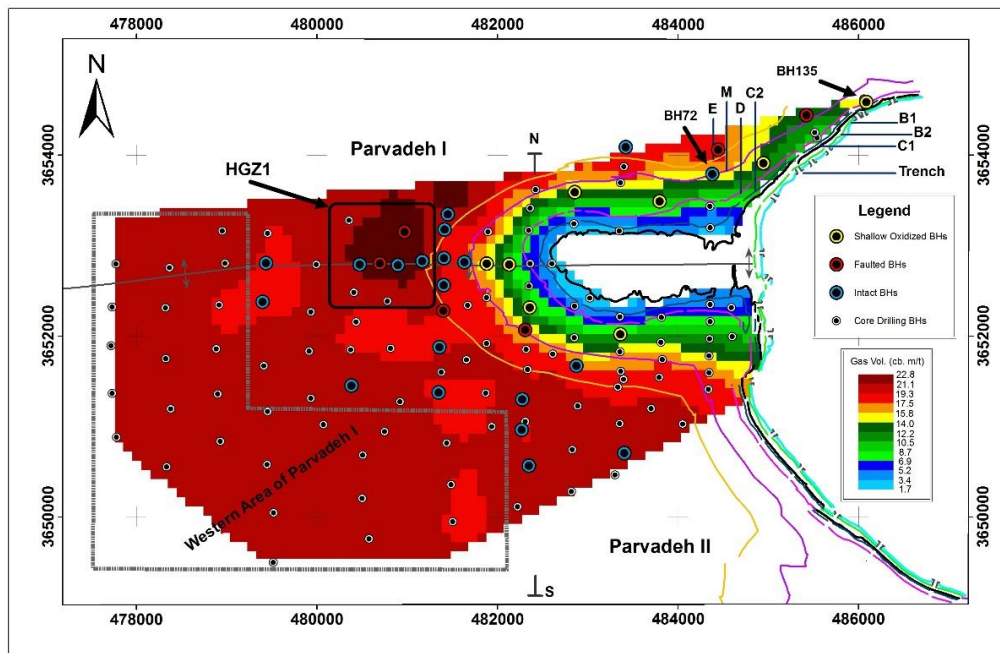


Figure 3. Distribution of the gas volume in the deposit, Estimated by the regression kriging method

The validation of RK is measured by the Jackknife method. It is calculated as 94%, which shows a high level of validity. Although it is a high rate, the results are still exposed to the kriging smoothing effect. In order to solve this problem, a geostatistical simulation approach is followed. The critical gas vol. threshold is set to 20 m³/t and then, 250 realizations are simulated using the conditional indicator cosimulation method. A probability study for the whole domain was carried out. It is found that the probability of critical gas volume at the eastern part is zero. The probability increases by moving toward deeper western parts. In total, 0.38 million m² of the C₁ seam is critical with the probability of 100%. This probability is 75% for 1.43 million m² of the seam. Related to the RK and simulation results, two locations are proposed for gas drainage studies.

CONCLUSIONS

In this study, a joint application of statistical, geostatistical and simulation methods was used to model the gas volume in the Parvadeh I Tabas coal mine. This is important to consider the structural specifications of the target seam, such as depth, faulting and folding. Even though the regression kriging delivered acceptable results, conditional indicator cosimulation was employed to stay away from the smoothing of kriging. It is concluded that the mathematical findings of this research, conforms to the geological facts such as: 1- Separation of gas zones at the depth of 133 meters. This depth is reported as 140 m, based on a previous gas chemistry study; 2- Experimental variograms fitted by the Gaussian models are a mathematical expression of smooth changes at small distances. This is an evidence of sedimentary nature of the coal (Figure 4); 3- The major axis of the anisotropy ellipse is along the azimuth 105°, which is concordant with the forming direction of the Parvadeh paleo-swamp. These findings are proofs for the validity and reliability of the presented models.

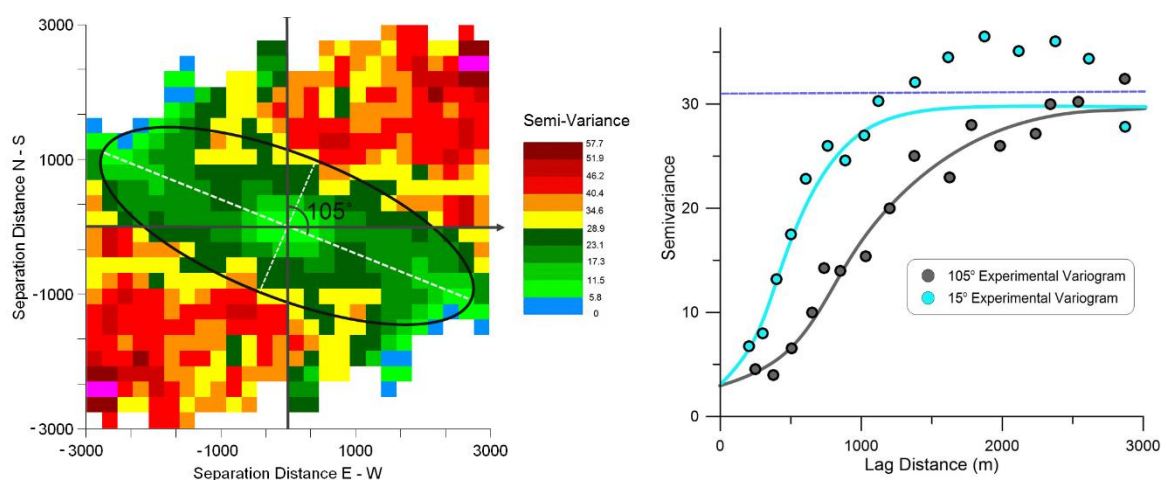


Figure 4. Left: The anisotropy map of the gas volume, with the most continuity along the azimuth 105°. Right: Experimental variogram and Gaussian fitted models on the major and minor axis of gas volume anisotropy ellipse

REFERENCES

- [1] United States Center of disease control and prevention; National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2015). "All U.S mining disasters: 1839 to present". U.S. Department of Health & Human Services Yearbook, pp. 761.
- [2] Zheng, Y. P., Feng, C. G., Jing, G. X., Qian, X. M., Li, X. J., Liu, Z. Y., and Huang, P. (2009). "A statistical analysis of coal mine accidents caused by coal dust explosions in China". Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22(4): 528-532.
- [3] Wang, L., Cheng, Y. P., and Liu, H. Y. (2014). "An analysis of fatal gas accidents in Chinese coal mines". Safety Science, 62: 107-113.

- [4] Si, R., Li, R., and Huang, Z. (2012). "Material evidence analysis upon accident investigation of gas and coal dust explosion". *Procedia Engineering*, 45: 458-463.
- [5] Cheng, J., and Luo, Y. (2013). "Modified explosive diagram for determining gas-mixture explosibility". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(4): 714-722.
- [6] Molayemat, H., Torab, F. M., Pawlowsky-Glahn, V., Hossein-Morshedy, A., and Egozcue, J. J. (2018). "The impact of the compositional nature of data on coal reserve evaluation, a case study in Parvadeh IV coal deposit, Central Iran". *International Journal of Coal Geology*, 188: 94-111.
- [7] Nian, Q., Shi, S., and Li, R. (2012). "Research and Application of Safety Assessment Method of Gas Explosion Accident in Coal Mine based on GRA-ANP-FCE". *Procedia Engineering*, 45(50774033): 106-111.
- [8] Fan, X., Yi, J., and Bao, Z. (2011). "Research on safety input research model for preventing coal gas explosion". *Procedia Engineering*, 26: 2012-2017.
- [9] Hengl, T., Bajat, B., Blagojević, D., and Reuter, H. I. (2008). "Geostatistical modeling of topography using auxiliary maps". *Computers & Geosciences*, 34(12): 1886-1899.
- [10] Ahmed, Sh., and De Marsily, G. (1987). "Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity". *Water Resources Research*, 23(9): 1717.
- [11] Minasny, B., and McBratney, A. B. (2007). "Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function". *Geoderma*, 140(4): 324-336.