

## بررسی همبستگی عوامل ژئومکانیکی با میزان جابه‌جایی دیواره شرقی معدن سنگ آهن چادرملو با استفاده از مدل‌سازی فرکتالی

مهدی مهدی‌زاده<sup>۱</sup>؛ پیمان افضل<sup>۲</sup>؛ سید مصلح افتخاری<sup>۳\*</sup>؛ کاوه آهنگری<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- گروه نفت و معدن، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱

### چکیده

ناپایداری دیواره در معادن روباز می‌تواند اثرات بسیار زیان‌باری بر ایمنی و اقتصاد معادن بگذارد. روش‌های طبقه‌بندی راهکارهای مهندسی جهت بررسی میزان تاثیر هر یک از عوامل ژئومکانیکی بر ناپایداری دیواره را فراهم می‌کنند. این روش‌ها ضمن بررسی و وزن‌دهی هر یک از عوامل موثر، روابطی را پیشنهاد می‌کنند تا معیاری برای میزان پایداری دیواره جهت تصمیم‌گیری فراهم کنند. این وزن‌دهی در شرایط و مناطق مختلف می‌تواند متفاوت باشد که استفاده از مطالعات با شرایط مشترک می‌تواند مفید واقع شود. معدن سنگ آهن چادرملو یکی از معادن بزرگ ایران واقع در ایران مرکزی است که برداشت‌ها و آزمایش‌های ژئومکانیکی مناسبی بر روی این معدن صورت پذیرفته است. در این پژوهش پس از بررسی اطلاعات اولیه و ساخت بانک اطلاعاتی، مدل بلوکی بخشی از دیواره شرقی معدن برای پارامترهای ژئومکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوره، وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی تخمین زده شد. سپس با استفاده از مدل‌سازی فرکتالی زون‌های هر پارامتر شناسایی شده و با مقایسه هر یک از این پارامترها با میزان جابه‌جایی تجمعی به دست آمده از رادار، انطباق کلی هر یک از این عوامل با استفاده از ماتریس لاگ‌راشيو محاسبه گردید. بر این اساس مقاومت فشاری تک‌محوره و زاویه اصطکاک داخلی به دست آمده از آزمایش برش مستقیم، انطباق بیشتری با میزان جابه‌جایی نشان داد.

### واژگان کلیدی

مدل‌سازی فرکتالی (مقدار-حجم)، طبقه‌بندی سنگ، زمین‌آمار، ماتریس لاگ‌راشيو، چادرملو

### ۱- مقدمه

ناپایداری دیواره شیب‌دار در معادن می‌تواند منجر به وقوع ریزش‌های کوچک تا بزرگ گردد که خسارات مالی و حتی جانی بسیار زیادی را سبب می‌شود. پیش‌بینی و پیشگیری از وقوع این ناپایداری‌ها همواره از مهمترین دغدغه‌های معدنکاری بوده و روش‌های مختلفی جهت شناسایی و مقابله با آن پیشنهاد شده است. یکی از معیارهای سنجش میزان ناپایداری، مقدار جابه‌جایی نقطه‌ای بوده که در مقیاس کوچک منحصر به جابه‌جایی یک قطعه سنگ منفرد بوده و در مقیاس بسیار بزرگ می‌تواند در حد یک ریزش چندین پله‌ای و فاجعه‌آفرین باشد. از سال‌ها قبل روش‌های طبقه‌بندی سنگ‌ها به

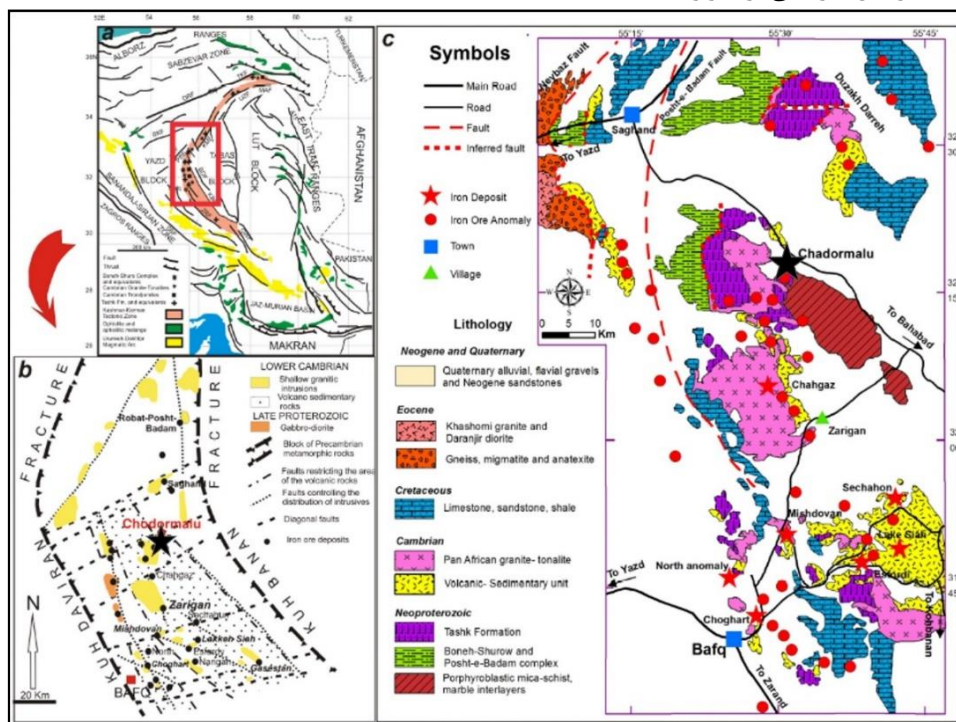
عنوان راهکارهای مهندسی جهت دسته‌بندی عوامل موثر بر ناپایداری ارائه شدند و در طول سالیان مختلف برای شرایط محلی اصلاحاتی بر روی آن‌ها اعمال شده است. یکی از راه‌های بررسی تاثیر عوامل ژئومکانیکی، مقایسه وضعیت هر یک از این عوامل در محدوده مورد مطالعه با شرایط واقعی و تعیین میزان تاثیر هر یک از این عوامل در ناپایداری است. تعیین وضعیت و مقایسه این عوامل نیازمند جمع‌آوری همه اطلاعات به صورت یک زبان مشترک است که در قالب یک مدل دوبعدی یا سه‌بعدی قابل اجراء است. با توجه به این که برداشت اطلاعات عوامل موثر در یک محدوده معدنی برای همه نقاط امری غیر ممکن و یا بسیار گران قیمت است، نمونه برداری و

ریاضیات در علوم مختلف است. هندسه فرکتال توسط ماندلبروت [۱۶] به عنوان روشی جهت محاسبه ابعاد فرکتالی پدیده‌ها معرفی شده و توسط دیگر محققین توسعه یافت [۱۷، ۱۸]. در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری بر روی هندسه فرکتال و کاربردهای آن در علوم مختلف من جمله علوم زمین صورت گرفته که می‌توان به کاربرد فرکتال در جدایش جوامع مختلف کانی‌زایی [۱۹-۲۴] و طبقه‌بندی پارامترهای ژئومکانیکی [۷، ۳۱-۲۵] اشاره نمود. در این مطالعه این طبقه‌بندی با استفاده از مدل‌سازی فرکتالی انجام شده و جهت مقایسه جوامع با یکدیگر از ماتریس لاگ‌راشیو استفاده شده که در ادامه به تشریح هر یک از این روش‌ها پرداخته شده است.

## ۲- معرفی مطالعه موردی

معدن سنگ آهن چادرملو یکی از مهمترین و بزرگترین معادن روباز کشور است. محدوده معدن چادرملو در شرق ایران مرکزی، در استان یزد و در ۴۵ کیلومتری شرق خرانق و ۱۶۵ کیلومتری شرق یزد جای گرفته است. در حال حاضر عملیات معدنکاری در حال انجام و پیت معدن در حال گسترش بوده که قطر تقریبی آن ۱۴۰۰ متر و بیشینه ارتفاع دیواره آن ۳۰۰ متر است. کانسنگ اصلی معدن سنگ آهن چادرملو توسط سنگ‌های آذرین بخصوص گرانیت و گرانودوریت و دگرگونی دربر گرفته شده است. موقعیت معدن چادرملو بر روی نقشه زون‌های ساختاری ایران مرکزی در شکل ۱ نشان داده شده است.

محاسبه مقادیر برای یک شبکه منظم می‌تواند بسیار راهگشا باشد. سپس می‌توان مقادیر هر یک از متغیرها را با استفاده از روش‌های زمین‌آماری برای بخش‌های اندازه‌گیری نشده درون‌یابی کرد. هدف زمین‌آمار تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی است در مقایسه با آمار کلاسیک که به استخراج اطلاعات مربوطه از مجموعه داده‌های بزرگ صرف نظر از موقعیت مکانی آنها مربوط می‌شود. یعنی هر مقدار داده با مکانی در فضا مرتبط است و حداقل یک ارتباط ضمنی بین مکان و مقدار داده وجود دارد. فرض اصلی زمین‌آمار این است که مناطق نزدیک به هم (به شرطی که به یک واحد سنگ‌شناسی یکسان تعلق داشته باشند) بیشتر از مناطق دورتر از هم ارزش‌های مشابهی دارند [۴-۱]. تخمین پارامترهای مختلف مانند تخمین عیار ماده معدنی و همچنین پارامترهای ژئومکانیکی به روش‌های گوناگون زمین‌آماری توسط محققین زیادی انجام شده است [۱۵-۵]. در این پژوهش نیز برخی از اطلاعات ژئومکانیکی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری تخمین زده شده است. یکی از ساده‌ترین و معمول‌ترین روش‌ها برای مقایسه میزان ارتباط متغیرها با یکدیگر، ماتریس همبستگی است. لازم به ذکر است روش‌های معمول ماتریس همبستگی، ارتباط متغیرها در تمام جامعه آماری را به صورت یک به یک بررسی می‌کنند. حال آنکه می‌توان با طبقه‌بندی مقادیر هر یک از متغیرها در جوامع مختلف، میزان انطباق جوامع زمینیه و جوامع بیشینه در هر متغیر را بررسی نمود. در طول زمان علوم ریاضی و به ویژه هندسه در توضیح پدیده‌های طبیعی پیش از علوم تجربی حرکت کرده و هندسه فرکتال نیز یکی از کاربردهای نسبتاً جدید



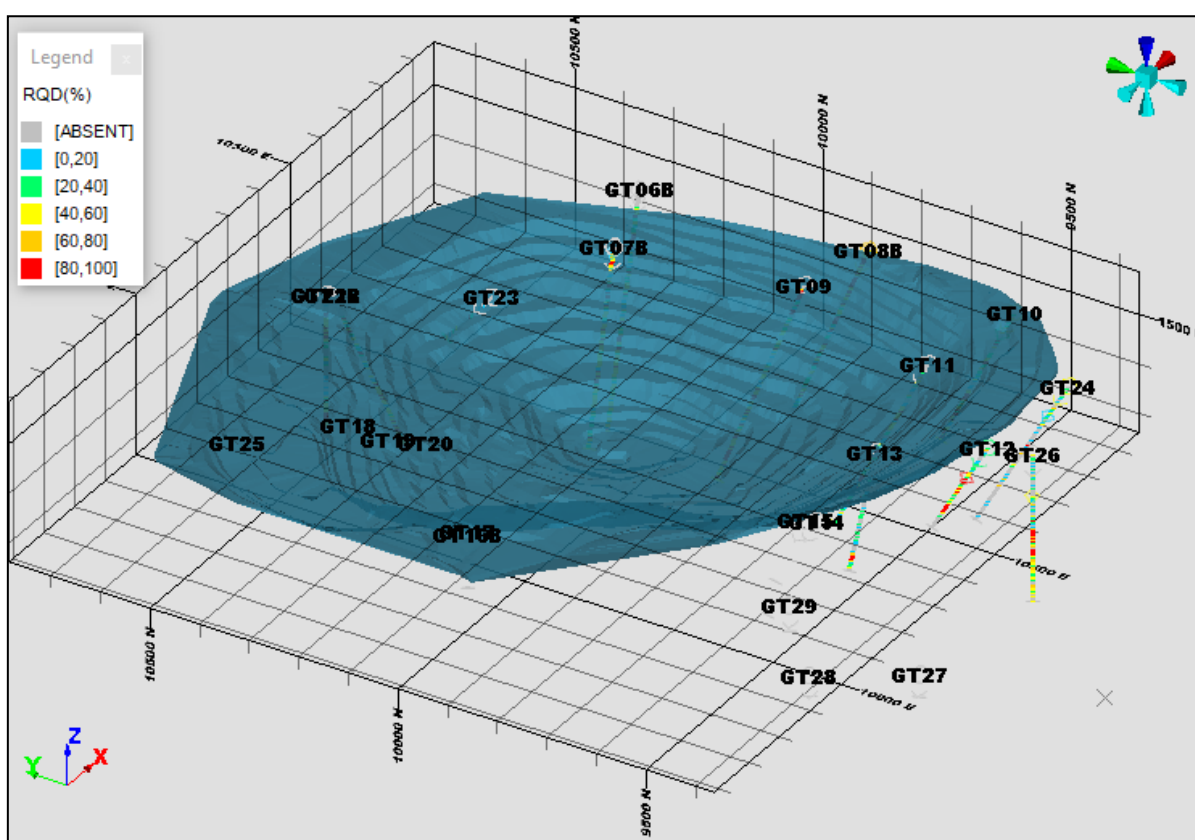
شکل ۱- موقعیت معدن چادرملو بر روی نقشه زون‌های ساختاری ایران مرکزی (ستاره مشکی) [۳۲]

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- آماده سازی اطلاعات

در این پژوهش اطلاعات مختلفی از معدن چادرمو جمع‌آوری شده و در یک بانک اطلاعاتی تجمیع گردید. بدین منظور ابتدا اطلاعات گمانه‌های ژئومکانیکی از قبیل موقعیت، عمق، فیل انحراف سنجی و نتایج آزمایشات تمامی نمونه‌ها در نرم‌افزار دیتامین استودیو (*Datamine Studio RM*) پیاده سازی شد. در این معدن علاوه بر حفر گمانه‌های ژئومکانیکی، مطالعات پایش دیواره با استفاده از رادار نیز صورت پذیرفته که اطلاعات جابه‌جایی نسبی نقاط در دیواره شرقی معدن را به طور مداوم برداشت نموده است. همچنین

نقشه‌های توپوگرافی، طرح نهایی معدن، نقشه زمین‌شناسی و زمین‌شناسی ساختاری، مدل سنگ‌شناسی و تمامی داده‌های موجود در قالب ورودی‌های مورد نیاز نرم‌افزار آماده‌سازی شد. لازم به توضیح است در هر یک از این مراحل اطلاعات با دقت مرتب شده و داده‌های نامناسب از قبیل داده‌های خارج از ردیف و نمونه‌های دارای خطا در صورت امکان اصلاح و در غیر این صورت حذف گردید. در شکل ۲ نمایی از توپوگرافی معدن به همراه موقعیت گمانه‌های ژئومکانیکی نشان داده شده است.



شکل ۲- نمایی از توپوگرافی معدن به همراه گمانه‌های ساخته شده (رنگ‌بندی بر اساس RQD)

#### ۳-۲- تخمین زمین‌آماري

زمین‌آمار دانشی مبتنی بر ترکیب آمار کلاسیک و علوم زمین است که ارتباط فضایی بین داده‌ها را بدست آورده و از آن برای تخمین یا شبیه‌سازی متغیر ناحیه‌ای مورد نظر استفاده می‌شود. بنابراین زمین‌آمار بخشی از آمار فضایی به حساب می‌آید. واژه آمار فضایی برای توصیف روش‌هایی به کار می‌رود که به بررسی رفتار متغیرهایی در ارتباط با فضا می‌پردازند. نخستین بار این دانش توسط مهندس

معدن فرانسوی -جرج ماترون- در دهه ۱۹۷۰ میلادی پایه‌گذاری شد [۳۳].

جهت برآورد مقادیر پارامترهای مختلف در علوم مهندسی، می‌توان با داشتن تعدادی مقدار معلوم و بررسی ارتباط فضایی بین آنها، مقادیر مجهول قی‌مابین را درون‌یابی نمود.

در این مطالعه متغیرهای ژئومکانیکی مختلف به روش زمین‌آماري کریجینگ (*Kriging*) تخمین زده شد.

### ۳-۳- هندسه فرکتال

مفهوم هندسه فرکتال بر این اصل بنا شده است که اصولاً همه پدیده‌ها و اشکال یک بعدی، دو بعدی، سه بعدی و یا چند بعدی نیستند؛ بدین معنی که برای توصیف ابعاد پدیده‌ها می‌توان از ابعاد غیر صحیح مثل یک و نیم بعدی استفاده کرد. برای مثال، اگر خط، یک بعدی و صفحه، دو بعدی است، یک خط شکسته که صدها بار در یک صفحه شکسته می‌شود شکلی را به وجود می‌آورد که می‌توان بر حسب شدت این شکستگی‌ها بعدی بین یک و دو به آن نسبت داد. در این صورت می‌توان آن را شکلی بین خط و صفحه معرفی کرد با بعد بین یک و دو. با افزایش شکستگی‌ها خط مورد نظر می‌تواند بعدی بیش از یک را اختیار کند. شکل‌های فرکتالی در مقیاس‌های مختلف از نظر بزرگ‌نمایی ممکن است مشابه باشند. به این خاصیت خودتشابهی می‌گویند. در واقع می‌توان این‌گونه توضیح داد که وقتی مقیاس تغییر می‌کند، آنها خصوصیات خودتشابهی از خود نشان می‌دهند.

ممکن است اجزای تشکیل دهنده یک جسم وقتی به دقت بررسی شوند، همانند خود آن باشند. سیستم آبراه‌های، سیستم درزه‌ها و سیستم گسل‌ها و بسیاری از سیستم‌های دیگر طبیعت ممکن است دارای چنین خاصیتی باشند. برای تمامی اشکال خود متشابه، رابطه‌ی نمایی زیر برقرار است [۳۴]

$$a = S^D \quad (1)$$

که در آن  $a$  تعداد اجزا،  $S$  ضریب کوچک‌نمایی و  $D$  بعد فرکتال است و در نتیجه:

$$D = \frac{\log(a)}{\log(S)} \quad (2)$$

اگرچه تئوری‌های مختلفی برای محاسبه بعد فرکتالی ارایه شده است، اما در نهایت همه آن‌ها از روند سه مرحله‌ای زیر تبعیت می‌کنند [۱۷، ۲۴]:

- اندازه‌گیری کمیت‌های شی مورد نظر با استفاده از اندازه گام‌های مختلف

- ترسیم لگاریتمی مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل لگاریتم اندازه‌های گام؛ و برازش خط رگرسیون حداقل مربعات بر نقاط داده‌ها.

- برآورد بعد فرکتال از شیب خط برازش شده

به عنوان مثال اگر سنگ‌های منطقه‌ای دارای مقاومت فشاری تک‌محوری تقریباً یکسان و با تغییرات کمی باشند و صرفاً ناحیه سست در آن یافت شود، قله‌ها و دره‌های کم‌ارتفاعی در صفحه تغییرپذیری متغیر مورد نظر (که در این‌جا مقاومت سنگ است) ظاهر می‌شود. لذا بعد فرکتال آن کم و نزدیک به ۲ خواهد شد. پس از گذر از محدوده سست و ورود به محدوده نسبتاً مقاومت، به دلیل پیدایش قله‌های مرتفع در تغییرپذیری متغیر مقاومتی، بعد فرکتال

متناسب با افزایش مقاومت زیاد می‌شود؛ از این رو می‌توان با استفاده از اختلاف بعد فرکتال دو جامعه سست و مقاوم را از یکدیگر جدا کرد.

### ۳-۴- ماتریس لاگ‌راشیو

اولین بار ماتریس لاگ‌راشیو (*Logratio*) توسط جان کارانزا (*John M. Carranza*) برای بررسی آنومالی (*Anomaly*) طلا در سیستم‌های رگه‌ای طلای اپی‌ترمال شمال غرب فیلیپین معرفی شده است [۳۵-۳۹].

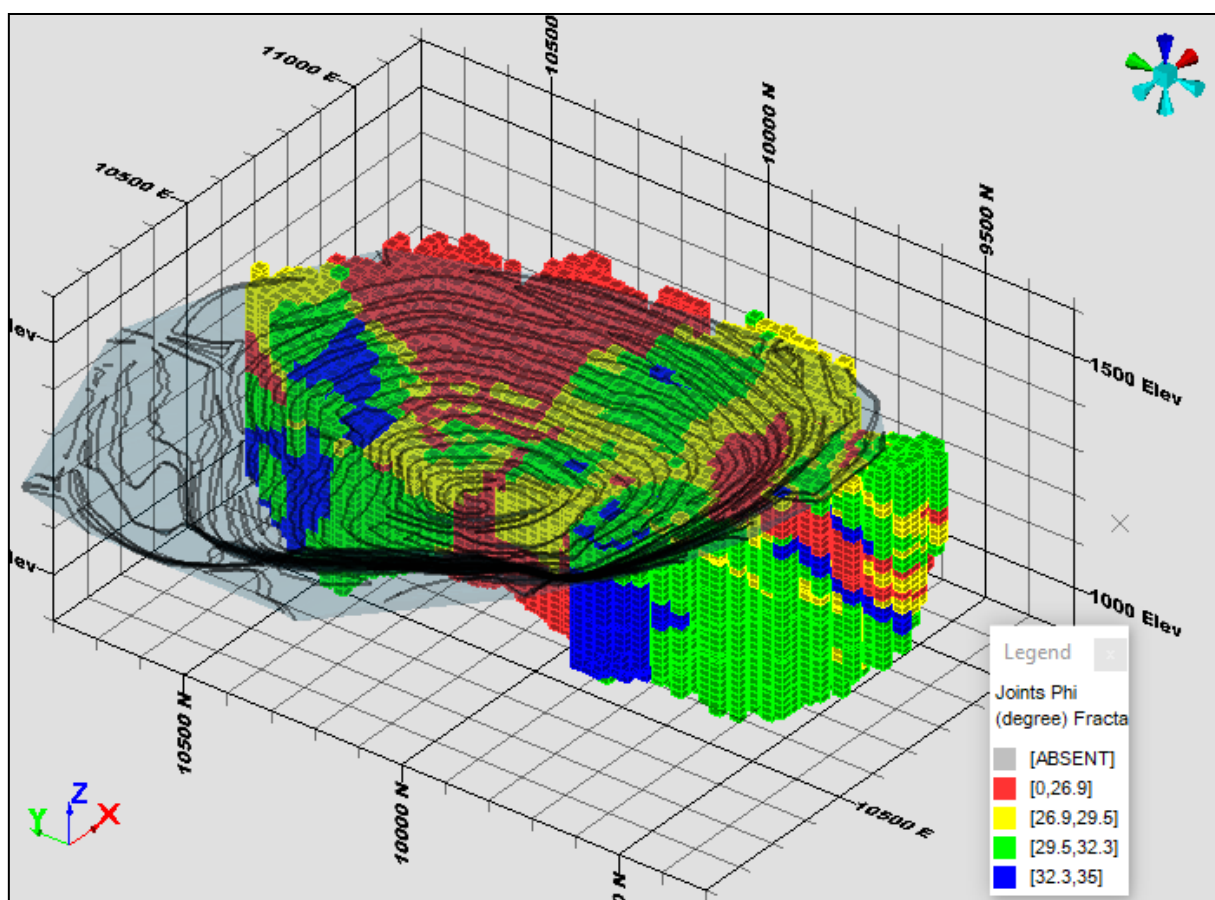
ماتریس لاگ‌راشیو یکی از روش‌های مقایسه و بررسی آماری انطباق بین دو پارامتر، است. مبنای محاسبه در این روش تعداد انطباق کامل یا عدم انطباق دو پارامتر با یکدیگر به نسبت تعداد کل داده‌ها است. نحوه محاسبه انطباق به روش ماتریس لاگ‌راشیو در جدول ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش با استفاده از ماتریس لاگ‌راشیو میزان انطباق کلی جوامع جابه‌جایی به دست آمده از مدل فرکتالی با جوامع هر یک از پارامترهای ژئومکانیکی بررسی شده است. میزان انطباق کلی بالای ۰/۶ نشان از انطباق خوب بین جوامع دارد.

جدول ۱- بررسی انطباق جوامع به روش ماتریس لاگ‌راشیو

بیرون زون پارامتر دوم	داخل زون پارامتر دوم	
B تعداد انطباق با پارامتر اول و عدم انطباق پارامتر دوم	A تعداد انطباق هر دو پارامتر	داخل زون پارامتر اول
D تعداد عدم انطباق هر دو پارامتر	C تعداد انطباق با پارامتر دوم و عدم انطباق پارامتر اول	بیرون زون پارامتر اول
خطای نوع اول = $C/(A+C)$		
خطای نوع دوم = $D/(B+D)$		
<b>Overall Accuracy (OA) = (A+D)/(A+B+C+D)</b>		

### ۴- بحث و نتایج

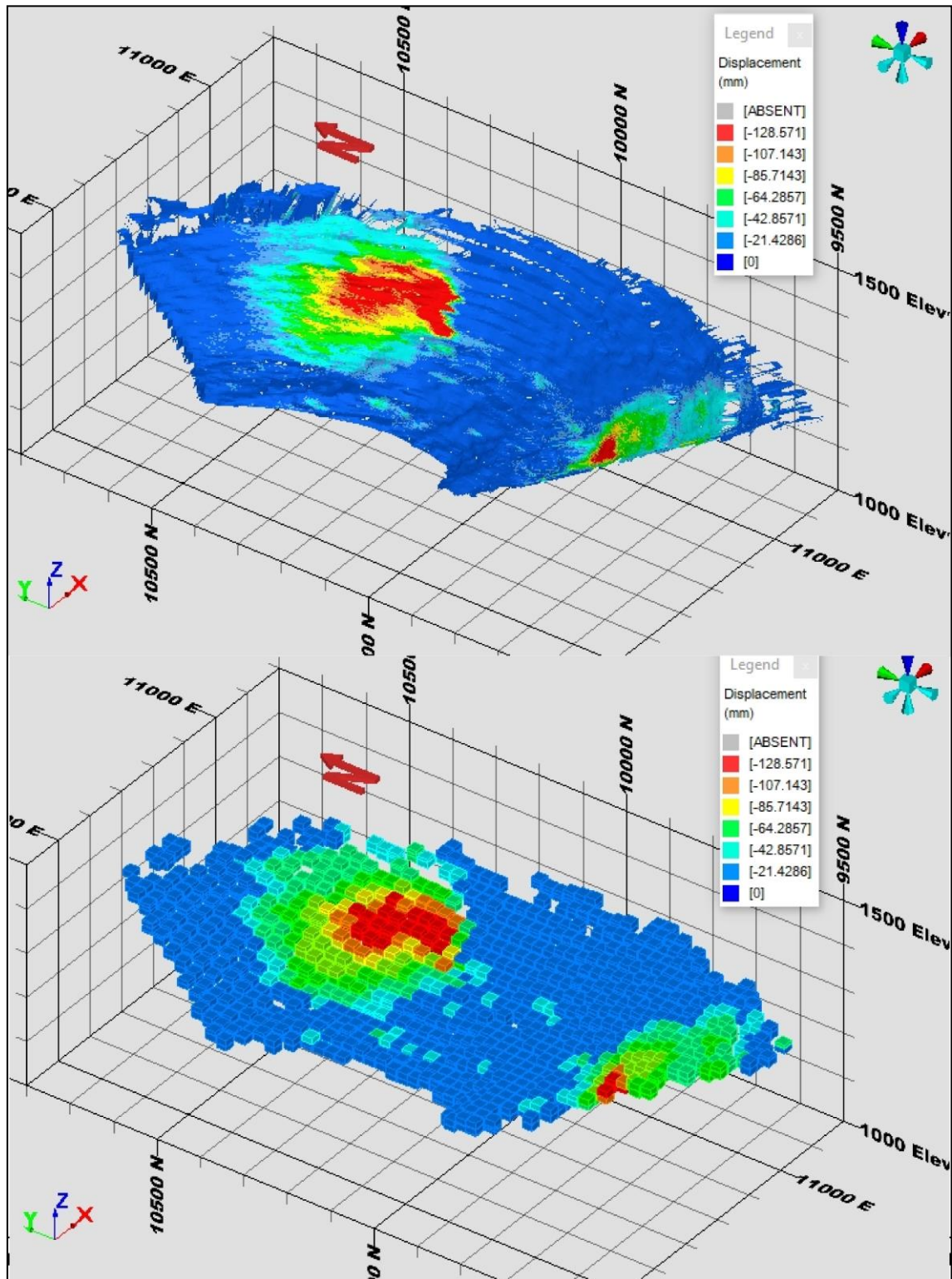
در این تحقیق نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی هر یک از نمونه‌ها پس از تحلیل آماری به کامپوزیت‌های با طول یکسان تبدیل شد. بدین‌منظور برای هر یک از متغیرهای ناحیه‌ای واریوگرافی انجام شده و پس از تعیین بیضوی ناهمسانگردی، در یک شبکه منظم سه‌بعدی (مدل بلوکی)، مقادیر مختلف هر یک از متغیرها (پارامترهای ژئومکانیکی) برای هر سلول تخمین زده شد. لازم به توضیح است با توجه به میانگین فاصله شبکه گمانه‌های ژئومکانیکی، ابعاد سلول‌ها  $25 \times 25 \times 15$  متر در نظر گرفته شد. نمایی از مدل بلوکی ساخته شده برای دیواره شرقی به عنوان نمونه بر اساس مقادیر زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



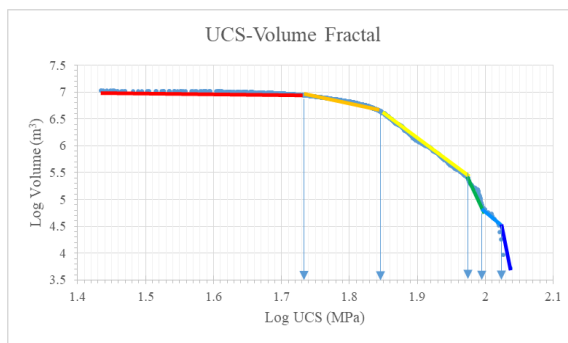
شکل ۳- مدل بلوکی دیواره شرقی معدن چادرملو بر اساس زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها

ژئومکانیکی و مقدار جابه‌جایی، هر یک از پارامترها با استفاده از مدل‌سازی فرکتالی مقدار-حجم به جوامع مختلف دسته‌بندی شد. نتایج این بخش برای پارامترهای مقدار جابه‌جایی، مقاومت فشاری تک محوری، زاویه اصطکاک داخلی ناپیوستگی‌ها،  $RQD$ ، مدول یانگ و وزن مخصوص در شکل ۵ و جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به توضیح است که فلش‌های آبی رنگ نشان‌دهنده حدود آستانه‌ای (*Threshold*) برای هر پارامتر است.

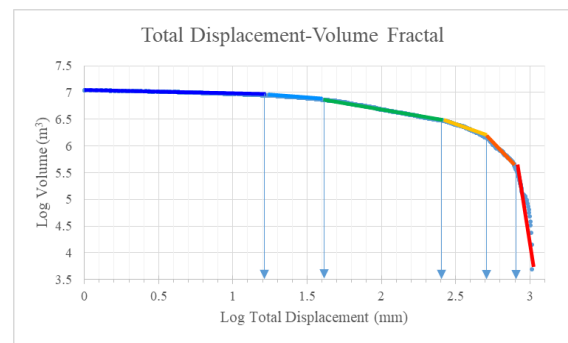
در ادامه این مطالعات، نتایج جابه‌جایی‌ها که توسط رادار برداشت شده، پس از خوشه‌زدایی (*Decluster*)، برای سلول‌های بلافاصله زیر سطح توپوگرافی در مدل بلوکی محاسبه گردید. در نتیجه برای سلول‌های نزدیک سطح به اطلاعات داده‌های ژئومکانیکی و نتایج واقعی تأثیر عوامل ژئومکانیکی (به صورت میزان جابه‌جایی) تکمیل شد. شکل ۴ نمایی از مدل تورسیمی (*Wireframe*) میزان جابه‌جایی و مدل بلوکی میزان جابه‌جایی سطحی را نشان داده است. پس از تکمیل بانک اطلاعاتی بلوک‌های سطحی بر اساس پارامترهای



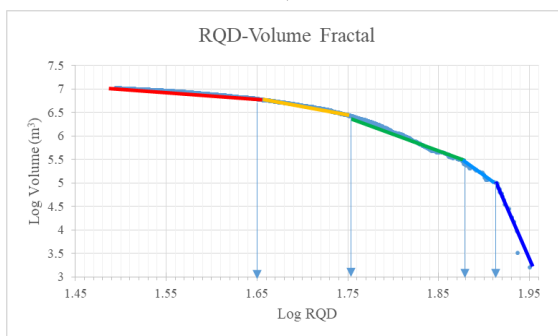
شکل ۴- مدل میزان جابه‌جایی‌ها (بالا: وایرفریم خروجی از رادار، پایین: مدل بلوکی تبدیل شده از وایرفریم)



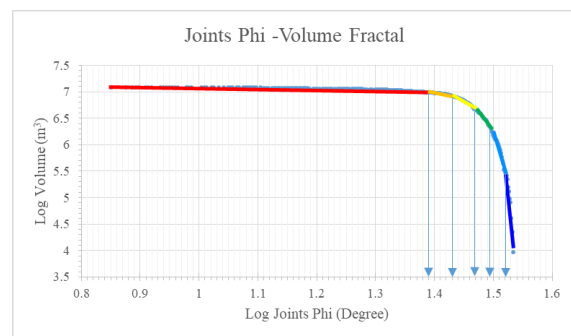
(ب)



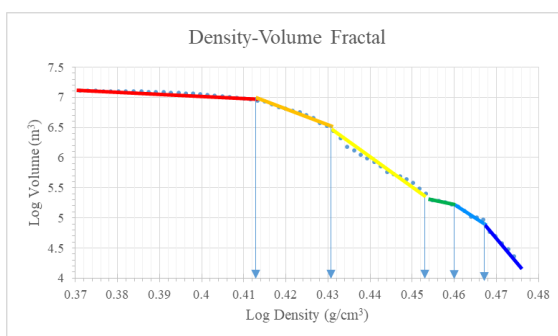
(الف)



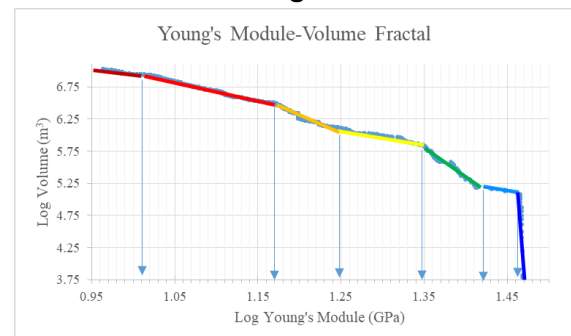
(د)



(ج)



(و)



(ه)

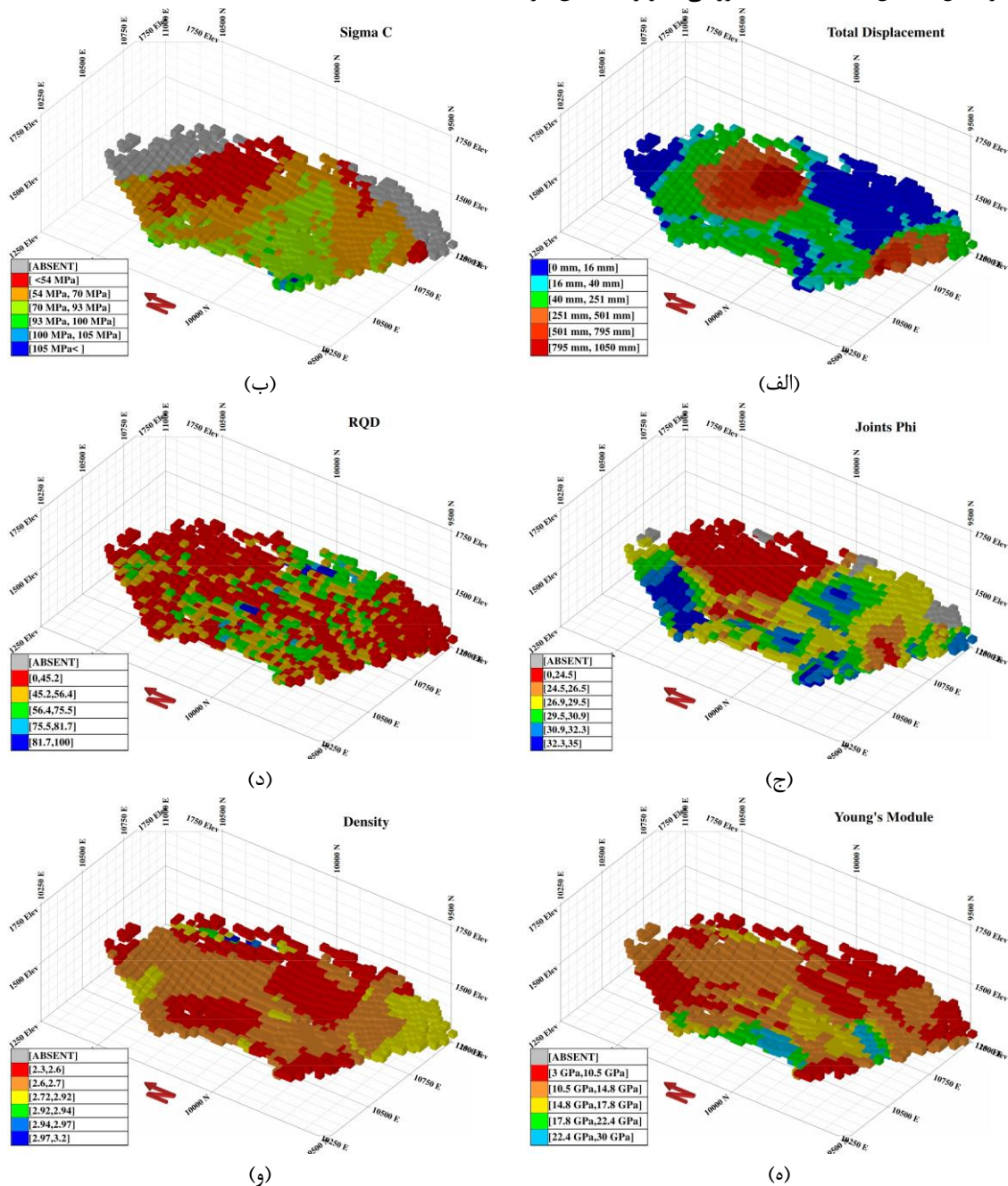
شکل ۵- نمودار فرکتالی (الف) مقدار جابه‌جایی - حجم، (ب) مقاومت فشاری تک محوره - حجم، (ج) زاویه اصطکاک داخلی درزه - حجم، (د) RQD - حجم، (ه) مدول یانگ - حجم و (و) وزن مخصوص - حجم

جدول ۲- حدود آستانه به دست آمده از مدل فرکتالی هر یک از پارامترها

حد آستانه اول	حد آستانه دوم	حد آستانه سوم	حد آستانه چهارم	حد آستانه پنجم	حد آستانه ششم
۱۶	۴۰	۲۵۱	۵۰۱	۷۹۵	مقدار جابه‌جایی (میلی‌متر)
۵۴	۶۹	۹۳	۱۰۰	۱۰۵	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
۲۴/۵	۲۶/۶	۲۹/۵	۳۰/۹	۳۲/۴	زاویه اصطکاک داخلی درزه (درجه)
۴۴/۷	۵۶/۴	۷۵/۹	۸۱/۷		RQD
۱۰/۵	۱۴/۸	۱۷/۸	۲۲/۴	۲۶/۳	مدول یانگ (GPa)
۲/۶	۲/۷	۲/۸۴	۲/۸۸	۲/۹۳	وزن مخصوص (g/cm³)

از پارامترهای ژئومکانیکی با میزان جابه‌جایی‌های رادار، نشان از ارتباط خوب بین زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری تک محوره با میزان جابه‌جایی‌ها دارد.

در ادامه انطباق عوامل مختلف با جابه‌جایی به چندین روش شامل مقایسه گرافیکی، بررسی ماتریس همبستگی و در نهایت بررسی ماتریس لاگرتشیو جوامع فرکتالی مورد مطالعه قرار گرفت. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بررسی تصویری انطباق هر یک



شکل ۶- مدل بلوکی زون‌بندی فرکتالی پارامترهای (الف) مقدار جابه‌جایی، (ب) مقاومت فشاری تک محوره، (ج) زاویه اصطکاک داخلی درزه، (د) RQD، (ه) مدول یانگ و (و) وزن مخصوص



دارد که در ادامه انطباق هر یک از این جوامع بررسی خواهد شد. به منظور بررسی میزان انطباق هر یک از پارامترها با میزان جابه‌جایی، ماتریس همبستگی به روش پیرسون (*Pearson*) بررسی شد که نشان از ارتباط معکوس پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و همچنین مقاومت فشاری تک محوری با میزان جابه‌جایی دارد (جدول ۳).

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در مدل بلوکی مقدار جابه‌جایی (تصویر الف) یک زون جابه‌جایی بیشینه قابل مشاهده است که در مدل بلوکی پارامترهای دیگر به رنگ قرمز مشخص شده است. این تصاویر نشان از ارتباط خوب زون با جابه‌جایی بیش از ۲۵۱ میلی‌متر با زون‌های با مقاومت فشاری تک محوری کمتر از ۵۴ مگاپاسکال و همچنین زاویه اصطکاک داخلی کمتر از ۲۴/۵ درجه

جدول ۳- ماتریس همبستگی پارامترها

وزن مخصوص (گرم بر سانتیمتر مکعب)	مدول یانگ (GPa)	RQD	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)	مقدار جابه‌جایی (میلی‌متر)
-۰/۱۶۸	-۰/۱۲۷	-۰/۱۴۲	-۰/۵۰۴	-۰/۴۷۹	۱
۰/۴۲۳	۰/۴۷۱	۰/۲۲	۰/۶۹۱	۱	-۰/۴۷۹
۰/۴۸۷	۰/۱۹۸	۰/۱۸۲	۱	۰/۶۹۱	-۰/۵۰۴
-۰/۰۰۶	۰/۲۷۵	۱	۰/۱۸۲	۰/۲۲	-۰/۱۴۲
۰/۲۸۷	۱	۰/۲۷۵	۰/۱۹۸	۰/۴۷۱	-۰/۱۲۷
۱	۰/۲۸۷	-۰/۰۰۶	۰/۴۸۷	۰/۴۲۳	-۰/۱۶۸

جدول ۴- ماتریس لاگ‌راشیو مقایسه جابه‌جایی با مقاومت فشاری تک محوری

مقاومت فشاری تک محوره $\geq 54$		مقاومت فشاری تک محوره $< 54$	
جابه‌جایی کل $251/2 \leq$	A = 195	B = 240	
جابه‌جایی کل $251/2 >$	C = 78	D = 899	
	خطای نوع اول = ۰/۲۸۶	خطای نوع دوم = ۰/۷۸۹	
OA = ۰/۷۷۵			

جدول ۵- ماتریس لاگ‌راشیو مقایسه جابه‌جایی با زاویه اصطکاک داخلی درزه

زاویه اصطکاک داخلی درزه $\geq 26/6$		زاویه اصطکاک داخلی درزه $< 26/6$	
جابه‌جایی کل $251/2 \leq$	A = 310	B = 138	
جابه‌جایی کل $251/2 >$	C = 277	D = 1181	
	خطای نوع اول = ۰/۴۷۲	خطای نوع دوم = ۰/۸۹۵	
OA = ۰/۷۸۲			

پس از بررسی همبستگی عوامل، میزان انطباق جوامع تعیین شده در مدل‌سازی فرکتالی با بلوک‌های با جابه‌جایی بیش از ۲۵۱ میلی‌متر، به روش ماتریس لاگ‌راشیو تحقیق گردید. همان‌طور که در جداول ۴ تا ۸ مشخص است نتایج این بررسی نشان داد افزایش مقاومت فشاری تک محوری به بیش از ۵۴ مگاپاسکال در ۷۷ درصد موارد و زاویه اصطکاک داخلی درزه‌ها به میزان بیش از ۲۶/۶ درجه در ۷۸ درصد موارد مانع از جابه‌جایی بیش از ۲۵۱/۲ میلی‌متر خواهد شد. جهت انتخاب بیشترین انطباق جوامع به دست‌آمده در مدل‌سازی فرکتالی، ابتدا ماتریس لاگ‌راشیو برای هر یک از حدود آستانه‌ای به صورت دو به دو ترسیم شد که بهترین آن‌ها به عنوان نماینده هر جفت متغیر انتخاب شد و در ادامه میزان این انطباق‌ها آورده شده است. انطباق دو به دو هر یک از عوامل نشان‌دهنده ارتباط موثر بین زاویه اصطکاک داخلی درزه و مقاومت فشاری تک محوره است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به اطلاعات موجود مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی برای یک مدل بلوکی تخمین زده شد و با استفاده از مدل فرکتالی مقدار-حجم، جوامع مختلف پارامترهای ژئومکانیکی در دیواره شرقی معدن چادرملو تعیین شد. مزیت استفاده از این روش، به کارگیری توام پارامترهای ژئومکانیکی با مکان هندسی مرتبط با آن‌ها می‌باشد. پس از تعیین جوامع مختلف در هر پارامتر، میزان انطباق جوامع ناپایدار با میزان جابه‌جایی‌ها مقایسه شد و نتایج زیر حاصل گردید:

- استفاده از مدل زمین‌آماری جهت برآورد وضعیت پارامترهای ژئومکانیکی در عمق می‌تواند به عنوان روشی مناسب جهت پهنه‌بندی پتانسیل ناپایداری در نظر گرفته شود.
- مدل‌سازی فرکتالی می‌تواند در تعیین مرز نواحی ناپایداری با نواحی پایدار مورد استفاده قرار بگیرد.
- با توجه به داده‌های برداشت شده در این مطالعه، زاویه اصطکاک داخلی بیشترین انطباق را با میزان جابه‌جایی نشان داد، به طوری که با کاهش این مقدار، میزان جابه‌جایی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

### ۶- سپاس‌گزاری

نویسندگان کمال تشکر را از مجتمع صنعتی و معدنی چادرملو داشته و به خصوص از همکاری و حمایت آقای دکتر حق‌نژاد و دکتر معین‌السادات به سبب در اختیار قرار دادن اطلاعات مفید و ارزشمند معدن چادرملو قدردانی می‌نمایند. همچنین از همکاری‌های دلسوزانه آقای دکتر شمس‌الدین می‌گونی در مطالعات انجام شده قدردانی می‌گردد.

and A. B. Yasrebi, "DETERMINATION OF RELATIONSHIP BETWEEN UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH ( UCS ) AND ROCK DENSITIES USING FRACTAL MODELLING IN KAROUN-4 DAM , SW IRAN," in *Proceedings of the 24th UK Conference of the Association for Computational Mechanics in Engineering*, 2016, no. April, pp. 73–76.

[8] I. Aghamolaie, G. R. Lashkaripour, M. Ghafoori, and N. Hafezi Moghaddas, "3D geotechnical modeling of subsurface soils in Kerman city, southeast Iran," *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 78, no. 3, pp. 1385–1400, 2019.

[9] K. Kaewkongkaew, N. Phien-wej, and D. Kham-ai, "Prediction of rock mass along tunnels by geostatistics," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 81–90, 2015.

[10] O. Tavchandjian, A. Rouleau, G. Archambault, R. Daigneault, and D. Marcotte, "Geostatistical analysis of fractures in shear zones in the Chibougamau area:

### جدول ۶- ماتریس لاگ‌راشیو مقایسه جابه‌جایی با RQD

۴۵/۲ > RQD	۴۵/۲ ≤ RQD	
B= ۱۵۳	A= ۲۹۵	جابه‌جایی کل ۲۵۱/۲ ≥
D= ۵۸۶	C= ۶۵۷	جابه‌جایی کل ۲۵۱/۲ <
خطای نوع دوم = ۰/۷۹۳	خطای نوع اول = ۰/۶۹۰	
OA= ۰/۵۲۱		

### جدول ۷- ماتریس لاگ‌راشیو مقایسه جابه‌جایی با مدول یانگ

مدول یانگ > ۱۰/۵	مدول یانگ ≤ ۱۰/۵	
B= ۴۱۳	A= ۸۳۰	جابه‌جایی کل ۲۵۱/۲ ≥
D= ۷۱	C= ۳۷۷	جابه‌جایی کل ۲۵۱/۲ <
خطای نوع دوم = ۰/۱۴۷	خطای نوع اول = ۰/۳۱۲	
OA= ۰/۵۳۳		

### جدول ۸- ماتریس لاگ‌راشیو مقایسه جابه‌جایی با وزن مخصوص

وزن مخصوص > ۲/۷	وزن مخصوص ≤ ۲/۷	
B= ۳۹۱	A= ۸۰	جابه‌جایی کل ۱۶ ≥
D= ۱۰۷۱	C= ۲۹۲	جابه‌جایی کل ۱۶ <
خطای نوع دوم = ۰/۷۲۳	خطای نوع اول = ۰/۷۸۵	
OA= ۰/۶۲۸		

### ۷- منابع‌ها

[1] G. S. Rifai, Achmad, *Rock Mechanics and Engineering*, vol. 21, no. 2. 2020.

[2] A. G. Journel and C. J. Huijbregts, *Mining Geostatistics*, 4th ed. Harcourt Brace Jovanovich, 1989.

[3] G. Exadaktylos, M. Stavropoulou, G. Xiroudakis, M. De Broissia, and H. Schwarz, *A spatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM*, vol. 41, no. 6. 2008.

[4] R. G. Maliva, "Geostatistical Methods and Applications," no. Yeh 1992, pp. 595–617, 2016.

[5] J. Read and P. Stacey, *Guidelines for open pit slope design*. Collingwood, Vic.; Leiden, Netherlands: CSIRO Publishing ; CRC, 2009.

[6] N. Sotiropoulos, A. Benardos, and A. Mavrikos, "Spatial Modelling for the Assessment of Geotechnical Parameters," *Procedia Eng.*, vol. 165, pp. 334–342, 2016.

[7] M. Mahdizadeh, K. Ahangari, A. Javadi, P. Afzal,

- Sarajeh 1:100,000 sheet, Central Iran," *Arab. J. Geosci.*, vol. 7, no. 12, pp. 5333–5343, Dec. 2014.
- [23] B. Sadeghi, P. Moarefvand, P. Afzal, A. Bijan, and L. Daneshvar, "Application of fractal models to outline mineralized zones in the Zaghia iron ore deposit, Central Iran," *J. Geochemical Explor.*, 2012.
- [24] R. Zuo and J. Wang, "Fractal/multifractal modeling of geochemical data: A review," *J. Geochemical Explor.*, vol. 164, pp. 33–41, May 2016.
- [25] M. N. Bagde, A. K. Raina, A. K. Chakraborty, and J. L. Jethwa, "Rock mass characterization by fractal dimension," *Eng. Geol.*, vol. 63, no. 1–2, pp. 141–155, Jan. 2002.
- [26] M. Stigsson and D. Mas Ivars, "A Novel Conceptual Approach to Objectively Determine JRC Using Fractal Dimension and Asperity Distribution of Mapped Fracture Traces," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 52, no. 4, pp. 1041–1054, Apr. 2019.
- [27] D. Huang, X. Chang, Y. Tan, K. Fang, and Y. Yin, "From rock microstructure to macromechanical properties based on fractal dimensions," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 3, p. 168781401983636, Mar. 2019.
- [28] E. Avşar, "Contribution of fractal dimension theory into the uniaxial compressive strength prediction of a volcanic welded bimrock," *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2020 797, vol. 79, no. 7, pp. 3605–3619, Mar. 2020.
- [29] م. مهدی‌زاده، ن. حسینی‌علائی، پ. افضل و د. کاوه آهنگران، «استفاده از روش فرکتالی مقدار-تعداد جهت طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس مقاومت؛ مطالعه موردی: معدن زغالسنگ قشلاق»، در پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ، ۱۳۹۳
- [30] م. باغستانی، م. منجزی، ع. یاراحمدی بافقی و پ. افضل، «تعیین قابلیت‌خردایش ناشی از انفجار بر اساس نسبت سرعت موج طولی و بعد فرکتال بلوک‌های انفجاری»، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۲۴، صفحه ۱۰۵–۱۱۷، ۱۳۹۹.
- [31] ق. ا. رستمی پایدار و ه. اسدی‌حویزیان، «کاربرد مدل‌های فرکتالی جهت زون‌بندی شاخص کیفیت سنگ (RQD) در کانسار طلای زرشوران، تکاب، ایران»، نشریه علوم زمین، شماره ۱۱۱، صفحه ۱۵۱–۱۶۰، ۱۳۹۸.
- [32] H. Heidarian, S. Alirezaei, and D. R. Lentz, "Chadormalu Kiruna-type magnetite-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data," *Ore Geol. Rev.*, vol. 83, pp. 43–62, Apr. 2017.
- applications to structural geology," *Tectonophysics*, vol. 269, no. 1–2, pp. 51–63, Jan. 1997.
- [11] F. Ferrari, "Rock Mass Characterization and Spatial Estimation of Geomechanical Properties through Geostatistical Techniques," 2014.
- [12] M. Stavropoulou, G. Exadaktylos, and G. Saratsis, "A combined three-dimensional geological-geostatistical-numerical model of underground excavations in rock," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 213–243, 2007.
- [13] P. R. La Pointe, "Analysis of the spatial variation in rock mass properties through geostatistics," in *21st U.S. Symposium on Rock Mechanics, USRMS 1980*, 1980, pp. 570–580.
- [14] ع. جبین‌پور، ع. یاراحمدی بافقی و ج. غلام‌نژاد، «مدلسازی زمین‌آماری تخریب‌پذیری توده سنگ مبتنی بر روش تجربی لابسچر در معدن سه‌چاهون»، نشریه مهندسی منابع معدنی، جلد دوم، شماره ۳، صفحه ۵۳–۶۹، ۱۳۹۷.
- [15] ف. اسدالهی، ح. منصوری، م. ع. ابراهیمی فرسنگی، «تخمین پارامترهای موثر بر قابلیت انفجار به روش زمین‌آمار در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر» در پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، انجمن مهندسی معدن ایران، ۱۳۹۳
- [16] B. B. Mandelbrot, *THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE*, vol. 1. New York: W. H. FREEMAN AND COMPANY, 1983.
- [17] R. Lopes and N. Betrouni, "Fractal and multifractal analysis: A review," *Med. Image Anal.*, vol. 13, no. 4, pp. 634–649, 2009.
- [18] A. Barcellos, "The Fractal Geometry of Mandelbrot," *Coll. Math. Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 98–114, 1984.
- [19] P. Afzal, Y. F. Alghalandis, A. Khakzad, P. Moarefvand, and N. R. Omran, "Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling," *J. Geochemical Explor.*, vol. 108, no. 3, pp. 220–232, 2011.
- [20] C. Li, T. Ma., and J. Shi, "Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background," *J. Geochemical Explor.*, vol. 77, no. 2–3, pp. 167–175, 2003.
- [21] J. Deng, Q. Wang, L. Yang, Y. Wang, Q. Gong, and H. Liu, "Delineation and explanation of geochemical anomalies using fractal models in the Heqing area, Yunnan Province, China," *J. Geochemical Explor.*, vol. 105, no. 3, pp. 95–105, 2010.
- [22] M. Shamseddin Meigoony, P. Afzal, M. Gholinejad, A. B. Yasrebi, and B. Sadeghi, "Delineation of geochemical anomalies using factor analysis and multifractal modeling based on stream sediments data in

- [37] M. Yousefi, A. Kamkar-Rouhani, and E. J. M. Carranza, "Geochemical mineralization probability index (GMPI): A new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping," *J. Geochemical Explor.*, vol. 115, pp. 24–35, Apr. 2012.
- [38] R. Zuo, E. J. M. Carranza, and J. Wang, "Spatial analysis and visualization of exploration geochemical data," *Earth-Science Rev.*, vol. 158, pp. 9–18, 2016.
- [39] م. باغستانی، «تحلیل فرکتالی ویژگی‌های توده سنگ و ارزیابی تاثیر آن بر خردایش ناشی از انفجار»، رساله مقطع دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۹.
- [33] G. Matheron, *The theory of regionalized variables and their applications, Les cahiers du Centre de Morphologie Mathematique*. 1971.
- [34] B. B. Mandelbrot and J. A. Wheeler, "Fractals and the Geometry of Nature," *Am. J. Phys.*, pp. 168–180, 1983.
- [35] Mahdizadeh, M., Afzal, P., Eftekhari, M., & Ahangari, K. (2022). Geomechanical zonation using multivariate fractal modeling in Chadormalu iron mine, Central Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81(1), 1-11.
- [36] E. J. M. Carranza, "Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values," *J. Geochemical Explor.*, vol. 110, no. 2, pp. 167–185, 2011.