مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز ۱۴۰۲، جلد شانزدهم، شماره ۳ صفحه ۱ تا ۲۰

مدلسازی زمین‌شناسی مهندسی سنگ‌های ساختمانی (مطالعه موردی تراورتن حاجی‌آباد محلات)

رضا احمدی*[۱]

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶

چکیده

در پژوهش حاضر مدلسازی زمین‌شناسی- ژئومکانیکی تراورتن حاجی‌آباد محلات با استفاده از تعداد ۹۰ حلقه گمانه اکتشافی قائم با طول مجموع ۶۶۳/۳۵ متر، در مقیاس بزرگ مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور ابتدا، چاه‌نگار دوبعدی زمین‌شناسی- ژئومکانیکی گمانه‌ها، چاه‌نگار سه‌بعدی سنگ‌شناسی تمام گمانه‌ها، مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی گمانه‌ها، نمودار نرده‌ای سه‌بعدی تغییرات لیتولوژی مرزی محدوده حفر گمانه‌ها و نقشه هم‌ضخامت ماده معدنی ترسیم شد. سپس مطالعات آماری داده‌های بازیابی مغزه (RC) و شاخص کیفی سنگ (RQD) گمانه‌ها صورت گرفت و مدل سه‌بعدی داده‌های RC، نقشه سه‌بعدی آماری و مدل سه‌بعدی داده‌های RQD تولید شد. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که میانگین ضخامت ماده معدنی (مجموع تراورتن و تراورتن مارنی) در کل محدوده برابر با ۴/۰۵ متر و ذخیره برجای ماده معدنی در محدوده حفر گمانه‌ها برابر با ۵۸۶۸۴۳۹ تن است که نشان از میزان ذخیره زیاد و ارزش بالای ماده معدنی دارد. میانگین داده‌های RC گمانه‌ها برابر با ۷۷/۴ درصد است که نشان از کیفیت نسبتاً بالای عملیات حفاری و ماده معدنی در محدوده دارد. همچنین میانگین داده‌های RQD در گمانه‌ها برابر با ۶۹/۳ درصد است که درمجموع کیفیت سنگ تراورتن حاجی‌آباد براساس رده‌بندی مهندسی سنگ‌ها با استفاده از معیار RQD در رده "نسبتاً خوب" ارزیابی می‌شود. برپایه نقشه سه‌بعدی آماری داده‌های RQD، بالاترین مقادیر RQD در گمانه‌های حفاری‌شده در سطح نیمه جنوبی محدوده، قرار دارند. مدل سه‌بعدی داده‌های RQD معدن تراورتن حاجی‌آباد نیز نشان می‌دهد که درمجموع از نظر کیفی، مرغوبیت و کیفیت سنگ تراورتن حاجی‌آباد در زون‌های ٦ شرقی، ٦ غربی و ١٤ از سایر زون‌های دیگر بهتر است.

کلید واژه‌ها: *سنگ‌ساختمانی، حاجی‌آباد محلات، مدلسازی، لیتولوژی، بازیابی مغزه، شاخص کیفی سنگ*

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک Rezahmadi@gmail.com
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

در صنعت سنگ ساختمانی، سنگ‌شناسی (لیتولوژی) به‌تنهایی تعیین‌کننده کیفیت سنگ نیست و علاوه بر ویژگی‌های یک سنگ از نظر سنگ‌شناسی و رنگ ظاهری، عواملی چون یک-پارچگی و یکنواختی (درجه همگنی)، درزه‌وشکاف‌ها، شکستگی‌ها، اثرات هوازدگی، حفرات و فضاهای خالی، وجود لایه‌بندی‌های ظریف، نحوه استخراج، چگونگی برش، ساب‌و-صیقل نیز در کیفیت و ارزیابی سنگ تاثیرگذارند (احمدی، ۱۳۹۵). علاوه‌براین، برخورداری از میزان ذخیره اقتصادی کافی دست‌کم برای یک دوره برداشت، ازجمله مشخصات کیفی لازم برای سنگ‌های ساختمانی است (احمدی، ۱۳۸۷). بنابراین قبل از هر چیز لازم است علاوه بر شناخت نوع سنگ‌ساختمانی، کیفیت و مرغوبیت آن از نظر میزان شفافیت و عدم وجود ترک-ها، درزه‌وشکاف‌ها و ناخالصی‌های موجود در آن و میزان ذخیره برجا به‌طور دقیق مشخص شود.

با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌توان ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های ساختمانی را اندازه‌گیری نمود اما از یک-سو به‌دلیل محدودیت‌های زمانی و بودجه، امکان انجام نمونه-گیری و آزمایش‌های متعدد بر روی تمام بخش‌های یک معدن وجود ندارد و از سوی دیگر با انجام چنین آزمایش‌هایی نمی-توان به برخی از ویژگی‌های ساختاری توده سنگ پی برد. بنابراین انجام مدلسازی برای کل محدوده براساس اطلاعات اکتشافی موجود و درنتیجه پیش‌بینی مدل برای بخش‌های ناشناخته به‌منظور آگاهی و استفاده از آن در آینده، کمک‌کننده خواهد بود.

در پژوهش حاضر معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات که از بزرگ‌ترین معادن تراورتن ایران است، با استفاده از حفر گمانه-های اکتشافی، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا ویژگی‌های زمین‌شناسی (لیتولوژی) و ژئومکانیکی سنگ‌معدن شامل بازیابی مغزه (RC: Core Recovery) و شاخص کیفی سنگ (RQD: Rock Quality Designation) در مقیاس بزرگ، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پارامتر RC شاخصی از کیفیت عملیات حفاری است که در ارزیابی منابع معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Annels and Dominy, 2003). پارامتر RQD نیز معیار و نشانه‌ای از کیفیت سنگ می‌باشد (Akingboye, 2023; Yong et al., 2022; Lukić, and Zlatanović, 2017; Pells et al., 2016; Hencher, 2015; Jaeger et al., 2007; Carter, 1992; Goodman, 1991; Bieniawski, 1989; Deere, 1989, 1963) که با روش‌های مختلفی تعیین می‌شود (Xu et al., 2023). افزودنی است که حفر گمانه‌های اکتشافی نیمه‌عمیق و عمیق به‌منظور اکتشاف مواد معدنی فلزی و برخی از مواد معدنی غیرفلزی، امری معمول، متداول و ضروری است اما حفر تعداد زیادی گمانه اکتشافی برای شناسایی سنگ ساختمانی زیر سطح زمین در محدوده تراورتن حاجی‌آباد محلات، از معدود موارد اکتشافی با این روش در ایران و حتی جهان می‌باشد.

انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM: International Society for Rock Mechanics) و انجمن آزمون و مواد آمریکا (ASTM: American Society for Testing and Materials, 1997) توصیه کرده‌اند که برای تعیین RQD اندازه قطر مغزه‌ها باید بین ۳۶/۵ تا ۸۵ میلی‌متر (۱/۴۴ تا ۳/۳۵ اینچ) باشد و حفاری نیز توسط سرمته‌های الماسی انجام گیرد. اندازه قطر مغزه‌های NX (۵۴/۷ میلی‌متر یا ۲/۱۵ اینچ) و NQ (۴۷/۵ میلی‌متر یا ۱/۸۷ اینچ) برای این منظور بهینه هستند. RQD برای قطرهای بزرگ مغزه نیز مفید است به‌شرط آنکه قطر مغزه به-وضوح بیان شود. افزودنی است که قطر مغزه‌های حاصل از حفاری‌های الماسه انجام‌شده در محدوده تراورتن حاجی‌آباد محلات برابر با ۸۶ میلی‌متر می‌باشد.

در ارتباط با مطالعات ژئومکانیکی سنگ‌های ساختمانی در گذشته، پژوهش‌های معدودی صورت گرفته که در آنها اغلب یا براساس مطالعات درزه‌نگاری، جهت برش و استخراج بلوک سنگ پیشنهاد شده است (همانند الوان دارستانی و کوهی-اصفهانی، ۱۳۹۰؛ شفیعی و همکاران، ۱۳۹۱؛ ربیعی‌وزیری و همکاران، ۱۳۹۳؛ حمزه و شفیعی بافتی، ۱۳۹۴) و یا براساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی نقطه‌ای، نظیر مقاومت فشاری تک‌محوره میزان مقاومت و سختی سنگ ارزیابی شده است (همانند دهقان و همکاران، ۱۳۸۷). امروزه، پژوهش‌ها در زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیک به مدلسازی‌های دقیق و

ترکیبی زمین‌شناسی-ژئومکانیکی نیاز دارند. انجام مدلسازی-های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی و ترکیب اطلاعات آنها با یکدیگر می‌تواند به تحلیل‌های کیفی و کمی محیط‌های سنگی در شرایط مختلف کمک کند. بنابراین در پژوهش حاضر مطالعات زمین‌شناسی- ژئومکانیکی سنگ تراورتن حاجی‌آباد در مقیاس بزرگ و براساس نتایج عملیات حفاری گمانه‌های اکتشافی صورت گرفته است. درواقع در این پژوهش کیفیت سنگ معدن تراورتن حاجی‌آباد هم از دیدگاه نوع و جنس (لیتولوژی) و هم سلامت سنگ از نظر بالا بودن مقادیر RQD و RC (ویژگی‌های ژئومکانیکی) در مقیاس بزرگ ارزیابی می-شود.

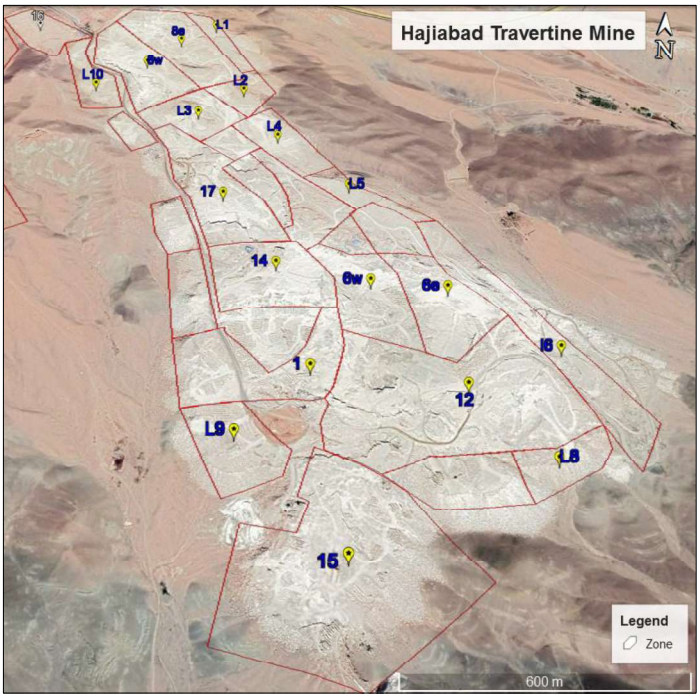
۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی- معدنی محدوده

معدن تراورتن حاجی‌آباد در جنوب غرب شهر محلات و کیلومتر پنج جاده محلات به خمین قرار دارد. این محدوده معدنی در پهنه ساختاری ایران مرکزی، چهارگوش زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ گلپایگان و برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ محلات قرار دارد. از نظر چینه‌شناسی قدیمی‌ترین واحدهای سنگی رخنمون‌یافته، سنگ‌های منسوب به سازند سلطانیه متعلق به پروتروزوئیک پسین- کامبرین پیشین هستند که در شمال‌غرب شهرستان محلات گسترش داشته و شامل دولومیت‌های ضخیم‌لایه به‌رنگ زرد، خاکستری‌تیره تا روشن هستند. سازندهای زاگون و لالون نیز با ناپیوستگی بر روی این واحد سنگی قرار گرفته‌اند که از شیل سیلتی سبز تا قرمز در پایین تا ماسه‌سنگ‌های آرکوزی کمی دگرگونه در بالا ادامه می‌یابد. حد بالایی این سازندها با همبری گسله توسط واحدهای سنگی پرمین پوشیده می‌شود. سنگ‌های پرمین در شمال و غرب محلات گسترش وسیعی دارند، بخش زیرین این واحد سنگی بطور عمده از دولومیت‌های قهوه‌ای تا خاکستری ضخیم‌لایه تشکیل شده و بخش میانی آن عمدتاً آهک‌های دولومیتی خاکستری تا خاکستری‌روشن است. بخش فوقانی این واحد سنگی را آهک‌های بلورین سفید تا شیری‌رنگ تشکیل می‌دهد که توده‌ای بوده و به‌ندرت دارای لایه‌بندی هستند. محدوده تراورتن حاجی‌آباد دارای ریخت‌شناسی تپه‌ماهوری نسبتاً ملایم بوده و در حدفاصل کوهپایه و دشت واقع است. این تپه‌ها که عمدتاً ارتفاع کم و سطح مسطحی دارند، از ماسه‌سنگ، مارن و شیل‌های ائوسن تشکیل شده‌اند و بر روی این ارتفاعات در ناحیه با ناپیوستگی دگرشیب، واحدهای تراورتن کواترنر قدیم نهشته شده‌اند. رخنمون واحدهای سنگی پالئوزوئیک در بخش شمالی و سنگ‌آهک‌های ستیغ‌ساز کرتاسه در بخش‌های شمالی و جنوبی برگه محلات، مرتفع‌ترین ارتفاعات ناحیه را پدید آورده‌اند. براساس مطالعات و بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده در محدوده معدنی تراورتن حاجی‌آباد، شش نوع واحد سنگ چینه‌ای تفکیک شده است که شامل یک واحد ماسه‌سنگ، شیل و مارن ائوسن، دو واحد کنگلومرایی تحتانی و فوقانی کواترنر و سه واحد تراورتن است که دارای قابلیت معدنکاری هستند. در این محدوده معدنی، نهشت تراورتن در بین دو واحد کنگلومرایی و طی دو نسل صورت گرفته است. با توجه به اینکه تراورتن معدن حاجی‌آباد از رسوبات چشمه‌های آبگرم در بستری ناهموار تشکیل شده، ضخامت لایه تراورتن در محدوده متغیر است. لایه تراورتن نیز تقریباً افقی و شیب آن تابع شیب توپوگرافی است (حاجی، ۱٤۰۰).

به‌دلیل وسعت زیاد، مطابق شکل ۱ محدوده به ۱۸ منطقه (zone) تقسیم‌بندی شده که با گذشت زمان، استخراج ماده-معدنی از مناطق مختلف و کاهش وسعت محدوده‌ها، تقسیم-بندی مناطق محدوده تغییر پیدا کرده است. درحال‌حاضر این محدوده شامل ۱۱ منطقه به‌نام‌های شش شرقی (6E)، شش غربی (6W)، هشت شرقی (8E)، هشت غربی (8W)، S3، L10، ۱، ۱۲، ۱٤، ۱۵ و ۱۷ می‌باشد.

براساس سابقه طولانی‌مدت معدنکاری در محدوده معدن تراورتن حاجی‌آباد و برپایه نتایج آزمایش‌های مختلف اندازه-گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ بر روی نمونه‌های متعدد، سنگ تراورتن حاجی‌آباد از حداقل میزان مقاومت فشاری تک‌محوری لازم (٤۰۰ کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع یا ٤۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع یا ٤۰ مگاپاسکال) برخوردار است. مقاومت فشاری سنگ تراورتن حاجی‌آباد بطور متوسط ۵۰۰ کیلوگرم‌نیرو بر سانتی‌متر مربع (۵۰ مگاپاسگال)، چگالی آن بین

۲/٤ تا ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب (بطور میانگین ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و درصد جذب آب آن نیز بین ۰/۲ تا ۰/۷ درصد (بطور متوسط ۰/۳۵ درصد) می‌باشد.



شکل ۱. منطقه‌بندی اولیه ۱۸ گانه محدوده معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات بر روی تصویر Google Earth.

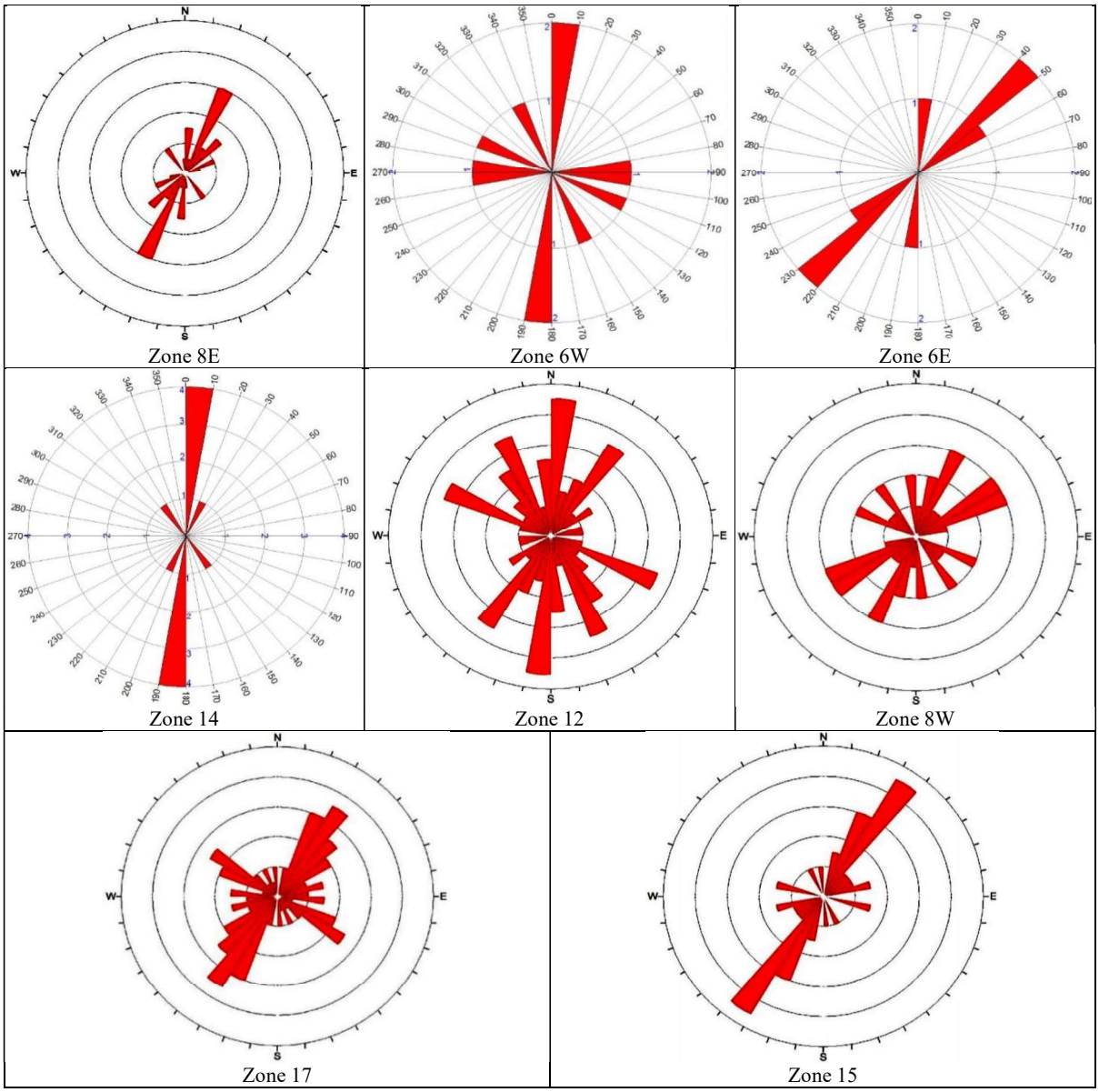
۳. مواد و روش‌ها

به‌دلیل توسعه بیشینه سینه‌کارها نسبت به وسعت محدوده، پوشش سنگ کف زیرین با حجم بالایی از دپوی خاک و باطله و سنگ‌لاشه و عدم امکان دسترسی به ماده معدنی در برخی قسمت‌ها، اکتشافات جدیدی در محدوده معدن تراورتن حاجی‌آباد صورت گرفته است. برای بررسی وضعیت ساختاری و تکتونیکی در سطح محدوده حاجی‌آباد، ابتدا مطالعات درزه-نگاری در زون‌های مختلف تشکیل‌دهنده محدوده صورت گرفت. سپس نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ محدوده تهیه شد (حاجی، ۱٤۰۰). به‌منظور اکتشاف ذخایر جدید، دسترسی به ماده‌سنگ، تعیین کیفیت، میزان ضخامت و درنتیجه میزان ذخیره ماده معدنی عمقی، در محدوده معدن تعداد ۹۰ حلقه گمانه اکتشافی قائم همراه با مغزه‌گیری به‌نام‌های BH1 تا BH90 با طول مجموع ٦٦۳/۳۵ متر حفاری شده است.

۱-۳. بررسی ساختاری و تکتونیکی محدوده

ازآنجایی‌که فعالیت‌های تکتونیکی موجب شکستگی‌های ساختاری و خردشدگی سنگ می‌شوند و درنتیجه مستقیماً بر روی کیفیت و سلامت سنگ و میزان کوپ‌دهی تاثیر می‌گذارند، ویژگی‌های ساختاری محدوده بویژه واحدهای تراورتن و تراورتن مارنی، مورد بررسی قرار گرفت. در محدوده مورد مطالعه در بعضی از مناطق، تغییرات لایه‌بندی و وجود لایه-بندی‌های ظریف کیفیت سنگ را تحت تاثیر قرار می‌دهد و به‌هنگام جداسازی بلوک از سینه‌کار منجر به شکست بلوک بزرگ، تبدیل آن به قطعات کوچک‌تر و درنتیجه تولید بلوک-های سنگی با ابعاد کوچک‌تر از حد مطلوب می‌شود. اما مسئله مهم‌تر در مطالعات ساختاری، بررسی وضعیت درزه و شکاف-ها، شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در محدوده است. در شکل نمودار گل سرخ (Rose diagram) شکستگی‌های برداشت شده بصورت میدانی در زون‌های مختلف محدوده تراورتن حاجی

آباد نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که بطورکلی فراوانی شکستگی‌ها در زون‌های مختلف و درنتیجه کل محدوده تراورتن حاجی‌آباد نسبتاً زیاد است و محدوده از نظر تکتونیکی تاحدودی فعال بوده است. هرچند برپایه شواهد میدانی، شدت فعالیت‌های تکتونیکی در محدوده به‌اندازه‌ای نیست که منجر به ایجاد شکستگی‌های بزرگ و خردشدگی سنگ‌ها شده باشد و سلامت سنگ را به‌شدت تحت تاثیر قرار دهد. امتداد عمومی شکستگی‌ها نیز اغلب در راستای شمال‌شرقی- جنوب‌غربی و بعضاً شمالی- جنوبی و شمال-غربی- جنوب‌شرقی است.



شکل ۲. نمودار گل‌سرخ درزه‌های برداشت‌شده در زون‌های مختلف معدن تراورتن حاجی‌آباد محلات.

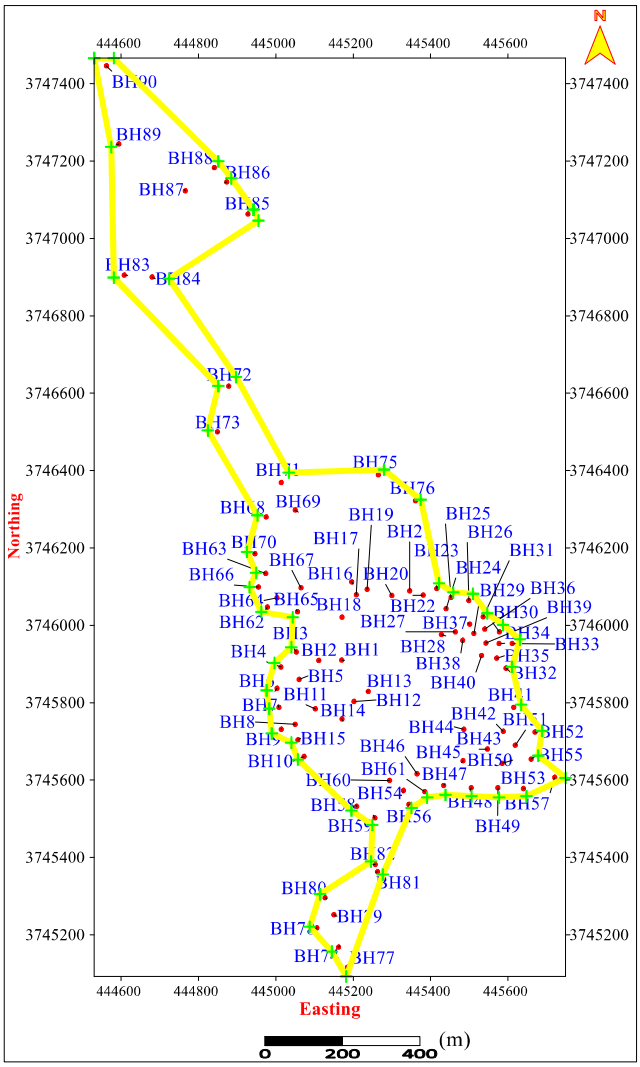
۲-۳. *بررسی وضعیت و مشخصات گمانه‌ها*

شکل ۳ نقشه موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد را نشان می‌دهد (دوایر توپر قرمزرنگ). در این شکل حدومرز نهایی ماده معدنی در سطح محدوده نیز با درنظرگرفتن شعاع تاثیری در حدود ۲۰ متر برای گمانه‌های مرزی تعیین شده است. مطابق این شکل اغلب گمانه‌ها در نیمه جنوبی محدوده و بصورت متمرکز حفاری شده‌اند. تمامی مغزه‌های حاصل از حفر گمانه‌های اکتشافی، بطور دقیق مورد

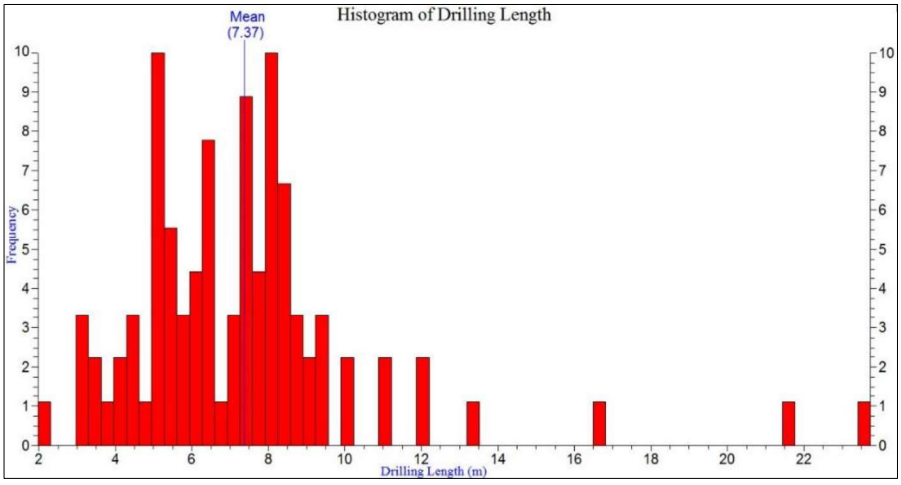
مطالعه قرار گرفته و براساس مطالعات چشمی آنها، مشخصات زمین‌شناسی شامل سنگ‌شناسی، رنگ ظاهری، وجود درزه‌و-شکاف‌ها، شکستگی‌ها و خردشدگی‌ها، حفرات و فضاهای خالی و ناخالصی‌های همراه با لیتولوژی ثبت شده است. همچنین مقادیر RC و RQD مغزه‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی براساس دورهای حفاری (فواصل عمقی متناظر با طول محفظه مغزه‌گیر یاBoring cylinder) محاسبه شده است.

شکل ٤ نمودار هیستوگرام طول حفاری گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که میانگین طول کل گمانه‌های اکتشافی معدن برابر با ۷/۳۷ متر است و ۹۵ درصد گمانه‌ها نیز طولی کمتر از ١٤ متر دارند. مشخصات کامل گمانه‌های اکتشافی حفاری‌شده در محدوده بعد از پردازش‌های اولیه داده‌های حاصل، در جدول ۱ آورده شده‌اند. در این جدول، گمانه‌های حفاری‌شده در هر زون، عمق کلی (Total depth) و میزان ضخامت ماده معدنی در هر گمانه (مجموع ضخامت لیتولوژی‌هایی که به-عنوان ماده معدنی محسوب می‌شوند)، ارتفاع برش بلوک استخراجی در آینده براساس اطلاعات گمانه اکتشافی حفاری-شده، متوسط مقادیر RQD در هر گمانه، درصد کوپ‌دهی سنگ براساس ویژگی‌های هر گمانه و درنهایت متوسط کوپ-دهی سنگ در هر زون، آورده شده است. مطابق داده‌های این جدول کوتاه‌ترین و بلندترین گمانه‌های حفاری‌شده در کل محدوده، به‌ترتیب BH14 با طول ۲/۳ متر و BH4 با طول ۲۳/۵ متر هستند.

در معدن تراورتن حاجی‌آباد، انواع تراورتن با ویژگی‌های فیزیکی مختلف (رنگ ظاهری، میزان تخلخل، درجه خلوص و غیره) و تراورتن مارنی (نامیده شده با نام محلی دژ در محدوده) به‌عنوان ماده معدنی محسوب شده و سایر انواع لیتولوژی همانند لایه‌های رسی، شیلی، مارنی، کنگلومرایی و ماسه‌سنگی به‌عنوان باطله تلقی می‌شوند. در این معدن واحد کنگلومرایی به‌عنوان سنگ‌کف (Basement) شناخته شده و در حین حفر گمانه‌های اکتشافی در اغلب موارد به‌محض برخورد با لایه کنگلومرایی، عملیات حفاری متوقف شده است. ارتفاع برش بلوک سنگی نیز براساس عمق نهایی ماده معدنی در هر گمانه تعیین شده است. برای هر گمانه، مقدار متوسط RQD برای مغزه‌های مربوط به ارتفاع برش بلوک سنگی تعیین‌شده آن گمانه، محاسبه شده است. درصد کوپ‌دهی سنگ برای هر گمانه نیز براساس نسبت ضخامت ماده معدنی در هر گمانه به ارتفاع برش بلوک سنگی مربوط به آن گمانه، ضرب‌در مقدار متوسط RQD آن گمانه محاسبه شده است. براساس داده‌های جدول ۱، در زون‌های L10 و ۸ غربی (8W) که تنها یک گمانه حفاری شده و آن گمانه نیز فاقد ماده معدنی می‌باشد، بطور کاملاً بدیهی میزان کوپ‌دهی سنگ برابر با صفر است. کمترین و بیشترین مقدار متوسط کوپ‌دهی سنگ به‌ترتیب برابر با ٤١ درصد مربوط به زون ۸ شرقی (8E) و ٧٦ درصد مربوط به زون ٦ شرقی (6E) می‌باشد. میانگین کوپ‌دهی سنگ در کل محدوده نیز از طریق متوسط‌گیری کوپ‌دهی در زون‌های مختلف، برابر با ٦٣ درصد است. البته ازآنجایی‌که طول حفاری گمانه‌های مختلف با یکدیگر برابر نیست و به‌هنگام استخراج می‌بایست کف‌بری بلوک‌های سنگی بصورت یک سطح مسطح افقی باشد و نیز تاثیر عوامل مختلف همانند عدم یکپارچگی و یکنواختی جنس سنگ (وجود ناخالصی‌ها، میان‌لایه‌ها و لایه-بندی‌های ظریف)، فعالیت‌های تکتونیکی محدوده (وجود درزه‌وشکاف‌ها، شکستگی‌ها و خردشدگی‌ها)، شرایط هوازدگی و دگرسانی، نوع و کارآیی دستگاه‌ها، تجهیزات و ماشین‌آلات استخراجی و غیره، در عمل میزان کوپ‌دهی سنگ‌ها به‌مراتب کمتر از مقدار محاسبه‌شده و در حدود ۳۰ درصد می‌باشد.



شکل ۳. نقشه موقعیت پراکندگی گمانه‌های اکتشافی در سطح محدوده تراورتن حاجی‌آباد همراه با نمایش حدومرز ماده معدنی (خط ضخیم زردرنگ).



شکل ٤. هیستوگرام طول حفر گمانه‌های اکتشافی در معدن تراورتن حاجی‌آباد.

جدول ۱. مشخصات گمانه‌های اکتشافی حفرشده در معدن تراورتن حاجی‌آباد.

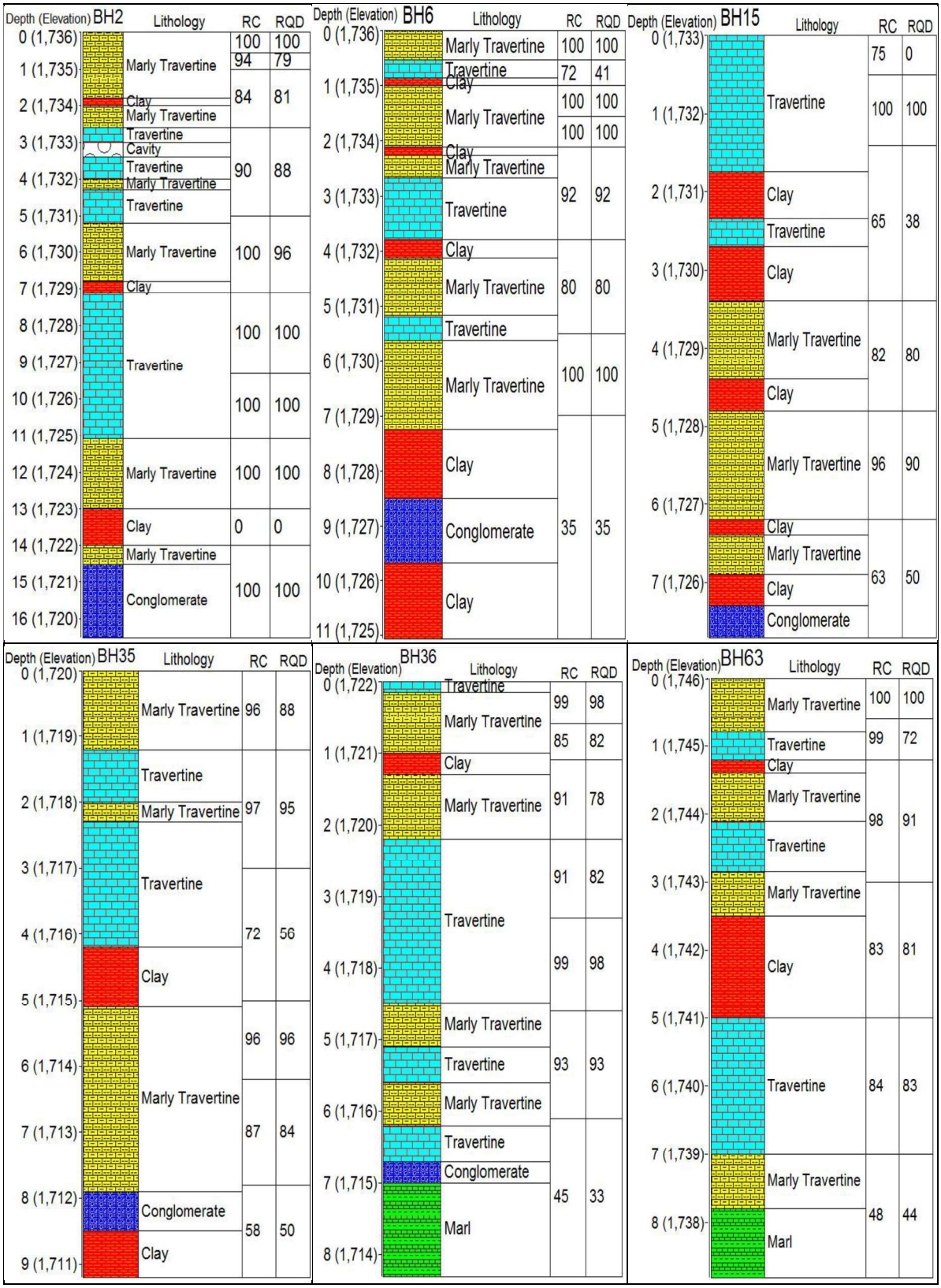
Zone of borehole drilling	Borehole name	Total depth (m)	Thickness of mining deposit (m)	Height of block (m)	Average RQD (%)	Block quarrying (%)	Average block quarrying (%)
Zone 14	BH1	6.4	2.1	2.6	77.33	62.46	64
	BH2	16.5	12.4	14.5	84.33	72.12	
	BH3	21.5	8.65	9.6	85.5	77.04	
	BH4	23.5	7.95	9.8	88.87	72.09	
	BH5	11.9	10.35	10.6	94.65	92.42	
	BH6	11.05	6.63	7.24	81.005	74.18	
	BH7	9.5	6.1	6.81	90	80.62	
	BH8	10.9	6.55	7.51	80.9	70.56	
	BH9	7.2	6.1	6.7	88.16	80.27	
	BH11	6.5	2	3.7	86.5	46.76	
	BH15	7.7	4.5	6.9	59.66	38.91	
	BH18	5.4	1	1	77	77.00	
	BH62	6.5	0	0	0	0.00	
	BH63	8.8	6.1	7.8	78.5	61.39	
	BH64	8	6.2	7.2	75.66	65.15	
	BH65	9.5	6.5	8.5	69.5	53.15	
	BH66	5.5	2.85	3.4	73.25	61.40	
	BH67	8	6.4	7	68.6	62.72	
Zone 6W	BH13	5.8	4.3	4.9	82.6	72.49	68
	BH16	5.7	1.9	1.9	89	89.00	
	BH17	7	6	6	52.86	52.86	
	BH19	6.5	5.05	6	78.6	66.16	
	BH20	13.5	9.85	12.1	87.8	71.47	
	BH21	10	10	10	59.22	59.22	
Zone 1	BH10	6.6	5.06	5.06	97.2	97.20	67
	BH12	4	3.6	3.6	84.75	84.75	
	BH14	2.3	0.3	0.5	31	18.60	
Zone 6E	BH22	10	8.6	9.3	63	58.26	76
	BH23	7.5	3.9	4.5	48	41.60	
	BH24	3.9	1.2	1.2	97	97.00	
	BH25	4	1.1	1.1	98.5	98.50	
	BH26	3.5	0.2	0.2	100	100.00	
	BH27	8	5.3	5.5	76	73.24	
	BH28	7.5	1	1	96.5	96.50	
	BH29	8	6.4	6.8	67.12	63.17	
	BH30	8.3	6.3	6.3	82.83	82.83	
	BH31	8.1	5	5.5	87.4	79.45	
	BH32	8	5.8	6.6	71.6	62.92	
	BH33	8.5	6.35	7.35	84	72.57	
	BH34	8.9	6.8	7.9	81.75	70.37	
	BH35	9.2	7	7.9	83.8	74.25	
	BH36	8.3	6.4	6.7	80.57	76.96	
	BH37	7.5	5.2	5.2	80.2	80.20	
	BH38	8	5.3	5.3	87.5	87.50	
	BH39	7.5	3.25	4.8	72.8	49.29	
	BH40	7.9	7.8	7.9	68.71	67.84	
	BH45	7.5	1.4	1.4	90.33	90.33	
	BH51	8.5	4	7	89	50.86	
	BH56	9.4	2.8	2.8	95	95.00	
	BH60	6.5	1	1	97.5	97.50	
	BH61	6	4	4	92.5	92.50	
	BH70	12	4.4	8	66	36.30	
Zone L10	BH83	4.5	0	0	0	0.00	0
Zone S3	BH76	7	3.7	4	61.6	56.98	57
Zone 12	BH41	7.5	3.8	5.8	64.6	42.32	61
	BH42	7.9	0.9	6	66.16	9.92	
	BH43	7.5	2.95	4.5	82.2	53.89	
	BH44	8	4.9	5.5	87.8	78.22	

	BH46	8.5	6.1	7	87.83	76.54	
	BH47	6.2	6.2	6.2	41.8	41.80	
	BH48	9	6.5	6.5	89.66	89.66	
	BH49	8	6	6	86.8	86.80	
	BH50	7.9	4.2	7	75.4	45.24	
	BH52	8.8	6	8.6	78	54.42	
	BH53	6	4	4	83.33	83.33	
	BH54	8.3	3.95	6.7	85.83	50.60	
	BH55	4.8	2.7	2.7	86.66	86.66	
	BH57	4.5	2.9	3.4	79.25	67.60	
	BH58	6.5	3	3	41	41.00	
	BH59	5.8	2.9	3.3	73.5	64.59	
	BH68	6	1.5	1.5	66	66.00	
	BH69	4.5	1.8	2	91.5	82.35	
Zone 17	BH71	5	1.4	1.4	76	76.00	48
	BH72	5	0	0	0	0.00	
	BH73	7.4	2	3	25.5	17.00	
	BH74	5	3.5	4	41.25	36.09	
	BH75	6.5	4.3	4.3	92.4	92.40	
	BH77	5	4.5	4.5	51.16	51.16	
Zone 15	BH78	5.5	3.6	3.6	81	81.00	65
	BH79	5	2.4	2.4	82	82.00	
	BH80	5.5	1.4	1.4	89.5	89.50	
	BH81	3	0	0	0	0.00	
	BH82	5	4	4	88.4	88.40	
	BH85	5	1.5	1.5	21	21.00	
	BH86	5.5	0	0	15	0.00	
Zone 8E	BH87	5	1.6	1.6	90	90.00	41
	BH88	3.5	0.7	0.7	92.5	92.50	
	BH89	3	0	0	0	0.00	
	BH90	3	0.9	0.9	40	40.00	
Zone 8W	BH84	5	0	0	0	0.00	0

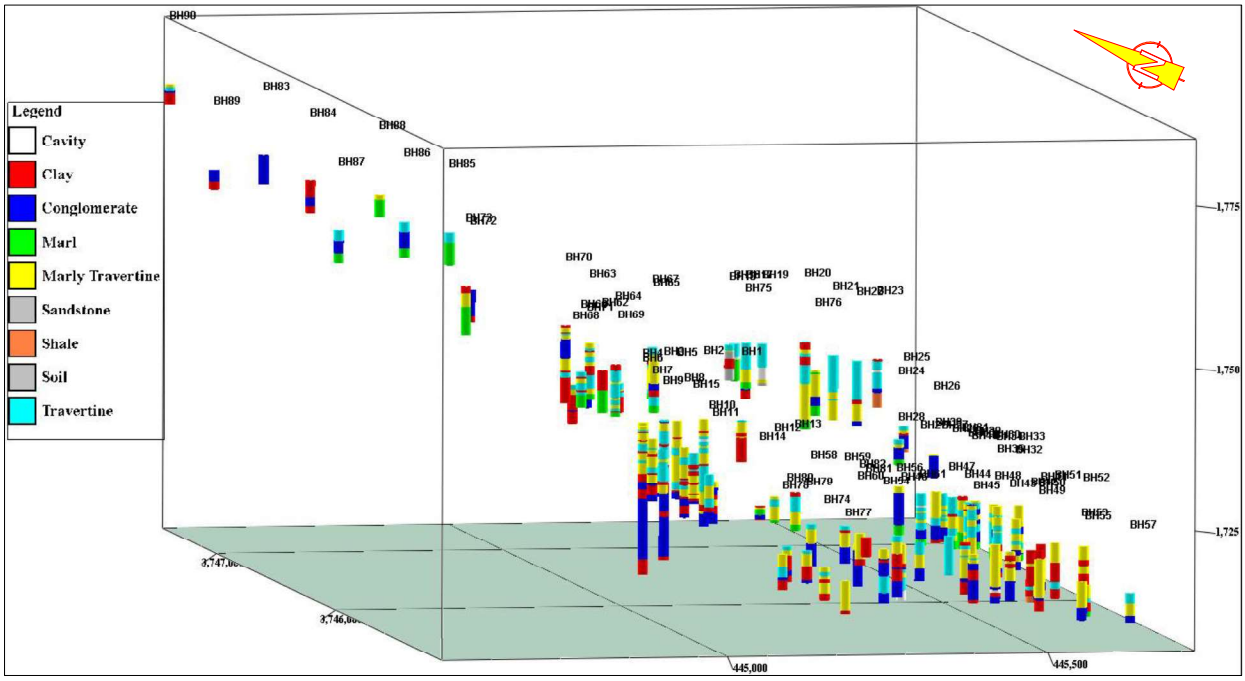
٤. بحث و نتایج

٤-١. تحلیل اکتشافی محدوده با گمانه‌ها

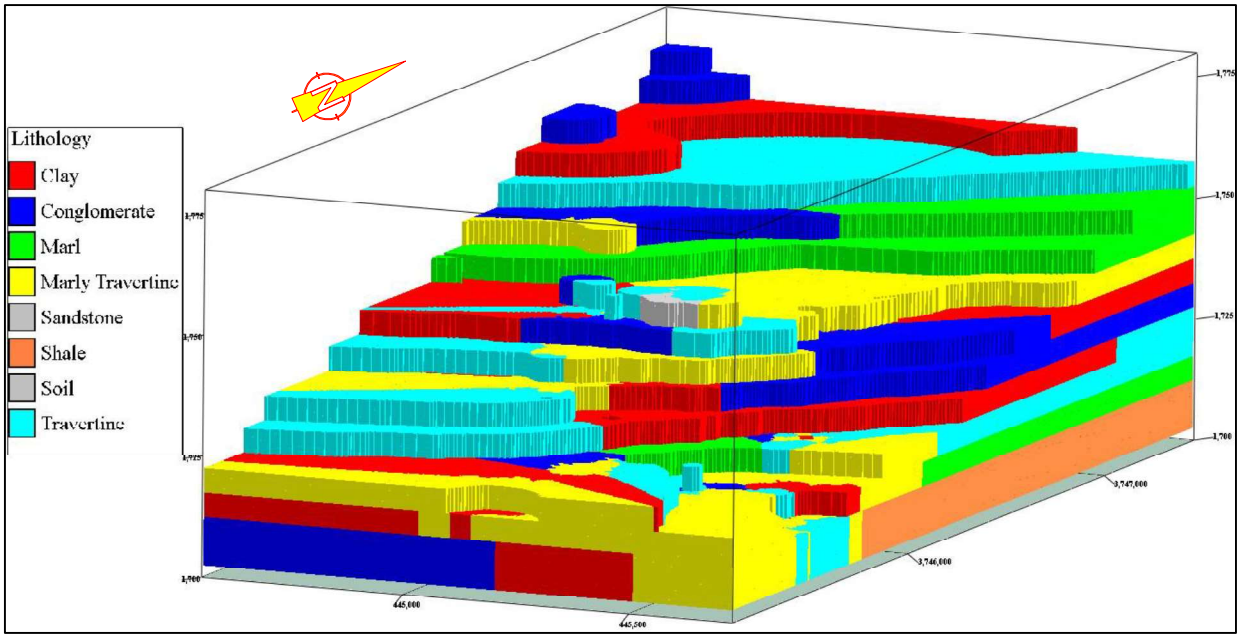
به‌منظور تجسم و نمایش بهتر، در شکل ٥ چاه‌نگار (Strip-log) دوبعدی زمین‌شناسی- ژئومکانیکی تعدادی از گمانه‌های اکتشافی شاخص معدن تراورتن حاجی‌آباد بصورت مجزا از هم با استفاده از نرم‌افزار RockWorks2022 ترسیم شده است. در این چاه‌نگارها علاوه بر ستون سنگ‌شناسی، تغییرات عمقی مقادیر RC و RQD نیز نشان داده شده اند. شکل ٦ نیز چاه‌نگار سه‌بعدی سنگ‌شناسی تمام گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد را با استفاده از مغزه‌های حاصل از حفاری گمانه‌ها نشان می‌دهد. به‌دلیل کم‌بودن طول (عمق) اغلب گمانه‌ها، در این شکل برای دید بهتر، ارتفاع گمانه‌ها تا ١٠ برابر بزرگ‌نمایی (Exaggeration) شده است. در شکل ٧ نیز مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد نشان داده شده است. براساس راهنمای رنگی این شکل، تنوع سنگ-شناختی در محدوده نسبتاً زیاد است. مطابق این شکل، تراورتن، تراورتن مارنی (دژ)، شیل، مارن، رس، کنگلومرا و ماسه‌سنگ عمده‌ترین واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده محدوده می‌باشند. بطورکلی واحدهای سنگی تراورتن و تراورتن مارنی در سطح محدوده، بیشتر به‌چشم می‌خورند. برای ساخت مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی نیز به‌منظور طرح اختلاط لیتولوژی، از الگوریتم اختلاط تصادفی به‌همراه درونیابی مقادیر خارج از محدوده استفاده شده است. این الگوریتم مدلسازی سنگ‌شناختی خاص، اساساً برای پرکردن فضای خالی بین چاه‌نگارها استفاده می‌شود. درونیابی مقادیر خارج از محدوده نیز همانند عملیات برون‌یابی است که منجر به درونیابی کامل و به‌نقشه درآمدن تمام محدوده



شکل ۵. چاه‌نگار دوبعدی زمین‌شناسی- ژئومکانیکی تعدادی از گمانه‌های اکتشافی شاخص معدن تراورتن حاجی‌آباد.



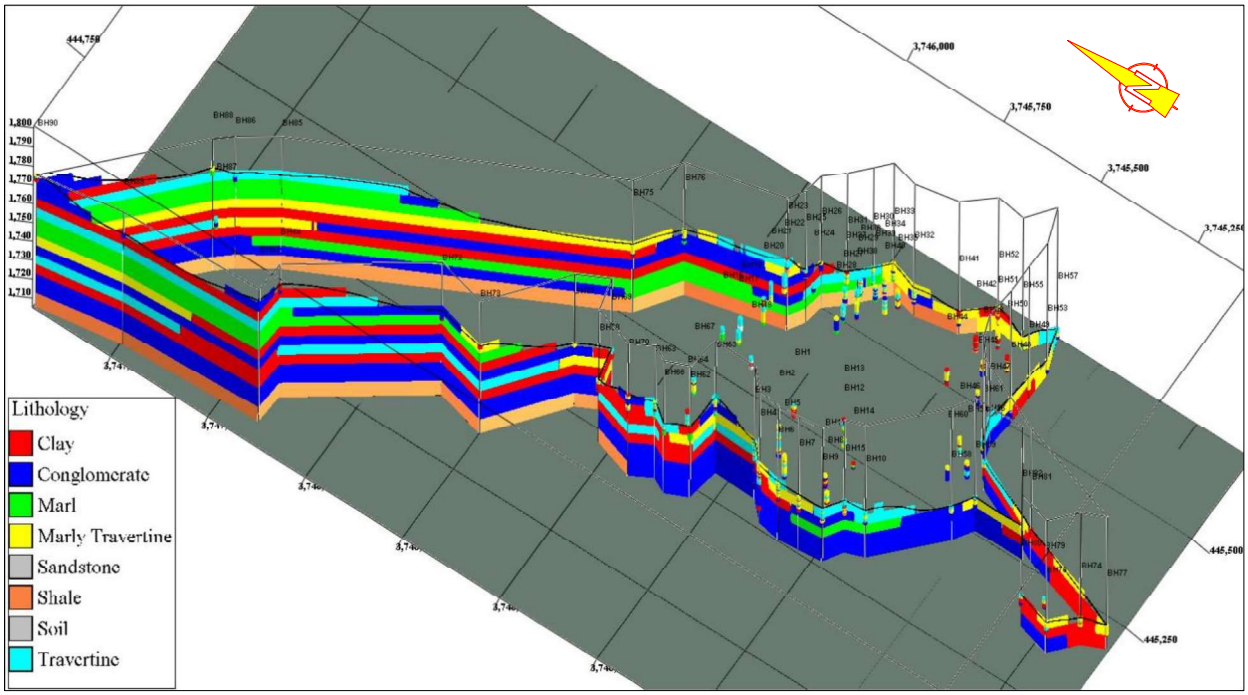
شکل ٦. نمایش چاه‌نگار سه‌بعدی سنگ‌شناسی گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد (واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد).



شکل ۷. نمایش مدل سه‌بعدی سنگ‌شناسی گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد (واحد اندازه‌گیری اعداد محورهای افقی و قائم، متر می‌باشد).

بویژه حاشیه‌ها می‌شود (Tutorial– RockWare). به‌منظور نمایش بهتر نحوه تغییرات لیتولوژی درون محدوده معدن تراورتن حاجی‌آباد، در شکل ۸ نمودار نرده‌ای (Fence diagram) سه‌بعدی تغییرات لیتولوژی مرزی محدوده حفر گمانه‌های اکتشافی نشان داده شده است. در این شکل، نقشه انتخاب خط مرزی محدوده در بالا و نقشه تغییرات لیتولوژی

در پایین آن آورده شده است. افزودنی است که به‌دلیل کم‌بودن عمق اغلب گمانه‌ها، هم در شکل ۷ و هم در شکل ۸ برای دید بهتر، ارتفاع گمانه‌ها تا ۱۰ برابر بزرگ‌نمایی شده است. میزان حجم و جرم انواع لیتولوژی‌های موجود در محدوده حفر گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد متناظر با شکل ۷ درون محدوده نظیر شکل ۱، در جدول ۲ آورده شده است. بدیهی است که میزان جرم هر نوع لیتولوژی از حاصل‌ضرب حجم در جرم مخصوص آن به‌دست آمده است. ضمناً جرم مخصوص تراورتن حاجی‌آباد براساس نتیجه آزمایش یک نمونه سنگ، برابر با ۲/٦ و تراورتن مارنی (دژ) برابر با ۲/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب منظور شده است. با توجه به داده‌های این جدول مشاهده می‌شود که جرم (میزان ذخیره برجای) ماده معدنی (مجموع تراورتن و تراورتن مارنی) در محدوده حفر گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد برابر با ۵۸٦۸٤۳۹ تن می‌باشد.



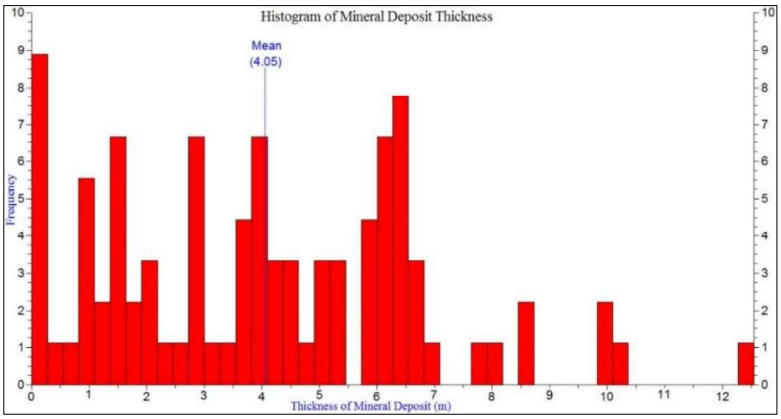
شکل ۸. نمودار نرده‌ای تغییرات لیتولوژی مرزی گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.

جدول ۲. حجم و جرم انواع سنگ‌های موجود در محدوده حفر گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.

Rock type	Volume (m^3)	Density (gr/cm^3)	Mass (t)
Travertine	1173688	2.6	2934220
Marly travertine	1173687	2.5	2934219
Conglomerate	3407460	2.2	7496412
Shale	1970790	2.3	4532817
Marl	1866405	2.3	4292731.5
Sandstone	5610	2.6	14586
Clay	2719305	2.1	5710540.5

بررسی آماری میزان ضخامت ماده معدنی در گمانه‌های زون‌های مختلف معدن تراورتن حاجی‌آباد به‌کمک جدول ۱ نشان می‌دهد که گمانه‌های BH62، BH83، BH72، BH81، BH86 و BH89 و BH84 فاقد ماده معدنی هستند. بیشترین میزان ضخامت ماده معدنی برابر با ۱۲/٤ متر در گمانه BH2 می‌باشد و میانگین ضخامت ماده معدنی در کل محدوده نیز برابر با ٤/۰۵ متر می‌باشد.

در شکل ۹ نمودار هیستوگرام ضخامت ماده معدنی در گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که میانگین ضخامت ماده معدنی در گمانه‌های اکتشافی برابر با ٤/۰۵ متر می‌باشد و ضخامت ماده معدنی در ۹۵ درصد از گمانه‌ها کمتر از ۹ متر است.



شکل ۹. هیستوگرام ضخامت ماده معدنی در گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.

به‌منظور تجسم بهتر در شکل ۱۰ نقشه دوبعدی هم‌ضخامت ماده معدنی (Isopach) و نقشه سه‌بعدی ذخیره برجای ماده معدنی براساس داده‌های گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد ترسیم شده است. مطابق این شکل، ضخامت ماده معدنی در بخش شمال‌غربی محدوده کمتر از سه متر است ولی در نیمه جنوبی محدوده در اغلب قسمت‌ها بیشتر از چهار متر می‌باشد.

۲-٤. تحلیل ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ تراورتن حاجی‌آباد

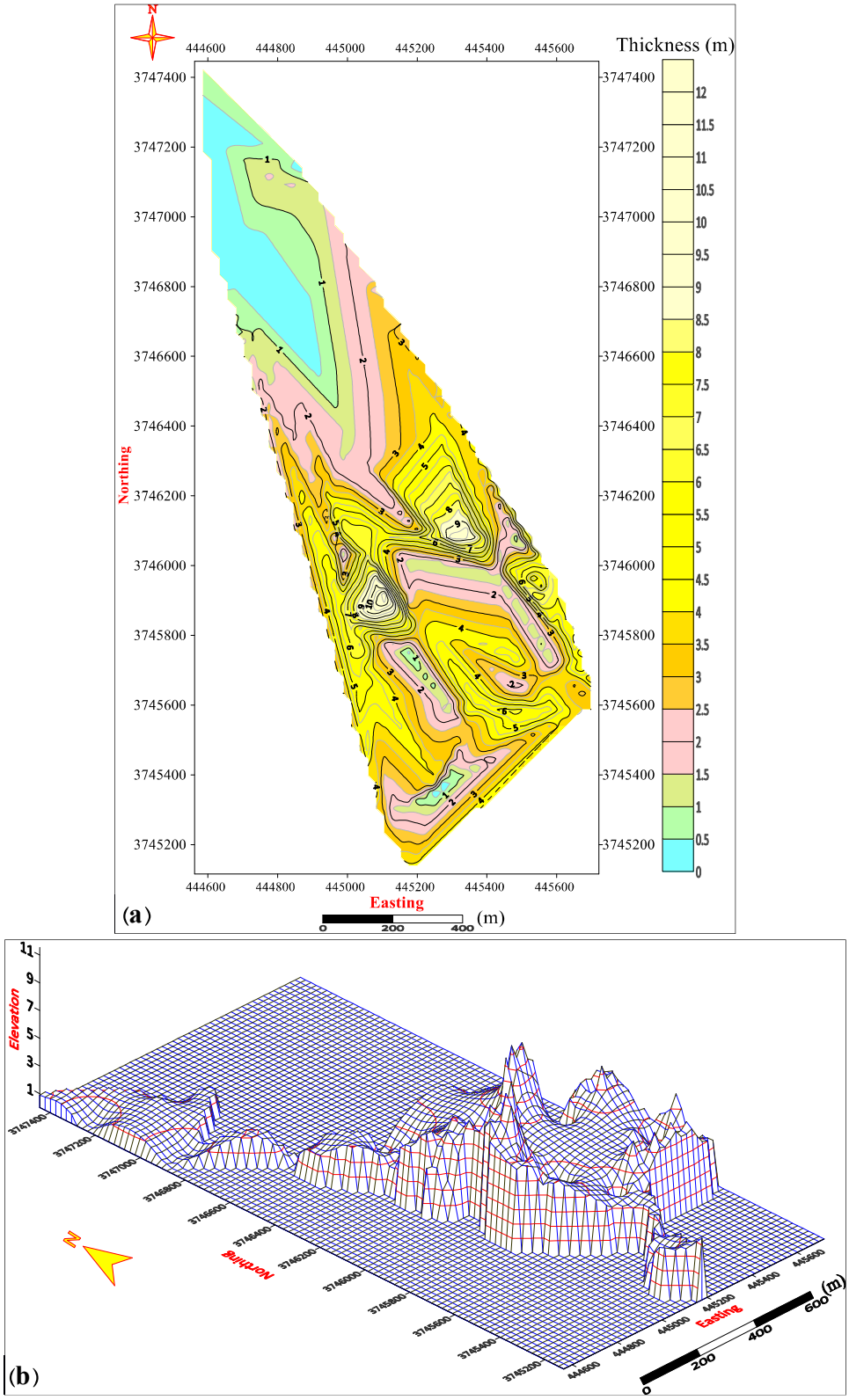
۱-۲-٤. تجزیه‌وتحلیل داده‌های RC

پارامترهای آماری مقادیر داده‌های RC گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد در جدول ۳ خلاصه شده است. در شکل ۱۱ نیز نمودار هیستوگرام داده‌های RC نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول ۳ و شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که میانگین داده‌های RC گمانه‌های اکتشافی برابر با ۷۷/٤ درصد می‌باشد. همچنین توزیع این داده‌ها نامتقارن بوده و دارای چولگی به سمت راست (چولگی منفی) است که داده‌های با RC برابر با ۱۰۰ درصد، بیشترین فراوانی را دارند. به‌عبارت‌دیگر بازیابی مغزه در گمانه‌های معدن تراورتن حاجی‌آباد نسبتاً بالاست که نشان از کیفیت نسبتاً بالای عملیات حفاری و ماده معدنی در محدوده دارد.

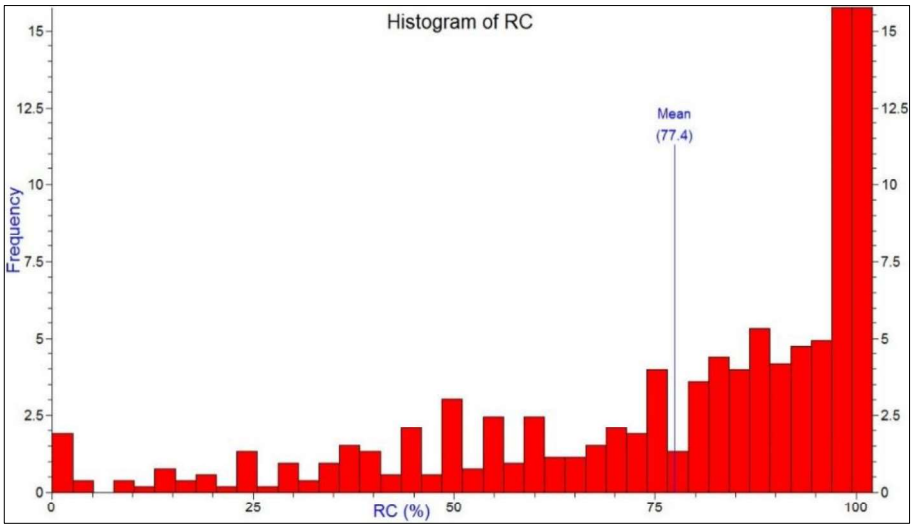
در شکل ۱۲ مدل سه‌بعدی (Solid model) داده‌های RC نمونه‌های گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد نشان داده شده است. برای ساخت این مدل از یک مدل شبکه‌ای اولیه مکعب‌مستطیلی شکل به‌ابعاد ۷۰×۲۳۳۵×۱۱٦۵ متر با سلول‌های ۵×۵×۵ متری به‌کمک الگوریتم عکس فاصله وزن‌دار پیشرفته (AIDW: Advanced inverse distance weighted) استفاده شده است. در این الگوریتم امکان وزن‌دهی فاصله با توان متفاوت در جهات مختلف وجود دارد. در این مورد به‌دلیل عدم جهت‌یافتگی مشخص، در هر دو جهت افقی و قائم وزن دو به داده‌ها نسبت داده شد. بیشترین تعداد داده‌های شرکت‌کننده در تخمین هر نقطه، در هر سلول ۲۰ عدد و در داخل گمانه، یک عدد انتخاب شد. راهنمای رنگی این شکل، تغییرات میزان RC در محدوده را بر حسب درصد نشان می‌دهد. مطابق این شکل تغییرات RC محدوده مورد مطالعه با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار ۱۰۰ درصد به ۲۰ محدوده رنگی با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. مطابق این شکل کیفیت عملیات حفاری در بخش بزرگی از محدوده بویژه در نیمه جنوبی، نسبتاً زیاد و بیش از ۸۰ درصد است.

جدول ۳. مشخصات آماری داده‌های RC گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.

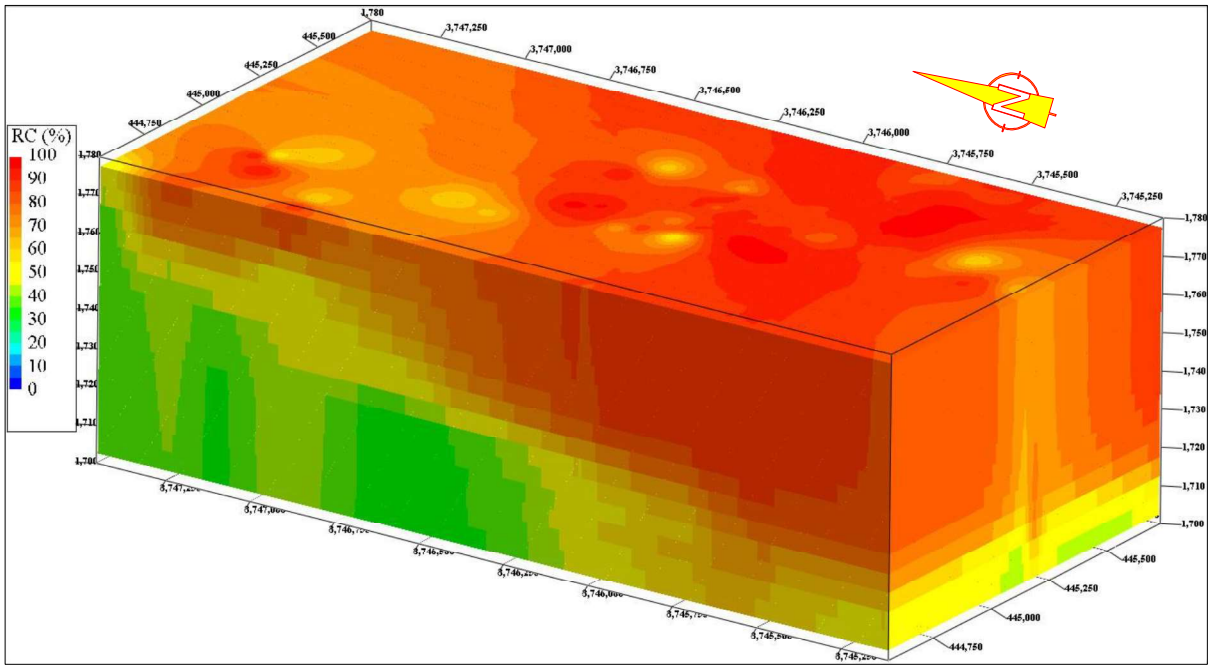
Number	Minimum (%)	Maximum (%)	Range (%)	Mean (%)	Median (%)	Variance $(\%)^2$	Standard Deviation (%)	Coefficient Of variation (%)	Skewness	Kurtosis
527	0	100	100	77.4	87	651	25.5	33	-1.26	0.77



شکل ۱۰. الف) نقشه دوبعدی هم‌ضخامت، ب) نقشه سه‌بعدی ذخیره برجای ماده معدنی در سطح محدوده حفر گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.



شکل ۱۱. هیستوگرام داده‌های RC گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.



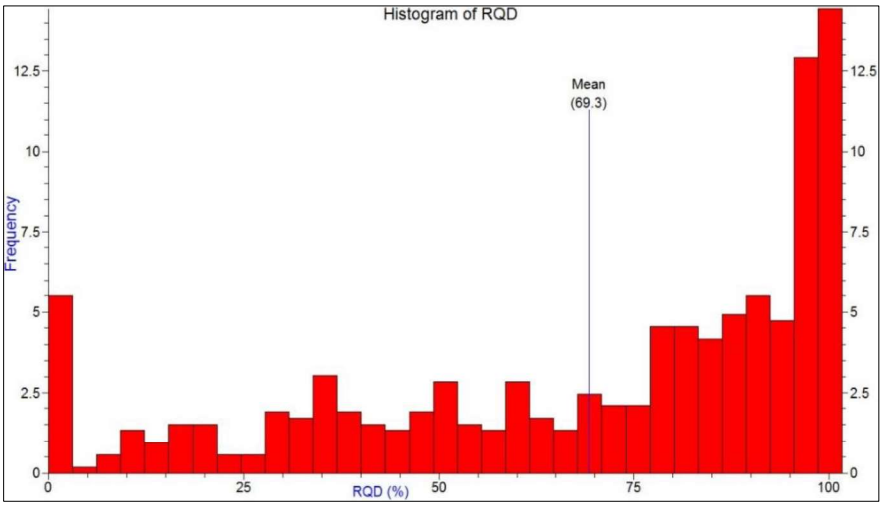
شکل ۱۲. مدل سه‌بعدی داده‌های RC گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.

۲-۲-٤. *تجزیه‌وتحلیل داده‌های RQD*

مشخصات آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد در جدول ٤ خلاصه شده است. در شکل ۱۳ نیز نمودار هیستوگرام داده‌های RQD این معدن نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول ٤ و شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که میانگین داده‌های RQD در گمانه‌های اکتشافی برابر با ٦۹/۳ درصد است. همچنین توزیع داده‌ها نامتقارن بوده و دارای چولگی به سمت راست (چولگی منفی) است که در آن داده‌های با RQD برابر با ۱۰۰ درصد، بیشترین فراوانی را دارند. به‌هرجهت فراوانی RQD صفر نیز نسبتاً بالاست. براساس این اطلاعات، درمجموع کیفیت سنگ تراورتن معدن حاجی‌آباد براساس رده‌بندی مهندسی سنگ‌ها با استفاده از معیار RQD (Deere, 1963) مطابق جدول ۵ در رده "نسبتاً خوب (Fair)" ارزیابی می‌شود.

جدول ٤. پارامترهای آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.

Number	Minimum (%)	Maximum (%)	Range (%)	Mean (%)	Median (%)	Variance $(\%)^2$	Standard Deviation (%)	Coefficient Of variation (%)	Skewness	Kurtosis
527	0	100	100	69.3	81	949.5	30.82	45	-0.86	-0.51



شکل ۱۳. هیستوگرام داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.

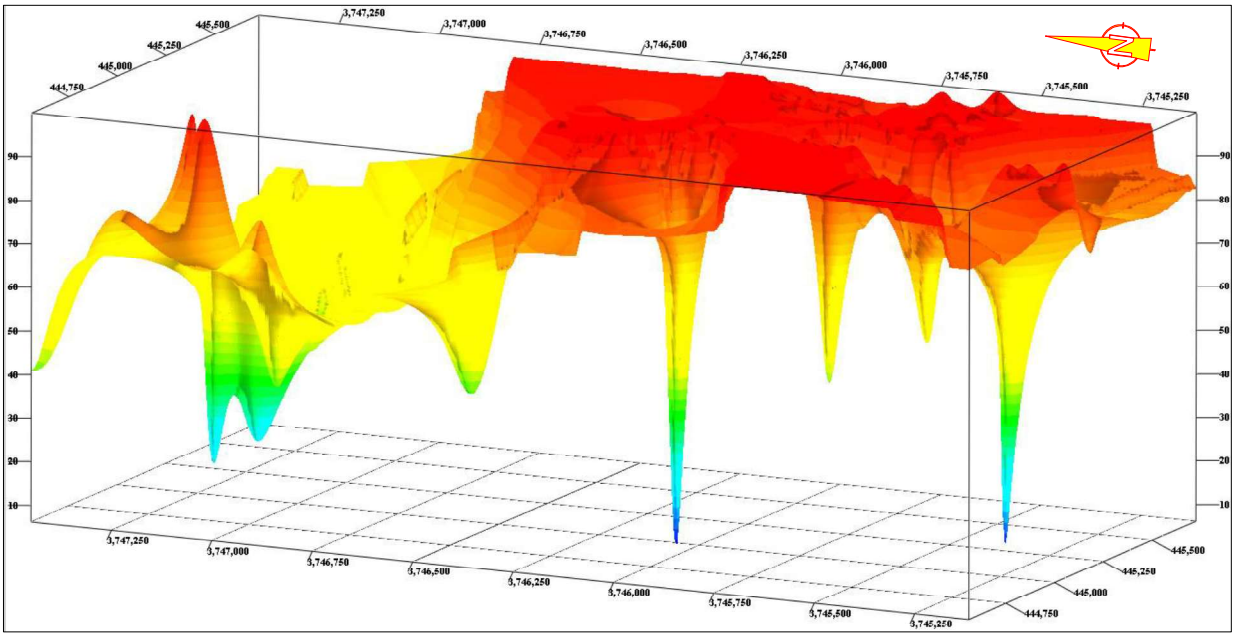
جدول ۵. رده‌بندی کیفی سنگ‌ها براساس معیار RQD (Abzalov, 2016).

RQD index (%)	Descriptive word
0-25	Very poor
25-50	Poor
50-75	Fair
75-90	Good
90-100	Excellent

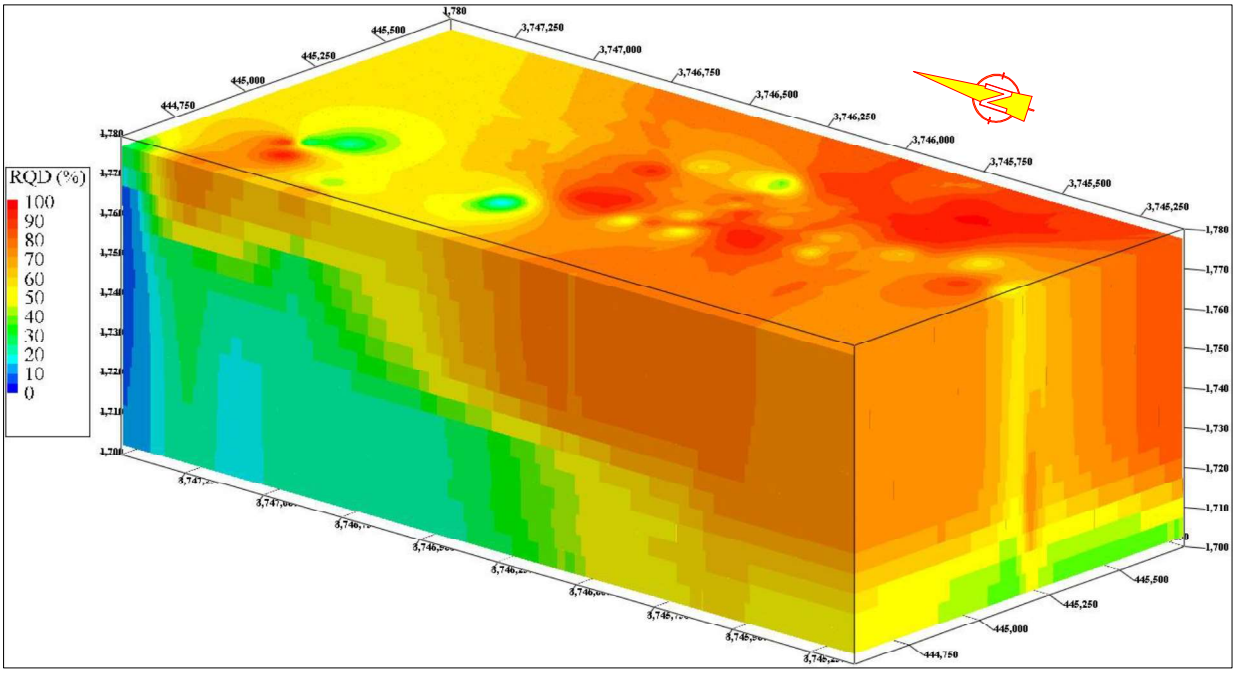
شکل ١٤ نقشه سه‌بعدی آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد را نشان می‌دهد. برای رسم این نقشه، ابتدا بیشترین مقدار RQD در هر گمانه به موقعیت دهانه آن گمانه نسبت داده شد، سپس شبکه‌بندی صورت گرفت و با استفاده از الگوریتم عکس مجذور فاصله، درونیابی انجام شد. ترکیب رنگ‌بندی هم بدین صورت است که به کمترین مقدار RQD رنگ آبی تیره، به مقدار متوسط، رنگ زرد و به بیشترین مقدار، رنگ قرمز تخصیص داده شده و در فاصله بین آنها ترکیب رنگی بطور خودکار از رنگ‌های سرد (Cold) به گرم (Hot) تغییر می‌کند. به‌منظور دید بهتر، در راستای قائم ۱۰ برابر بزرگ‌نمایی صورت گرفته است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بالاترین مقادیر RQD در گمانه‌های حفاری‌شده در سطح نیمه جنوبی محدوده، قرار دارند.

در شکل ۱۵ مدل سه‌بعدی داده‌های RQD معدن تراورتن حاجی‌آباد نشان داده شده است. ساخت این مدل نیز با استفاده از یک مدل شبکه‌ای مکعب‌مستطیلی به‌ابعاد ۷۰×۲۳۳۵×۱۱٦۵ متر با سلول‌های ۵×۵×۵ متری و داده‌های RQD نمونه‌های حفاری گمانه‌های اکتشافی، به‌کمک الگوریتم عکس فاصله وزن‌دار پیشرفته صورت گرفته است. به‌دلیل کم‌بودن طول اغلب گمانه‌ها در این شکل برای دید بهتر، ارتفاع گمانه‌ها تا ۱۰ برابر بزرگ‌نمایی شده است. بیشترین تعداد داده‌های شرکت‌کننده در تخمین هر نقطه، در هر سلول ۲۰ عدد و در داخل گمانه، یک عدد انتخاب شد. راهنمای رنگی این شکل تغییرات میزان RQD در محدوده را بر حسب درصد نشان می‌دهد که در آن تغییرات RQD محدوده مورد مطالعه با کمترین مقدار صفر و بیشترین مقدار ۱۰۰ درصد به ۲۰ محدوده رنگی با رنگ‌های مختلف تقسیم شده است. مطابق این شکل کیفیت سنگ تراورتن در چند قسمت در نیمه جنوبی، نسبتاً زیاد (بیش از ۸۰

درصد) است. با توجه به داده‌های جدول ۱ و شکل‌های ١٤ و ١٥ می‌توان گفت که درمجموع از نظر کیفی، مرغوبیت و کیفیت سنگ تراورتن حاجی‌آباد در زون‌های ٦ شرقی، ٦ غربی و ١٤ از سایر زون‌های دیگر بهتر است. اگرچه مقدار متوسط RQD در زون ١٥ نسبتاً بالاست، اما در این زون لیتولوژی غالب گمانه‌ها را تراورتن مارنی (دژ) تشکیل می‌دهد و ضخامت تراورتن مرغوب، کم است.



شکل ١٤. نقشه سه‌بعدی آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.



شکل ١٥. مدل سه‌بعدی داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی معدن تراورتن حاجی‌آباد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدلسازی زمین‌شناسی (لیتولوژی) و ژئومکانیکی (RC و RQD) سنگ تراورتن حاجی‌آباد براساس اطلاعات اکتشافی مغزه‌های حاصل از عملیات حفاری تعداد ۹۰ حلقه گمانه اکتشافی قائم، مورد مطالعه قرار گرفت. مدلسازی زمین‌شناسی به‌منظور بررسی جنس و نوع واحدهای لیتولوژی و تغییرات توالی‌های رسوبی انجام شد و مدلسازی ژئومکانیکی با هدف تعیین ساختار مقاومتی، یکنواختی، همگنی، وجود شکستگی‌ها و سلامت سنگ صورت گرفت. نتایج بررسی‌های ساختاری محدوده از طریق برداشت شکستگی‌ها در زون‌های مختلف محدوده و ترسیم نمودار گل سرخ در گام نخست، نشان داد که بطورکلی فراوانی شکستگی-ها در زون‌های مختلف و درنتیجه کل محدوده تراورتن حاجی-آباد نسبتاً زیاد است اما برپایه شواهد میدانی، فعالیت‌های تکتونیکی در محدوده منجر به خردشدگی سنگ‌ها نشده و سلامت سنگ را تحت تاثیر قرار نداده است. بررسی دقیق تمامی مغزه‌های حاصل از حفر گمانه‌ها نشان داد که بطورکلی تنوع سنگ‌شناختی در محدوده نسبتاً زیاد است و محدوده از هفت واحد لیتولوژی شامل تراورتن، تراورتن مارنی، رس‌ها، شیل، مارن، کنگلومرا و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. با محاسبه حجم و جرم انواع لیتولوژی‌های موجود در محدوده حفر گمانه‌های اکتشافی، ۵۸٦۸٤۳۹ تن ماده معدنی (مجموع تراورتن و تراورتن مارنی) با جرم مخصوص متوسط ۲/۵۵ گرم برسانتی‌متر مکعب بدست آمد که نشان از میزان ذخیره برجای زیاد و ارزش بالای ماده معدنی دارد. همچنین میانگین ضخامت ماده معدنی در کل محدوده، برابر با ٤/۰۵ متر محاسبه شد که ضخامت ماده معدنی در بخش شمال‌غربی محدوده کمتر از سه متر ولی در نیمه جنوبی محدوده، در اغلب قسمت‌ها بیشتر از چهار متر است. ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ تراورتن حاجی‌آباد نیز بر پایه داده‌های اندازه‌گیری شده RC و RQD مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که میانگین داده‌های RC گمانه‌های اکتشافی برابر با ۷۷/٤ درصد است که نشان از کیفیت نسبتاً بالای عملیات حفاری و ماده معدنی در محدوده دارد. برپایه مدل سه‌بعدی RC محدوده نیز کیفیت عملیات حفاری در بخش بزرگی از محدوده بویژه در نیمه جنوبی، نسبتاً زیاد و بیش از ۸۰ درصد است. به‌کمک این مدل سه‌بعدی می‌توان مقدار RC را در هر نقطه از فضای محدوده برآورد نمود.

میانگین داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی هم برابر با ٦۹/۳ درصد است که براساس رده‌بندی مهندسی سنگ‌ها با استفاده از معیار RQD درمجموع کیفیت سنگ تراورتن حاجی‌آباد، "نسبتاً خوب" ارزیابی می‌شود. ترسیم نقشه سه‌بعدی آماری داده‌های RQD گمانه‌های اکتشافی نیز نشان داد که بالاترین مقادیر RQD در گمانه‌های حفاری‌شده در سطح نیمه جنوبی محدوده، قرار دارند. به‌عبارت دیگر سلامت سنگ بر مبنای معیار RQD در نیمه جنوبی محدوده مورد مطالعه، بیشتر است. ساخت مدل سه‌بعدی داده‌های RQD هم نشان داد که مرغوبیت و کیفیت سنگ تراورتن حاجی‌آباد در زون‌های ٦ شرقی، ٦ غربی و ١٤ از سایر زون‌های دیگر بهتر است. با استفاده از این مدل می‌توان مقدار RQD را در هر نقطه از فضای محدوده مورد مطالعه برآورد نمود.

ذکر این نکته نیز لازم است که اگرچه شاخص RQD در تمامی زمینه‌های ارزیابی کیفی و رده‌بندی‌های مهندسی توده‌سنگ به-تنهایی کافی نیست، اما در مورد سنگ‌های ساختمانی این شاخص به‌تنهایی می‌تواند نشانه و دلیلی بر کیفیت سنگ باشد. بویژه در شرایط تصمیم‌گیری در مقیاس بزرگ همانند مطالعه موردی حاضر و یا موارد مشابه، که در آنها قبلاً از طریق انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی نقطه‌ای بر روی نمونه‌های مغزه‌ای، میزان مقاومت سنگ مشخص و قابل قبول می‌باشد و بایستی در مقیاس بزرگ کیفیت سنگ ارزیابی گردد، RQD کارآیی بالایی دارد. نتایج پژوهش حاضر برای کلیه کاربران علوم زمین بویژه زمین‌شناسان مهندس و مهندسین معدن درگیر با حوزه فعالیت معدنکاری سنگ‌های ساختمانی در زمینه برنامه‌ریزی و ارزیابی مفید خواهد بود.

منابع

احمدی، ر.، ۱۳۸۷. راهکارهای بهبود تکنولوژی تولید سنگ به‌منظور افزایش سهم صادرات سنگ فرآوری‌شده در استان مرکزی، تهران، معاونت پژوهشی دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷ص.

احمدی، ر.، ۱۳۹۵. راهکارهای بهبود مراحل زنجیره تولید صنعت سنگ ساختمانی کشور ایران- مطالعه میدانی: صنعت سنگ تراورتن منطقه محلات، مجله مهندسی منابع معدنی، دوره اول، شماره ۲، ٦٠-٤٧.

حاجی، ع.، ١٤٠٠. گزارش عملیات تهیه نقشه زمین‌شناسی و تکتونیک و تحلیل ساختاری معدن تراورتن حاجی آباد، شرکت معدن فرآور امداد (EMCO). ٤١ ص.

حمزه، ف.، شفیعی‌بافتی، ش.، ١٣٩٤. آنالیز خطوارگی در رخنمون‌های آهکی و اهمیت آن در بهینه‌سازی استخراج (مورد مطالعه: معادن سنگ ساختمانی کرمان)، فصلنامه علوم زمین، دوره ٢٤، شماره ٩٥، ١٩٦-١٨٥.

دهقان، س.، ستاری، ق.، چهره‌چلگانی، س.، ۱۳۸۷. تخمین مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ تراورتن محلات با استفاده از تخلخل و شاخص بار نقطه‌ای، دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، تهران.

ربیعی‌وزیری، م.، شفیعی‌بافتی، ش.، حسیبی، و.، ۱۳۹۳. تحلیل وضعیت ناپیوستگی‌ها به روش مونت کارلو و مقایسه آن با محاسبات نرم‌افزار Dips (بررسی موردی: معادن سنگ سعیدی کرمان)، زمین‌شناسی ایران، دوره ۸، شماره ۳۱، ٣٤-١٩.

شفیعی، ش.، عبادی، م.، ترکاشوند، م.، ۱۳۹۱. تحلیل ناپیوستگی‌ها در معادن سنگ ساختمانی و اهمیت آن در بهینه‌سازی استخراج (مورد مطالعه: معدن سنگ ساختمانی سعیدی، کرمان)، فصلنامه علوم زمین، ٨٤، ٩٨-٨٩.

الوان دارستانی، ر.، کوهی اصفهانی، و.، ۱۳۹۰. مطالعات درزه نگاری و بررسی‌های ژئومکانیکی در طراحی و استخراج معادن سنگ ساختمانی، مطالعه موردی: معدن مرمریت برد شیراز، زمین و منابع، دوره ٤ شماره ١، ١٦-١١.

Abzalov, M., 2016. Applied mining geology, Book chapter: Geotechnical logging and mapping Springer, 87–95.

Akingboye, A.S., 2023. RQD modeling using statistical-assisted SRT with compensated ERT methods: Correlations between borehole-based and SRT-based RMQ models, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 131, 103421.

Annels, A.E., Dominy, S.C., 2003. Core recovery and quality: important factors in mineral resource estimation, Applied Earth Science, 112 (3): 305-312.

ASTM (American Society for Testing and Materials), 1997. Standard test method for determining Rock Quality Designation (RQD) of rock core.

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley, 272P.

Carter, T.G., 1992. Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments. Proceeding of 4th International rock mechanics and rock engineering conference, Torino. Paper 1.

Deere, D.U., 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. Felsmechanik undIngenieurgeologie, 1: 16–22.

Deere, D.U., 1989. Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.

Goodman, R.E., 1991. Introduction to Rock Mechanics, 2nd edition, Wiley, 576P.

Hencher, S.R., 2015. Practical rock mechanics, Taylor & Francis group, London, 374P.

Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R., 2007. Fundamentals of Rock Mechanics, 4th edition, Wiley-Blackwell, 488P.

Lukić, D., Zlatanović, E., 2017. RQD classification of rock masses, 10th International scientific conference "Science and Higher Education in Function of Sustainable Development", Mećavnik – Drvengrad, Užice, Serbia.

Pells, P.J., Bieniawski, Z.T., Hencher, S.R., Pells, S.E., 2016. RQD: time to rest in peace, Canadian Geotechnical Journal, 54: 825–834.

www.rockware.com/Rockworks2022

Xu, S., Ma, J., Liang, R. et al., 2023. Intelligent recognition of drill cores and automatic RQD analytics based on deep learning, Acta Geotechnica, 18: 6027-6050.

Yong, Z., Peng, L., Fengyin, L., 2022. An improved method for estimating the strength of jointed rock mass using drilling technology, Geofluids, 2022: Article ID: 5212677, 12P.