

رده‌بندی سقف کارگاه در معادن زغال‌سنگ با استفاده از تحلیل‌گر زمین‌آماري و GIS

وحید وزیری^۱؛ جعفر خادمی حمیدی^{۲*}؛ احمدرضا صیادی^۳

۱- کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس، v.vaziri66@yahoo.com

۲- استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه تربیت مدرس، jafarkhademi@modares.ac.ir

۳- دانشیار، عضو هیات علمی دانشگاه تربیت مدرس، sayadi@modares.ac.ir

(دریافت ۴ بهمن ۱۳۹۳، پذیرش ۳ شهریور ۱۳۹۴)

چکیده

ریزش سقف معادن زیرزمینی یکی از مشکلاتی است که معدن‌کاران اغلب با آن روبرو می‌شوند. مواردی مثل شکستگی‌ها و گسل‌ها باعث کاهش مقاومت طبقات بالایی لایه زغال‌سنگ می‌شود. به همین دلیل، آگاهی از وضعیت سقف در معادن زغال‌سنگ قبل از استخراج آن بسیار مهم است. این تحقیق به منظور پیش‌بینی وضعیت سقف کارگاه در معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس و به کمک تخمین‌گر زمین‌آماري انجام شد. در این راستا، ابتدا اطلاعات آماری موجود در رابطه با وضعیت لایه‌های بالای سقف (شامل ۳۳ گمانه)، جمع‌آوری و بانک اطلاعاتی تهیه شد. پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها، وجود یا عدم وجود روند و همسانگردی، از میان روش‌های زمین‌آماري، روش کریجینگ معمولی به عنوان بهترین روش تخمین انتخاب شد. با ارزیابی چهار معیار خطای تخمین، بهترین مدل واریوگرام از میان مدل‌های کروی، توانی و گوسین انتخاب شد. بررسی‌ها نشان داد که واریوگرام مدل کروی به عنوان بهترین مدل برازش شده به ساختار فضایی داده‌ها می‌باشد. اعتبارسنجی متقابل، دقت بالای پیش‌بینی با درونیابی زمین‌آماري را نشان داد. برای رده‌بندی سقف از طبقه‌بندی ارائه شده توسط مارک و مولیندا استفاده شد. سپس نقشه رده‌بندی سقف معدن مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد. نتایج نقشه پیش‌بینی وضعیت سقف نشان داد که به طور تقریبی ۲۲٪ از کل مساحت سقف محدوده مورد مطالعه، در رده سقف‌های ضعیف و ۷۸٪ در رده سقف‌های متوسط قرار دارد. به منظور اعتبارسنجی نتایج، تجربیات پانل‌های استخراج شده E_1 و E_2 و مشاهدات میدانی با نقشه نهایی پیش‌بینی وضعیت سقف معدن مقایسه شد، به طوری که داده‌های واقعی ثبت شده از تأخیرهای مربوط به شرایط زمین، نقشه نهایی به دست آمده برای وضعیت سقف کارگاه استخراج را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی

رده‌بندی سقف معدن زغال‌سنگ (CMRR)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تخمین‌گر زمین‌آماري، معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس

۱- مقدمه

شدت کاهش یافت. همچنین، پیش‌بینی‌ها نشان می‌داد که با پیشروی عملیات استخراج در پانل‌های عمیق‌تر معدن و روبرو شدن با زون‌های گسلی، مشکلات ناشی از ناپایداری سقف به مراتب بیشتر از گذشته خواهد بود. این شرایط، ایده بررسی ناپایداری سقف کارگاه استخراج پانل‌های بعدی معدن مکانیزه طبس و انجام این تحقیق به منظور ارائه یک نقشه کلی از پهنه-بندی کیفیت سقف کارگاه استخراج را فراهم ساخت.

در این تحقیق، از روش امتیازدهی $CMRR$ برای پهنه‌بندی کیفیت سقف معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس استفاده شد. برای این کار، ابتدا بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از گمانه‌های اکتشافی، مقدار $CMRR$ در ۳۳ نقطه (در محل برخورد گمانه با لایه زغال‌سنگ) محاسبه شد. سپس با استفاده از روش درونیابی کریجینگ، مقدار $CMRR$ در منطقه تخمین زده شد. همچنین با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS)، یک پهنه‌بندی از وضعیت سقف کارگاه استخراج در کل محدوده مورد مطالعه ارائه شد.

اگرچه عمده زمینه‌های رشد و توسعه زمین‌آمار، مسئله تخمین ذخایر معدنی بوده است ولی در زمینه‌های ژئوشیمی، زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، مکانیک سنگ و تخمین مخازن هیدروکربنی نیز کاربردهای جالبی داشته است [۱۰].

تاکنون تخمین‌های زمین‌آمار و تلفیق آن با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف مهندسی معدن داشته است (به عنوان مثال [۱۸-۱۱]).

در این تحقیق، به‌خاطر توانایی بالای GIS از جمله در جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی نظیر آنالیزهای تخمین زمین‌آمار، مدیریت پایگاه داده‌ها، تلفیق متغیرهای مختلف با یکدیگر، اعتبارسنجی نتایج و ارائه مدل نهایی و خروجی به فرم یک نقشه، از تخمین زمین‌آمار در محیط GIS به‌منظور رده‌بندی وضعیت سقف در معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس استفاده شد.

۲- امتیازدهی سقف معدن زغال‌سنگ ($CMRR$)

سیستم رده‌بندی $CMRR$ یکی از روش‌های ساده و درعین حال پرکاربرد است که بر پایه سیستم امتیازدهی توده‌سنگ (RMR) توسعه داده شد و به طور مشابه امتیازدهی نهایی آن از صفر تا ۱۰۰ متغیر است. هدف از ارائه این روش، کمی‌سازی شرایط توده‌سنگ و پیدا کردن مقادیر مقاومتی برای استفاده در طراحی‌های مهندسی بوده است. از زمان معرفی آن تاکنون،

آگاهی از وضعیت سقف در معادن زیرزمینی قبل از شروع عملیات استخراج تأثیر بسزائی در حفظ ایمنی و رسیدن به بهره‌وری مورد انتظار را دارد. ریزش سقف و خطرات ناشی از آن یکی از بزرگ‌ترین چالش‌هایی است که معدنکاری زیرزمینی با آن مواجهه بوده است. همچنین، از میان سایر معادن زیرزمینی (شامل زغال‌سنگ، فلزی، غیرفلزی و سنگ طبیعی)، معادن زغال‌سنگ بیشترین نرخ حوادث ناشی از ریزش سقف و ناپایداری را به خود اختصاص داده است به نحوی که این رقم در بیشترین مقدار خود به ۱/۷۵ حادثه ناشی از ریزش سقف به ازای هر ۲۰۰ هزار ساعت کار زیرزمینی می‌رسد [۱]. این امر زمینه انجام تحقیق‌های گسترده‌ای را به‌ویژه در سال‌های اخیر، به منظور ارزیابی پایداری و نیز بررسی کیفیت و کنترل سقف معادن زیرزمینی فراهم ساخته است. مولیندا و مارک^۱ [۲] برای ارزیابی رفتار و تعیین قابلیت تخریب سقف در معادن زغال‌سنگ، روش امتیازدهی به سنگ سقف در معادن زغال‌سنگ ($CMRR$) را در معادن زغال‌سنگ آمریکا ارائه کردند و برای اولین بار برای طراحی پایه‌های معدنی در روش تحلیل پایداری لنگه‌های جبهه-کار طولانی^۲ ($ALPS$) به کار گرفتند [۳]. مرو و همکاران^۴ [۴] به بررسی دقیق ریزش‌های سقف در معادن زغال‌سنگ آفریقای جنوبی و تعیین عوامل مؤثر بر آن پرداختند. مولیندا^۵ [۵] به بررسی نقش ساختارها و عوارض زمین‌شناسی در ریزش سقف معادن زغال‌سنگ پرداخت. دوزگون و انیشتین^۶ [۶] روش مبتنی بر آنالیز تصمیم را برای ارزیابی و مدیریت ریسک ریزش سقف در معادن زغال‌سنگ ارائه کردند. پالی و داس^۷ [۷] با استفاده از بانک اطلاعاتی حاصل از ریزش‌های سقف در یک معدن زغال-سنگ به تحلیل حساسیت ضریب ایمنی سیستم نگهداری به پارامترهای مؤثر و نیز تعیین احتمال ریزش سقف پرداختند. شهریار و بخت‌آور [۸] از داده‌های ریزش سقف در پنج حوزه زغالی در ایران برای ارزیابی و مدیریت ریسک ریزش در معادن زغال‌سنگ استفاده کردند. اخیراً، قاسمی و همکاران [۹] به بررسی عوامل مؤثر بر ریزش سقف در معادن زغال‌سنگ و نیز ارزیابی ریسک در حین بازیابی لنگه‌های زغالی در روش استخراج اتاق و پایه پرداختند. ایشان قابلیت بکارگیری مدل پیشنهادی را با استفاده از داده‌های معدن مرکزی زغال‌سنگ طبس بررسی کردند.

در معدن مکانیزه (شماره ۱) زغال‌سنگ طبس، به دنبال وقوع تأخیرهای طولانی و توقف عملیات استخراج به‌خاطر ریزش سقف در پانل E_1 در فاصله سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۲ راندمان عملیات به

سقف در فاصله‌ای که پیچ‌سنگ نصب شده و اعمال فاکتورهای تعدیلی مناسب محاسبه می‌شود. آخرین تغییرات و به‌روزرسانی در نحوه امتیازدهی و تعیین CMRR در سال ۲۰۰۵ توسط مارک و مولیندا [۲۰] انجام شده است.

۳- روش تحقیق

به‌منظور پیش‌بینی وضعیت سقف معدن زغال‌سنگ طبس، ابتدا اطلاعات آماری با استفاده از ۳۳ حلقه گمانه اکتشافی در محدوده مورد مطالعه، جمع‌آوری و بانک اطلاعاتی تهیه شد. به دلیل وجود محدودیت‌های عملی، امکان نمونه‌برداری جامع برای تعیین وضعیت سقف در هر نقطه وجود ندارد. بنابراین، می‌توان از روش‌های درونیابی به‌عنوان ابزاری برای آنالیز و نمایش مقادیر مربوط به وضعیت سقف در مکان‌های فاقد نمونه‌برداری استفاده کرد. دانش زمین‌آمار با استفاده از تخمین‌گرهای آماری مختلف نظیر کریجینگ، شرایطی را فراهم می‌سازد تا با استفاده از اطلاعات حاصل از نقاط نمونه‌برداری شده، وضعیت سقف را در نقاط فاقد نمونه تخمین زد. کریجینگ به‌عنوان بهترین تخمین‌گر خطی ناریب شناخته می‌شود. بنابراین از این روش برای رده‌بندی وضعیت سقف معدن زغال‌سنگ استفاده شد. رابطه کلی کریجینگ به صورت زیر است [۱۴]:

$$z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n l_i z(x_i) \quad (1)$$

که در آن، $z^*(x_i)$: مقدار تخمینی متغیر در موقعیت x_i ، l_i : وزن مربوط به نمونه l_i ، $z(x_i)$: مقدار متغیر l_i و n نیز تعداد پارامترها است.

در ابتدا با استفاده از نمودار هیستوگرام و *Normal QQ Plot* نرمال بودن داده‌های CMRR بررسی شد. بعد از بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نمودار هیستوگرام و ابر سمی‌واریوگرام، خط‌های بارز عمومی و محلی بر روی داده‌های CMRR مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از بسته آماری SPSS⁴ و نرم‌افزار ArcGIS وجود و یا عدم وجود روند در داده‌های CMRR بررسی شد. درنهایت، از روش کریجینگ برای رده‌بندی وضعیت سقف در معدن مورد مطالعه استفاده شد. واریوگرام با در نظر گرفتن ناهمسانگردی در گام‌های مختلف، ترسیم شد. واریوگرافی با هر سه مدل کروی، نمایی و گوسین انجام گرفت و با استفاده از چهار معیار خطای تخمین شامل MPE^5

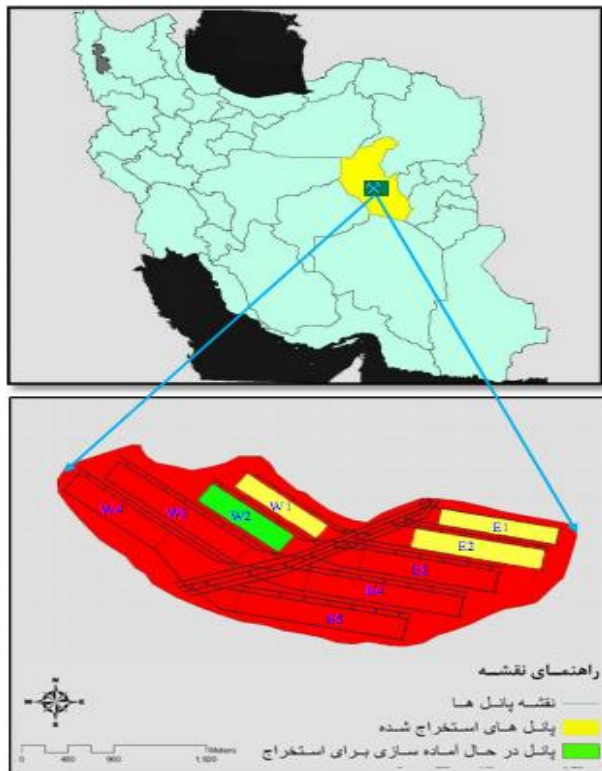
در بسیاری از جنبه‌های برنامه‌ریزی معدن، از جمله طراحی پایه‌های جبهه‌کار طولانی، سیستم نگهداری سقف، مطالعات امکان‌سنجی و دیگر موارد به‌کار گرفته شده است [۱۹].

قبل از ارائه روش CMRR، اطلاعات زمین‌شناسی بیشتر به صورت کیفی و توصیفی بود؛ از طرفی دیگر، نیازهای طراحی معدن کاری ایجاب می‌کرد که تفسیر اطلاعات زمین‌شناسی به صورت کمی درآیند. مشابه سایر روش‌های طبقه‌بندی در مهندسی سنگ، روش CMRR با توجه به این واقعیت ارائه شد که مقاومت ساختاری سنگ سقف معادن زغال‌سنگ قبل از هر چیزی تحت تأثیر صفحات لایه‌بندی یا سایر ناپیوستگی‌هایی است که باعث تضعیف ساختار سنگ می‌شود. همچنین خواص مهندسی سنگ با دقت کافی قابل پیش‌بینی نیست و این احتمال وجود دارد که از یک نقطه به نقطه دیگر به‌طور گسترده‌ای تغییر کند.

نکته مهم در خصوص CMRR آن است که این روش برای طبقه‌بندی سنگ‌های لایه‌ای دربرگیرنده زغال‌سنگ ارائه شده است و علاوه بر آمریکا در کشورهای آفریقای جنوبی، استرالیا و کانادا در بیشتر پروژه‌های تحقیقاتی استفاده شده است. به‌عنوان مثال، پروژه‌های زیادی به‌منظور بررسی علل ریزش‌های سقف منجر به فوت در معادن زغال‌سنگ در آفریقای جنوبی انجام گرفت. گروهی از کارشناسان شناخته شده در طیف گسترده‌ای به بازدید از معادن پرداختند و داده‌های زیادی را از ۱۸۲ سایت که ریزش سقف در آنها اتفاق افتاده بود، جمع‌آوری کردند. این مطالعه نشان داد که ریزش سقف به احتمال زیاد در نقاطی اتفاق می‌افتد که از نظر طبقه‌بندی سقف، مقدار CMRR کمتر از ۴۵ باشد [۲۰].

متغیرهای اندازه‌گیری برای تعیین CMRR عبارت است از: مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر، شدت (فاصله‌داری و تداوم) لایه‌بندی و سایر ناپیوستگی‌ها، مقاومت برشی (چسبندگی و زبری) سطوح لایه‌بندی و سایر ناپیوستگی‌ها، حساسیت سنگ نسبت به رطوبت، وجود لایه‌ای مقاوم در فاصله‌ای که پیچ‌سنگ نصب شده و سایر فاکتورهای ثانویه شامل تعداد لایه‌ها، وجود آب‌بازرزمینی و باری که از طبقات ضعیف فوقانی به لایه سقف تحمیل می‌شود. CMRR طی یک فرآیند دو مرحله‌ای محاسبه می‌شود؛ ابتدا سقف معدن به واحدهای ساختمانی جداگانه تقسیم شده و امتیازدهی برای هر کدام از واحدها انجام می‌شود. در قدم بعدی مقدار CMRR با گرفتن میانگین از واحدهای

آرژلیت و لایه‌های زغال‌سنگ به صورت متناوب در این حوضه برجای گذاشته شده است. در ناحیه طبس، پنج لایه زغال‌سنگ (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، شش معدن را شامل می‌شود. از میان آن، معدن شماره ۱ به روش جبهه‌کار طولانی مکانیزه در حال استخراج است. در این معدن برای برش زغال‌سنگ سینه‌کار از ماشین زغال‌تراش شیرر، برای نگهداری کارگاه از سپر و برای انتقال زغال‌سنگ کنده شده در کارگاه از ناو زنجیری AFC استفاده می‌شود. ظرفیت اسمی تولید 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. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی معدن زغال‌سنگ طبس و همچنین پانل‌های استخراجی واقع در محدوده مورد مطالعه در معدن شماره ۱ نشان داده شده است.

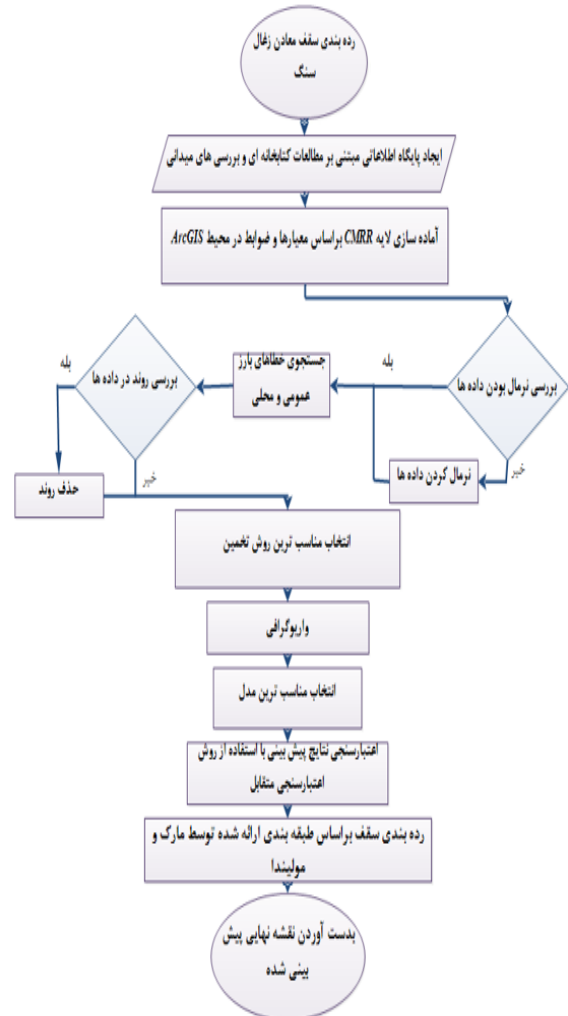


شکل ۲: موقعیت جغرافیایی و ۹ عدد از پانل‌های استخراجی معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس

۵- پیش‌بینی وضعیت سقف معدن شماره ۱ زغال‌سنگ طبس

در این پژوهش برای امتیازدهی سقف معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس از برنامه کامپیوتری $CMRR2013$ استفاده شد. این برنامه به منظور تسهیل در ورود، ذخیره‌سازی و پردازش داده‌ها طراحی

$RMSSPE$ ، ASE و $RMSPE$ بهترین مدل از میان این سه مدل انتخاب شد. برای اطمینان از صحت پیش‌بینی، از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. به منظور رده‌بندی سقف معدن مورد مطالعه از طبقه‌بندی ارائه شده توسط مولیندا و مارک [۲۰] استفاده شد. در نهایت نقشه پیش‌بینی برای رده‌بندی سقف معدن زغال‌سنگ طبس به دست آمد. فلوچارت مراحل انجام این تحقیق برای پیش‌بینی وضعیت سقف در معدن زغال‌سنگ در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: فلوچارت پیشنهادی برای پیش‌بینی وضعیت سقف در معدن زغال‌سنگ

۴- معدن زغال‌سنگ طبس

ناحیه پروده ۱، یکی از مناطق زغال‌دار طبس است که با وسعتی حدود ۱۲۰۰ کیلومترمربع در قسمت شرقی ایران مرکزی، حاشیه شمال‌غربی کویر لوت و در ۷۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان طبس واقع شده است. شمال ناحیه را دشت کاملاً هموار و باتلاق‌های نمک فراگرفته و در سمت جنوب رسوبات تریاس و ژوراسیک، ارتفاعات نه‌چندان مرتفعی را به وجود آورده است. در طول این مدت، رسوباتی از جنس ماسه‌سنگ، آهک،

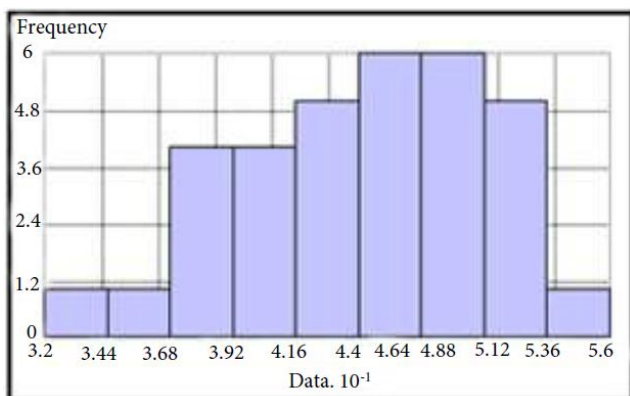
شده است. به هنگام انجام کوچکترین تغییرات، محاسبات خیلی سریع به روزرسانی می‌شود. سپس برای تعیین وضعیت سقف معدن در نقاط فاقد اطلاعات و تهیه نقشه پیش‌بینی رده‌بندی وضعیت سقف از روش درون‌یابی و تخمین‌گر زمین‌آماري استفاده شد. در نهایت، با توجه به اطلاعات بدست آمده از تحلیل‌های زمین‌آماري و براساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط مارک و مولیندا [۲۰] نقشه پیش‌بینی وضعیت $CMRR$ بدست آمد. به‌عنوان مثال، نمونه‌ای از نحوه محاسبه $CMRR$ برای کارگاه E_1 که در برنامه کامپیوتری $CMRR2013$ مورد تحلیل قرار گرفته در جدول ۱ آورده شده است.

۵-۱- بررسی نرمال بودن داده‌ها

اگر داده‌ها به‌صورت نرمال توزیع شده باشد، روش‌های درون‌یابی که برای ایجاد یک سطح استفاده می‌شود، بهترین نتیجه را به‌دنبال خواهد داشت. بنابراین درک توزیع داده‌ها قبل از ایجاد یک سطح ضروری است [۲۱]. به‌طور کلی، از ویژگی‌های مهم توزیع، مقدار مرکزی، گسترش و تقارن آن است. در کل، برای آنکه داده‌ها توزیع نرمال داشته باشد، به‌طور معمول باید میانگین و میانه شبیه هم باشد، چولگی نزدیک به صفر و کشیدگی در یک نمودار آماری نزدیک به ۳ باشد. اگر داده‌ها خیلی اریب باشد، باید از روش‌هایی مثل تکنیک‌های لگاریتمی برای نرمال کردن داده‌ها استفاده شود. بررسی نرمال بودن داده‌های $CMRR$ با نمودار هیستوگرام و $Normal\ QQ\ Plot$ انجام شد. نتایج شکل ۳ و جدول ۲ نشان داد که هیستوگرام داده‌های $CMRR$ متقارن نبوده و داده‌ها توزیع نرمال ندارد. بنابراین، قبل از تخمین، توزیع داده‌ها با استفاده از روش لگاریتمی نرمال شد.

جدول ۱: مثالی از نحوه محاسبه $CMRR$ در نرم افزار $CMRR2013$

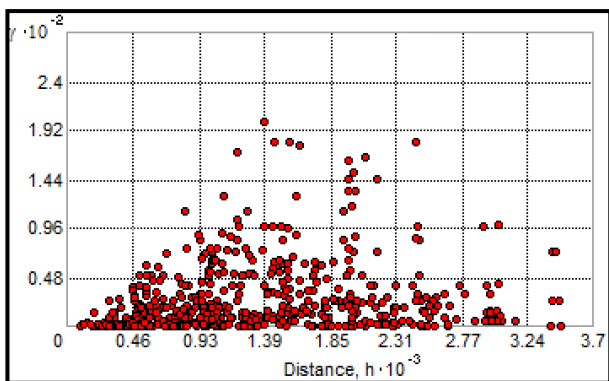
پارامتر ورودی	واحد ساختمانی اول	واحد ساختمانی دوم
طول بولت (m)	۱/۴۵	۰/۹۵
توصیف هر واحد	سیلتستون	آرژیلیت
ضخامت هر واحد (m)	۱/۴۵	۱/۲۱
عمق هر واحد از سطح زمین (m)	۱۴۸/۲۴	۱۴۹/۴۵
مقاومت فشاری (MPa)	۳/۵	۳/۵
رطوبت	نسبتاً حساس	خیلی حساس
تعداد ناپیوستگی‌ها	۲	۲
نوع تماس	قوی	ضعیف
امتیاز واحد (بدون تعدیل)	۴۰	۳۵
امتیاز واحد (با تعدیل)	۳۳	۲۰
اطلاعات ناپیوستگی	واحد ۲/۲	واحد ۱/۲
توصیف ناپیوستگی	لایه‌بندی	لایه‌بندی
چسبندگی ناپیوستگی	متوسط	ضعیف- صیقلی
زبری ناپیوستگی	صفحه‌ای	موجی
فاصله‌داری ناپیوستگی	> ۶ سانتی متر	> ۶ سانتی متر
تداوم ناپیوستگی (m)	۰/۹ - ۳	۰/۹ - ۳
چسبندگی ناپیوستگی	متوسط تا ضعیف	متوسط تا ضعیف
زبری ناپیوستگی	موجی	موجی
فاصله‌داری ناپیوستگی	> ۶ سانتی متر	> ۶ سانتی متر
تداوم ناپیوستگی	۲/۵	۲/۵
تعدیل برای آب زیرزمینی	قطره‌ای	قطره‌ای
تعدیل مربوط به بار اضافی	مقاومت طبقات بالایی برابر با مقاومت منطقه پیچ‌سنگ شده	مقاومت طبقات بالایی برابر با مقاومت منطقه پیچ‌سنگ شده
CMRR	40.5	



(الف)

شکل (۳) در این مطالعه، در مقادیر بالای $CMRR$ خطای بارز مشاهده نمی‌شود، از این رو نباید از مجموعه داده حذف شود. بررسی خطای بارز عمومی برای داده‌های $CMRR$ با ابر سمی‌واریوگرام به این صورت است که اگر خطای بارز عمومی با یک مقدار بالای غیرعادی در داده‌ها موجود باشد، همه زوج نقاط بدون توجه به فاصله‌شان، مقادیر بالایی در سمی‌واریوگرام خواهند داشت. برای بررسی خطای بارز محلی با ابر سمی‌واریوگرام در داده‌های $CMRR$ ، اگر زوج نقاط بر روی ابر سمی‌واریوگرام به گونه‌ای باشد که در انتهای سمت چپ محور X ، با فاصله خیلی کم واقع شود و مقدار بالایی روی محور Y نشان دهد، بیانگر وجود خطای بارز محلی است.

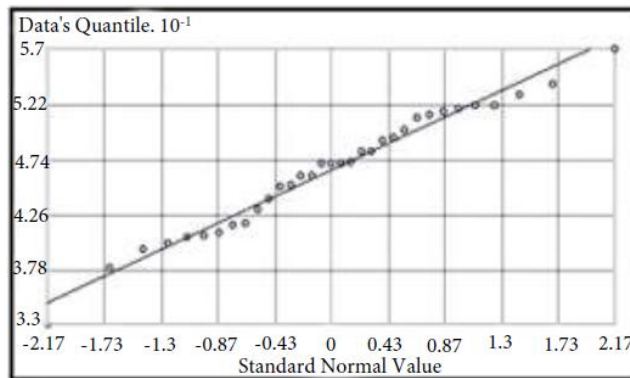
در شکل ۴ ابر سمی‌واریوگرام برای داده‌های $CMRR$ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که در داده‌های $CMRR$ خطای بارز عمومی و محلی وجود ندارد.



شکل ۴: ابر سمی‌واریوگرام برای بررسی خطای داده‌های $CMRR$

۳-۵- بررسی روند در داده‌های $CMRR$

داده‌ها به‌منظور بررسی وجود یا عدم وجود روند، ارزیابی شد. گاهی اوقات ممکن است به‌دلیل شرایط توپوگرافی، در داده‌ها روند وجود داشته باشد. به‌هنگام استفاده از کریجینگ به‌عنوان یک روش درون‌یابی، روند در داده‌ها (در صورت وجود) بایستی حذف شود تا اینکه داده‌ها شرایط ثابت یا ایستا پیدا کند [۲۳]. برای تحلیل روند در داده‌های $CMRR$ از بسته آماری $SPSS$ و نرم‌افزار $ArcGIS$ استفاده شد. بررسی وجود روند با استفاده از نرم‌افزار $ArcGIS$ مطابق شکل (۵ - الف)، انجام شده است. نقاط روی یک صفحه تصویر شده است. بهترین خطی که برای برازش به نقاط تصویر شده ترسیم می‌شود (یک چندجمله‌ای خطی است که روندهای موجود در جهت‌های خاص را مدل‌سازی می‌کند. اگر این خط نسبتاً هموار باشد به این معنا است که روندی در داده‌ها وجود ندارد. نتایج حاصل از بسته آماری $SPSS$ برای بررسی روند در شکل ۵ - ب نشان داده شده است. در کل، مقدار R هر چه به مقادیر مرزی یعنی ۱ و -۱ نزدیکتر



(ب)

شکل ۳: بررسی توزیع داده‌های $CMRR$: الف) با استفاده از نمودار هیستوگرام ب) با استفاده از $QQ PlotNormal$

جدول ۲: آماره‌های توصیفی مربوط به داده‌های $CMRR$

مقدار	آماره توصیفی
۳۳	حداقل
۵۷	حداکثر
۴۶/۴	میانگین
۴۷	میانه
۵/۳۲	انحراف از معیار
-۰/۳۱	چولگی
۲/۷۱	کشیدگی

۲-۵- بررسی خطاهای بارز محلی و عمومی

خطای بارز عمومی، نقطه نمونه اندازه‌گیری شده‌ای است که نسبت به مقادیر موجود در یک مجموعه داده، مقدار خیلی بالا و یا پایینی را دارد. برای مثال، اگر ۹۹ نقطه از ۱۰۰ نقطه، مقادیری بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ دارد، اما صدمین نقطه مقدار ۷۵۰ داشته باشد، ممکن است این نقطه خطای بارز عمومی داشته باشد [۲۱]. خطای بارز محلی، نقطه نمونه اندازه‌گیری شده‌ای است که مقدار آن در محدوده نرمال مجموعه داده است، اما اگر به نقاط پیرامون آن نگاه کنید، این مقدار به‌صورت غیرعادی بالا یا پایین است [۲۲]. خطای بارز در داده‌های $CMRR$ ممکن است به‌صورت حقیقی در پدیده غیر نرمال مشاهده شود و یا اینکه به خاطر اشتباه در محاسبات و ثبت نادرست داده رخ داده باشد.

خطای بارز عمومی و محلی با استفاده از هیستوگرام و ابر سمی‌واریوگرام در این مطالعه بررسی شد. روش ارزیابی خطای بارز با هیستوگرام این گونه است که اگر مقادیر حداکثر، موقعیت جداگانه (یعنی احاطه شده با مقادیر بسیار متفاوت) داشته باشد، ممکن است داده‌های $CMRR$ به بررسی بیشتری نیاز پیدا کند و اگر لازم باشد حذف شود. بنابراین با توجه به نمودار هیستوگرام

وجود دارد. بنابراین به دلیل عدم وجود روند در داده‌ها و مشخص نبودن مقدار میانگین کمیت مورد نظر در محدوده مورد مطالعه، برای پیش‌بینی وضعیت سقف، روش کریجینگ معمولی، به عنوان مناسب‌ترین روش تشخیص داده و انتخاب شد.

۵-۵- واریوگرافی داده‌ها

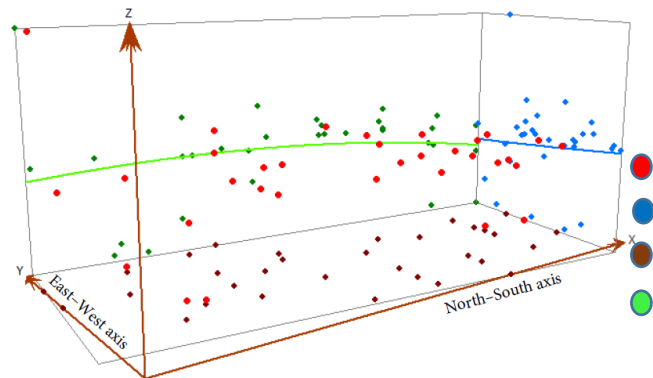
برای حداقل کردن خطای تخمین (مقادیر پیش‌بینی شده)، واریوگرافی انجام گرفت. سمی‌واریوگرام این امکان را فراهم می‌کند تا خودهمبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده، بررسی شود. در خودهمبستگی مکانی، فرض بر این استوار است که مشخصه نقطه‌ای که به یکدیگر نزدیک‌تر هستند، به یکدیگر شبیه‌ترند [۲۱]. ابر سمی‌واریوگرام برای بررسی ویژگی‌های محلی خودهمبستگی مکانی در یک مجموعه داده استفاده می‌شود. به عنوان مثال، برای تعیین فاصله بهینه نمونه‌برداری در محدوده‌ای که داده‌ها خودهمبستگی مکانی دارند با در نظر گرفتن تأثیر ناهمسانگردی، می‌توان از ابر سمی‌واریوگرام استفاده کرد [۲۳]. هدف از مدل‌سازی سمی‌واریوگرام انتخاب بهترین برازش برای یک مدل با استفاده از زوج نقاط بر روی سمی‌واریوگرام است [۲۱]. تابع واریوگرام به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۵]:

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

که در آن $\gamma(h)$ برای تعداد N جفت نمونه است که به فاصله h از یکدیگر قرار گرفته‌اند. $Z(x)$ نیز مقدار متغیر x در نقطه i است.

به منظور محاسبه دقیق تأثیرات جهتی روی مدل سمی‌واریوگرام، ناهمسانگردی در جهت‌های مختلف بررسی شد. ناهمسانگردی فرآیندی است که بالاترین خودهمبستگی را در یک جهت نسبت به سایر جهت‌ها نشان می‌دهد. با بررسی جهات مختلف مشاهده شد که داده‌های $CMRR$ تقریباً در زاویه ۶۰ درجه نسبت به شمال (N) بیشترین خودهمبستگی و در زاویه ۱۵۰ درجه کمترین خودهمبستگی را دارد. در کل با توجه به شکل ۶، می‌توان مشاهده کرد که یک خودهمبستگی جهت‌دار (ناهمسانگردی) در داده‌های $CMRR$ وجود دارد و روی شکل سمی‌واریوگرام تأثیر می‌گذارد. منحنی سمی‌واریوگرام به آرامی در جهت شمال‌شرق - جنوب‌غرب افزایش می‌یابد و بر روی نمودار سمی‌واریوگرام، پایین‌ترین منحنی بنفش است و در جهت جنوب‌شرق - شمال‌غرب منحنی سمی‌واریوگرام با سرعت

باشد، بدین معنی است که داده‌ها همبستگی بیشتری دارند. اما تفاوتی که وجود دارد این است که در مقادیر منفی این همبستگی، رابطه معکوس را نشان می‌دهد. نتایج هر دو روش، بیانگر آن است که در داده‌های $CMRR$ روند وجود ندارد.



داده‌های استفاده شده (۳۳ نقطه مورد نظر)

داده‌های تصویر شده بر روی صفحه ZY

داده‌های تصویر شده بر روی صفحه XY

داده‌های تصویر شده بر روی صفحه ZX

روند در جهت شرق - غرب

روند در جهت شمال - جنوب

(الف)

		X	Y	Z	CMRR
X	Correlation Coefficient	1.000	-0.370*	0.308	-0.198
	Sig - (2 - tailed)	-	0.034	0.081	0.269
	N	33	33	33	33
Y	Correlation Coefficient	-0.370*	1.000	0.720**	-0.373**
	Sig - (2 - tailed)	0.034	-	0.000	0.033
	N	33	33	33	33
Z	Correlation Coefficient	0.308	0.720**	1.000	-0.390*
	Sig - (2 - tailed)	0.081	0.000	-	0.025
	N	33	33	33	33
CMRR	Correlation Coefficient	-0.198	-0.373*	-0.390*	1.000
	Sig - (2 - tailed)	0.269	0.033	0.025	-
	N	33	33	33	33

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

N: Number of points.

(ب)

شکل ۵: بررسی روند در داده‌های $CMRR$ الف: نتایج حاصل از نرم افزار

$ArcGIS$ ب: نتایج حاصل از نرم افزار $SPSS$

۵-۴- انتخاب مناسب‌ترین نوع کریجینگ برای تخمین

انواع مختلف کریجینگ را می‌توان برای تخمین $CMRR$ استفاده کرد. در درون‌یابی با کریجینگ ساده و معمولی، فرض می‌شود که $CMRR$ یک متغیر ثابت است. از سوی دیگر، در درون‌یابی با کریجینگ عام فرض می‌شود که یک روند در اعماق مختلف

افزایش می‌یابد (بالاترین منحنی برازش شده بر روی نمودار سمی واریوگرام).

جدول ۳: مقایسه معیارهای خطای تخمین در سه مدل واریوگرافی

معیار خطا	مدل واریوگرام	کروی	نمایی	گوسین
MPE		-۰/۲۵	-۰/۲۷	-۰/۲۶
RMSPE		۲/۴۵	۲/۵۳	۲/۴۵
ASE		۲/۴۳	۲/۴۶	۲/۴۱
MSPE		-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۰۹
RMSSPE		۰/۹۹	۱/۰۳	۱/۰۴

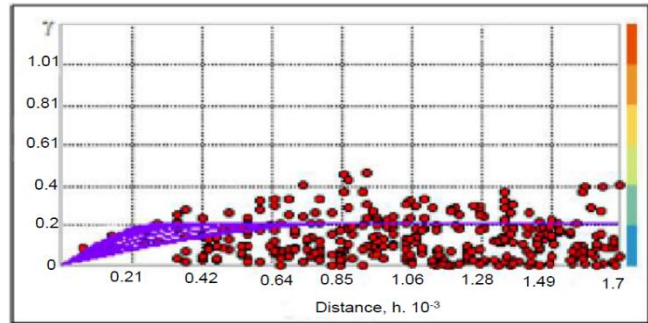
مقادیر بهینه مورد استفاده برای هر پارامتر در مدل واریوگرام در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴: مقدار بهینه پارامترهای مورد استفاده در مدل واریوگرام

پارامتر	مقدار
قطر بزرگ بیضی (متر)	۵۷۰
قطر کوچک بیضی (متر)	۱۶۰
حداکثر تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین	۵
حداقل تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین	۳
ناگت	۰/۰۰۰۲۲

۵-۵-۲- اعتبارسنجی نتایج

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. 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 می‌شود. 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. در شکل ۷ نتایج اعتبارسنجی متقابل برای مدل کروی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این مدل پیش‌بینی خیلی خوبی داشته است.



شکل ۶: بررسی ناهمسانگردی داده‌های *CMRR* (با استفاده از نمودار سمی واریوگرام).

بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که ناهمسانگردی در داده‌ها وجود دارد و راستای محور بزرگ بیضی ناهمسانگردی، تقریباً در جهت شمال شرق - جنوب غرب است.

۵-۵-۱- انتخاب مناسب‌ترین مدل

در نرم افزار *ArcGIS* توابع بهینه سازی برای تعیین پارامترهای بهترین برازش برای یک مدل وجود دارد. بنابراین در اعتبارسنجی اغلب از چهار معیار خطای تخمین برای کنترل سازگاری مدل انتخابی استفاده می‌شود. این معیارها شامل خطای پیش‌بینی متوسط (*MPE*)، کوچک‌ترین خطای پیش‌بینی ریشه میانگین مربعات (*RMSPE*)، خطای استاندارد میانگین پیش‌بینی (*ASE*) و خطای پیش‌بینی ریشه میانگین مربعات (*RMSSPE*) است. بهترین مدل، مدلی است که خطای پیش‌بینی متوسط (*MPE*) نزدیک به صفر، کوچک‌ترین خطای پیش‌بینی ریشه میانگین مربعات (*RMSPE*)، خطای استاندارد میانگین پیش‌بینی (*ASE*) نزدیک به خطای پیش‌بینی ریشه میانگین مربعات (*MSPE*) و خطای پیش‌بینی استاندارد شده ریشه میانگین مربعات (*RMSSPE*) نزدیک به یک داشته باشد [۲۴]. در این مطالعه، واریوگرافی با سه مدل کروی، نمایی و گوسین انجام شد. پس از انجام واریوگرافی و مقایسه نتایج با آماره‌های ذکر شده، مشخص شد که مدل کروی نسبت به دیگر مدل‌ها نتیجه بهتری را ارائه می‌دهد (جدول ۳).

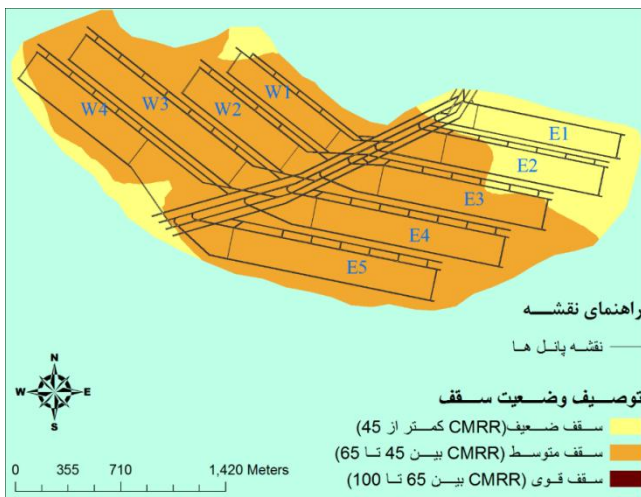
معادن مکانیزه زغال‌سنگ از تقسیم‌بندی ارائه شده توسط مارک و مولیندا [۲۰] استفاده شده است (جدول ۵). طبق این روش، اگر مقدار $CMRR$ کمتر از ۴۵ باشد سقف ضعیف، اگر بین ۴۵ تا ۶۵ باشد متوسط و اگر بالای ۶۵ باشد سقف قوی است.

جدول ۱۲: رده‌بندی سقف معادن زغال‌سنگ بر اساس مارک و مولیندا [۲۰]

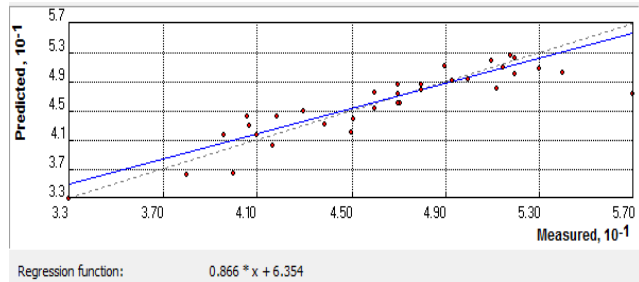
امتیازدهی سنگ سقف	توصیف سقف	رنگ روی نقشه
۰-۴۵	ضعیف	زرد
۴۵-۶۵	متوسط	قهوه‌ای
۶۵-۱۰۰	قوی	بنفش

براساس پیش‌بینی انجام گرفته در نرم‌افزار *ArcGIS*، در شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که تقریباً ۲۲٪ از سقف کل مساحت محدوده مورد مطالعه در معدن مکانیزه طبس، در رده سقف‌های ضعیف قرار می‌گیرد. بنابراین استخراج این مناطق اغلب با ریزش سقف و توقف عملیات استخراج و در نهایت با افزایش هزینه‌ها همراه خواهد بود. از طرف دیگر، ۷۸٪ از سقف محدوده مورد مطالعه در رده سقف‌های متوسط قرار دارد. همچنین نتایج

شان داد که در کل محدوده مورد مطالعه سقف قوی (با $CMRR$ بزرگتر از ۶۵) یافت نمی‌شود.



شکل ۹: نقشه نهایی پیش‌بینی $CMRR$ در ۹ پانل استخراجی معدن زغال‌سنگ مکانیزه طبس



شکل ۷: اعتبارسنجی متقابل مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده $CMRR$

در ادامه، کنترل‌های مربوط به بررسی صحت عملکرد پیش‌بینی وضعیت سقف، بررسی شد. برای این منظور، عبارت "خطای پیش‌بینی" به منظور بررسی تفاضل بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر محاسبه شده برای هر گمانه استفاده شد. به‌عنوان نمونه، در شکل ۸ برای ۷ حلقه گمانه، اختلاف بین مقدار $CMRR$ پیش‌بینی شده با استفاده از نرم‌افزار *ArcGIS* با مقادیر محاسبه شده $CMRR$ ، نشان داده شده است. در واقع بررسی شکل ۸

نشان می‌دهد که میزان خطای پیش‌بینی در هر کدام از گمانه‌ها بسیار پایین بوده است. این مسئله بیانگر بالا بودن دقت پیش‌بینی در این تحقیق است.

Source ID	Included	Measured	Predicted	Error
17	Yes	50	49.472	-0.52784
19	Yes	40.6	44.534	3.934
26	Yes	49.3	49.417	0.11689
8	Yes	51	52.097	1.0975
4	Yes	48	48.026	0.025769
13	Yes	51.2	48.252	-2.9484
9	Yes	51.8	52.799	0.99886
21	Yes	57	57.526	0.5261

شکل ۸: مقایسه مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده $CMRR$ برای ۷ گمانه

۵-۳- نقشه رده‌بندی سقف معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس

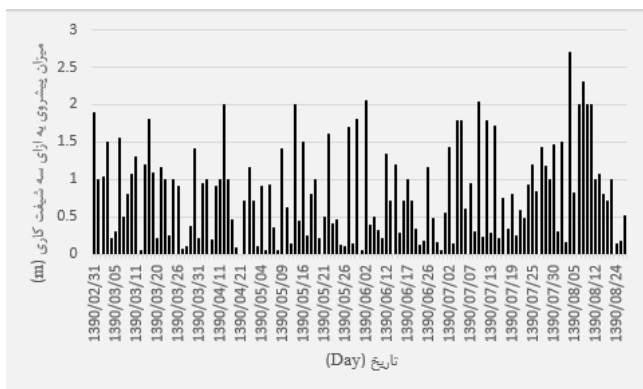
پس از انجام تحلیل‌های زمین‌آماري بر روی داده‌های $CMRR$ ، نقشه پیش‌بینی نهایی وضعیت سقف معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس در نرم‌افزار *ArcGIS* به‌دست آمد. برای رده‌بندی سقف

۶- قابلیت اعتماد روش پیشنهادی رده‌بندی سقف کارگاه

استخراج

معدن زغال‌سنگ طبس اولین معدن مکانیزه جبهه‌کار طولانی در ایران است. از زمان شروع به کار این معدن تاکنون، کار استخراج سه پانل از ۹ پانل مورد مطالعه در این تحقیق به پایان رسیده است. تاکنون، مهم‌ترین چالش‌های زمین شامل ناپایداری و ریزش سقف کارگاه بویژه در زون‌های گسلی و هجوم آب از زون‌های گسلی به داخل کارگاه بوده است. نتایج نقشه‌نمایی پیش‌بینی وضعیت سقف با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در این مطالعه، مطابقت بسیار خوبی با تجربه‌های حاصل و گزارش‌های دریافتی از شرایط فعلی در معدن نشان می‌دهد.

نتایج نقشه‌نمایی رده‌بندی سقف نشان می‌دهد که سقف کارگاه در پانل E_1 و قسمت‌های انتهایی پانل E_2 ، ضعیف است. چنین شرایطی با ریزش‌های رخ داده در سقف کارگاه استخراج در پانل E_1 و قسمت‌های انتهایی پانل E_2 مطابقت دارد. همچنین، برای اطمینان از صحت عملکرد رویکرد پیشنهادی، میزان پیشروی عملیات استخراج به ازای سه شیفت کاری که در حین استخراج بخشی از کارگاه E_2 در گزارش‌های روزانه به ثبت رسیده است با نقشه‌نمایی حاصل مقایسه شد. در شکل ۱۰ میزان پیشروی از زمان شروع استخراج کارگاه E_2 به صورت پسر، به مدت شش ماه نشان داده شده است. این منطقه بر روی شکل ۹ با وضعیت سقف ضعیف ($CMRR < 45$) پیش‌بینی شده است. بررسی شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در طول عملیات استخراج، میزان پیشروی در بسیاری از روزها کمتر از ۰/۵ متر به ازای سه شیفت کاری بوده است. براساس اطلاعات حاصل از گزارش‌های روزانه بخش زمین‌شناسی و دفتر فنی معدن، دلیل عمده این تأخیرها برخورد با زون‌های گسلی و ریزش سقف بیان شده است، به طوری که باعث بروز تأخیرهایی به مدت ۳ تا ۲۴ ساعت شده است. مقایسه نقشه پیش‌بینی وضعیت سقف در پانل E_2 (شکل ۹) با کاهش پیشروی روزانه و راندمان عملیات (شکل ۱۰)، صحت نقشه‌نمایی را تأیید می‌کند.



شکل ۱۰: میزان پیشروی به ازای سه شیفت کاری مربوط به استخراج ۶ ماهه اول کارگاه E_2

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سقف معدن مکانیزه (شماره ۱) زغال‌سنگ طبس با استفاده سیستم امتیازدهی $CMRR$ و سیستم اطلاعات جغرافیایی، رده‌بندی و پهنه‌بندی شده است. برای این کار مقدار $CMRR$ در ۳۳ حلقه گمانه محاسبه شد. سپس برای مشخص کردن مقدار $CMRR$ در سایر نقاط از درون‌یابی زمین‌آماری در محیط GIS استفاده شد. برای پیش‌بینی وضعیت سقف معدن مورد مطالعه به دلیل عدم وجود روند در داده‌ها، کریجینگ معمولی برای درون‌یابی انتخاب شد. بررسی‌ها نشان داد که ناهمسانگردی در داده‌ها وجود دارد. سپس واریوگرافی انجام گرفت. با مقایسه مدل‌ها مشخص شد که سمی‌واریوگرام مدل کروی بهترین برازش با ساختار فضایی داده‌ها نشان می‌دهد. نتایج نقشه پیش‌بینی متغیر $CMRR$ نشان می‌دهد که سقف معدن مکانیزه زغال‌سنگ طبس در قسمت‌هایی از کارگاه‌های E_1 ، E_2 و W_4 ضعیف است. بررسی تجارب حاصل از استخراج پانل‌های E_1 و E_2 و مشاهدات میدانی نشان داد که دلیل اصلی ضعیف بودن سقف در این معدن وجود زون‌های گسلی متعدد است، به طوری که وجود زون‌های گسلی باعث نشت گاز، نفوذ آب زیرزمینی از طبقات بالایی به کارگاه و در نهایت ریزش سقف و توقف عملیات استخراج شده است. در کل، نتایج نقشه پیش‌بینی وضعیت سقف نشان می‌دهد که حدود ۲۲٪ از مساحت سقف کل محدوده مورد مطالعه، در رده سقف‌های ضعیف و ۷۸٪ در رده سقف‌های متوسط قرار دارد و سقف قوی در محدوده مورد مطالعه یافت نمی‌شود.

با انجام این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که تلفیق تخمین‌گر زمین‌آماری با GIS ابزار مناسبی را برای مهندس معدن در

contributing parameters on roof falls in underground coal mines", *Int. J. Coal Geol.*, 75:241-7, 2008.

[8]. Shahriar, K., Bakhtavar, E., "Geotechnical risks in underground coal mines. *J. Appl. Sci.*, 9:2137-43, 2009.

[9]. Ghasemi, E., Ataei, M., Shahriar, K., Sereshki, F., Jalali, S.E., Ramazanzadeh, A., "Assessment of roof fall risk during retreat mining in room and pillar coal mines", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 54:80-89, 2012.

[10]. Hammah, R.E., Curran, J.H., "Geostatistics in Geotechnical Engineering: Fad or Empowering?" *GeoCongress*, 1-5, 2006.

[11]. Keogh, A., Moulton, C., Iron, C., "Median indicator kriging—a case study in iron ore", In: *Proceedings of the One Day Symposium: Beyond Ordinary Kriging*. October 30th, Perth, Western Australia. 106-120, 1995.

[12]. Watson, W.D., Ruppert, L.F., Bragg, L.J., Tewalt, S.J., "A geostatistical approach to predicting sulfur content in the Pittsburgh coal bed", *International Journal of Coal Geology*, 48: 1-22, 2001.

[13]. Taboada, J., Vaamonde, A., Saavedra, A., Ordóñez, C., "Geostatistical study of the feldspar content and quality of a granite deposit", *Engineering Geology*, 65:285-292, 2002.

[14]. Lloyd, C.D., Atkinson, P.M., "Increased accuracy of geostatistical prediction of nitrogen dioxide in the United Kingdom with secondary data", *International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information*, 5(4): 293-305, 2004.

[15]. Potoglou, D., Kanaroglou, P.S., "Carbon monoxide emissions from passenger vehicles: predictive mapping with an application to Hamilton, Canada", *Transportation Research Part D* 10(2): 97-109, 2005.

[16]. Suh, J.W., Park, H.D., "GIS-based subsidence risk assessment due to underground mining activities at Taebak province in Korea", In: *Proceedings of the 45th US rock mechanics/geomechanics symposium*, San Francisco, Document ID: 11-579, 2011.

[17]. Sutcu, E., "Use of GIS to discover potential coalfields in Yatagan-Milas area in Turkey", *International Journal of Coal Geology*, 98:95-109, 2012.

[18]. Akumu, C.E., Johnson, J.A., Etheridge, D., Uhlig, P., Woods, M., Pitt, D.G., McMurray, S., "GIS-fuzzy logic based approach in modeling soil texture: Using parts of the Clay Belt and Hornepayne region in Ontario Canada as a case study", *Geoderma*, 239-240:13-24, 2015.

[19]. Mark, C., "Ground Control in South African Coal Mines –A U.S. Perceptive", 18th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, PP. 186-193, 1999.

[20]. Mark, C., Molinda, G.M., "The Coal Mine Roof Rating (CMRR) – a decade of experience", *International Journal of Coal Geology*, PP. 85-103, 2005.

[21]. Johnston, K., Jay M., Hoef, V., Krivoruchko, K., Lucas, N., "Using ArcGIS Geostatistical Analyst", Environmental System Research Institute – USA, 2003.

[22]. Hamad, S., "Geostatistical analysis of groundwater levels in the south Al Jabal Al Akhdar area using GIS",

ارزیابی وضعیت سقف کارگاه استخراج معادن زغال‌سنگ در محدوده وسیع معدن کاری بویژه در مرحله قیل از طراحی فراهم

می‌سازد. همچنین تهیه نقشه پیش‌بینی سایر پارامترها از جمله گازخیزی، وضعیت تنش‌های برجا و گسل‌ها به همراه نقشه رده-بندی سقف شناخت مناسبی را از ریسک عوامل زمین‌شناسی فراهم می‌سازد و مهندسیین و پرسنل معدن را قادر می‌سازد تا با به‌کارگیری راه‌کارهای مناسب در مواجهه با شرایط مخاطره‌آمیز، راندمان و ایمنی محیط کار را در معادن زغال‌سنگ افزایش دهند.

۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند تا از زحمات مدیریت، کارشناسان و پرسنل محترم معدن زغال‌سنگ طبس به خاطر فراهم ساختن امکان انجام این تحقیق و همچنین همکاری صمیمانه در گردآوری اطلاعات مورد نیاز در حین بازدیدهای میدانی کمال تشکر را داشته باشند.

منابع

- [1]. Mine Safety and Health Administration (MSHA); 2006. Available from: <http://www.msha.gov/Stats/Part50/Yearly%20IR's/Coal%20IR%20Publication-2006.pdf> .
- [2]. Molinda, G.M., Mark, C., "The Coal Mine Roof Rating (CMRR) - A practical rock mass classification for coal mines", USBM IC 9387, p. 83, 1994.
- [3]. Mark, C., Chase, F.E., Molinda, G.M., "Design of longwall gate entry systems using roof classification, in *Proceedings New Technology for Longwall Ground Control: The USBM Technology Transfer Seminar*, USBM SP 94-01, 5-18, 1994.
- [4]. van der Merwe, J.N., van Vuuren, J.J., Butcher, R., Canbulat, I., "Causes of falls of roof in South African collieries", Safety in Mines Research Advisory committee (SIMRAC). Final project report, report no. COL613; 2001.
- [5]. Molinda, G.M., "Geologic hazards and roof stability in coal mines", Department of Health and Human Services, Center for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH Publication No. 9466; 2003.
- [6]. Duzgun, H.S.B., Einstein, H.H., "Assessment and management of roof fall risks in underground coal mines", *Safety Science*, 42:23-41, 2004.
- [7]. Palei, S.K., Das, S.K., "Sensitivity analysis of support safety factor for predicting the effects of

Water resource department, General Water Authority, 32718, Benghazi, Libya, 2009.

[23]. Kamble, K. H., Aggrawal, P., "Geostatistical Analyst for Deciding Optimal Interpolation Strategies for Delineating Compact Zones", International Journal of Geosciences, PP. 585-596, 2011.

[24]. Burke, S., Chu, G., Heyer, J., Lee, J., Tang, X., Tran, T., Zhang, L., "Mass Quantification of PCE in Los Angeles Groundwater from the GeoTracker Database", UCLA Institute of the Environment and Sustainability Senior Practicum, 2013.

[25]. Margaret, A., Carignan, J., "Geostatistique lineaire application au domaine minier", Presses de l'École des Mines de Paris, 1997.

پی نوشت

-
- ¹ Molinda & Mark
 - ² Coal mine roof rating
 - ³ Analysis of longwall pillar stability (ALPS)
 - ⁴ van der Merwe et al
 - ⁵ Duzgun & Einstein
 - ⁶ Palei & Das
 - ⁷ Geographical information system
 - ⁸ Statistical Package for the Social Sciences
 - ⁹ Mean prediction error
 - ¹⁰ Standardized root mean square error
 - ¹¹ Average standard error
 - ¹² Root mean squared error