نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دوره سوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۵۳ تا ۶۹
Vol. 3, No. 2, Summer 2018, pp. 53-69

مدلسازی زمین‌آماری تخریب پذیری توده‌سنگ مبتنی بر روش تجربی لابسچر در معدن سه‌چاهون

علیرضا جبین پور[۱]، علیرضا یاراحمدی بافقی[۲*]، جواد غلام نژاد[۲]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

(دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۲۰، پذیرش ۱۳۹۷/۰۵/۲۳)

چکیده

انتخاب روش‌های استخراج تخریبی در معادن زیرزمینی مستلزم شناخت ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ است. شاخص قابلیت تخریب یک پارامتر کلیدی برای انتخاب روش‌های استخراج تخریبی است. برای ارزیابی این شاخص، روش‌های تجربی مختلفی ارایه شده که مبتنی بر طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ است. روش تجربی لابسچر بر اساس طبقه‌بندی توده‌سنگ در پروژه‌های معدنی و شعاع هیدرولیکی فضای زیربرش، یکی از روش‌های قابل قبول در این زمینه است. در این مطالعه ویژگی‌های ژئومکانیکی موثر در قابلیت تخریب بر اساس داده‌های سطحی و زیرسطحی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری مدلسازی شده‌اند. به این صورت که بر اساس روش طبقه‌بندی لابسچر قابلیت تخریب توده‌سنگ با انتخاب بلوکی با ابعاد ۲۵×۲۵×۲۵ متر برآورد شد. از طرفی بر اساس منحنی تخریب لابسچر، روابط مورد نیاز برای بررسی این قابلیت بر اساس طبقه‌بندی توده‌سنگ در پروژه‌های معدنی و شعاع هیدرولیکی به دست آمده است. در این مطالعه داده‌های آنومالی شماره ۱۲ معدن سه‌چاهون به عنوان مطالعه موردی بررسی شد و مدلسازی زمین‌آماری و وضعیت تخریب‌پذیری منطقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن شعاع هیدرولیکی ۱۲٫۵ متر، بیش از ۸۰ درصد بلوک‌ها دارای قابلیت تخریب می‌شوند و بقیه بلوک‌ها در شرایط گذار قرار دارند، بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که منطقه مورد مطالعه دارای قابلیت تخریب مناسب برای به کارگیری روش‌های تخریبی است.

کلمات کلیدی

روش‌های استخراج تخریبی، مدلسازی زمین‌آماری، قابلیت تخریب توده‌سنگ، آنومالی شماره ۱۲ سه‌چاهون.

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: ayarahmadi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

در به کارگیری روش‌های تخریبی، عوامل متعددی باید مدنظر قرار گیرد. مهم‌ترین و ابتدایی‌ترین عامل در به کارگیری روش‌های تخریبی، قابلیت تخریب توده‌سنگ است. قابلیت تخریب به معنای تخریب خود به خودی توده‌سنگ بر اثر ایجاد یک فضای آزاد در زیر آن است، بنابراین واضح است که برای مثال در روش تخریب بزرگ بر اثر ایجاد زیربرش، ابتدا توده‌سنگ و پس از آن با گسترش ناحیه تخریب، کمربالای کانسار باید تخریب شود و موضوع قابلیت تخریب برای هر دو مورد حایز اهمیت است. پس قبل از به کارگیری روش‌های تخریبی و برنامه‌ریزی استخراج، نیاز است قابلیت تخریب توده‌سنگ مورد نظر به دقت مورد بررسی قرار گیرد. برای بررسی قابلیت تخریب توده‌سنگ، شناخت توده‌سنگ از نظر ویژگی‌های ژئومکانیکی و هندسی ضروری است.

از طرفی، ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ وابستگی شدیدی به ناپیوستگی‌های (هرگونه عارضه‌ای در توده‌سنگ اعم از درزه، دسته‌درزه، ترک، گسل و ریزترک) موجود در منطقه دارد. از آنجا که دسترسی به عمق توده سنگ به طور معمول امکان‌پذیر نیست، برای بررسی ناپیوستگی‌ها تنها می‌توان مواردی را برداشت و مورد بررسی قرار داد که با سطح، گمانه و ترانشه‌ها برخورد دارند. از این رو یکی از اولین گام‌ها در مطالعه ناپیوستگی‌ها، تعیین هندسه ناپیوستگی‌ها بر اساس مشاهده‌های حاصل از برخوردها با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و تخمین آن‌ها است[۱]. از طرفی، مدلسازی توده‌سنگ ناپیوسته فرآیندی پیچیده و وابسته به پارامترهای متعددی است. این پیچیدگی مرتبط با محدودیت‌های موجود در برداشت‌های سطحی و کمبود داده است و باید تا حد ممکن داده‌های بیشتری برای بررسی و مدلسازی جمع‌آوری شود.

با توجه به محدودیت‌های یاد شده در زمینه برداشت و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، امکان ساخت یک مدل قطعی برای ایجاد مدل هندسی ناپیوستگی‌ها اغلب امکان‌پذیر نیست. بنابراین به مدل‌های تصادفی نیاز خواهد بود. پژوهش‌های انجام شده در زمینه شناخت ویژگی‌های هندسی، مکانیکی و رفتاری به دلیل پیچیدگی‌های همراه با حوزه مهندسی معدن و علوم زمین همواره مطرح بوده است. همچنین پس از معرفی روش‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ، روش‌های طبقه‌بندی به عنوان راهکاری برای معرفی توده‌سنگ بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بر اساس محدودیت‌های گفته شده در این زمینه، روش‌های تخمین و شبیه‌سازی برای حصول موارد گفته شده به کار گرفته شده است.

یکی از منابع دریافت اطلاعات در مورد وضعیت منطقه مورد مطالعه، مغزه‌های حاصل از حفاری اکتشافی و مطالعه آنها است. با توجه به فاصله زیاد بین گمانه‌های اکتشافی، برای در اختیار داشتن داده‌های لازم و رسیدن به یک شناخت مناسب از توده‌سنگ، به یک تخمین قابل قبول از پارامترهای ژئومکانیکی و هندسی توده‌سنگ نیاز است. در علوم و مهندسی در ابتدای امر تعدادی داده که محصول نمونه‌گیری یا آزمایش است، وجود دارد که بیانگر مقادیر یک تابع از تعداد محدودی از مقادیر مستقل است[۲]. در اغلب موارد لازم است تا نقاط میانی درون‌یابی شوند. این درون‌یابی یا تخمین با استفاده از روش‌های مختلف از جمله درون‌یابی با روش‌های ریاضیاتی کلاسیک (برازش) و یا با تخمین‌های زمین‌آماری (کریجینگ یا شبیه‌سازی تصادفی) انجام می‌شود. مزیت اصلی روش‌های زمین‌آماری این است که می‌توان توزیع فضایی متغیرها را تخمین زد[۴،۳]. به صورت مرسوم، تحلیل‌های آماری با تعداد نمونه محدود انجام می‌شود و در آن امکان تعیین نواحی با مشخصه مورد نظر وجود ندارد که زمین‌آمار این مشکل را پوشش داده و می‌تواند ارتباط‌های فضایی را علاوه بر توزیع‌های آماری داده‌ها مورد بررسی قرار دهد[۵].

استفاده از روش تخمین زمین آمار برای تخمین و تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ مرسوم و متداول است. این مطالعات در چهار بخش تخمین فضایی ویژگی‌های مکانیکی از جمله مقاومت و مدول یانگ[۱۳-۶]، ویژگی‌های هندسی شامل شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها، چگالی درزه‌داری، توزیع فضایی ناپیوستگی‌ها[۲۵،۸-۱۴]، ویژگی‌های رفتاری توده‌سنگ[۳۰-۲۶] و طبقه‌بندی توده‌سنگ شامل تخمین سیستم‌های طبقه‌بندی مرسوم از جمله RMR[۳۱]، RQD، GSI و طبقه‌بندی سقف فضاهای زیرزمینی اعم از تونل و کارگاه استخراج[۱۳, ۴۳-۳۲] ارایه شده‌اند.

تاوچانجیان و همکاران[۱۷] با مدلسازی زمین‌آماری چگالی درزه‌داری، نواحی خردشده را در منطقه چیبوگاما تعیین کردند. در سال ۲۰۰۲ توزیع مقادیر RQD با استفاده از زمین‌آمار و روش کریجینگ عام توسط آیالو و همکاران[۳۲] تخمین زده شد. اوزتورک و ناسوف [۳۳] با استفاده از ویژگی‌های مقاومت فشاری، RQD و چکش اشمیت، نواحی سنگی را برای انجام عملیات تونلسازی به وسیله زمین‌آمار ارزیابی کردند.

سریواستاوا و همکاران[۱۹] با استفاده از زمین‌آمار، شبکه شکستگی‌ها را با استفاده از شبیه‌سازی زمین‌آماری مورد بررسی قرار داده و فرآیندی برای آن طراحی کردند. غضنفری‌نیا و همکاران[۲۰] شبیه‌سازی زمین‌آماری ناپیوستگی‌ها را در معادن سنگ ساختمانی مورد مطالعه قرار دادند. استاوروپولو و همکاران[۲۸] با ترکیب سه مدل زمین‌شناسی، زمین‌آماری و عددی به بررسی وضعیت توده‌سنگ برای حفر فضاهای زیرزمینی پرداختند. در این مطالعه تخمین پراکندگی فضایی RMR با استفاده از زمین‌آمار و نرم‌افزار سورپک انجام شده است. دبیری و همکاران[۳۵] در مطالعه‌ای با توجه به وضعیت ساختگاه سد بختیاری، از داده‌های RQD استفاده کردند و با روش کریجینگ معمولی نسبت به تخمین آن در منطقه اقدام کردند. در نهایت بر اساس نتایج، منطقه از نظر هوازدگی به پنج دسته مختلف تقسیم شد. دبیری و همکاران[۳۷] با استفاده از داده‌های مربوط به ساختگاه سد بختیاری، مقدار امتیاز طبقه‌بندی RMR را با استفاده از زمین‌آمار برای آن منطقه تخمین زدند. در سال ۲۰۱۳ ایگانا و اورتیز[۳۸] با استفاده از زمین‌آمار و داده‌های مربوط به معادن شیلی، منطقه مورد بررسی را به واحدهای ژئوتکنیکی مجزا تقسیم کردند و بر اساس مقادیر تخمین زده شده RMR، طبقه‌بندی و تخمین منطقه‌ای را ارایه کردند. شادمان و همکاران[۳۹] با استفاده از داده‌های حاصل از مطالعات ژئوتکنیکی، اقدام به تعیین پراکندگی فضایی پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ و در انتها پایداری بلوک‌های معدن گل‌گهر را بر اساس تخمین این پارامترها با زمین‌آمار مشخص کردند. فراری و همکاران[۴۱] از زمین‌آمار برای تخمین RMR در پهنه‌ای به وسعت ۲۰۰ کیلومترمربع در ایتالیا استفاده کردند. کائوکونگ کاو و همکاران[۴۲] با استفاده از زمین‌آمار، امتیاز طبقه‌بندی RMR را بر اساس داده‌های حاصل از حفاری گمانه در مسیر دو تونل مجزا در کره جنوبی تخمین زدند. سوتیروپولوس و همکاران[۱۳] با استفاده از نرم‌افزار سورپک مطالعاتی را برای مدلسازی فضایی پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری و RQD انجام دادند تا بر اساس آن عدم قطعیت‌های مربوط به ایجاد فضاهای زیرزمینی با کاربری دفع زباله را تعیین کنند.

مقادیر اندیس‌های کیفیت توده‌سنگ در یک محدوده بزرگ و گسترده، یک پیش‌نیاز بسیار مهم در طراحی معادن و فعالیت‌های عمرانی است. به صورت معمول برای پروژه‌های معدنی طبقه‌بندی RMR کاربرد گسترده‌ای یافته است. این روش برای ارزیابی عوارض ژئومکانیکی و شرایط پایداری مناطق مورد نظر در کارهای مهندسی به صورت بزرگ مقیاس استفاده می‌شود[۴۱]. با توجه به گستردگی کاربرد طبقه‌بندی RMR در مسایل و پروژه‌های معدنی، این روش با توجه به نیازهای مختلف با تعدیل‌هایی همراه بوده است. یکی از تعدیل‌های بسیار مهم، معرفی طبقه‌بندی توده‌سنگ در معادن (MRMR) [۴۴] بر پایه RMR برای تخمین و پیش‌بینی قابلیت تخریب توده‌سنگ است. این مطالعه متمرکز بر تخمین MRMR و تعیین قابلیت تخریب برای توده‌سنگ محدوده آنومالی شماره ۱۲ معدن سه‌چاهون (ایران مرکزی) که در ادامه به صورت خلاصه آنومالی ۱۲ نامیده می‌شود، است.

۲- روش تحقیق

قابلیت تخریب یکی از مراحل مهم در طراحی معادن زیرزمینی است و علاوه بر شرایط توده‌سنگ، روش استخراج و برنامه‌ریزی تولید را شامل می‌شود، بنابراین برای تخمین این قابلیت معمولا ساده‌ترین و سریع‌ترین راه، به کارگیری روش طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ است. روش پیشنهادی لابسچر[۴۵] بر اساس طبقه‌بندی RMR که MRMR خوانده می‌شود و روش ماتئوس ([۴۶-۴۸]) بر اساس طبقه‌بندی Q اصلی‌ترین روش‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی قابلیت تخریب محسوب می‌شوند.

برای طبقه‌بندی یک توده‌سنگ نیاز به داده‌های مورد نیاز است. از طرفی تخصیص امتیاز متوسط به یک توده‌سنگ بزرگ با پراکندگی داده‌ها، باعث می‌شود مقادیر تخمینی قابلیت تخریب دور از واقعیت باشد، بنابراین در این مقاله روش کریجینگ که بر منطق میانگین متحرک وزن‌دار، استوار است به عنوان بهترین تخمینگر خطی ناریب (BLUE) برای تخمین توزیع قابلیت تخریب مورد استفاده قرار گرفت. از مهمترین ویژگی‌های این روش آن است که به ازای هر تخمینی می‌توان خطای مرتبط با آن را محاسبه کرد، بنابراین برای هر مقدار تخمین زده شده می‌توان دامنه اطمینان آن تخمین را محاسبه کرد.

۲-۱- سیستم طبقه‌بندی قابلیت تخریب MRMR

برای تعیین قابلیت تخریب توده‌سنگ، لابسچر از سال ۱۹۷۷ با تقسیم توده‌سنگ درزه‌دار به پنج دسته با امتیازهای مساوی، بر اساس پارامترهای مقاومتی و ژئومکانیکی توده‌سنگ،

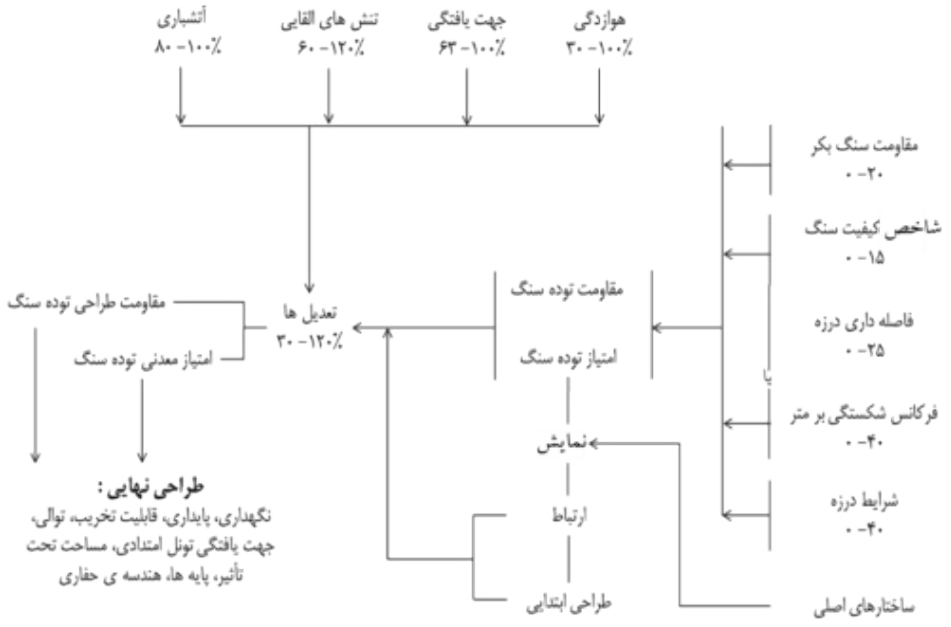
یک روش طبقه‌بندی ارایه کرده است. پارامترهای مورد نظر در این طبقه‌بندی شامل همه پارامترهای موثر در RMR و ضرایب اصلاحی هوازدگی، جهت‌یافتگی درزه‌ها، تنش‌های القایی ناشی از معدنکاری و اثرات آتشباری در نهایت منتج به مقدار طبقه‌بندی MRMR می‌شود.

لابسچر در سال ۱۹۸۱ راهکاری برای انتخاب روش‌های استخراج زیرزمینی توده‌ای غیرانتخابی ارایه کرد. وی عوامل موثر بر انتخاب این روش‌ها را به شرح زیر معرفی می‌کند[۴۹]:

- تنش‌های ناحیه‌ای سنگ و هندسه فضای استخراجی
- طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ و سنگ‌های فراگیر
- داده‌های مربوط به قابلیت تخریب و خردایش ماده‌معدنی و کمربالا
- نیاز یا عدم نیاز به حفظ پایداری محلی

جزییات طبقه‌بندی لابسچر در شکل ۱ ارایه شده است [۴۵]. همان‌طور که مشخص است برای محاسبه امتیاز طبقه‌بندی MRMR، ابتدا لازم است مقاومت سنگ بکر، چگالی درزه‌داری، RQD، فاصله‌داری و شرایط درزه‌ها اخذ و تعیین شود. طبقه‌بندی یاد شده به توده‌سنگ امتیازی بین صفر تا ۱۰۰ تخصیص می‌دهد که ۲۰ امتیاز به مقاومت سنگ بکر، ۴۰ امتیاز به شرایط درزه‌ها و ۴۰ امتیاز به چگالی درزه‌داری (یا ۲۵ امتیاز به فاصله‌داری و ۱۵ امتیاز برای RQD) مربوط می‌شود. هر کدام از موارد گفته شده به صورت جزیی بر اساس جدول‌های ارایه شده در این زمینه، امتیازهای لازم را اخذ می‌کنند. برای مثال در صورتی که مقاومت سنگ بکر در بازه ۶۵ تا ۸۴ مگاپاسکال قرار داشته باشد، ۸ امتیاز از ۲۰ امتیاز کل را به خود اختصاص خواهد داد. نکته‌ای که در امتیازدهی چگالی درزه‌داری وجود دارد، این است که امتیاز آن به تعداد دسته درزه‌های محل بستگی دارد. برای مثال اگر چگالی درزه‌داری ۵ باشد، برای یک، دو و سه دسته درزه به ترتیب امتیازهای ۲۱، ۱۸ و ۱۵ در نظر گرفته می‌شود. امتیاز شرایط درزه به چهار بخش شامل وضعیت درزه به صورت بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس، وضعیت آلتراسیون دیواره درزه و پرشدگی تقسیم می‌شود که هر بخش امتیازی با حداکثر مقدار عددی ۱۰۰ به خود اختصاص می‌دهد. برای هر کدام از این موارد، شرایط خشک و تر وجود دارد و امتیازهای متفاوتی به درزه اختصاص می‌یابد. در نهایت با ضرب کردن مقادیر اختصاص یافته به موارد یاد شده، مضربی حاصل می‌شود که در امتیاز کلی این بخش یعنی ۴۰ ضرب شده و امتیاز شرایط درزه حاصل می‌شود.

با تجمیع امتیازهای سه بخش گفته شده، امتیاز اولیه طبقه‌بندی به دست می‌آید. در این مرحله لازم است چهار عامل اصلاحی هوازدگی، جهت‌یافتگی درزه، تنش القایی و آتشباری



شکل ۱: روند محاسبه MRMR [۴۵]

تعیین شده و بر اساس شرایط موجود، درصد تعدیل‌های متناسب به مقدار اولیه اعمال شود که منجر به تعیین امتیاز طبقه‌بندی MRMR برای توده‌سنگ مورد نظر می‌شود.

کلید ارتباط MRMR با قابلیت تخریب، شعاع هیدرولیکی است. شعاع هیدرولیکی از تقسیم مساحت بر محیط سطح آزاد توده‌سنگ محاسبه می‌شود به عبارت بهتر، شعاع هیدرولیکی برای سطح سقف فضای ایجاد شده تعریف می‌شود. این روش با استفاده از منحنی تخریب قابلیت تخریب را پیش‌بینی می‌کند (شکل ۲).

این نمودار، سه حالت را برای توده‌سنگ شامل محدوده تخریب، محدوده پایدار و محدوده گذار در نظر می‌گیرد، بنابراین بر اساس MRMR برای فراهم شدن عملیات تخریب، باید فضایی ایجاد شود که شعاع هیدرولیکی آن، توده‌سنگ را در ناحیه تخریب قرار دهد. بنابراین، لازم است برای مرز هر ناحیه یک رابطه تعیین شود که بر اساس آن وضعیت قرارگیری توده‌سنگ مشخص شود. از این رو با استفاده از نرم‌افزار Plot Digitizer[۵۰] برای هر کدام از مرزها رابطه‌ای بر اساس MRMR و شعاع هیدرولیکی تعیین شد (رابطه‌های ۱ و ۲).

$$f_{caving} = 0.0057(MRMR)^2 + 0.2284(MRMR) + 1.8431 - HR \quad (۱)$$

$$f_{stability} = 0.0063(MRMR)^2 - 0.0357(MRMR) + 0.8933 - HR \quad (۲)$$

که در آن‌ها، HR مقدار شعاع هیدرولیکی طراحی است. با این رابطه‌ها، سه ناحیه تعریف شده در روش لابسچر تعیین می‌شود. این ناحیه‌ها با استفاده از رابطه‌های ۳ تا ۵ قابل تشخیص است.

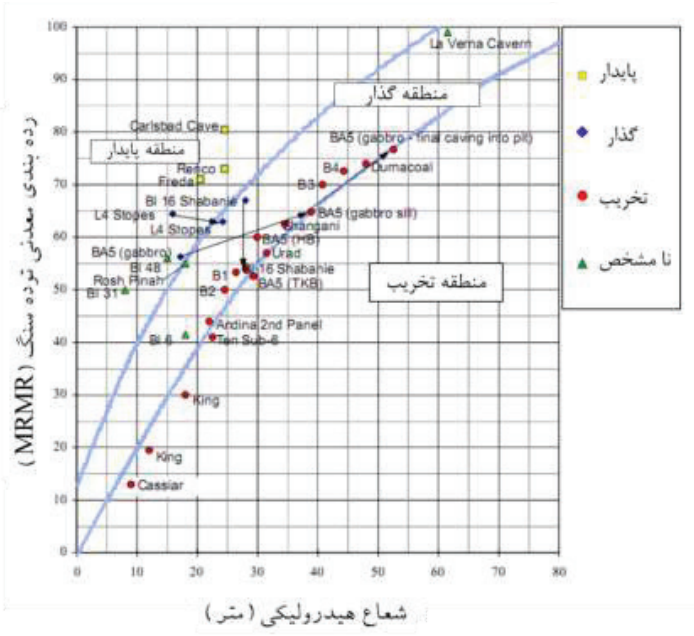
$f_{caving} < 0$ ناحیه تخریب (۳)

$f_{stable} > 0$ ناحیه پایدار (۴)

$f_{stable} < 0$, $f_{caving} > 0$ ناحیه گذار (۵)

۲-۲- تخمین قابلیت تخریب به روش زمین‌آماری

برای برداشت داده‌ها از منطقه، محدودیت‌هایی وجود داشته است، بنابراین لازم است با استفاده از روش‌های تخمین موجود، برای مناطقی که امکان نمونه‌برداری و برداشت داده برای آن میسر نبوده است، شرایط را تعیین کرد. تخمین زمین‌آماری شامل دو مرحله است. مرحله اول، شناخت و مدلسازی ساختار فضایی منطقه مورد تخمین است که در این



شکل ۲: نمودار قابلیت تخریب لابسچر[۴۵]

مرحله مفهوم پیوستگی، همگنی و ناهمگنی و بالاخره ساختار فضایی ذخایر معدنی به وسیله واریوگرام بررسی می‌شود. مرحله دوم، تخمین زمین‌آماری بلوک‌های استخراجی به روش کریجینگ است که به مشخصات مدل واریوگرام برازش داده شده در مرحله اول وابسته است[۵۱]. چنانچه در انتخاب مدل اشتباهی انجام گیرد در کلیه مراحل بعد منعکس خواهد شد.

از آنجایی که کریجینگ به عنوان بهترین تخمینگر خطی نااریب شناخته می‌شود، از آن برای تخمین شرایط ناپیوستگی‌ها و مقاومتی توده‌سنگ استفاده شده است. به طور کلی، کریجینگ تخمین‌ها را با استفاده از رابطه ۶ انجام می‌دهد[۵۲]:

$$z^*(x_i)=\sum_{i=1}^{n} l_i z(x_i) \qquad (۶)$$

که در آن:

$z^*(x_i)$: مقدار تخمین زده شده متغیر در مکان x_i

l_i: وزن مربوط به نمونه iام

$z(x_i)$: مقدار متغیر iام

n: تعداد پارامترها است.

واریوگرام ابزاری برای تعیین تداوم، شعاع تاثیر و ناهمسانگردی در ارتباط فضایی پارامتر مورد تخمین است، به نحوی که ابتدا شرایط پارامتر در منطقه به صورت واریوگرام تجربی پدیدار شده و سپس مدلی بر آن برازش می‌شود و در انتها، اعتبار مدل برازش شده مورد سنجش قرار می‌گیرد. در صورتی که مدل برازش شده دارای اعتبار باشد (۱۰ درصد اختلاف به صورت معمول مورد پذیرش است)، این مدل توانایی نمایندگی ارتباط فضایی پارامتر را دارد و در تخمین ظاهر می‌شود. تابع واریوگرام از رابطه ۷ تعریف می‌شود[۵۲].

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}\left[Z(x_i)-Z(x_i-h)\right]^2 \qquad (۷)$$

که در آن:

$\gamma(h)$: برای تعداد N جفت نمونه که با فاصله h از هم قرار گرفته‌اند.

$Z(x)$: مقدار متغیر x در نقطه i است.

۳- تعیین قابلیت تخریب توده‌سنگ آنومالی شماره ۱۲

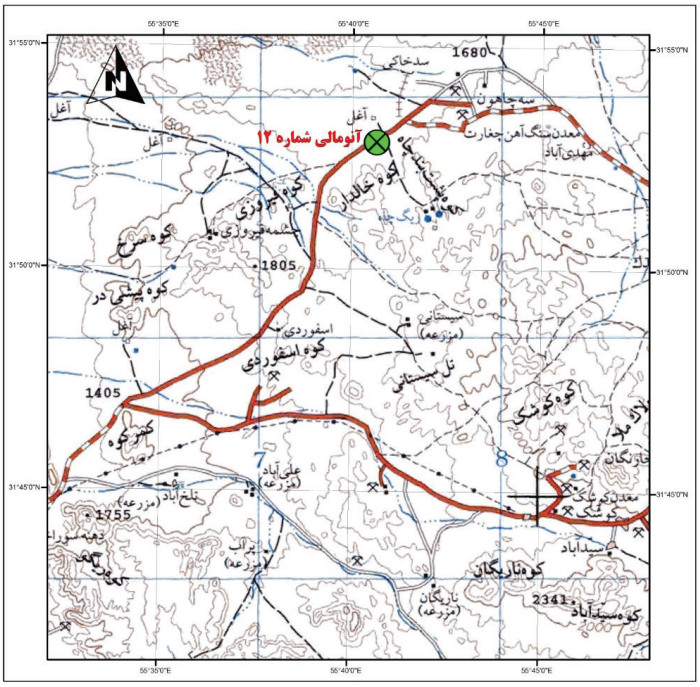
آنومالی شماره ۱۲ در استان یزد در فاصله ۱۴۲ کیلومتری شرق شهر یزد و ۳۲ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان بافق قرار دارد. همچنین این آنومالی در ۲۳ کیلومتری شمال‌شرقی معدن سنگ‌آهن چغارت و ۵ کیلومتری جنوب‌غربی معدن سنگ‌آهن سه‌چاهون (آنومالی شماره ۱۱) قرار دارد. شکل ۳ محل قرار گرفتن آنومالی شماره ۱۲ را نشان می‌دهد.

ذخیره آهن آنومالی شماره ۱۲ در بخش جنوب‌غربی معدن سنگ‌آهن سه‌چاهون (آنومالی شماره ۱۱) و در مرز غربی آنومالی سنگ‌آهن شماره ۱۰ قرار دارد. این ذخیره به صورت دو بخش جدا از هم که بخش اصلی آن در عمق تقریبی ۳۵۰ تا ۴۹۰ متری از سطح زمین و در شمال‌غربی منطقه قرار دارد، تشکیل شده است. سطح آنومالی شماره ۱۲ به وسیله سنگ‌های رسوبی کواترنری پوشیده شده که در منطقه‌ای به مساحت حدود ۲۶۰ هکتاری قرار دارد. ذخیره این معدن به وسیله بررسی‌های ژئومکانیکی و حفاری‌های گسترده کشف شده است.

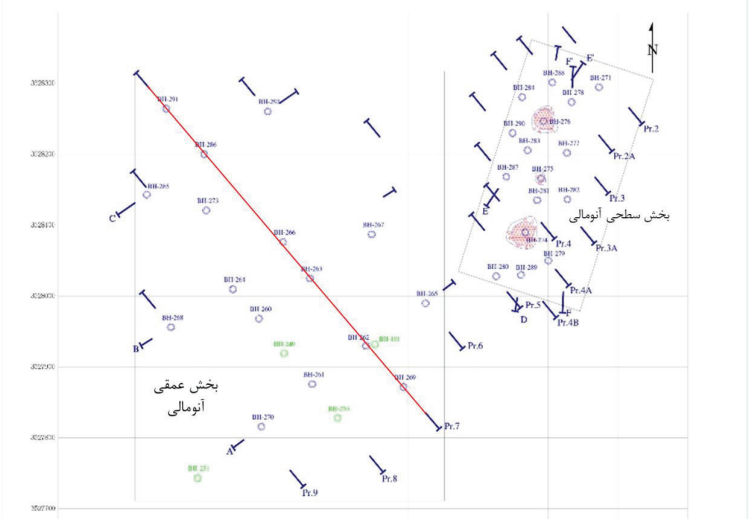
ذخیره کلی قابل برداشت در آنومالی شماره ۱۲ برابر با ۲۴ میلیون تن در بخش عمیق و ۲٫۴ میلیون تن در سطح با عیار متوسط ۶۰ درصد آهن است. علاوه بر این در این ذخیره ۱٫۲۸ درصد اکسید تیتانیوم و ۰٫۳۹ درصد اکسید وانادیوم نیز وجود دارد[۵۴].

۳-۱- تهیه داده‌های قابلیت تخریب

داده‌های مورد نیاز در دو بخش سطحی از خط برداشت‌ها و زیرسطحی از چاه‌های اکتشافی منطقه (شکل ۴) تهیه شد. شکل ۵ مقطع قائم شماره ۷ منطقه را که در شکل ۴ با خط مشخص شده است، نشان می‌دهد. داده‌های سطحی که از چند پله استخراجی بخش بالای آنومالی شماره ۱۲ و دیواره ۱۲۰ متری شمال آنومالی ۱۰ در فاصله ۵۰۰ متری آنومالی شماره ۱۲ تهیه شد. این داده‌ها شامل درزه‌نگاری ناپیوستگی‌ها و نمونه‌برداری سطحی برای انجام آزمون‌های ژئومکانیکی است و اطلاعات زیرسطحی از داده‌های اولیه چاه‌های ژئوشیمیایی منطقه و نمونه‌برداری ژئومکانیکی و تصاویر تهیه شده از مغزه‌های حفاری استخراج شد. داده‌های ژئومکانیکی شامل برداشت شیب و جهت شیب، مقاومت سطح ناپیوستگی (JCS) و پروفیل زبری ناپیوستگی (JRC) به صورت سطحی و در دیواره‌های نزدیک به منطقه مورد مطالعه و تعیین مقاومت



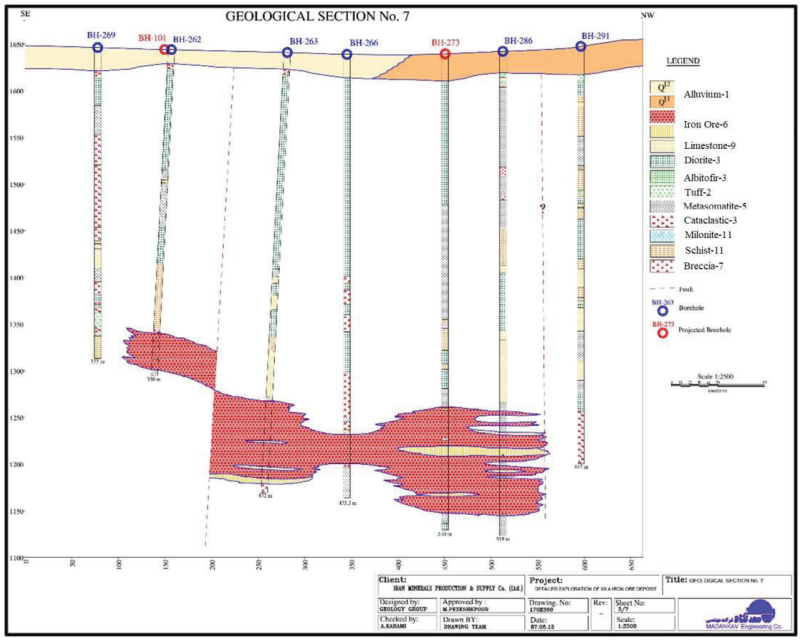
شکل ۳: محل قرارگیری آنومالی ۱۲



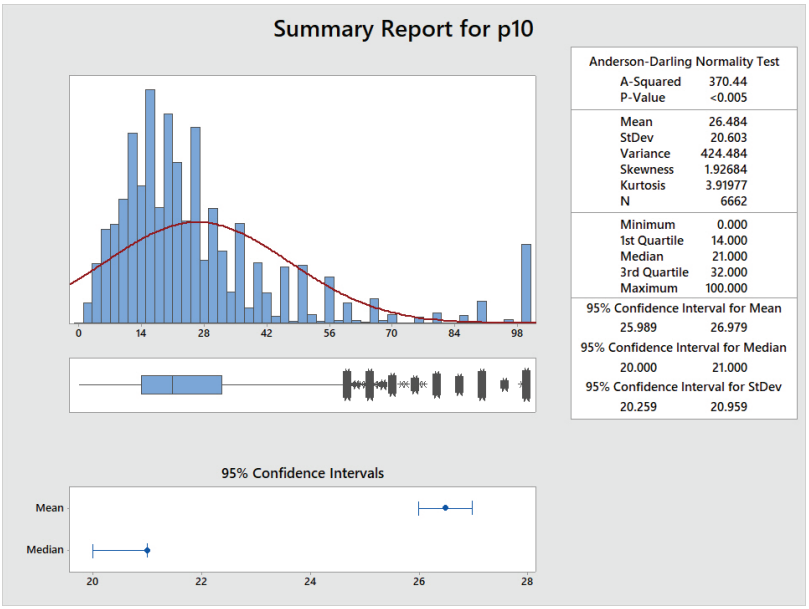
شکل ۴: پلان محل حفر گمانه‌های اکتشافی[۵۴]

تراکمی تک‌محوری، مدول الاستیک و مقاومت کششی در آزمایشگاه از نمونه‌های سطحی و زیرسطحی بوده است. بر اساس وضعیت سنگ‌شناسی منطقه که شامل ۱۱ تیپ سنگ است، بالغ بر ۱۰۰ نمونه در آزمایشگاه تهیه و بیش از ۲۰۰ مورد آزمایش‌های مختلف بنا به نیاز، انجام شده است. همچنین داده‌های مربوط به چگالی درزه‌داری (P10) نیز با استفاده از تصاویر تهیه شده از مغزه‌های حفاری اکتشافی منطقه و نرم‌افزار CoreProcessing[۵۳] حاصل شد.

برای مطالعه زمین‌آماری، لازم است تا داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌ها و سنگ‌شناسی منطقه تهیه شود. این داده‌ها پس از بررسی‌های گفته شده در بخش‌های مختلف حاصل شده است. داده‌های فراهم شده شامل مقادیر چگالی درزه‌داری و



شکل ۵: نمونه‌ای از مقاطع مورد استفاده برای تهیه داده‌های سنگ‌شناسی[۵۴]



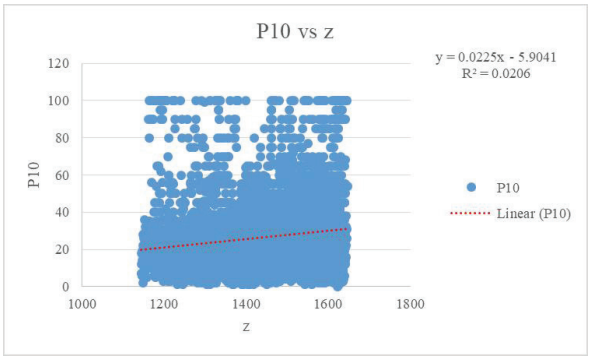
شکل ۶: توزیع آماری داده‌های چگالی درزه‌داری

سنگ‌شناسی است که مورد اول به ازای هر متر مغزه، یک مقدار و سنگ‌شناسی بر اساس لاگ گمانه‌های حفر شده و گزارش اکتشاف تنظیم شده است.

۳-۲- بررسی آماری و واریوگرافی چگالی درزه‌داری

تحلیل آماری لازمه مدلسازی‌های زمین‌آماری است و از طرفی به تفکیک جوامع آماری نیاز است تا فرضیه پایایی که از اصلی‌ترین فرضیه‌های زمین‌آماری است صدق کند، بنابراین تشخیص و تفکیک مناطق دارای چگالی درزه‌داری یکسان نیازمند بررسی‌های ساختاری و زمین‌شناسی است. شکل ۶ توزیع آماری داده‌های مربوط به چگالی درزه‌داری را نمایش می‌دهد.

در هیستوگرام مربوط به چگالی درزه‌داری، تجمع نسبی در مقادیر ۱۰۰ مشاهده می‌شود. این تجمع از این مساله ناشی می‌شود که در این پژوهش، برای مقادیر خردشدگی بالا، مقدار ۱۰۰ به عنوان حداکثر مقدار لحاظ شده است و در مواردی که خردشدگی زیاد بوده است، به آن مقدار ۱۰۰ اختصاص یافته است، برای تشخیص صحت فرضیه پایایی، نبود روند و وابستگی مکانی پارامتر مورد مدلسازی زمین‌آماری است و زمانی می‌توان زمین‌آمار را بهترین روش تخمین دانست که یا روندی وجود نداشته باشد و یا حذف روند انجام گرفته باشد. راه‌های متفاوتی برای تشخیص روند وجود دارد. از جمله آن‌ها روش رسم نمودار مقدار پارامتر بر حسب مختصات x، y و z است. تحلیل روند برای برای چگالی درزه‌داری منطقه انجام گرفت و نشان داد که چگالی درزه‌داری در راستای شرقی- غربی و شمالی- جنوبی دارای روند نبوده و چنانچه در شکل ۷ نشان داده شده است در راستای عمق (z) روند ضعیفی دیده می‌شود که قابل چشم‌پوشی است.



شکل ۷: توزیع مکانی چگالی درزه‌داری در راستای عمق

در شکل ۸ واریوگرافی مربوط به چگالی درزه‌داری نمایش داده شده است. برای تخمین چگالی درزه‌داری با استفاده از واریوگرام کروی بهترین جهت شیب، شیب و زاویه پنجره جستجو به ترتیب ۱۸۰، ۵۷ و ۳۰ درجه با طول جستجوی (Lag) برابر با یک متر به دست آمد.

برای اعتبارسنجی واریوگرام روش‌هایی وجود دارد که بهترین آن‌ها روش خطای جک نایف است. در این روش بعد از تخمین هر نقطه معلوم توسط نقاط معلوم دیگر به روش کریجینگ معمولی و مقایسه مقدار نقطه معلوم و مقدار تخمین، چهار پارامتر کنترل می‌شود. اول اینکه حد آستانه (آستانه واریوگرام) از واریانس نمونه‌ها تجاوز نکند. دوم، میانگین خطاها

شکل ۸: مدل واریوگرام تجربی برازش شده چگالی درزه‌داری با گام یک متر

به صفر میل کند، سوم اختلاف واریانس خطاها و واریانس تخمین کمتر از ۱۰ درصد شود و چهارم اینکه هیستوگرام خطاها نرمال شود.

بر اساس آنچه گفته شد، واریوگرام چگالی درزه‌داری برای تخمین مدل بلوکی معتبر است، زیرا سقف واریوگرام پایین‌تر از واریانس نمونه‌ها است، میانگین خطاها تقریبا صفر، درصد اختلاف واریانس خطاها و متوسط واریانس تخمین کمتر از پنج درصد و قابل قبول است و درصد خطاها که در بازه مثبت و منفی دو برابر انحراف معیار خطا قرار می‌گیرد ۹۴٫۰۹ درصد است که نشان‌دهنده نرمال بودن هیستوگرام خطاها است. جدول ۱ نتایج اعتبارسنجی واریوگرام چگالی درزه‌داری را نشان می‌دهد.

جدول۱: نتایج اعتبارسنجی واریوگرام چگالی درزه‌داری

معیار	مقدار
میانگین خطاها	-۰٫۰۳۳۸
واریانس خطاها	۱۳۵٫۴۸۲۳
انحراف معیار خطاها	۱۱٫۶۳۹۷
میانگین توان ۲ خطاها	۱۳۵٫۴۶۳۱
میانگین وزن دار توان ۲ خطاها	۱۳۵٫۱۷۵۵
چولگی هیستوگرام خطاها	-۱٫۲۰۱۹
کشیدگی هیستوگرام خطاها	۱۰٫۳۱۵۳
تعداد نمونه‌ها	۶۶۶۲
متوسط واریانس تخمین	۱۳۰٫۷۴۰۳
درصد اختلاف واریانس خطاها و متوسط واریانس تخمین	۳٫۵
درصد خطاها که بین به اضافه و منهای دو برابر انحراف معیار قرار گرفته است	۹۴٫۰۹

۳-۳- بررسی آماری و واریوگرافی واحدهای سنگ‌شناسی

در این مطالعه تخمین واحدهای سنگی به این دلیل انجام شده است که بتوان بر اساس نوع سنگ، پارامترهای مقاومتی را به آن اختصاص داد. برای تخمین واحدهای سنگی منطقه که بر اساس اطلاعات سنگ‌شناسی گمانه‌های حفر شده، فایل ترکیبی مورد نیاز تخمین به روش کریجینگ معمولی تهیه شد. شکل ۹ نمودار فراوانی واحدهای سنگ‌شناسی موجود در منطقه را نشان می‌دهد.

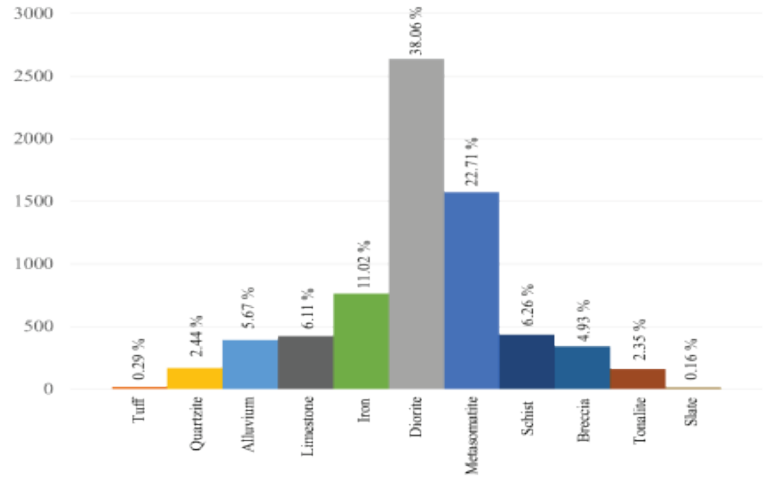
برای بررسی وجود ارتباط فضایی در کد داده‌های واحدهای سنگی واریوگرافی انجام شد که در جهت شیب ۱۸۰ درجه، شیب ۶۰ درجه و پنجره جستجو ۳۰ درجه، مناسب‌ترین واریوگرام منتج شد که در شکل ۱۰ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به واریوگرام شکل ۱۰ و از آنجایی که مرزهای واحدهای سنگ‌شناسی در مدلسازی تاثیر زیادی ندارد از روش کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله برای تخمین کد واحدهای سنگ‌شناسی در این مطالعه بهره گرفته شده است.

بر اساس جدول ۲ و با توجه به نکات کنترلی روش خطای جک‌نایف، واریوگرام کد سنگ‌شناسی معتبر است و امکان تخمین توزیع واحدهای سنگ‌شناسی در مدل ژئومکانیکی تولید شده بالا وجود دارد.

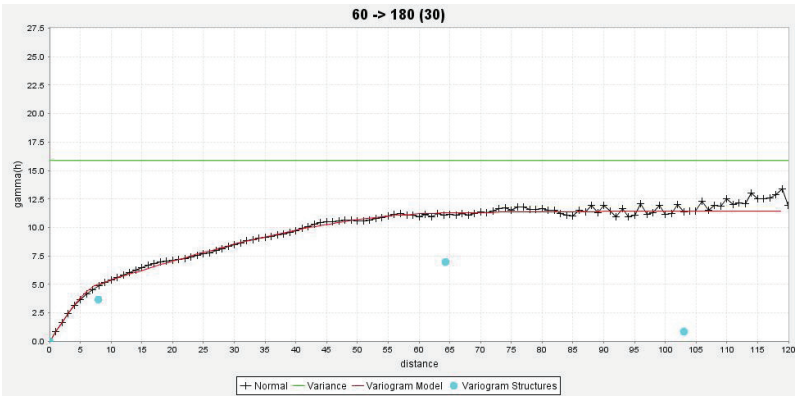
۴-۳- تخمین چگالی درزه‌داری و واحدهای سنگ‌شناسی

برای تخمین پارامترهای مورد نیاز قابلیت تخریب و با توجه به گستردگی منطقه و نیازهای استخراجی، ابعاد بلوک‌های مدل تخمین ۵۰×۵۰×۵۰ متر در نظر گرفته شد (شکل ۱۱).

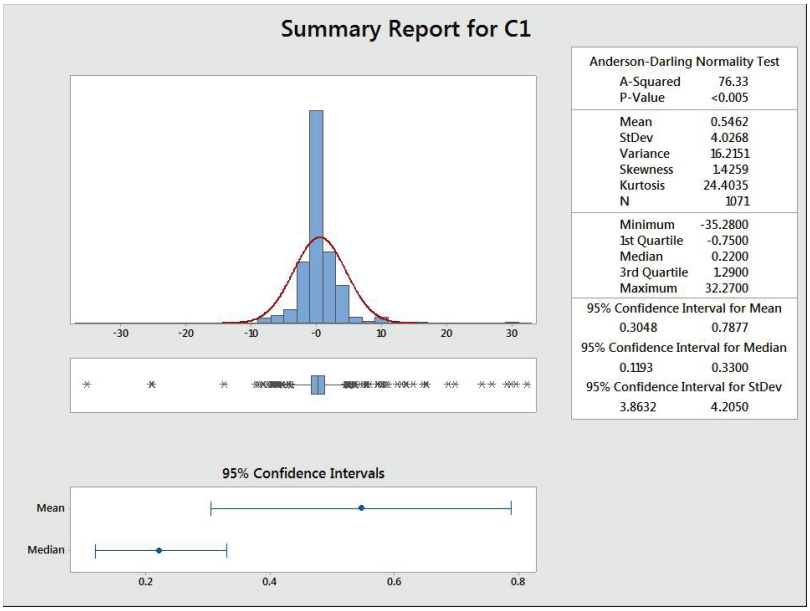
با توجه به فاصله گمانه‌های اکتشافی حفر شده و شعاع



شکل ۹: نمودار فراوانی داده‌های واحدهای سنگ‌شناسی



شکل ۱۰: مدل واریوگرام تجربی برازش شده سنگ‌شناسی با گام یک متر

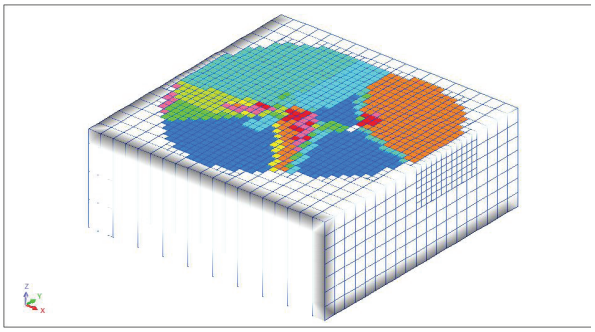


شکل ۱۱: هیستوگرام اختلاف مقادیر تخمین چگالی درزه‌داری به دو روش کریجینگ معمولی و عکس مجذور فاصله

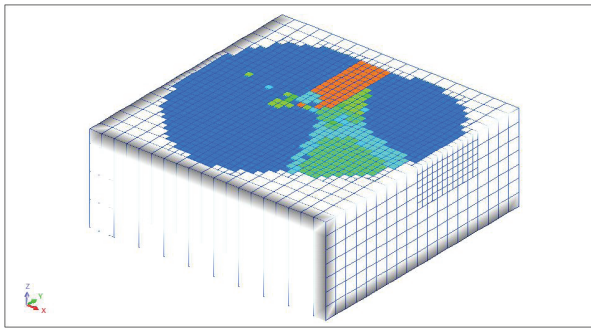
تاثیر محاسبه شده در واریوگرافی، تخمین پارامترهای چگالی درزه‌داری و سنگ‌شناسی منطقه با دو روش کریجینگ و عکس مجذور فاصله انجام شد تا نقاط تخمین زده نشده به روش کریجینگ به تخمین عکس مجذور فاصله جایگزین شوند. در اغلب نقاط اختلاف دو روش استفاده شده قابل چشم پوشی است (شکل ۱۱). مدل سه‌بعدی چگالی درزه‌داری و واحدهای سنگ‌شناسی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲: نتایج اعتبار سنجی واریوگرام سنگ‌شناسی

معیار	مقدار
میانگین خطاها	۰٫۰۰۰۳
واریانس خطاها	۰٫۸۶۳۱
انحراف معیار خطاها	۰٫۹۲۹۰
میانگین توان ۲ خطاها	۰٫۸۶۳۰
میانگین وزن دار توان ۲ خطاها	۰٫۸۶۵۵
چولگی هیستوگرام خطاها	۰٫۰۳۸۰
کشیدگی هیستوگرام خطاها	۴۰٫۱۵۰۸
تعداد نمونه‌ها	۶۹۳۳
متوسط واریانس تخمین	۰٫۸۷۵۵
درصد اختلاف واریانس خطاها و متوسط واریانس تخمین	۱٫۴۱
درصد خطاها که بین به اضافه و منهای دو برابر انحراف معیار قرار گرفته است	۹۶٫۲۸



(الف)



(ب)

شکل ۱۲: نمایی از مدل بلوکی تخمین زده شده الف)چگالی درزه‌داری، ب) واحد سنگ‌شناسی

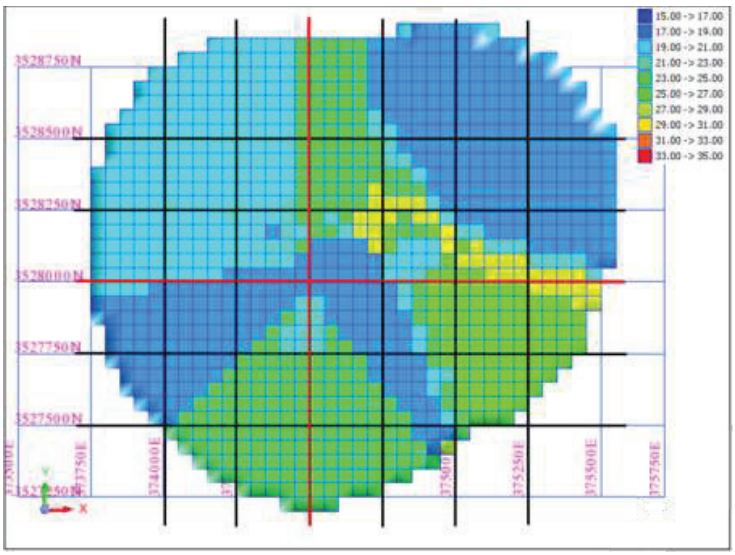
۳-۵- تخمین مدل MRMR

چگالی درزه‌داری، مقاومت تراکمی تک‌محوری و شرایط درزه‌داری منطقه پارامترهای تعیین‌کننده مدل MRMR اند، بنابراین اطلاعات مدل چگالی درزه‌داری مستقیما وارد مدل MRMR شد. با استفاده از مدل واحدهای سنگ‌شناسی و بر اساس مقاومت تراکمی تک محوری هر واحد سنگی، پارامتر مقاومت به مدل اختصاص یافت. اطلاعات مورد نیاز شرایط درزه‌داری از برداشت‌های سطحی تهیه و به صورت عمومی به همه کانسار تعلق گرفت به طوری که امتیاز ۲۱ را به خود اختصاص داد. در نهایت مدل پایه MRMR بر اساس نحوه امتیازدهی روش تجربی لابسچر کمی شد. برای محاسبه MRMR باید بر اساس مطالب پیش گفته، چهار عامل اصلاحی بر مقدار پایه اعمال شود. بر اساس وضعیت منطقه و عمق قرارگیری ماده معدنی، هوازدگی وجود ندارد و تعدیل آن ۱۰۰ درصد خواهد بود. همچنین سه دسته درزه در منطقه شناسایی شده که یکی از این سه دسته‌درزه، تقریبا قائم است، میزان تعدیل در این بخش برابر با ۸۰ درصد خواهد بود. برای تعدیل تنش القایی تنها می‌توان از نتایج مدلسازی استفاده کرد که با توجه به اینکه در این مرحله هنوز طراحی انجام نگرفته است، امکان تعیین تنش‌های القایی وجود ندارد و از این تعدیل چشم‌پوشی می‌شود. تعدیل مربوط به انفجار نیز بر اساس موارد موجود، آتشباری متداول و خوب در نظر گرفته شده و مقدار اصلاحی ۹۴ درصد به آن تخصیص داده می‌شود. بنابراین مقدار اصلاحی با ضرب کردن این عوامل محاسبه و برابر با ۷۵٫۲ درصد می‌شود. مدل MRMR و موقعیت مقطع‌های قائم در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. همچنین شکل‌های ۱۴ و ۱۵ دو مقطع شمالی- جنوبی و شرقی- غربی در مرکز مدل را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها بلوک‌های ماده معدنی با رنگ تیره نشان داده شده است.

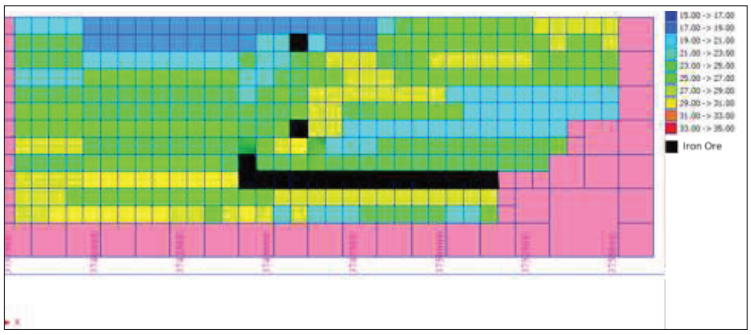
همانطور که در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است، محدوده تغییرات MRMR از ۱۷ تا ۳۵ است. هچنین ماده معدنی بر اساس مدل‌ها دارای مقادیر بین ۱۹ تا ۳۰ است، بنابراین توده‌سنگ مورد بررسی از نظر مقاومتی در محدوده ضعیف تا متوسط قرار می‌گیرد و به صورت کلی از نظر شرایط مورد نیاز برای به کارگیری روش‌های تخریبی دارای وضعیت مساعدی است. توزیع آماری مقادیر MRMR تخمین زده شده به صورت نمودار شکل ۱۶ ارایه شده است.

۴- بررسی قابلیت تخریب

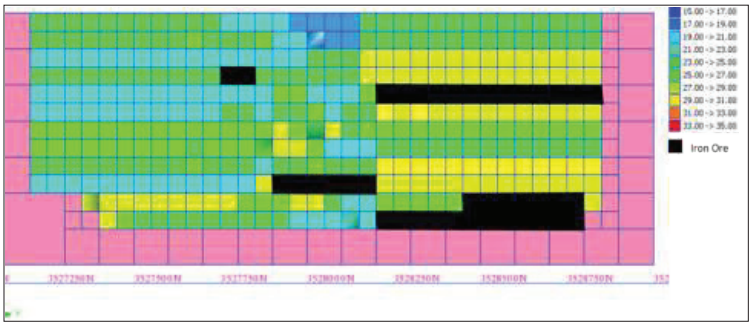
با توجه به رابطه‌های ۳ تا ۵ و بر اساس ابعاد بلوک‌های انتخابی در مدل زمین‌آماری، سقف فضای زیربرش به صورت مربع و با بُعد ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. شعاع هیدرولیکی این فضا برابر با ۱۲٫۵ متر است. با قراردادن مقادیر MRMR و شعاع هیدرولیکی مورد نظر در رابطه‌های گفته شده، وضعیت بلوک‌های مدل به شرح جدول ۳ حاصل می‌شود.



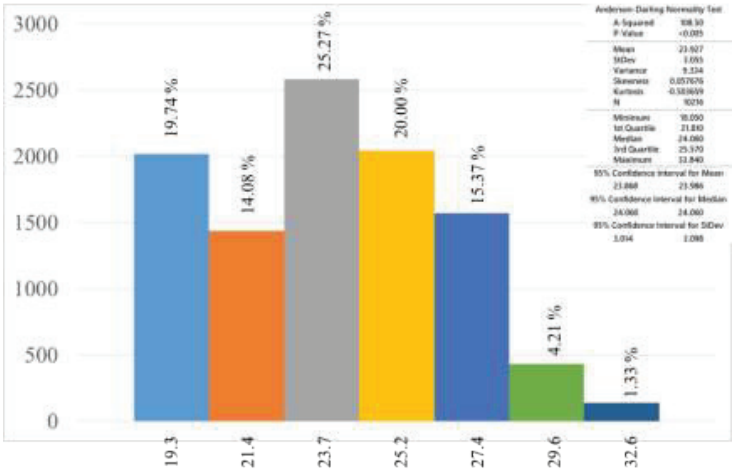
شکل ۱۳: مدل MRMR و موقعیت مقاطع قائم



شکل ۱۴: مقطع قائم از تخمین MRMR در راستای شمالی- جنوبی



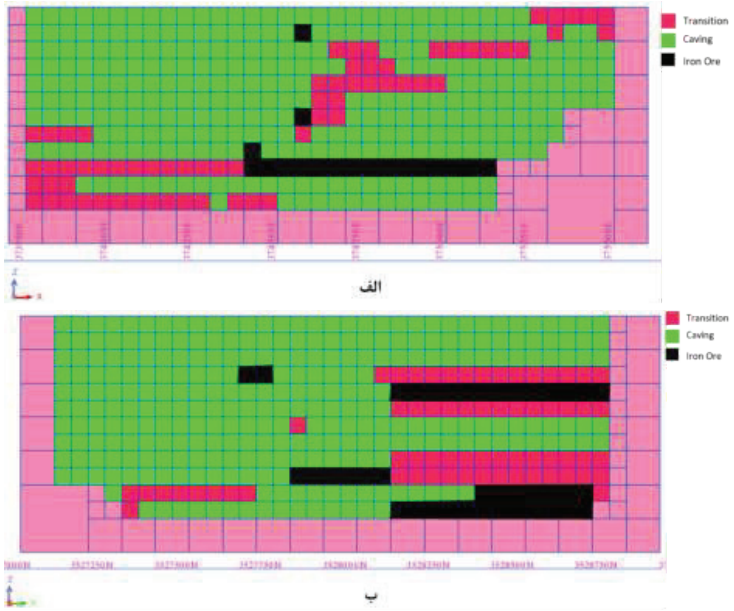
شکل ۱۵: مقطع قائم از تخمین MRMR در راستای شرقی- غربی



شکل ۱۶: توزیع آماری مقادیر MRMR

جدول ۳: وضعیت تخریب پذیری مدل بلوکی

تعداد کل بلوک‌ها	۱۰۲۱۶
تعداد بلوک‌های توده‌سنگ کمربالا و کمر پایین	۹۱۴۹
تعداد بلوک‌های واقع در ناحیه تخریب	۷۵۰۳
تعداد بلوک‌های واقع در ناحیه گذار	۱۶۴۶
تعداد بلوک‌های واقع در ناحیه پایدار	۰



شکل ۱۷: وضعیت قابلیت تخریب در مقطع‌های متناظر با شکل‌های ۱۴ (الف) و ۱۵ (ب)

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، با در نظر گرفتن شعاع هیدرولیکی ۱۲٫۵ متر، ۸۲ درصد بلوک‌ها با معیار لابسچر در وضعیت تخریبی قرار می‌گیرند و ۱۸ درصد باقیمانده در وضعیت گذار قرار دارند. بر اساس همین بررسی، هیچ بلوکی شرایط پایداری قطعی را تجربه نخواهد کرد. شکل ۱۷ وضعیت قابلیت تخریب بلوک‌های متناظر با شکل‌های ۱۴ و ۱۵ را نشان می‌دهد. در شکل ۱۷ رنگ سبز بیانگر فراهم بودن شرایط برای تخریب و رنگ قرمز بیانگر وضعیت گذار است.

۵- نتیجه‌گیری

روش‌های استخراج تخریبی در معادن زیرزمینی به عنوان یکی از روش‌های با توان رقابت با روش‌های سطحی در حال حاضر برای انواع کانسارها مطرح است. در مرحله امکان‌سنجی و از نظر مکانیک‌سنگی، آنچه که به کارگیری این روش‌ها را با اما و اگر مواجه می‌سازد، وضعیت تخریب‌پذیری توده‌سنگ مورد نظر است، بنابراین لازم است قبل از هرگونه تصمیم‌گیری در زمینه انتخاب روش استخراج، قابلیت‌تخریب توده مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه با استفاده از داده‌های زمین‌شناسی و روش زمین‌آماری ابتدا وضعیت کیفی توده‌سنگ بر اساس طبقه‌بندی MRMR مورد بررسی و تخمین قرار گرفت. پس از آن وضعیت تخریب‌پذیری توده‌سنگ بر اساس منحنی لابسچر ارزیابی شد و با توجه به شعاع هیدرولیکی ۱۲٫۵ متر، این نتیجه حاصل شد که بیش از ۸۰ درصد از بلوک‌های توده‌سنگ قابلیت تخریب دارند. همچنین هیچ یک از بلوک‌های مدل دارای وضعیت پایدار نیستند و از این جهت می‌توان امیدوار بود که به کارگیری روش‌های تخریبی در این کانسار می‌تواند یک گزینه بسیار مناسب باشد. با استفاده از تجربه‌های جهانی و نیز به کارگیری روش‌های انتخاب روش استخراج مرسوم، می‌توان گزینه‌های ممکن برای روش استخراج را تعیین کرد. البته رسیدن به یک تصمیم قطعی در مورد روش استخراج آنومالی ۱۲ مستلزم بررسی‌های فنی و اقتصادی تفصیلی‌تری است.

۶- مراجع

[1] Rafiee, A., and Vinches, M. (2008). *"Application of geostatistical characteristics of rock mass fracture systems in 3D model generation"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(4): 644-652.

[2] Ferrari, F. (2014). *"Rock mass characterization and spatial estimation of geomechanical properties through geostatistical techniques"*. PhD thesis, Università degli studi di Milano.

[3] Doustmohammadi, M., Jafari, A., and Asghari, O. (2014). *"Application of Geostatistical Modelling*

to Study the Exploration Adequacy of Uniaxial Compressive Strength of Intact Rock alongthe Behesht-Abad Tunnel Route". International Journal of Mining & Geo-Engineering. 48(2): 127-137.

[4] Houlding, S. (2000). *"Practical geostatistics: modeling and spatial analysis"*. Manual. Vol. 1. Springer Science & Business Media.

[5] Hammah, R., and Curran, J. (2006). *"Geostatistics in Geotechnical Engineering: Fad or Empowering?"*. In GeoCongress, Geotechnical Engineering in the Information Technology Age, 1-5.

[6] Barla, G., Scavia, C., Antonellis, M., Guarascio, M., (1987). *"Characterization of rock mass by geostatistical analysis at the Masua Mine"*. In 6th ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics.

[7] Van de Wall, I. A., and Msc, J. A. (1997). *"Characterization of the geotechnical properties of rock material for construction purposes"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(3-4): 319.e1-319.e12.

[8] Archambault, G., Gentier, S., Riss, J., and Flamand, R.,(1997). *"The evolution of void spaces (permeability) in relation with rock joint shear behavior"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(3-4): 14.e1-14.e15.

[۹] شادمان، م.؛ حسنی، ح.؛ معارف وند، پ.؛ مدنی، ح.؛ ۱۳۹۳؛ **"تحلیل پایداری شیب معدن بر اساس تفسیر زمین‌آماری پارامترهای ژئوتکنیکی"**. پنجمین کنفرانس مهندسی معدن. انجمن مهندسی معدن ایران.

[10] Pishbin, M., Fathianpour, N., and Mokhtari, A. R. (2016). *"Uniaxial Compressive Strength spatial estimation using different interpolation techniques"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 89(Supplement C): 136-150.

[۱۱] خراسانی، ع.؛ حسینی، ع.؛ اصغری، الف.؛ امینی، م.؛ ۱۳۹۳؛ **"کاربرد زمین‌آمار در مکانیک سنگ، مطالعه موردی: تخمین مدول تغییر شکل توده‌سنگ ساختگاه سد خرسان یک"**. پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران. انجمن مکانیک سنگ ایران.

[12] Pinheiro, M., Vallejos, J., Miranda, T., and Emery, X. (2016). *"Geostatistical simulation to map the spatial heterogeneity of geomechanical parameters: A case study with rock mass rating"*. Engineering Geology, 205: 93-103.

[13] Sotiropoulos, N., Benardos, A., and Mavrikos, A. (2016). *"Spatial Modelling for the Assessment of Geotechnical Parameters"*. Procedia Engineering, 165: 334-342.

[14] Chiles, J. (1989). *"Three-dimensional geometric modeling of a fracture network"*. In Geostatistical, sensitivity, and uncertainty methods for ground-water flow and radionuclide transport modeling, Proceedings.

[15] Villaescusa, E., and Brown, E. (1990). *"Characterizing joint spatial correlation using geostatistical methods"*. Rock joints, Balkema Rotterdam, 115-122.

[16] Blanchin, R., and Chiles, J. P. (1993). *"The Channel Tunnel: Geostatistical prediction of the geological conditions and its validation by the reality"*. Mathematical Geology, 25(7): 963-974.

[17] Tavchandjian, O., Rouleau, A., Archambault, G., Daigneault, R., and Marcotte, D. (1997). *"Geostatistical analysis of fractures in shear zones in the Chibougamau area: applications to structural geology"*. Tectonophysics, 269(1): 51-63.

[18] Castaing, C., Genter, A., Chiles, J. P., Bourgine, B., and Ouillon, G. (1997). *"Scale effects in natural fracture networks"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(3-4): 45.e1-45.e18.

[19] Srivastava, R. M., Frykman, P., and Jensen, M. (2005). *"Geostatistical simulation of fracture networks"*. Geostatistics Banff 2004, 295-304.

[۲۰] غضنفری‌نیا، ج.؛ الوان‌دارستانی، ر.؛ کاظمیان‌فر، م.؛ ۱۳۸۳؛ **"شبیه‌سازی زمین‌آماری ناپیوستگی‌ها در معادن سنگ ساختمانی"**. چهارمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[21] Seguret, S. A., Moreno, C. G., and Rivera, R. F. (2014). *"Geostatistical evaluation of fracture frequency and crushing"*. In Geomechanical design and geomechanical characterization, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

[۲۲] دوست محمدی، م.؛ جعفری، الف.؛ اصغری، الف.؛ ۱۳۹۳؛ **"تخمین زمین آماری شرایط ناپیوستگی‌ها در تونل انتقال آب بهشت آباد"**. پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، انجمن مهندسی معدن ایران.

[23] Nazari Ostad, M., Asghari, O., Emery, X., Azizzadeh, M., and Khoshbakht, F. (2016). *"Fracture network modeling using petrophysical data, an approach based on geostatistical concepts"*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 31(Supplement C): 758-768.

[۲۴] کرمپورراد، ح.؛ یاراحمدی بافقی، ع.؛ ۱۳۸۷؛ **"بررسی وابستگی فضایی پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها (مطالعه موردی: بلوک تکتونیکی I معدن چغارت)"**. دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران.

[۲۵] باغیانی، م.؛ ۱۳۹۴؛ **"مدلسازی هندسی ناپیوستگی‌های معدن فسفات اسفوردی بافق"**. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد.

[26] Hoerger, S. F., and Young D. S. (1987). *"Predicting local rock mass behavior using geostatistics"*. In The 28th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), American Rock Mechanics Association.

[27] Gentier, S., Riss, J., Archambault, G., Flamand, R., and Hopkins, D. (2000). *"Influence of fracture geometry on shear behavior"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(1): 161-174.

[28] Stavropoulou, M., Exadaktylos, G., and Saratsis, G. (2007). *"A Combined Three-Dimensional Geological-Geostatistical-Numerical Model of Underground Excavations in Rock"*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 40(3): 213-243.

[29] Ozturk, C., and Simdi, E. (2014). *"Geostatistical investigation of geotechnical and constructional properties in Kadikoy–Kartal subway, Turkey"*. Tunnelling and Underground Space Technology, 41: 35-45.

[۳۰] اسدالهی، ف.؛ منصوری، ح.؛ ابراهیمی فرسنگی، م.؛ ۱۳۹۳؛ **"تخمین پارامترهای موثر بر قابلیت انفجار به روش زمین‌آمار در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل گهر"**. پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، انجمن مهندسی معدن ایران.

[31] Bieniawski, Z. T. (1989). *"Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering"*. John Wiley & Sons.

[32] Ayalew, L., Reik, G., and Busch, W. (2002). *"Characterizing weathered rock masses-a geostatistical approach"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(1): 105-114.

[33] Ozturk, C. A., and Nasuf, E. (2002). *"Geostatistical assessment of rock zones for tunneling"*. Tunnelling and Underground Space Technology, 17(3): 275-285.

[34] Oh, S., Chung, H., and Lee, D. K. (2004). *"Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation"*. Environmental Geology, 46(8): 1070-1078.

[۳۵] دبیری، ف.؛ کریمی‌نسب، س.؛ جلالی‌فر، ح.؛ ۱۳۸۸؛ **"زون‌بندی ژئومکانیکی محدوده مغار سد بختیاری با استفاده از زمین‌آمار"**. سومین کنفرانس مهندسی معدن، دانشگاه یزد.

[36] Yu, Y. (2010). *"Geostatistical interpolation and simulation of RQD measurements"*. PhD thesis, University of British Columbia.

[۳۷] دبیری، ف.؛ کریمی‌نسب، س.؛ رفیعا، ف.؛ ۱۳۹۰؛ **"طبقه‌بندی توده‌سنگ محدوده ساختگاه سد بختیاری با استفاده از روش زمین‌آمار"**. چهارمین کفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه شهید بهشتی.

[38] Egana, M., and Ortiz, J. M. (2013). *"Assessment of RMR and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project"*. Journal of GeoEngineering, 8(3): 83-90.

[۳۹] شادمان، م.؛ حسنی، ح.؛ معارف وند، پ.؛ زمانی، ح.؛ ۱۳۹۳؛ **"مدلسازی زمین‌آماری اندیس مقاومت زمین‌شناسی در دیواره‌های پیت شماره یک معدن سنگ آهن گل گهر، کرمان، جنوب شرق ایران"**. پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، انجمن مکانیک سنگ ایران.

[40] Oh, S. (2013). *"Geostatistical integration of seismic velocity and resistivity data for probabilistic evaluation of rock quality"*. Environmental Earth Sciences, 69(3): 939-945.

[41] Ferrari, F., Apuani, T., and Giani, G. P. (2014). *"Rock Mass Rating spatial estimation by geostatistical analysis"*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 70(Supplement C): 162-176.

[42] Kaewkongkaew, K., Phien-wej, N., and Kham-ai, D. (2015). *"Prediction of rock mass along tunnels by geostatistics"*. KSCE Journal of Civil Engineering, 19(1): 81-90..

[۴۳] وزیری، و.؛ خادمی حمیدی، ج.؛ صیادی، الف.؛ ۱۳۹۵؛ **"رده‌بندی سقف کارگاه در معادن زغال‌سنگ با استفاده از تحلیل‌گر زمین‌آماری و GIS"**. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره سی‌ام، شماره ۱۱، ص ۶۲-۵۱.

[44] Laubscher, D., and Jakubec, J. (2001). *"The MRMR rock mass classification for jointed rock masses. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies"*. WA Hustrulid and RL Bullock (editors), Society of Mining Metallurgy and Exploration (SMME), 475-481.

[45] Laubscher, D. (2000). *"Block caving manual"*. Prepared for the International Caving Study, JKMRC and Itasca Consulting Group, Brisbane.

[46] Trueman, R., Mikula, P., Mawdesley, C., and Harries, N., (2000). *"Experience in Australia with the application of the Mathews' method for open stope design"*. CIM Bulletin, 93(1036): 162-167.

[47] Potvin, Y. (1988). *"Empirical open stope design in Canada"*. University of British Columbia.

[48] Suorieni, F. T. (2010). *"The stability graph after three decades in use: Experiences and the way forward"*. International journal of mining, Reclamation and Environment, 24(4): 307-339.

[49] Laubscher, D. H. (1981). *"Selection of Mass Underground Mining Method"*. In Design and Operation of Caving and Sublevel Stoping mines, AIME: New York.

[50] Huwaldt, J. A., and Steinhorst, S. (2013). *"Plot digitizer"*. Software package.

[51] Chiles, J. P., and Delfiner, P. (2009). *"Geostatistics: modeling spatial uncertainty"*. John Wiley & Sons, 497.

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

[۵۳] مبینی، م.؛ صادقی، م.؛ یاراحمدی بافقی، ع.؛ ۱۳۹۰؛ **"شناسایی خودکار درزه‌های توده‌سنگ با ترکیب اطلاعات تکنیک‌های آشکارسازی کنی و ماکزیمم‌سازی تابع هدف"**. هفتمین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصویر، دانشگاه علم و صنعت.

[۵۴] شرکت مهندسی معدنکاو؛ ۱۳۸۷؛ **"گزارش اکتشاف تفصیلی سنگ‌آهن آنومالی ۱۲"**. شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران.