

## ارزیابی کیفیت توده سنگ بخش زیرزمینی معدن انگوران با استفاده از تحلیل گر زمین آماری در محیط GIS

یاسین تقوی<sup>۱</sup>، جعفر خادمی حمیدی<sup>۲</sup>، احمد رضا صیادی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- استادیار، گروه استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۳- دانشیار، گروه استخراج معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۳/۰۹

### چکیده

یکی از پارامترهای تاثیر گذار در طراحی معادن زیرزمینی، ویژگی سنجی توده سنگ است. این تحقیق به منظور پیش بینی توزیع وضعیت کیفی و پهنه بندی توده سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران به کمک تخمین گر زمین آماری انجام شده است. بدین منظور داده های کیفیت توده سنگ بر اساس شاخص  $Q$  شامل ۴۲۷ نقطه در تونل های آماده سازی جمع آوری شد. نتایج تحلیل داده های  $Q$  نشان داد که: ۱- داده ها از توزیع نرمال برخوردار نیست، ۲- خطای بارز عمومی و محلی در داده ها وجود ندارد و ۳- در داده ها روند وجود دارد. به دلیل وجود روند در داده های  $Q$ ، از روش کریجینگ عام برای درون یابی استفاده شد. با ارزیابی پنج معیار خطای تخمین، بهترین مدل واریوگرام انتخاب شد. بررسی ها نشان داد که واریوگرام مدل کروی، بهترین مدل برازش شده به ساختار فضایی داده ها است. اعتبارسنجی متقابل، دقت بالای پیش بینی را نشان داد. سپس نقشه رده بندی وضعیت کیفیت توده سنگ محدوده مورد مطالعه در محیط آرک جی آی اس تهیه شد. نتایج حاصل نشان داد که تقریباً ۵۳٪ از مساحت کل محدوده مورد مطالعه، در رده توده سنگ ضعیف تا فوق العاده ضعیف، ۸٪ در رده توده سنگ متوسط و ۳۹٪ در رده توده سنگ خوب تا فوق العاده خوب قرار دارد.

**کلیدواژه ها:** رده بندی کیفیت توده سنگ، تخمین گر زمین آماری، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، معدن سرب و روی انگوران.

## ۱- مقدمه

مطالعات ساختگاهی و حفر گمانه‌های اکتشافی در پروژه‌های تونل‌سازی و معدنکاری زیرزمینی عمدتاً به صورت مشابه انجام می‌شود اما در عمل و به هنگام تفسیر و تعمیم نتایج برای طراحی فضاها، بسیار متفاوتند. پروژه‌های معدنی در مقایسه با تونلسازی نیاز به حفر گمانه‌های اکتشافی بیشتری برای ویژگی‌سنجی کانسار و شناخت محدوده ذخیره با توجه به هندسه آن دارد. همچنین در حفر گمانه اکتشافی در معادن زیرزمینی، آگاهی از اطلاعات ژئومکانیکی توده‌سنگ از جمله مقاومت سنگ، درزه‌داری، شرایط ناپیوستگی‌ها و حضور ساختارهای زمین‌شناسی، در کنار داده‌های عیارسنجی ضروری است. در حین استخراج، علاوه بر عیار و بازیابی ماده معدنی، پایداری کارگاه استخراج و نحوه کنترل زمین در موفقیت آمیز بودن عملیات نقش دارد. چرا که اگر امکان استخراج کانسنگ با عیار بالاتر از عیار حد در شرایط پایدار زمین فراهم نباشد، کارگاه استخراج تا زمان ارائه طرحی برای پایدارسازی جبهه کار در آن قسمت آماده‌سازی نمی‌شود.

ناپایداری کارگاه استخراج در معادن زیرزمینی با بروز آسیب به پرسنل و تجهیزات، ممکن است صدمات پرهزینه و جبران ناپذیری به دنبال داشته باشد. به‌علاوه با بروز تأخیر به علت تمیزکاری و برگشت به شرایط عادی، ممکن است برنامه تولید را از زمان‌بندی پیش‌بینی شده معدن دور کند. از این‌رو، شناخت وضعیت کیفیت توده‌سنگ یک پیش‌نیاز بسیار مهم برای تحلیل پایداری و طراحی فضاها در معدن کاری زیرزمینی به‌شمار می‌رود. استفاده از رده‌بندی‌های توده‌سنگ به عنوان روش تجربی (در کنار روش‌های تحلیلی و مشاهده‌ای) در طراحی روش حفاری، کنترل چینه‌ها و نگهداری فضاها زیرزمینی به دلیل سهولت کاربرد بسیار رایج و گسترده شده است. از حدود صد سال گذشته سیستم‌های رده‌بندی مختلفی با اهداف متفاوت

در زمینه مهندسی سنگ ارائه شده است. در این میان، سیستم‌های رده‌بندی <sup>۱</sup>RMR و Q از رایج‌ترین طبقه‌بندی‌های مورد استفاده در ویژگی‌سنجی توده‌سنگ و طراحی فضاها زیرزمینی می‌باشد. کیفیت توده سنگ یک منطقه را می‌توان به روش‌های مختلفی پیش‌بینی کرد. یکی از روش‌های قابل کاربرد، روش‌های زمین آماری با همه مزایای آن است که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در معادن زیرزمینی با استفاده از زمین آمار می‌توان ارتباط فضایی شاخص‌های کیفیت توده سنگ را تعیین کرد و با استفاده از درون‌یابی، مقادیر آن را در فواصل بین نقاط برداشت و تمام محدوده ذخیره تخمین زد. از نقشه توزیع حاصل می‌توان برای طراحی‌های مختلف از جمله روش مناسب کنترل زمین (و به‌عنوان مثال انتخاب و طراحی مقاومت پرکننده در صورت نیاز به پرکردن کارگاه) استفاده کرد.

هدف از انجام تحقیق حاضر، بررسی همبستگی فضایی شرایط توده سنگ و امکان ارائه روشی برای پهنه‌بندی کیفیت توده‌سنگ ساختگاه یک معدن زیرزمینی با تلفیق تحلیل‌گر زمین آماری و سیستم اطلاعات جغرافیایی <sup>۲</sup>(GIS) است. برای این کار از داده‌های ژئومکانیکی مربوط به سیستم رده‌بندی Q در افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن سرب و روی انگوران به عنوان مطالعه موردی استفاده می‌شود. در این معدن، بر اساس طرح استخراجی، قرار است از پرکننده برای کنترل زمین استفاده شود. در ابتدا و بر اساس اطلاعات به‌دست آمده در حین حفر تونل‌های آماده‌سازی، مقدار Q در ۴۲۷ نقطه (هر نقطه به ازای یک متر پیشروی تونل آماده‌سازی حین حفاری) محاسبه و یک بانک اطلاعاتی توسعه داده می‌شود. سپس با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ و

<sup>۱</sup> Rock Mass Rating (RMR)<sup>۲</sup> Geographic information system

امتیازدهی توده سنگ (RMR) از سوی بنیایوسکی<sup>۸</sup> [۵] و اندیس کیفیت توده سنگ Q از سوی بارتن و همکاران<sup>۹</sup> [۶] منجر شده است. در ادامه سیستم‌های دیگری همچون اندیس توده سنگ<sup>۱۰</sup> (RMi) توسط پالمستروم [۷] و اندیس مقاومت زمین‌شناسی<sup>۱۱</sup> (GSI) توسط هوک و براون<sup>۱۲</sup> [۸] ارائه شد. در همان سال‌ها و همچنین در سال‌های اخیر، سیستم‌های رده‌بندی دیگری با اهداف مختلف توسعه داده شد. همچنین، بسیاری از محققان، تعدادی از سیستم‌های رده‌بندی موجود را برای اهداف خاص در زمینه‌های مختلف مهندسی سنگ با کم و زیاد کردن تعداد پارامترهای ورودی و یا تغییر امتیاز پارامترها اصلاح کردند. امروزه تعداد بسیار زیادی از سیستم‌های رده‌بندی در زمینه‌های مختلف مهندسی سنگ وجود دارد، اما تنها تعداد کمی از این سیستم‌ها مثل RMR، Q و GSI با کاربری عمومی از مقبولیت کافی در بین زمین‌شناسان و مهندسان معدن و عمران برخوردار است.

سیستم‌های رده‌بندی با هدف کمی کردن و ارائه یک زبان مشترک (به عنوان مثال بین زمین‌شناس و طراح) برای درک مناسب از کیفیت و رفتار مورد انتظار از توده سنگ ارائه شده است. اما توده سنگ، طبیعت تغییرپذیری دارد و ماهیت آن بسته به محل اندازه‌گیری و فاصله از آن تغییر می‌کند. در سازه‌های زیرزمینی و به ویژه معادن زیرزمینی که دقت طراحی به دقت اندازه‌گیری و تخمین متغیرها در نقاط فاقد نمونه‌برداری و اندازه‌گیری وابسته است، آگاهی از عدم قطعیت‌های بزرگ و تغییرپذیری‌های ذاتی در توده سنگ بسیار مهم و بحرانی است.

انجام تحلیل‌های لازم، مقدار Q در منطقه تخمین زده می‌شود. به خاطر توانایی بالای GIS در جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی نظیر آنالیزهای تخمین زمین‌آماری، مدیریت پایگاه داده‌ها، تلفیق متغیرهای مختلف با یکدیگر، اعتبارسنجی نتایج و ارائه مدل نهایی و خروجی به فرم یک نقشه، از تخمین‌گر زمین‌آماری در محیط GIS به‌منظور پهنه‌بندی وضعیت کیفیت توده سنگ در کل محدوده مورد مطالعه استفاده می‌شود.

## ۲- پیشینه تحقیق

سیستم‌های رده‌بندی توده سنگ به خاطر سادگی و سهولت استفاده، در طراحی مقدماتی پروژه‌های مهندسی معدن و عمران استفاده می‌شود. هدف اصلی از به‌کارگیری این روش‌های تجربی، ویژگی‌سنجی توده سنگ، تقسیم توده سنگ به کلاس‌های مختلف، تحلیل پایداری و انتخاب سیستم نگهداری مناسب است. ایده بار سنگ<sup>۱</sup> مطرح شده از سوی ترزاغی<sup>۲</sup> در سال ۱۹۴۶ [۱] اولین تلاش عملیاتی برای تقسیم توده سنگ به کلاس‌های مختلف برای انتخاب سیستم نگهداری مناسب در تونلسازی بوده است که بعدها با ارائه مفهوم زمان خودایستایی از سوی لوفر<sup>۳</sup> در سال ۱۹۵۸ [۲] و اندیس کیفی سنگ<sup>۴</sup> (RQD) از سوی دیبر<sup>۵</sup> در سال ۱۹۶۳ [۳] دنبال شد. تلاش برای توسعه سیستم‌های رده‌بندی توده سنگ با چند پارامتر ورودی در دهه ۱۹۷۰، به ارائه سیستم امتیازدهی ساختار سنگ<sup>۶</sup> (RSR) از سوی ویکهام و همکاران<sup>۷</sup> [۴]، سیستم

<sup>۱</sup> Rock load

<sup>۲</sup> Terzaghi

<sup>۳</sup> Lauffer

<sup>۴</sup> Rock Quality Designation (RQD)

<sup>۵</sup> Deere

<sup>۶</sup> Rock Structure Rating (RSR)

<sup>۷</sup> Wickham et al.

<sup>۸</sup> Bieniawski

<sup>۹</sup> Barton et al.

<sup>۱۰</sup> Rock Mass index (RMi)

<sup>۱۱</sup> Geological Strength Index (GSI)

<sup>۱۲</sup> Hoek and Brown

داده ثانویه برای تخمین RMR در نقاط فاقد نمونه برداری استفاده شد و در نهایت با اعتبارسنجی متقابل بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده، نتایج بدست آمده اعتبارسنجی شد. رفیعی و وینچز<sup>۳</sup> [۱۳] از ویژگی زمین آمار برای تولید یک مدل سه بعدی به منظور تعیین ساختار شکست توده سنگ استفاده کردند. آنها در این مطالعه نشان دادند که ترکیب زمین آمار با روش‌های سنتی قادر به پیش‌بینی خوبی از توزیع فضایی شکستگی‌ها در زمین است. الفیمو و آیدسویک<sup>۴</sup> [۱۴] ضمن بیان اهمیت شناخت درزه در پروژه‌های معدنی و تونل‌سازی، به کمک روش‌های زمین آمار، فراوانی درزه‌های نامعلوم محلی را پیش‌بینی کردند. اصفهانی و اصغری [۱۵] با استفاده از شبیه‌سازی زمین آمار مقادیر RQD در معدن گزستان، به پیش‌بینی وجود مناطق گسلی در این معدن پرداختند. فراری و همکاران<sup>۵</sup> [۱۶] به کمک روش‌های زمین آمار، وضعیت کیفیت توده سنگ (RMR) محدوده ۲۰۰ کیلومتر مربعی در مرکز آلپس ایتالیا را پیش‌بینی کردند. آنها در این مطالعه دریافتند که وضعیت کیفیت توده‌سنگ به شدت به تاریخچه زمین شناسی منطقه و ساختار زمین شناسی وابسته است. دوست‌محمدی و همکاران [۱۷] با استفاده از مدل‌سازی زمین آمار به تخمین شرایط ناپیوستگی‌ها (به عنوان یکی از پارامترهای ورودی سیستم رده‌بندی RMR) در راستای محور پیشنهادی تونل انتقال آب بهشت‌آباد پرداختند و دریافتند که این پارامتر از همبستگی فضایی خوبی برخوردار است. کائوکانگ کائو و همکاران<sup>۶</sup> [۱۸] به کمک روش زمین آمار وضعیت کیفیت توده سنگ (RMR) را در امتداد مسیر دو پروژه تونل بر اساس

در این شرایط استفاده از روش‌های زمین آمار، به‌منظور به حداقل رساندن خطا و کاهش هزینه‌های مربوط به مطالعات ساختگاهی بسیار مفید خواهد بود. زمین آمار را می‌توان شاخه‌ای از علم آمار کاربردی دانست که در آن ساختار مکانی داده‌های نقطه‌ای موجود در محدوده مورد مطالعه، مورد بررسی قرار گرفته تا بتوان مقدار یک کمیت را در نقطه‌ای با مختصات مشخص، با استفاده از مقادیر معلوم همان کمیت در نقاط دیگر، بدست آورد [۹]. اگرچه عمده زمینه‌های رشد و توسعه نظریه متغیرهای ناحیه‌ای، مسئله تخمین ذخایر معدنی بوده است ولی در زمینه‌های ژئوشیمی، زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، مکانیک سنگ و تخمین مخازن هیدروکربنی نیز کاربردهای جالبی داشته است [۱۰].

در سال‌های اخیر، از زمین آمار به‌منظور بررسی همبستگی فضایی خواص مکانیکی سنگ و ویژگی‌سنجی توده‌سنگ نیز استفاده شده است. ازتورک و ناسوف<sup>۱</sup> [۱۱]، به کمک روش‌های زمین آمار، زون‌های مختلف مسیر احداث تونل فاضلاب شهر استانبول ترکیه را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه بر روی سه مشخصه مکانیکی سنگ شامل مقاومت فشاری ماده سنگ، اندیس کیفی سنگ (RQD) و مقدار سختی چکش اشمیت و یک مشخصه برش‌پذیری سنگ شامل نرخ برش آنی (برای حفاری با ماشین حفار بازویی) انجام شد و نقشه پیش‌بینی نرخ برش آنی ماشین تهیه شد. اوه و همکاران<sup>۲</sup> [۱۲] با ادغام داده‌های مربوط به مغناطیس زمین و داده‌های برداشت شده از گمانه‌ها، به کمک زمین آمار RMR محدوده مورد مطالعه را تعیین کردند. در این مطالعه از داده‌های مغناطیسی زمین به‌عنوان

<sup>۳</sup> Rafiee and Vinches<sup>۴</sup> Ellefmo and Eidsvik<sup>۵</sup> Ferrari et al.<sup>۶</sup> Kaewkongkaew<sup>۱</sup> Ozturk and Nasuf<sup>۲</sup> Oh et al.

کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف مهندسی معدن داشته است (به عنوان مثال در [۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸ و ۲۹]).

از این رو در تحقیق حاضر، تخمین کیفیت توده سنگ بخش زیرزمینی معدن انگوران با استفاده از تحلیل گر زمین‌آماري در محیط GIS انجام می‌شود که خود یکی دیگر از نوآوری های تحقیق به شمار می‌رود.

### ۳- سیستم رده بندی Q

سیستم رده بندی توده سنگ Q در سال ۱۹۷۴ توسط بارتن و همکاران [۶] از انستیتوی ژئوتکنیکی نروژ ابداع شد. این روش سهم بزرگی در گسترش کاربرد طبقه بندی توده سنگ ایفا کرده است. Q یک سیستم کیفی مبتنی بر ارزیابی عددی از کیفیت توده سنگ با استفاده از امتیاز شش پارامتر اندیس کیفی سنگ (RQD)، تعداد دسته درزه ( $J_n$ )، عدد زبری درزه ( $J_r$ )، عدد کاهش آب درزه ( $J_w$ )، عدد هوازدگی درزه ( $J_a$ ) و ضریب کاهش تنش (SRF) است. این شش پارامتر که به صورت سه کسر گروه بندی می‌شود، کیفیت توده سنگ Q را طبق رابطه (۱) نشان می‌دهد.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad \text{رابطه (۱)}$$

طبقه بندی توده سنگ براساس معیار Q از حساسیت بسیار بالایی بر خوردار است به طوری که مقدار آن بین ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰ تغییر می‌کند. به طول معمول از سیستم Q در حفاری تونل و فضاهای زیرزمینی برای بررسی شرایط پایداری استفاده می‌شود. توده سنگ براساس مقدار Q مطابق جدول (۱) در نه کلاس رده بندی می‌شود [۳۰]. آخرین تغییرات و به روزرسانی در نحوه امتیازدهی و تعیین Q در سال ۲۰۰۲ توسط بارتن انجام شده است [۳۱].

داده‌های گمانه‌های اکتشافی در تایلند پیش‌بینی کردند. ایشان دریافتند که برای استفاده از تحلیل زمین آماری در شرایط پیچیده زمین‌شناسی، تنها داده‌های اکتشافی از گمانه‌های قایم و نزدیک به قایم کافی نیست و انجام مطالعات ساختگاهی تکمیلی از جمله روش‌های ژئوفیزیکی در امتداد مسیر تونل ضروری به نظر می‌رسد.

بررسی جامع مطالعات سال‌های اخیر نشان می‌دهد که روش‌های زمین‌آماري، ابزاری قابل قبول برای تخمین توزیع خواص مکانیکی سنگ در مسایل مهندسی سنگ است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطالعات نسبتاً گسترده‌ای بر روی سیستم رده بندی خطی RMR و پارامترهای ورودی آن انجام شده و تاکنون مطالعه مشابهی بر روی سیستم غیرخطی Q انجام نشده است. از این رو در تحقیق حاضر، با استفاده از این تکنیک و برای اولین بار به بررسی همبستگی فضایی شاخص Q و تخمین توزیع آن در بخش زیرزمینی معدن سرب و روی انگوران پرداخته می‌شود. تحلیل‌های زمین آماری در بسته نرم‌افزاری سامانه اطلاعات جغرافیایی آرک جی آی اس<sup>۱</sup> انجام می‌شود.

سیستم اطلاعات جغرافیایی ابزاری است که امکان پردازش داده‌های فضایی و تبدیل آن‌ها به اطلاعات را فراهم می‌کند. از آنجایی که خروجی سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی به صورت تصویری و بر روی نقشه نمایان می‌شود؛ تصورها، برداشتها و استنتاج‌های ذهنی را به شدت تقویت نموده و موجب بهینه‌سازی تصمیم‌ها می‌شود. توانایی GIS در تلفیق متغیرهای مختلف با یکدیگر و ارائه مدل نهایی در قالب یک نقشه سبب گسترش کاربرد آن در سال‌های اخیر در زمینه‌های مختلف از جمله معدن‌کاری شده است. تاکنون تخمین‌های زمین‌آماري و تلفیق آن با GIS،

<sup>۱</sup> ArcGIS

جدول ۱: طبقه بندی توده سنگ براساس مقدار Q [۲۲]

مقدار Q	گروه	نوع کلاس
10-40	۱	خوب
40-100		خیلی خوب
100-400		فوق العاده خوب
400-1000		به طور استثنایی خوب
0.1-1	۲	خیلی ضعیف
1-4		ضعیف
4-10		متوسط
0.001-0.01	۳	به طور استثنایی ضعیف
0.01-0.1		فوق العاده ضعیف

## ۴- روش تحقیق

به منظور پیش بینی وضعیت کیفیت توده سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران، ابتدا اطلاعات آماری در ۴۲۷ نقطه از تونل آماده سازی محدوده مورد مطالعه، جمع آوری و بانک اطلاعاتی تهیه شد. از آنجایی که به دلیل وجود محدودیت های عملی، امکان نمونه برداری جامع در تمامی نقاط محدوده برای تعیین وضعیت کیفیت توده سنگ وجود ندارد، می توان از روش های درون یابی به عنوان ابزاری برای آنالیز و نمایش مقادیر مربوط به وضعیت کیفیت توده سنگ در مکان های فاقد نمونه برداری استفاده کرد. دانش زمین آمار با استفاده از تخمین گرهای آماری مختلف نظیر کریجینگ، شرایطی را فراهم می سازد تا با استفاده از اطلاعات حاصل از نقاط نمونه برداری شده، وضعیت کیفیت توده سنگ را در نقاط فاقد نمونه تخمین زد. کریجینگ به عنوان بهترین تخمین گر خطی نااریب شناخته می شود. رابطه کلی کریجینگ به صورت رابطه (۲) است:

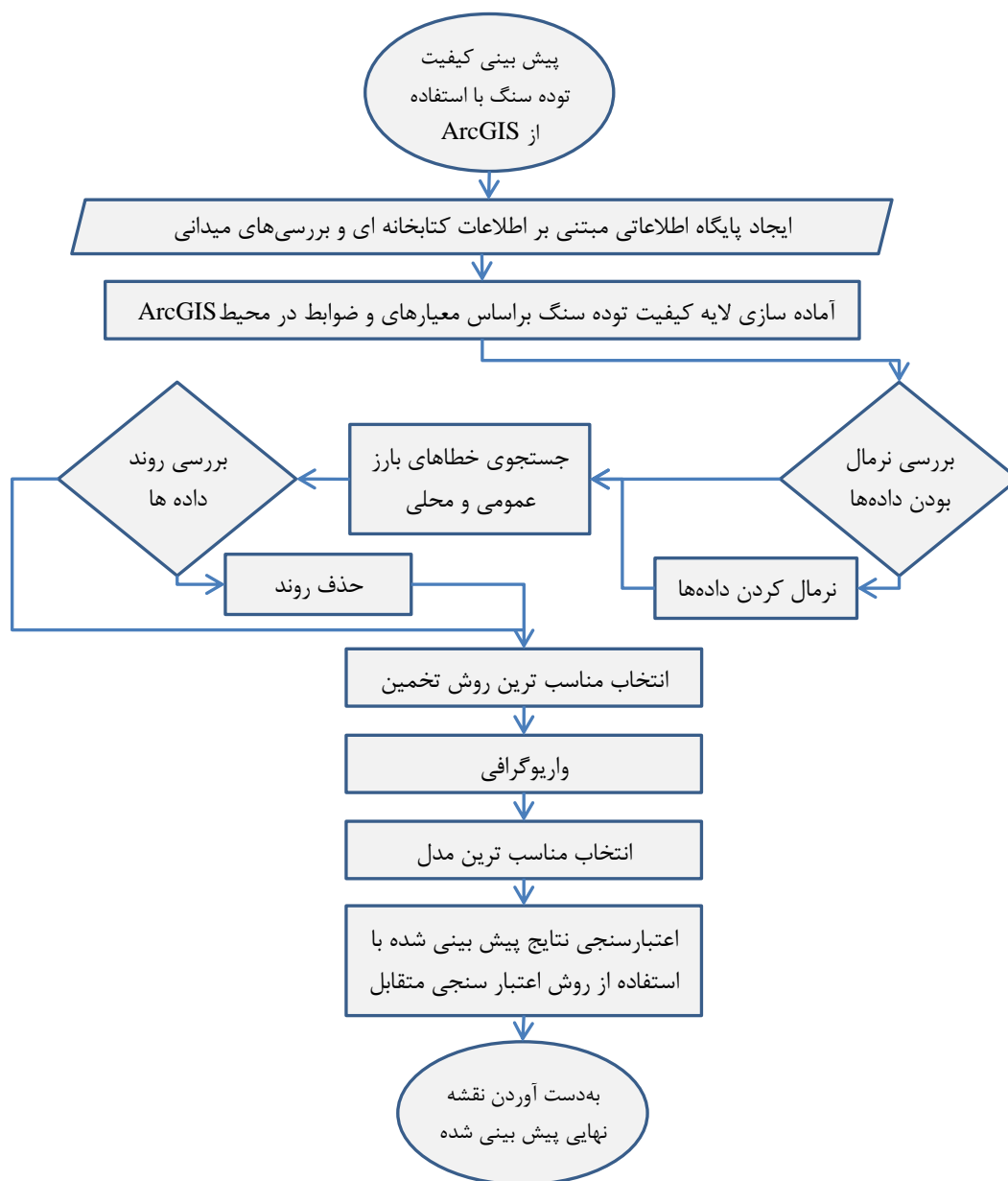
$$\hat{z}^*(x_i) = \sum_{i=1}^n l_i z(x_i) \quad \text{رابطه (۲)}$$

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

در تحقیق حاضر، ابتدا با استفاده از نمودار هیستوگرام و

نمودار چندک-چندک ( $Q-Q$ ) نرمال بودن داده های  $Q$  بررسی شد. بعد از بررسی نرمال بودن داده ها با استفاده از نمودار هیستوگرام و ابر سمی واریوگرام، خطاهای بارز عمومی و محلی بر روی داده های  $Q$  مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از نرم افزار آرک جی آی اس وجود و یا عدم وجود روند در داده های  $Q$  بررسی شد. در نهایت، از روش کریجینگ برای تخمین وضعیت توده سنگ در معدن مورد مطالعه استفاده شد. واریوگرام با در نظر گرفتن ناهمسانگردی در گام های مختلف، ترسیم شد. واریوگرافی با هر سه مدل کروی، نمایی و گوسین انجام گرفت و با استفاده از پنج معیار خطای تخمین شامل خطای پیش بینی متوسط<sup>۱</sup> (MPE)، کوچک ترین خطای پیش بینی ریشه میانگین مربعات<sup>۲</sup> (RMSPE)، خطای استاندارد میانگین پیش بینی<sup>۳</sup> (ASE)، خطای پیش بینی ریشه میانگین مربعات<sup>۴</sup> (MSPE) و مربعات<sup>۵</sup> (RMSSPE)، بهترین مدل از میان این سه مدل انتخاب شد. به منظور اعتبارسنجی و اطمینان از صحت پیش بینی، از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. در نهایت نقشه پیش بینی برای رده بندی کیفیت توده سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران بدست آمد. فلوچارت مراحل انجام این تحقیق برای پیش بینی وضعیت کیفیت توده سنگ در شکل (۱) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Mean prediction error<sup>۲</sup> Root mean squared prediction error<sup>۳</sup> Average standard error<sup>۴</sup> Mean squared prediction error<sup>۵</sup> Root mean square standardized prediction error



شکل ۱: فلوچارت روش تحقیق برای پیش بینی وضعیت کیفیت توده سنگ

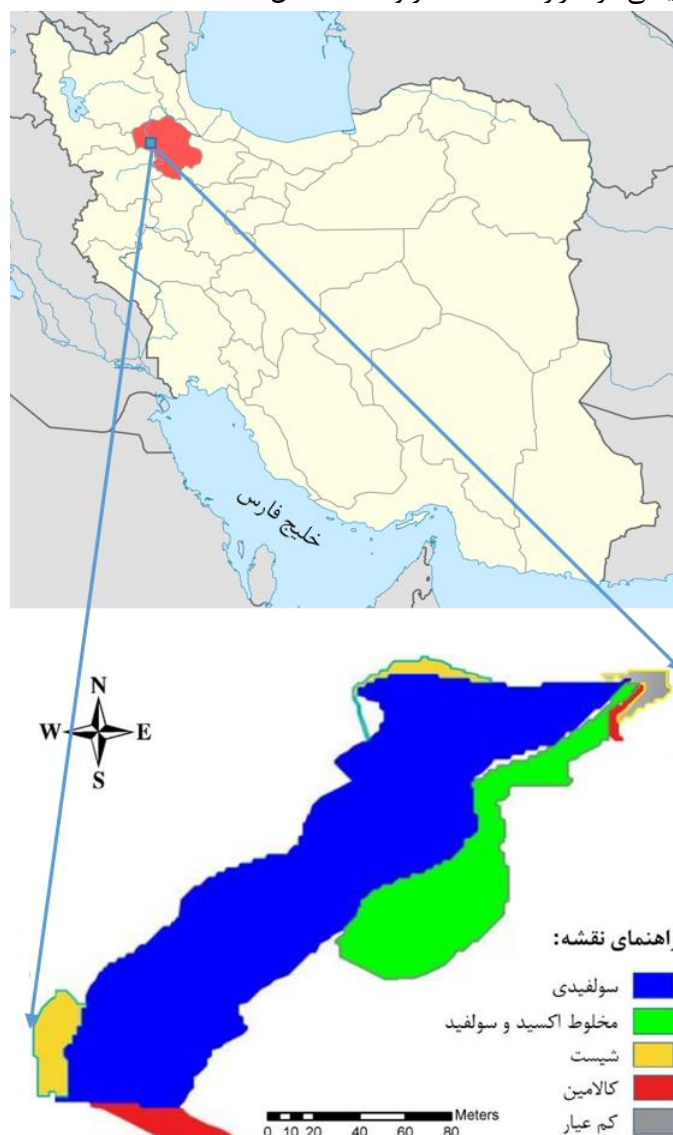
##### ۵- معدن سرب و روی انگوران

معدن سرب و روی انگوران در استان زنجان و در حدود ۱۲۳ کیلومتری جنوب غرب شهر زنجان و در ۳۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان دندی قرار دارد. کانسار انگوران در بخش مرکزی یک تاقدیس و بین دو دگرگونی شیستی و آهکی واقع شده است. در کمر بالای کانسار طبقات آهکی وجود دارد که شیب کلی آنها در حدود ۲۰ تا ۲۵ درجه به

سمت جنوب شرق است و در کمربلین شیست های دگرگونی قرار دارد که شیب کلی آنها ۱۰ تا ۲۵ درجه در جهت جنوب شرق است. شکل هندسی کانسار تقریباً مشابه یک عدسی یا گلابی وارونه و دارای شیبی در حدود ۲۰ تا ۳۰ درجه به طرف جنوب شرق است. این کانسار از سه بخش اکسیدی، سولفور و مخلوط تشکیل یافته است. بخش اکسیدی

حد بالای آن ۲۷۵۰+ متر تعیین شده است. طبق برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته، معدن در ۵ طبقه با روش استخراج از طبقات فرعی همراه با پرکننده استخراج خواهد شد [۳۲ و ۳۳]. در شکل (۲) موقعیت جغرافیایی معدن سرب و روی انگوران و وضعیت زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.

در بالاترین قسمت کانسار، بخش سولفور در پایین‌ترین قسمت و بخش مخلوط (اکسیدی و سولفور) بین آن دو قرار گرفته است. تناژ کل معدن انگوران ۱۲ میلیون تن می‌باشد که میزان ذخایر در قسمت روباز هشت میلیون تن و در بخش زیرزمینی چهار میلیون تن روی با عیار بالا است. حد پایین معدن زیرزمینی در تراز ۲۷۰۰+ متر و



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی و افق استخراجی ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران



نتایج به دست آمده از شکل (۳) و جدول (۲) نشان داد که هیستوگرام داده های  $Q$  متقارن نبوده و داده ها توزیع نرمال ندارد. بنابراین، قبل از تخمین، توزیع داده ها با استفاده از روش لگاریتمی نرمال شد.

جدول ۲: آماره های توصیفی مربوط به داده های  $Q$

آماره توصیفی	مقدار
حداقل	۰/۳۵
حداکثر	۲۱۳/۳۳
میانگین	۶۰/۵۱
میانه	۱۳/۲
انحراف از معیار	۷۴/۳۹
چولگی	۰/۷۴
کشیدگی	۲/۰۳

## ۶-۲- بررسی خطاهای بارز محلی و عمومی

خطای بارز عمومی، نقطه نمونه اندازه گیری شده ای است که نسبت به مقادیر موجود در یک مجموعه داده، مقدار خیلی بالا و یا پائینی 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 دارای خطای بارز عمومی باشد [۳۴]. خطای بارز محلی، نقطه نمونه اندازه گیری شده ای است که مقدار آن در محدوده نرمال مجموعه داده است، اما اگر به نقاط پیرامون آن توجه شود این مقدار به صورت غیرعادی بالا یا پایین است [۳۵].

خطای بارز عمومی و محلی با استفاده از هیستوگرام و ابر سیمی واریوگرام در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. روش ارزیابی خطای بارز با هیستوگرام به این گونه است که اگر مقادیر حداکثر، موقعیت جداگانه (یعنی احاطه شده با مقادیر بسیار متفاوت) داشته باشد، ممکن است داده های  $Q$  به بررسی بیشتری نیاز پیدا کند و اگر لازم باشد حذف شود. بنابراین با توجه به نمودار هیستوگرام شکل (۳) در این مطالعه،

## ۶-۳- پیش بینی وضعیت کیفیت توده سنگ افق استخراجی ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران

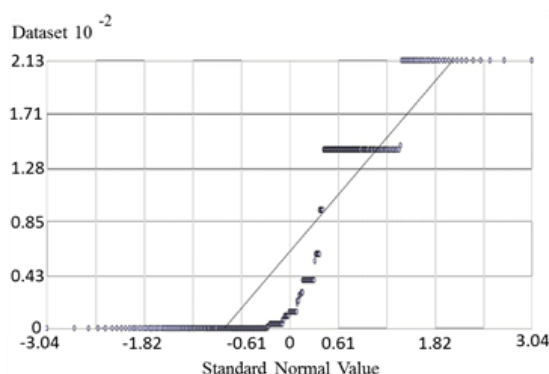
در این پژوهش برای پیش بینی وضعیت کیفیت توده سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران از سیستم  $Q$  استفاده شد. در هر فاصله یک متری در تونل آماده سازی، شش پارامتر سیستم  $Q$  شامل اندیس کیفی سنگ ( $RQD$ )، تعداد دسته درزه ( $J_n$ )، عدد زبری درزه ( $J_r$ )، عدد کاهش آب درزه ( $J_w$ )، عدد هوازدگی درزه ( $J_a$ )، ضریب کاهش تنش ( $SRF$ ) جمع آوری و یک پایگاه داده تشکیل شد. برای نقاط برداشتی مقدار  $Q$  محاسبه شد. سپس برای تعیین وضعیت کیفیت توده سنگ در نقاط فاقد اطلاعات از روش درون یابی و تخمین گر زمین آماری استفاده شد. در نهایت، با توجه به اطلاعات به دست آمده از تحلیل های زمین آماری و براساس مقدار  $Q$  نقشه پیش بینی وضعیت کیفیت توده سنگ محدوده مورد مطالعه به دست آمد. در ادامه مراحل تخمین زمین آماری در محیط آرک جی آی اس آمده است.

## ۶-۱- بررسی نرمال بودن داده ها

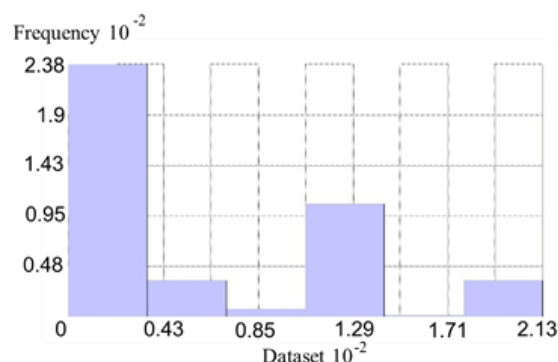
اگر داده ها به صورت نرمال توزیع شده باشد، روش های درون یابی که برای ایجاد یک سطح مورد استفاده قرار می گیرد، بهترین نتیجه را به دنبال خواهد داشت. بنابراین درک توزیع داده ها قبل از ایجاد یک سطح ضروری است [۳۴]. به طور کلی، از ویژگی های مهم توزیع، مقدار مرکزی، گسترش و تقارن آن است. برای آنکه داده ها توزیع نرمال داشته باشد، به طور معمول باید میانگین و میانه شبیه هم باشد، چولگی نزدیک به صفر و کشیدگی در یک نمودار آماری نزدیک به ۳ باشد. اگر داده ها خیلی اریب باشد، باید از روش هایی مثل تکنیک های لگاریتمی برای نرمال کردن داده ها استفاده شود. بررسی نرمال بودن داده های  $Q$  با نمودار هیستوگرام و نمودار  $QQ$  انجام شد.

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  $Q$  نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳)، مشاهده می‌شود که در داده‌های  $Q$  خطای بارز عمومی و محلی وجود ندارد.

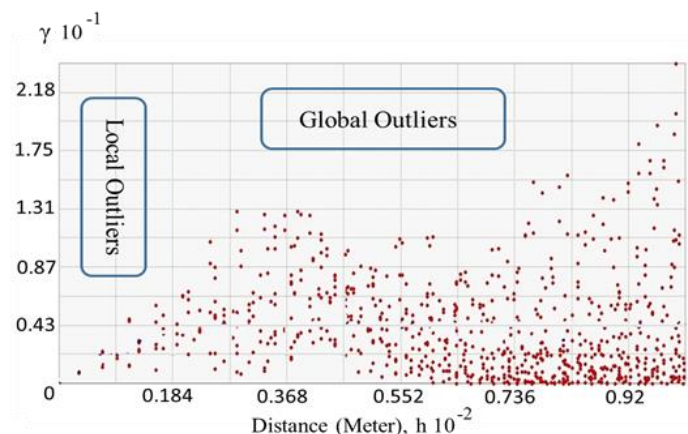


ب



الف

شکل ۳: بررسی توزیع داده‌های Q: (الف) : با استفاده از نمودار هیستوگرام (ب) : با استفاده از QQ Plot Normal.



شکل ۴: ابر سمی‌واریوگرام برای بررسی خطای داده‌های Q

در داده‌ها (در صورت وجود) بایستی حذف شود تا اینکه داده‌ها شرایط ثابت یا ایستا پیدا کند [۳۶]. داده‌ها به منظور بررسی وجود یا عدم وجود روند، ارزیابی شد. برای تحلیل روند در داده‌های  $Q$  از آنالیز روند در نرم‌افزار آرک جی آی اس استفاده شد.

### ۳-۶- بررسی روند در داده‌های Q

گاهی اوقات ممکن است به دلیل شرایط توپوگرافی، در داده‌ها روند وجود داشته باشد. به هنگام استفاده از کریجینگ به عنوان یک روش درونیابی، روند

بهینه نمونه برداری در محدوده‌ای که داده‌ها خودهمبستگی مکانی دارند با در نظر گرفتن تأثیر ناهمسانگردی، می‌توان از ابر سمی واریوگرام استفاده کرد [۳۶]. هدف از مدل‌سازی سمی واریوگرام انتخاب بهترین برازش برای یک مدل با استفاده از زوج نقاط بر روی سمی واریوگرام می‌باشد [۳۴]. تابع واریوگرام مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود [۳۷]:

رابطه (۳)

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

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  $i$  می‌باشد.

ناهمسانگردی فرآیندی است که سمی واریوگرام بالاترین خودهمبستگی را در یک جهت نسبت به سایر جهت‌ها نشان می‌دهد. به منظور محاسبه دقیق تأثیرات جهتی روی مدل سمی واریوگرام برای محاسبات سطح، مدل سمی واریوگرام در جهت‌های مختلف ترسیم شد (جدول (۳)). با بررسی جهات مختلف مشاهده شد که داده‌های  $Q$  تقریباً در زاویه ۱۲ درجه نسبت به شمال ( $N$ ) بیشترین خودهمبستگی و در زاویه ۱۰۲ درجه کمترین خودهمبستگی را دارد. در کل با توجه به شکل (۶)، می‌توان مشاهده کرد که یک خودهمبستگی جهت‌دار (ناهمسانگردی) در داده‌های  $Q$  وجود دارد و روی شکل سمی واریوگرام تأثیر می‌گذارد. منحنی سمی واریوگرام به آرامی در جهت شمال شرق - جنوب غرب افزایش می‌یابد و بر روی نمودار سمی واریوگرام، پایین‌ترین منحنی آبی می‌باشد و در جهت جنوب شرق - شمال غرب منحنی سمی واریوگرام با سرعت افزایش می‌یابد (بالاترین منحنی برازش شده بر روی 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 می‌باشد.

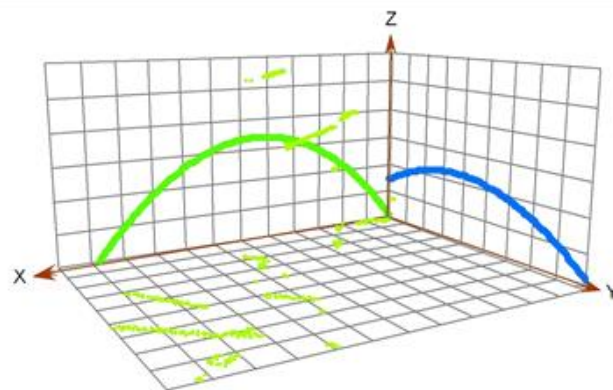
بررسی وجود روند با استفاده از نرم‌افزار آرک جی آی اس مطابق شکل (۵)، انجام شده است. نقاط روی یک صفحه تصویر شده است. بهترین خطی که برای برازش به نقاط تصویر شده ترسیم می‌شود (یک چندجمله‌ای) خطی است که روندهای موجود در جهت‌های خاص را مدل‌سازی می‌کند. اگر این خط نسبتاً هموار باشد به این معنا است که روندی در داده‌ها وجود ندارد. نتایج بیانگر آن است که در داده‌های  $Q$  روند وجود دارد. در این مطالعه برای حذف روند از یک چندجمله‌ای درجه دو استفاده شد.

#### ۴-۶- انتخاب مناسب‌ترین نوع کریجینگ برای تخمین

در این مطالعه، به دلیل وجود روند در داده‌های  $Q$  از روش کریجینگ عام برای درونیابی استفاده شد. در این نوع کریجینگ ابتدا روند مدل‌سازی و حذف می‌شود. پس از حذف روند، تحلیل آماری بر روی باقی‌مانده‌ها یا اجزای با تغییرات کم سطح انجام می‌شود. قبل از این که سطح ایجاد شود روند به صورت خودکار اضافه می‌شود تا پیش‌بینی‌ها نتایجی معنی‌دار تولید کند. با حذف روند، تحلیل‌هایی که در ادامه انجام می‌پذیرد تحت تأثیر روند نخواهد بود و پس از اضافه شدن دوباره سطحی صحیح‌تر ایجاد می‌شود.

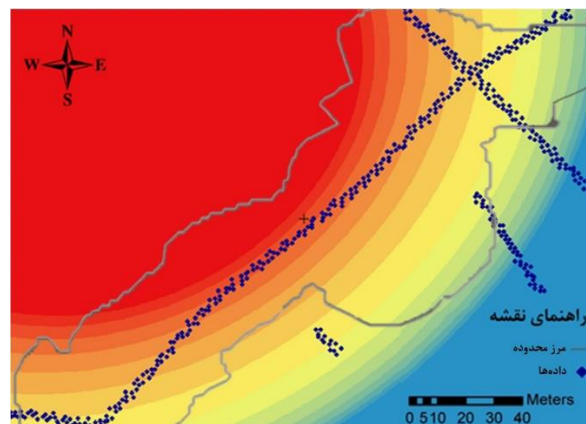
#### ۵-۶- واریوگرافی داده‌ها

برای حداقل کردن خطای تخمین (مقادیر پیش‌بینی شده)، واریوگرافی انجام گرفت. سمی واریوگرام این امکان را فراهم می‌کند تا خودهمبستگی مکانی بین نقاط اندازه‌گیری شده، بررسی شود. در خودهمبستگی مکانی، فرض بر این استوار است که مشخصه نقاطی که به یکدیگر نزدیک‌تر هستند، به یکدیگر شبیه‌ترند [۳۴]. ابر سمی واریوگرام برای بررسی ویژگی‌های محلی خودهمبستگی مکانی در یک مجموعه داده استفاده می‌شود. به عنوان مثال، برای تعیین فاصله



— روند در جهت شرق - غرب  
— روند در جهت شمال - جنوب

(الف)

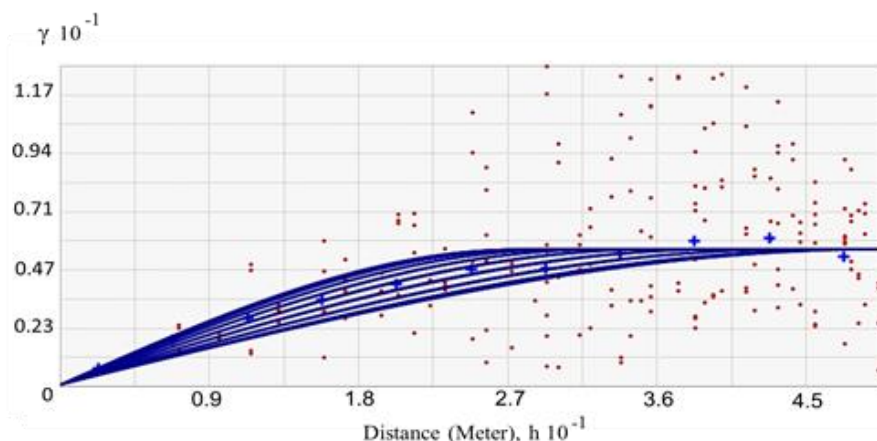


(ب)

شکل ۵: بررسی روند در داده‌های Q (الف): شناسایی نوع روند و (ب): نقشه روند به همراه توزیع فضایی نقاط نمونه برداری در محدوده مورد مطالعه

جدول ۳: مقایسه معیارهای خطای تخمین در سه مدل واریوگرافی

۱۸۰	۱۵۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	۳۰	راستای ترسیم (درجه)
۴۵	۳۳	۲۸	۲۹	۳۰	۴۲	شعاع همبستگی (متر)



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

جدول ۴: مقایسه معیارهای خطای تخمین در سه مدل

واریوگرافی

معیار خطا	مدل واریوگرام	کروی	نمایی	گوسین
MPE		۱۳/۳۲	۱۷/۰۵	۲۳/۵۱
RMSPE		۳۳/۹۱	۳۹/۷۳	۵۱/۸۱
ASE		۱/۵۶	۰/۰۱۳	۳/۸۱
MSPE		۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴
RMSSPE		۰/۰۲۱	۰/۰۳۷	۰/۰۴۴

جدول ۵: مقدار بهینه پارامترهای مورد استفاده در مدل

واریوگرام

پارامتر	مقدار
قطر بزرگ بیضی (متر)	۹۹
قطر کوچک بیضی (متر)	۲۱/۴
حداکثر تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین	۲۵
حداقل تعداد نقاط شرکت کننده در تخمین	۱۰
ناگت	۰/۰۸۲

#### ۶-۵-۲- 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 به‌صورت جداگانه

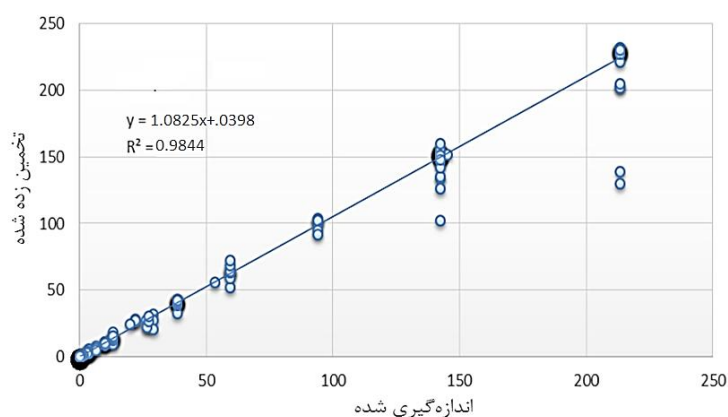
#### ۶-۵-۱- انتخاب مناسب‌ترین مدل

در نرم افزار ArcGIS توابع بهینه سازی جهت تعیین پارامترهای بهترین برازش برای یک مدل وجود دارد. بنابراین در اعتبارسنجی معمولاً از پنج 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)، خطای پیش‌بینی ریشه میانگین مربعات (MSPE) و خطای پیش‌بینی استاندارد شده ریشه میانگین مربعات (RMSSPE) است. بهترین مدل، مدلی است که MPE نزدیک به صفر، RMSPE و ASE نزدیک به MSPE و RMSSPE نزدیک به یک داشته باشد [۳۸]. 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 ۴). مقادیر بهینه پارامترهای مورد استفاده برای هر مدل واریوگرام در جدول (۵) آمده است.

مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی وضعیت کیفیت توده‌سنگ است (جدول ۶). شکل (۷) اعتبارسنجی متقابل مقادیر  $Q$  پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده مدل کروی را نشان می‌دهد. ضریب تشخیص ۹۸٪ یک پیش‌بینی خیلی خوب را نشان می‌دهد.

جدول ۶: مقایسه ضریب تشخیص در سه مدل واریوگرافی

مدل واریوگرام	کروی	نمایی	گوسین
ضریب تشخیص	۰/۹۸۴۴	۰/۹۳۰۲	۰/۸۸۷۷



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

ID	Q	Included	Predicted	Error
1	0.08	Yes	0.0793851	-0.0006149
2	0.08	Yes	0.0864514	0.00645144
3	0.08	Yes	0.0872189	0.00721892
4	0.08	Yes	0.0860659	0.0060659
5	0.08	Yes	0.0870394	0.00703939
6	0.08	Yes	0.0845407	0.00454069
7	0.08	Yes	0.0860208	0.00602081
8	0.08	Yes	0.0868116	0.00681162
9	0.08	Yes	0.086049	0.00604901
10	0.08	Yes	0.0865323	0.00653234

شکل ۸: مقایسه مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده  $Q$  برای ۱۰ نقطه

۷- نقشه رده‌بندی توده‌سنگ افق ۲۷۴۰+

#### بخش زیرزمینی معدن انگوران

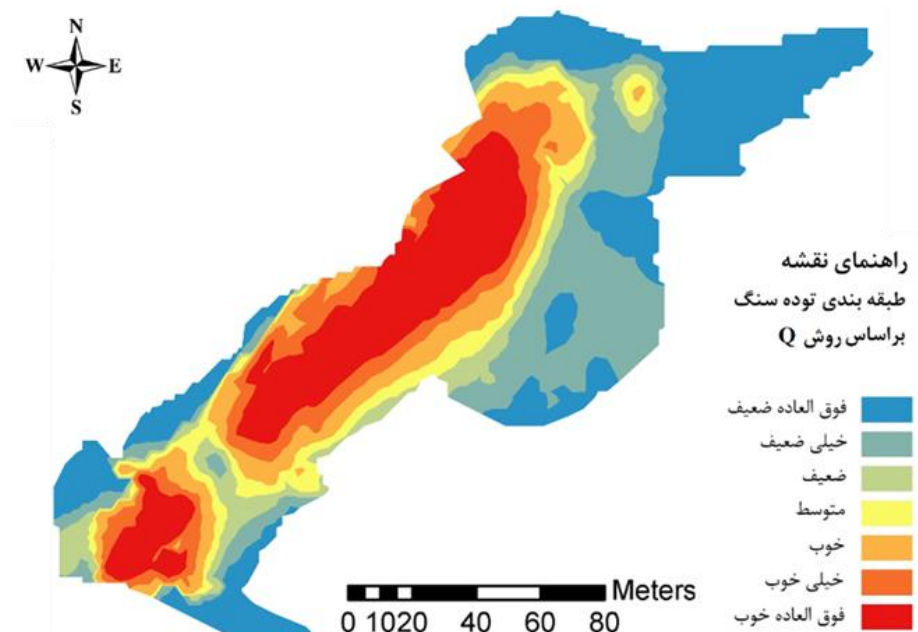
پس از انجام تحلیل‌های زمین‌آماري بر روی داده‌های  $Q$ ، نقشه پیش‌بینی نهایی وضعیت کیفیت توده‌سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران در نرم‌افزار آرک جی آی اس بدست آمد.

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. اعتبارسنجی متقابل برای هر سه مدل واریوگرام انجام شد. نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل هم نشان داد که مدل کروی،

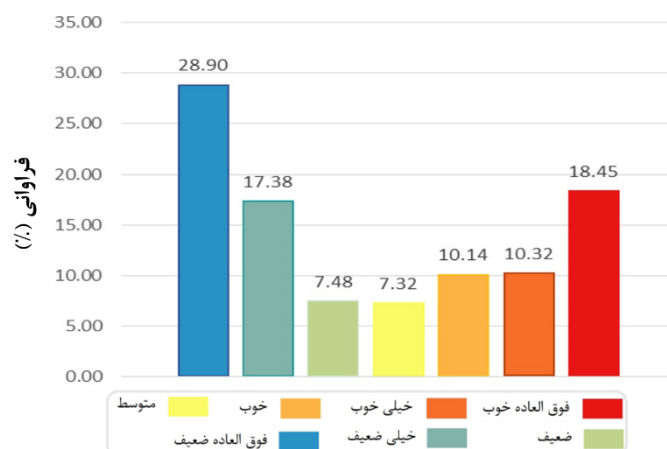
در ادامه، کنترل‌های مربوط به بررسی صحت عملکرد پیش‌بینی وضعیت کیفیت توده‌سنگ، بررسی شد. برای این منظور، عبارت "خطای پیش‌بینی" به منظور بررسی تفاضل بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر محاسبه شده برای هر نقطه برداشتی در تونل استفاده شد. به‌عنوان نمونه، در شکل (۸) در ۱۰ نقطه، اختلاف بین مقدار  $Q$  پیش‌بینی شده با استفاده از نرم‌افزار آرک جی آی اس با مقادیر محاسبه شده  $Q$ ، نشان داده شده است. در واقع بررسی شکل (۸) نشان می‌دهد که میزان خطای پیش‌بینی بسیار پایین بوده است. این مسئله بیانگر قابل قبول بودن دقت پیش‌بینی در این تحقیق است.

مورد مطالعه، در رده خیلی ضعیف و فوق العاده ضعیف قرار می گیرد. بنابراین مناسب ترین وضعیت کیفیت توده سنگ مربوط به بخش سولفیدی و بدترین وضعیت کیفیت توده سنگ مربوط به بخش شیست و کم عیار می باشد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که در کل محدوده مورد مطالعه دو طبقه توده سنگ به طور استثنایی ضعیف و به طور استثنایی خوب یافت نمی شود.

براساس پیش بینی انجام گرفته در نرم افزار آرک جی آی اس، در شکل (۹) می توان مشاهده کرد که توده سنگ محدوده مورد مطالعه در هفت گروه از فوق العاده ضعیف تا فوق العاده خوب طبقه بندی می شود. براساس نمودار فراوانی وضعیت توده سنگ تقریباً در افق ۲۷۴۰+ (شکل ۱۰) دو تیپ توده سنگ وجود دارد. ۲۹٪ از کل مساحت محدوده مورد مطالعه در معدن انگوران، در رده خیلی خوب و فوق العاده خوب قرار می گیرد و ۴۶٪ از کل مساحت محدوده



شکل ۹: نقشه نهایی پیش بینی وضعیت کیفیت توده سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران



شکل ۱۰: نمودار فراوانی وضعیت توده سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران

## ۸- بحث و نتیجه گیری

شناخت وضعیت کیفیت توده سنگ یک پیش نیاز بسیار مهم برای تحلیل پایداری و طراحی فضاها در معدن کاری زیرزمینی به شمار می رود. این شناخت معمولاً با حفر گمانه، چاه، چاهک، ترانشه، تونل آماده سازی و غیره با کمک گرفتن از سیستم های رده بندی توده سنگ ایجاد می شود. معمولاً در انجام مطالعات ساختمانی و اکتشافی، به دلیل وجود مشکلات عملیاتی و سرمایه ای، امکان نمونه برداری جامع از کل محدوده وجود ندارد، بنابراین به کمک روش درون یابی و تخمین گر زمین آماری می توان وضعیت کیفیت توده سنگ را در نقاط فاقد نمونه تعیین کرد.

در این تحقیق، برای تعیین وضعیت کیفیت توده سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران از سیستم تجربی  $Q$  استفاده شد. از آنجا که سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تجزیه و تحلیل توأم داده های فضایی و غیرفضایی ابزار مناسبی است، برای رده بندی و پهنه بندی وضعیت کیفیت توده سنگ از تخمین گر زمین آماری در محیط  $GIS$  استفاده شد. برای این کار ابتدا مقدار پارامترهای ورودی شاخص  $Q$  در ۴۲۷ نقطه از تونل های آماده سازی جمع آوری و مقدار  $Q$  محاسبه شد. سپس برای مشخص کردن مقدار  $Q$  در سایر نقاط از درون یابی زمین آماری استفاده شد. به دلیل وجود روند در داده ها، کریجینگ عام برای درون یابی انتخاب شد. بررسی ها نشان داد یک خودهمبستگی جهت دار در داده های  $Q$  وجود دارد که راستای محور بزرگ بیضی ناهمسانگردی، تقریباً در جهت شمال شرق - جنوب غرب می باشد. واریوگرافی برای سه مدل کروی، نمایی و گوسین انجام شد. با مقایسه مدل ها به کمک پنج معیار ارزیابی خطای تخمین و رگرسیون خطی مشخص شد که سمی واریوگرام مدل کروی بهترین برازش را بر ساختار فضایی داده ها نشان می دهد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد مدل از

سطح اعتماد بالای ۹۸ درصد برخوردار است. نتایج تحلیل و مدلسازی زمین آماری تطابق خوبی با نتایج تحقیق های مشابه داشت. مطالعه کائوکانگ کائو و همکاران [۱۸] نشان داد که برای داده های  $RMR$  در دو جهت افقی و قائم در سنگ های رسوبی ناهمسانگردی وجود دارد و در نهایت کریجینگ معمولی برای تخمین استفاده شد. در مطالعه از تورک و ناسوف [۱۱]، سمی واریوگرام مدل کروی با ضریب همبستگی ۰.۸۵٪ بهترین برازش را بر ساختار فضایی داده های  $RQD$  نشان داد. همچنین در مطالعه دوست محمدی و همکاران [۱۷]، دو مدل گوسین و کروی به ترتیب برای مدلسازی واریوگرام در راستای افقی و قائم برای داده های شرایط ناپیوستگی انتخاب شد که در نهایت سطح اعتماد حدود ۰.۸۰٪ برای نتایج تخمین به دست آمد. در مطالعه اصفهانی و اصغری [۱۵]، واریوگرام مدل کروی برای برازش بر ساختار فضایی داده های  $RQD$  با بیشترین دقت و قابلیت اطمینان انتخاب شد.

در کل، نتایج حاصل از نقشه پیش بینی نشان داد که وضعیت کیفیت توده سنگ افق ۲۷۴۰+ بخش زیرزمینی معدن انگوران در هفت رده، از فوق العاده ضعیف تا فوق العاده خوب تغییر می کند. حدود ۵۳٪ از مساحت کل محدوده مورد مطالعه، در رده توده سنگ ضعیف تا فوق العاده ضعیف، ۸٪ در رده توده سنگ متوسط و ۳۹٪ در رده توده سنگ خوب تا فوق العاده خوب قرار دارد. از آنجا که تمامی اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق حین حفاری تونل آماده سازی جمع آوری شد، بدیهی است واریانس خطای تخمین با فاصله گرفتن از محور تونل ها افزایش خواهد یافت. بر همین اساس پیشنهاد می شود اکتشافات تکمیلی در این نقاط انجام گیرد.

با انجام این تحقیق می توان نتیجه گرفت که علاوه بر گمانه های اکتشافی، استفاده از



پیشنهاد می‌شود.

### سیاسگزاری

نویسندگان از مدیریت، کارشناسان و پرسنل محترم شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران و معدن سرب و روی انگوران به خاطر مساعدت در گردآوری اطلاعات کمال تشکر و قدردانی را دارند.

اطلاعات جمع‌آوری شده حین حفاری تونل‌های آماده‌سازی کمک زیادی به ویژگی‌سنجی توده‌سنگ یک محدوده می‌کند. از آنجا که خروجی سیستم اطلاعات جغرافیایی در تمامی مراحل معدنکاری به برنامه‌ریزان و مهندسان در حل مسائل، طراحی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها کمک می‌کند، استفاده از مدلسازی زمین آماری در محیط GIS به عنوان ابزار مناسبی برای تجزیه و تحلیل وضعیت توده‌سنگ در معادن زیرزمینی

### مراجع

- [1] K. Terzaghi, "Rock defects and loads on tunnel supports", In: Rock Tunneling with Steel Supports, Youngstown, Ohio, pp. 15–99, 1946.
- [2] H. Lauffer, "Classification for tunnel construction", Geologie und Bauwesen, 24(1), pp. 46–51, 1958.
- [3] D. U. Deere, "Technical description of rock cores for engineering purposes", Rock Mech. Eng. Geol. 1(1), pp. 17–22, 1963.
- [4] G. E. Wickham, H. R. Tiedemann, and E. H. Skinner, "Support determination based on geologic predictions", In: Proc. RETC, AIME, New York, pp. 43–64, 1972.
- [5] Z. T. Bieniawski, "Engineering classification of jointed rock masses", Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15, pp. 335–344, 1973.
- [6] N. Barton, R. Lien, and J. Lunde, "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support", Rock mechanics, Vol. 6(4), pp. 189–236, 1974.
- [7] A. Palmstrom, RMI - a rock mass characterization system for rock engineering purposes. PhD thesis, University of Oslo, 400 p., 1995.
- [8] E. Hoek, and E. T. Brown, "Practical estimates of rock mass strength", Int J Rock Mech Min Sci 34(8), pp. 1165–86, 1997.
- [9] J. W. Suh, and H. D. Park, "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, USA, 2011.
- [10] R. E. Hammah, and J. H. Curran, "Geostatistics in Geotechnical Engineering: Fad or Empowering?", GeoCongress, pp. 1–5, 2006.
- [11] C. A. Öztürk, and E. Nasuf, "Geostatistical assessment of rock zones for tunneling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 17(3), pp. 275–85, 2002.
- [12] S. Oh, H. Chung, and D. K. Lee, "Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation", Environmental Geology, Vol. 46(8), pp. 1070–78, 2004.
- [13] A. Rafiee, and M. Vinches, "Application of geostatistical characteristics of rock mass fracture systems in 3D model generation", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 45(4), pp. 644–52, 2008.
- [14] S. L. Ellefmo, and J. Eidsvik, "Local and spatial joint frequency uncertainty and its application to rock mass characterisation", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42(4), pp. 667–88, 2009.
- [15] N. M. Esfahani, and O. Asghari, "Fault detection in 3D by sequential Gaussian simulation of Rock Quality Designation (RQD)- Case study: Gazestan phosphate ore deposit, Central Iran", Arabian Journal of Geosciences, Vol. 6(10), pp. 3737–47, 2013.
- [16] F. Ferrari, T. Apuani, and G. P. Giani, "Rock Mass Rating spatial estimation by

- geostatistical analysis", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 70, pp. 162-76, 2014.
- [17] M. Doustmohammadi, A. Jafari and O. Asghari, "Geostatistical estimation of discontinuities condition in Behesht-Abad water conveying tunnel", In: Proceedings of the 5th Iranian Mining Engineering Conference, Tehran, Iran, 2014 (Persian).
- [18] K. Kaewkongkaew, N. Phien-wej, and D. Kham-ai, "Prediction of rock mass along tunnels by geostatistics", KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 19(1), pp. 81-90, 2015.
- [19] V. Vaziri, J. Khademi Hamidi, and A. R. Sayadi, "Tabas mechanized coal mine roof classification using CMRR", In: Proceedings of the 5th Iranian Mining Engineering Conference, Tehran, Iran, 2014 (Persian).
- [20] V. Vaziri, J. Khademi Hamidi, and A. R. Sayadi, "Studying the impact of fault zones on mining process in Tabas coal mine using GIS", In: Proceedings of the National Mining Sciences Conference, Sari, Iran, 2014 (Persian).
- [21] V. Vaziri, J. Khademi Hamidi, and A. R. Sayadi, "Estimation of coal gas content using geostatistical methods in GIS environment: A case study from Tabas coal mine", In: Proceedings of the 24th International Mining Congress of Turkey, Antalya, Turkey, 2015.
- [22] A. Keogh, C. Moulton, and C. Iron, "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.
- [23] W. D. Watson, L. F. Ruppert, L. J. Bragg, and S. J. Tewalt, "A geostatistical approach to predicting sulfur content in the Pittsburgh coal bed", International Journal of Coal Geology, Vol. 48, pp. 1–22, 2001.
- [24] J. Taboada, A. Vaamonde, A. Saavedra, and C. Ordóñez, "Geostatistical study of the feldspar content and quality of a granite deposit", Engineering Geology, Vol. 65, pp. 285–92, 2002.
- [25] C. D. Lloyd, and P. M. Atkinson, "Increased accuracy of geostatistical prediction of nitrogen dioxide in the United Kingdom with secondary data", International Journal of Applied Earth Observation and Geo-information, Vol. 5(4), pp. 293–305, 2004.
- [26] D. Potoglou, and P. S. Kanaroglou, "Carbon monoxide emissions from passenger vehicles: predictive mapping with an application to Hamilton, Canada", Transportation Research Part D, Vol. 10(2), pp. 97–109, 2005.
- [27] J. W. Suh, and H. D. Park, "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, USA, 2011.
- [28] E. Sutcu, "Use of GIS to discover potential coalfields in Yatagan–Milas area in Turkey", International Journal of Coal Geology, Vol. 98, pp. 95-109, 2012.
- [29] C. E. Akumu, J. A. Johnson, D. Etheridge, P. Uhlig, M. Woods, D. G. Pitt, and S. McMurray, "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, Vol. 239-240, pp. 13–24, 2015.
- [30] B. Singh, and R. K. Goel, Rock mass classification: a practical approach in civil engineering. Elsevier Science Ltd., 1999.
- [31] N. Barton, "Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39(2), pp. 185-216, 2002.
- [32] Madan Zamin Co., Design of Anguran underground mine. Basic Design Report, 2004 (Persian).
- [33] Kavoshgaran Consulting Eng., Design of opening up and exploitation of Sulfur part, Anguran Lead and Zinc Mine. 2008.
- [34] K. Johnston, M. Jay, V. Hoef, K.

- Krivoruchko, and N. Lucas, Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Environmental System Research Institute – USA, 2003.
- [35] S. Hamad, Geostatistical analysis of groundwater levels in the south Al Jabal Al Akhdar area using GIS. Water resource department, General Water Authority, 32718, Benghazi, Libya, 2009.
- [36] K. H. Kamble, and P. Aggrawal, "Geostatistical Analyst for Deciding Optimal Interpolation Strategies for Delineating Compact Zones", International Journal of Geosciences, Vol. 2(4), pp. 585-96, 2011.
- [37] A. Margaret, and J. Carignan, Geostatistique lineaire application au domaine minier. Paris, Presses de l'École des Mines de Paris, 1997.
- [38] S. Burke, G. Chu, J. Heyer, J. Lee, X. Tang, T. Tran, and L. Zhang, Mass Quantification of PCE in Los Angeles Groundwater from the GeoTracker Database. Los Angeles, UCLA Institute of the Environment and Sustainability Senior Practicum, 2013.



## **Evaluation of Rock Mass Quality in Underground Section of Anguran Mine Using Geostatistical Analyst in GIS Environment**

Yasin Taghavi<sup>1</sup>, Jafar Khademi Hamidi<sup>2</sup>, Ahmad Reza Sayadi<sup>3</sup>

1- MSc Student, Mining Engineering Dept., Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University

2- Assistant Professor, Mining Engineering Dept., Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University

3- Associate Professor, Mining Engineering Dept., Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University

### **Abstract**

Rock mass characterization is one of the most important parameters affecting the underground mine design. This study deals with the prediction of rock mass quality using geo-statistical estimator in Anguran underground mine at the level +2740. For this, a database consisting of 427 Q-based rock mass quality data sets was developed during the development of mine drifts. Accordingly, data were analyzed and checked for normality, trend and anisotropy. Analysis on Q-data showed that: 1- they do not have a normal distribution, 2- there are neither global nor local outliers in data 3- the data seem to exhibit a trend. In this study, the Universal Kriging was used due to existing trend in datasets. Taking into consideration five estimation error evaluation criteria, the best Variogram model was selected among three models: exponential, spherical and Gaussian. The results showed that spherical variogram model provides the best fit to the data's spatial structure. Cross validation showed high accuracy level for performance of geo-statistical estimator. Accordingly, the rock mass quality map for the area under study built in ArcGIS environment. The analysis results of final rock mass quality map revealed that about 53% of under study area has poor to extremely poor rock mass condition, 8% has fair and 39% has good to extremely good rock mass condition.

**Key words:** Rock mass quality classification, Geostatistical estimator, Geographic Information System (GIS), Anguran Mine.