

## تحلیل پایداری ساختگاه تونل حاجی‌آباد با استفاده از روش‌های تجربی و تعادل حدی

بهرروز مرگان<sup>۱</sup> و داود فریدونی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، سمنان، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، سمنان، ایران

نویسنده مسئول: d.fereidooni@du.ac.ir \*

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۲۲

دریافت: ۱۴۰۲/۴/۲۶

## چکیده

در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه تونل حاجی‌آباد در استان هرمزگان بررسی شده و تحلیل پایداری آن با روش‌های تجربی و تعادل حدی صورت گرفته است. ساختگاه این تونل با استفاده از روش BGD به ده واحد ژئوتکنیکی تقسیم شده که شامل  $T_1$  تا  $T_8$  و دو زون خردشده در واحدهای ۵ ( $T_{f1}$ ) و ۹ ( $T_{f2}$ ) می‌باشند. ناپیوستگی‌های در توده‌سنگ‌های ساختگاه تونل دارای مواد پرکننده کلسیتی و رسی هستند، سطح آن‌ها خشک تا مرطوب با میزان هوازگی کم است. زاویه اصطکاک داخلی سطوح این ناپیوستگی‌ها بین ۱۵ تا ۴۵ درجه، پیوستگی آن‌ها بین ۳ تا بیش از ۲۰ متر، فاصله‌داری آن‌ها بین ۰/۱۵ تا ۴ متر و بازشدگی آن‌ها بین ۰/۱ و ۵ میلی‌متر است. مقاومت فشاری سنگ‌های ساختگاه به جزء دو زون خردشده که شرایط متفاوتی دارند، از ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال متغیر است. درصد رطوبت نمونه‌های حاصل از گمانه‌های ساختگاه تونل بین ۲/۸۷ و ۰/۱۲ و تخلخل آن‌ها بین ۷/۳۳ و ۰/۳۲ درصد بوده است. با استفاده از نتایج RQD، سنگ‌های ساختگاه تونل در رده بسیار ضعیف (کمتر از ۲۵) تا خوب (حدود ۹۰) قرار می‌گیرند. با نتایج بدست آمده از روش RMR به سنگ‌های بخش‌های مختلف تونل امتیاز ۱۸ یعنی رده خیلی ضعیف تا ۶۲ یعنی رده خوب تعلق گرفت. همچنین با استفاده از روش Q، این سنگ‌ها دارای امتیاز ۰/۰۴ یعنی رده بی‌نهایت ضعیف و ۲/۸۳ یعنی رده ضعیف می‌باشند. نتایج روش GSI نشان داد که سنگ‌های ساختگاه از امتیاز ۱۵ (رده خیلی ضعیف) تا ۶۱ (رده خوب) قرار دارند. با استفاده از نرم‌افزار Unwedge.v.3.0 حداکثر و حداقل وزن گوه‌های تشکیل شده ۵۸۷۵ و ۰/۷۶ تن بدست آمد. همچنین، ضریب اطمینان از حدود ۰/۴۰ تا ۱۱۲ متغیر بوده که گوه‌هایی دارای ضریب اطمینان کمتر از ۱/۵، با نصب پیچ‌سنگ به ضریب اطمینان قابل قبول خواهند رسید.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شناسی مهندسی، ساختگاه، تونل حاجی‌آباد، تحلیل پایداری، تعادل حدی

## ۱- پیشگفتار

که بسیار مهم هستند و باید در هنگام مطالعه و ساخت تونل در نظر گرفته شوند. به عبارت دیگر برای حفاری و بهره‌برداری از تونلی ایمن و پایدار، مطالعه شرایط زمین‌شناسی ساختگاه آن از اهمیت زیادی برخوردار است (میرزاعبدالیوسفی و همکاران، ۲۰۱۲). پایداری تونل‌ها علاوه بر مشخصات سنگ و خاک ساختگاه، تحت تأثیر عوامل زیادی قرار دارد که مهم‌ترین آن‌ها شامل تنش‌های برجا و القایی، ساختارهای زمین‌شناسی، آب‌های زیرزمینی، عمق تونل، روش حفاری و دیگر پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی می‌باشند (کائو و همکاران، ۲۰۱۸؛ چائوکان و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین پیش‌بینی پایداری تونل‌ها به عنوان سازه‌های زیرزمینی به دلایل تأمین ایمنی و رفع محدودیت‌های ساختگاه بسیار مهم و ضروری است (سازید و همکاران، ۲۰۱۹). در این خصوص، بررسی

در مناطق صعب‌العبور کوهستانی که از لحاظ شرایط و وضعیت زمین‌شناسی برای احداث سازه‌های سطحی نامناسب هستند، هزینه و زمان زیادی را باید صرف احداث آن‌ها کرد. برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان و تأمین پایداری سازه‌های مهندسی در این‌گونه مناطق به ناچار باید آن‌ها را در درون زمین احداث کرد. بنابراین تونل‌ها و فضاهای زیرزمینی تقریباً در هر جایی که ممکن است تهیه مکان برای ساخت سازه در سطح زمین دشوار یا غیرممکن باشد، اجرا می‌شوند (گوئل و همکاران، ۲۰۱۲). سازه‌های مهندسی زیرزمینی، به طور دائم از زمین و محیط اطراف خود تأثیر می‌پذیرند (معماریان، ۲۰۱۲؛ رحیمی، ۲۰۱۳). از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی، برای طراحی تونل به عنوان یک سازه زیرزمینی، فاکتورهای مختلفی وجود دارد

همکاران، ۲۰۲۳). به عنوان مثال در یک پژوهش، نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود با روش تجربی رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ و نرم‌افزارهای CMRR<sup>۱</sup> (رده‌بندی سقف معدن زغال‌سنگ) و ARBS<sup>۲</sup> (تجزیه و تحلیل پیچ‌های سقف) مقایسه گردیده و مشخص شده است که نتایج حاصل از سیستم طبقه‌بندی FEM<sup>۳</sup> و RMR<sup>۴</sup> با سایر روش‌ها مطابقت دارد (راماساستری و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین، در پژوهش دیگری روش تجربی سیستم طبقه‌بندی کیفیت توده‌سنگ (Q) با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی مقایسه گردیده و مشخص شده است که نتایج حاصل از این دو روش با یکدیگر مطابقت خوبی دارند (لو و همکاران، ۲۰۲۲). این مطالعات و مطالعاتی دیگر انجام شده در این زمینه، ضرورت انجام مطالعات و بررسی‌های مهندسی ساختگاه تونل‌ها را بخوبی نشان می‌دهند. به همین دلیل در این پژوهش، تحلیل پایداری ساختگاه تونل حاجی‌آباد در استان هرمزگان با استفاده از روش‌های تجربی و تعادل حدی انجام شده است.

## ۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی عمومی ساختگاه تونل

طرح انتقال آب خلیج فارس به صنایع جنوب خاور کشور در قالب سه قطعه اصلی طراحی و اجرا می‌گردد که تونل حاجی‌آباد در مسیر قطعه اول که به طول ۳۰۰ کیلومتر از بندرعباس تا مجتمع گل‌گهر ادامه دارد. این تونل در غرب شهر حاجی‌آباد واقع شده است. با توجه به موقعیت پروژه و محدودیت‌های موجود و شرایط توپوگرافی منطقه، اجرای تونل مورد مطالعه به روش کند و پوش (روپاز) و روش مکانیزه استفاده از TBM<sup>۵</sup> عملی نبوده و از روش تونل‌سازی اتریشی (NATM<sup>۶</sup>) برای حفاری آن استفاده شده است. هندسه تونل پیشنهادی به صورت نعل‌اسبی پیش‌بینی شده است. طول تونل حدود ۱۵۶۸ متر می‌باشد و ابعاد نهایی و تمام شده آن با عرض کف ۸/۲ متر و ارتفاع ۷/۲ متر خواهد بود. موقعیت تونل براساس سیستم UTM<sup>۷</sup> در زون ۴۰ واقع شده که مختصات ورودی آن  $X=336687$  و  $Y=3132778$  و مختصات خروجی آن  $X=386728$  و

وضعیت زمین در امتداد محور تونل و آگاهی از شرایط زمین‌شناسی مهندسی، هیدرولوژیکی و ژئوتکنیکی در عملیات تونل‌سازی بسیار ضروری است و باید قبل از طراحی و ساخت تونل، ساختگاه مورد تحلیل پایداری قرار گیرد (طارق‌زلی و همکاران، ۲۰۱۳). احداث تونل در زیرزمین ممکن است باعث ایجاد حرکت همگرایی زمین شود که می‌تواند بر آن تأثیر منفی داشته باشد و باعث خرابی سازه شود (لی و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، روش ساخت تونل‌ها بر میزان نشست سطح زمین و نیروها و ممان خمشی وارد بر پوشش داخل تونل تأثیر می‌گذارد (پیرنیا و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، ارتباط نزدیک بین تونل و ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی منطقه و ساختگاه آن مستلزم دستیابی به اطلاعاتی در مورد بهینه‌سازی طراحی تونل و تأمین پایداری آن‌ها در برابر مخاطرات زمین‌شناسی می‌باشد.

روش‌های تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهدارنده در پروژه‌های تونل‌سازی در طول زمان پیشرفت چشم‌گیری داشته است (سویا و همکاران، ۲۰۲۱). استفاده از روش‌های تجربی و تعادل حدی راهکاری مؤثر در پیش‌بینی وضعیت پایداری تونل و بررسی میزان جابجایی‌های سطحی و زیرسطحی زمین ناشی از حفر تونل می‌باشند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). این روش‌ها برای تحلیل پایداری و انتخاب سیستم نگهداری تونل بسیار مفید هستند. هرچند که با استفاده از روش‌های عددی نیز می‌توان تونل‌ها را در شرایط متفاوت و پیچیده مصالح تشکیل‌دهنده ساختگاه مدل‌سازی نمود و در نتیجه می‌توان تنش‌ها و جابجایی‌های ایجاد شده در اطراف تونل‌ها و همچنین نیروهای وارد بر سیستم نگهداری تونل را با دقت بالاتری پیش‌بینی کرد، اما روش‌های تجربی و تعادل حدی آسان‌تر، سریع‌تر و نتایج آن‌ها نیز قابل قبول می‌باشند (رامش و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعات موردی زیادی وضعیت پایداری تونل‌ها تحت شرایط مختلف با مدل‌سازی عددی و تحلیل پایداری با روش‌های تجربی و تعادل حدی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج مفیدی در جهت ساخت سازه‌های زیرزمینی ایمن حاصل شده است (محمودیان هریس و همکاران، ۲۰۱۷؛ نیکوبخت و همکاران، ۲۰۲۰؛ احمدی‌خونسارکی و

5. Tunnel boring machine

6. New Austrian tunneling method

7. Universal Transverse Mercator

1. Coal Mine Roof Rating

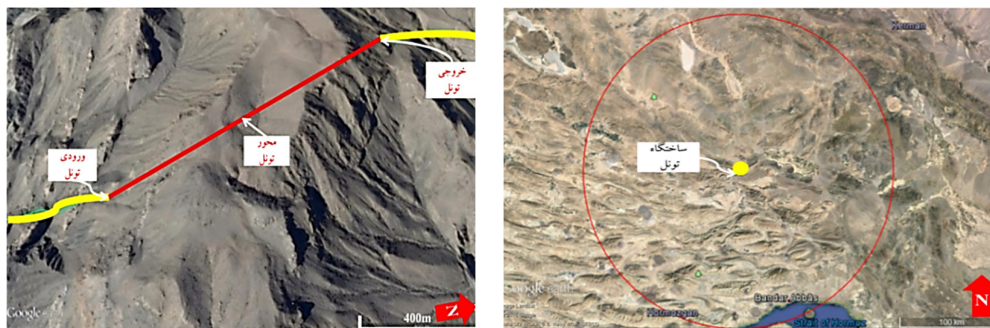
2. Analysis of Roof Bolts

3. Finite Element Modeling

4. Rock Mass Rating

حاجی‌آباد و ترانشه‌های ورودی و خروجی آن در زون ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده است. به عبارتی در ساختگاه این تونل توده‌های فیلیشی، سنگ‌های دگرگونی، توده‌های افیولیتی و سنگ‌های آهکی این زون ساختاری حضور دارند (شکل ۲). در محدوده خروجی تونل و ترانشه خروجی، توالی سنگ‌های آتشفشانی-رسوبی شامل تناوبی از سنگ‌آهک ماسه‌ای، آهک‌های ائولیتی میکرواسپاریتی و سنگ‌های ولکانیکی رخنمون دارند که با واحد سنگ‌آهک اربیتولین‌دار با سن کرتاسه زیرین پوشیده شده‌اند. با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی رسوبی این مجموعه، واحد آهک اربیتولین‌دار، بخش اعظم تونل را تشکیل می‌دهد. واحدهای زمین‌درز زاگرس شامل افیولیت‌ها و فیلیش‌های ترشیری، آخرین واحدهای سنگی تشکیل شده هستند، که عمدتاً در محدوده پرتال ورودی تونل دیده می‌شوند.

می‌باشد. از لحاظ زمین ریخت‌شناسی ساختگاه تونل حاجی‌آباد دارای ارتفاعات بلند و سیمای کوهستانی خشنی دارد. در این محدوده آبراهه‌ها عمدتاً منطبق بر سیستم گسله‌ها هستند. با توجه به شرایط توپوگرافی و ریخت‌شناسی ارتفاعات حاجی‌آباد، انتخاب مسیر تونل نیز از نظر ترازهای ورودی و خروجی محدودیت‌های خاص خود را دارد. به عبارت دیگر برای رسیدن به تراز مشخص در خروجی می‌بایستی مسیر طولانی را به صورت ترانشه باز در دامنه‌های جنوبی طی نمود. در شکل ۱ تصویری از وضعیت مورفولوژی ساختگاه مسیر تونل نشان داده شده است. تونل حاجی‌آباد از میان کوهی عبور می‌کند، که حداکثر ارتفاع روباره آن به بیش از ۲۵۲ متر می‌رسد. در سمت راست پرتال ورودی یک آبراهه نسبتاً بزرگ دیده می‌شود. از نظر زمین‌شناسی، تونل



شکل ۱. موقعیت ساختگاه تونل حاجی‌آباد (Google Earth)  
Fig. 1. Location of HajiAbad tunnel site (Google Earth)

تحلیل اطلاعات حاصل از مراحل قبل (مطالعات و بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی)، ابتدا با توجه به تفاوت در جنس و خصوصیات سنگ‌های منطقه در مسیر تونل، برای تفکیک واحدهای زمین‌شناسی از طبقه‌بندی BGD<sup>۱</sup> که توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۱۹۸۱)<sup>۲</sup> توصیه شده، استفاده شده است.

### ۳-۱- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه تونل

بر مبنای مطالعات صحرایی از پرتال ورودی تا خروجی تونل حاجی‌آباد، علاوه بر تغییر در جنس سنگ‌ها، تغییر در خصوصیات ساختاری واحدهای تشکیل‌دهنده مسیر تونل نیز وجود دارد و همین موضوع سبب تشکیل واحدهای

### ۳- روش انجام پژوهش

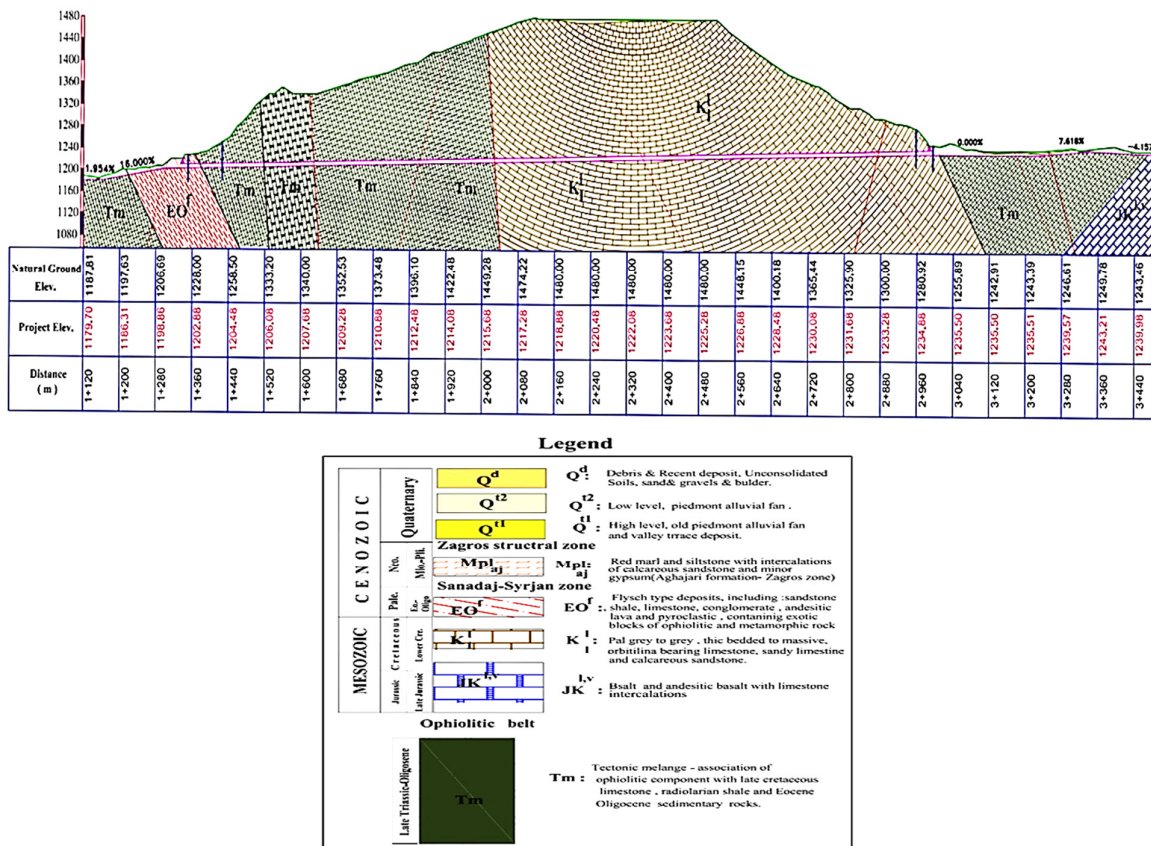
برای انجام این پژوهش، ابتدا با جمع‌آوری مجموعه اطلاعات و مدارک موجود شامل نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافی، تصاویر ماهواره‌ای، عکس‌های هوایی، گزارش‌ها و یادداشت‌های فنی از سازه‌های موجود در محدوده ساختگاه تونل، مطالعات دفتری صورت گرفته است. سپس با انجام بازدیدهای صحرایی و برداشت‌های محلی از ساختگاه تونل، مطالعات صحرایی اولیه انجام شده است. در نهایت با بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌های برجا که در ساختگاه تونل انجام شده و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های اخذ شده از این ساختگاه که حاصل حفاری‌های اکتشافی در مسیر تونل است، مطالعات تکمیلی صورت گرفته است. پس از بررسی و تجزیه و

2. ISRM, 1981

1. Basic Geotechnical Description

طبقه‌بندی، تفکیک سنگ‌های تشکیل دهنده مسیر تونل به شیوه‌ای ساده به واحدهای زمین‌شناسی مهندسی می‌باشد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

مختلف زمین‌شناسی مهندسی در مسیر آن شده است. به منظور تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی از طبقه‌بندی BGD استفاده شده است. هدف از این



شکل ۲. مقطع زمین‌شناسی در امتداد مسیر تونل حاجی‌آباد (مرگان، ۲۰۱۶)  
 Fig. 2. Geological section along Hajiabad tunnel route (Margan, 2016)

جدول ۱. تفکیک واحدهای زمین‌شناسی از ورودی تا خروجی ساختگاه تونل حاجی‌آباد بر اساس طبقه‌بندی BGD (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۱۹۸۱)

Table 1. Separation of geological units from the entrance to the exit of Hajiabad tunnel site based on BGD classification (ISRM, 1981)

رده واحد بر اساس طبقه‌بندی BGD	مشخصه اصلی واحد	رده زمین‌شناسی مهندسی	وضعیت سنگ‌شناسی	ردیف
Serpentinite, I <sub>3</sub> , F <sub>2,3</sub> , S <sub>4,5</sub> , A <sub>4</sub>	خردشدگی و چندین دسته درزه	T <sub>1</sub>	سرپانتینیت	۱
Sandy limestone, I <sub>2</sub> , F <sub>2,3</sub> , S <sub>2</sub> , A <sub>2</sub>	خردشدگی	T <sub>2</sub>	سنگ‌آهک ماسه‌ای	۲
Massive limestone, I <sub>1</sub> , F <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , A <sub>2</sub>	توده‌ای و مقاوم	T <sub>3</sub>	سنگ‌آهک توده‌ای	۳
Serpentinite, I <sub>3</sub> , F <sub>3,4</sub> , S <sub>4,5</sub> , A <sub>4</sub>	خردشدگی	T <sub>4</sub>	سرپانتینیت	۴
Fracture zone, I <sub>5</sub> , F <sub>5</sub> , S <sub>4</sub> , A <sub>4</sub>	تکتونیزه	T <sub>f1</sub>	زون خرد شده	۵
limestone, I <sub>3</sub> , F <sub>3</sub> , S <sub>2</sub> , A <sub>2</sub>	چین خوردگی	T <sub>5</sub>	سنگ‌آهک	۶
limestone, I <sub>3</sub> , F <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> , A <sub>2</sub>	چین خوردگی	T <sub>6</sub>	سنگ‌آهک	۷
limestone, I <sub>3</sub> , F <sub>3</sub> , S <sub>2</sub> , A <sub>2</sub>	چین خوردگی	T <sub>7</sub>	سنگ‌آهک	۸
Fracture zone, I <sub>5</sub> , F <sub>5</sub> , S <sub>4</sub> , A <sub>4</sub>	تکتونیزه	T <sub>f2</sub>	زون خرد شده	۹
Massive limestone, I <sub>1</sub> , F <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , A <sub>2</sub>	توده‌ای مقاوم	T <sub>8</sub>	سنگ‌آهک توده‌ای	۱۰

مقاومت آن ۸۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره آن حداکثر ۲۵۲ متر بوده و زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحد بر اساس معیار طبقه‌بندی بنیواسکی ۱۹۸۹، ۲۵ تا ۳۵ درجه پیش‌بینی شده است. بخش هفتم (T6) بخش دوم واحد آهکی چین‌خورده از کیلومتر ۲+۴۳۴ الی ۲+۵۹۱ به طول ۱۵۷ متر بخش دوم محدوده چین‌خورده را تشکیل داده است. بر اساس چکش‌اشمیت روی رخنمون‌های سطحی مقاومت آن ۸۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره آن حداکثر ۲۴۵ متر بوده و زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحد بر اساس معیار طبقه‌بندی بنیواسکی (۱۹۸۹)، ۲۵ تا ۳۵ درجه پیش‌بینی شده است. بخش هشتم (T7) بخش سوم واحد آهکی چین‌خورده از کیلومتر ۲+۵۹۱ تا ۲+۹۷۱ به طول ۳۸۰ متر گسترش دارد و بر اساس چکش‌اشمیت روی رخنمون‌های سطحی مقاومت آن ۸۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره آن حداکثر ۲۴۷ متر بوده و زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحد بر اساس معیار طبقه‌بندی بنیواسکی ۱۹۸۹، ۲۵ تا ۳۵ درجه پیش‌بینی شده است. بخش نهم (T2) در ادامه مسیر تونل و پس از بخش T7 به علت وجود گسل راندگی بزرگ F4 طولی معادل ۱۶ متر برای زون خردشده این گسل و از کیلومتر ۲+۹۷۱ تا ۲+۹۸۷ پیش‌بینی شده و ضخامت روباره آن حداکثر ۴۷ متر است. بخش دهم (T8) از کیلومتر ۲+۹۸۷ تا پرتال خروجی به طول ۸۱ متر تونل از میان سنگ‌آهک توده‌ای عبور می‌کند و بر اساس چکش‌اشمیت روی رخنمون‌های سطحی مقاومت آن حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره آن بیش از ۴۴ متر بوده و زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحد بر اساس معیار طبقه‌بندی بنیواسکی ۱۹۸۹، ۳۵ تا ۴۵ درجه پیش‌بینی شده است.

### ۳-۲- مطالعه آماری ناپیوستگی‌های ساختگاه تونل

برداشت صحرایی ناپیوستگی‌ها ساختگاه تونل حاجی‌آباد در واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مختلف انجام شده و مطالعه آماری آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Dips v5.103 صورت گرفته است و نتایج بدست آمده در جدول ۲ و شکل ۳ ارائه شده است.

به‌طور کلی با بررسی ناپیوستگی‌های واحدهای دهگانه زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل و با توجه نتایج بدست آمده از ۸ واحد زمین‌شناسی، پیوستگی ناپیوستگی‌های

بخش اول (T1) از کیلومتر ۱+۵۰۰ به طول ۵۷ متر واحد سرپانتینیتی درزه‌دار مسیر تونل را تشکیل داده است. این واحد به دلیل هوازدگی و خردشدگی مقاومتی قابل‌توجهی ندارد و بر اساس چکش‌اشمیت روی رخنمون‌های سطحی مقاومت آن حدود ۲۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره آن بین ۱۳ تا ۳۶ متر متغیر بوده و زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحد بر اساس معیار طبقه‌بندی بنیواسکی ۱۹۸۹، ۱۵ تا ۲۵ درجه پیش‌بینی شده است. بخش دوم (T2) حدفاصل کیلومتر ۱+۵۵۷ تا ۱+۵۸۷ به طول حدود ۳۰ متر تونل از میان سنگ‌آهک ماسه‌ای واحد فلیشی عبور می‌کند. این واحد در کنار ستیخ آهکی قرار گرفته است و بر اساس چکش‌اشمیت روی رخنمون‌های سطحی مقاومت آن حدود ۶۰ تا ۸۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره آن حداکثر ۶۰ متر بوده و زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحد بر اساس معیار طبقه‌بندی بنیواسکی ۱۹۸۹، ۲۵ تا ۳۵ درجه پیش‌بینی شده است. بخش سوم (T3) از کیلومتر ۱+۵۸۷ تا کیلومتر ۱+۶۸۳ به طول ۹۶ متر تونل از میان سنگ‌آهک توده‌ای عبور می‌کند. بر اساس چکش‌اشمیت روی رخنمون‌های سطحی مقاومت آن بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره آن بیش از ۱۲۶ متر بوده و زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحد بر اساس معیار طبقه‌بندی بنیواسکی ۱۹۸۹، ۳۵ تا ۴۵ درجه پیش‌بینی شده است. بخش چهارم (T4) از کیلومتر ۱+۶۸۳ تا ۲+۱۷۵ به طول ۴۹۲ متر مجدداً تونل از میان واحد سرپانتینیتی درزه‌دار عبور می‌کند. رخنمون‌های کوچکی از این واحد در میان واریزه‌های دامنه‌ای مشاهده می‌گردد که نشان دهنده هوازدگی و خردشدگی آن می‌باشد. بر اساس چکش‌اشمیت روی رخنمون‌های سطحی مقاومت آن کمتر از ۲۰ مگاپاسکال و ضخامت روباره آن بین ۱۱۴ تا ۲۴۴ متر متغیر بوده و زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحد بر اساس معیار طبقه‌بندی بنیواسکی ۱۹۸۹، ۱۵ تا ۲۵ درجه پیش‌بینی شده است. بخش پنجم (T5) در ادامه مسیر تونل و پس از بخش T3 به علت وجود گسل راندگی بزرگ F2 طولی معادل ۶۲ متر برای زون خردشده این گسل و از کیلومتر ۲+۱۷۵ الی ۲+۲۳۷ پیش‌بینی شده و ضخامت روباره آن بین ۲۴۴ تا ۲۵۲ متر متغیر است. بخش ششم (T6) حدفاصل کیلومتر ۲+۲۳۷ تا ۲+۹۷۱ به طول ۷۳۴ متر تونل از میان سنگ‌آهک چین‌خورده‌ای عبور می‌کند. بر اساس چکش‌اشمیت روی رخنمون‌های سطحی

یکسان بودن شرایط زمین‌شناسی برای ساختگاه تونل است. زاویه اصطکاک داخلی سطوح درزه در واحدهای مختلف ساختگاه تونل بر اساس طبقه‌بندی RMR بین ۱۵ تا ۴۵ درجه در تغییر است. همچنین مقاومت فشاری سطوح درزه در واحدهای هشتگانه مذکور بین ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال است به استثناء دو زون خرد شده  $T_{f1}$  و  $T_{f2}$  که به دلیل عبور گسل از این دو زون شرایط آن با سایر واحدها متفاوت است و به دلیل خردشدگی بیش از حد امکان بررسی درزه‌های این دو زون وجود ندارد.

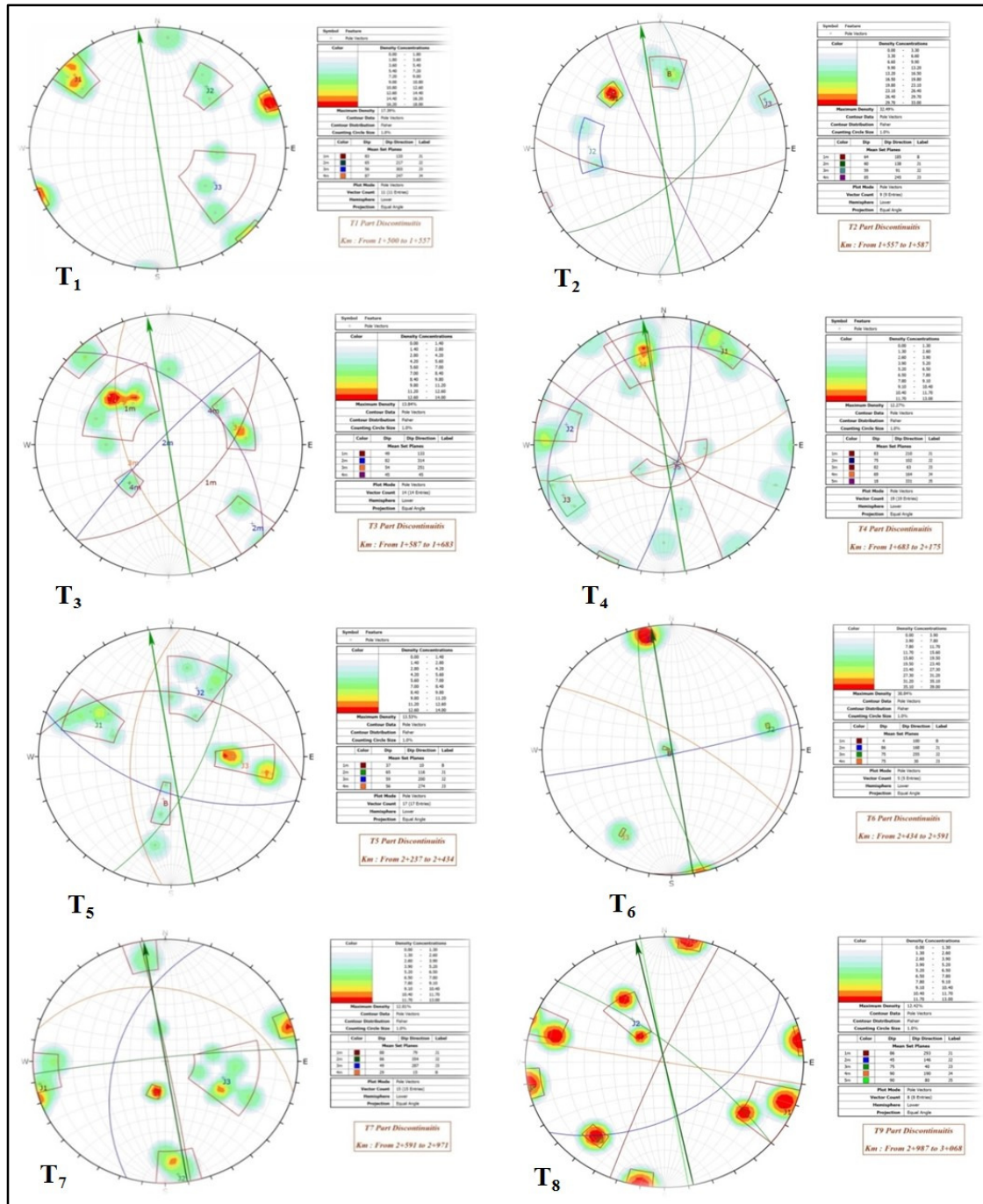
ساختگاه تونل در حدود ۳ متر تا بزرگ‌تر از ۲۰ متر مشاهده شده که فاصله‌داری آن‌ها از ۰/۱۵ تا ۴ متر می‌باشد. در مجموع همه ناپیوستگی‌ها دارای بازشدگی ۰/۱ تا ۵ میلی‌متر بوده‌اند. این ناپیوستگی‌ها اکثراً با کلسیت پر شده‌اند و میزان هوازدهی آن‌ها از کم تا متوسط در تغییر است. وضعیت زبری این درزه‌ها از کمی‌زبر و ناهموار تا ناهموار و موج متغیر است. همچنین وضعیت آب‌داری درزه‌ها خشک تا مرطوب می‌باشد که نشان‌دهنده پایین بودن سطح ایستابی و آب و هوای خشک منطقه و

جدول ۲. مشخصات زمین‌شناسی مهندسی ناپیوستگی‌های موجود در بخش‌های  $T_1$  تا  $T_8$  ساختگاه تونل حاجی‌آباد (مهندسین مشاور طوس آب، ۲۰۱۵)

Table 2. Geological characteristics of engineering discontinuities in parts  $T_1$  to  $T_8$  of Hajiabad tunnel site (Toosab Consulting Engineers, 2015)

مشخصات مربوط به ناپیوستگی‌های اندازه‌گیری شده بخش $T_1$							وضعیت فضائی		ناپیوستگی‌ها
وضعیت آبداری	هوازدهی	وضعیت زبری	پرشدهی	بازشدگی (میلی‌متر)	فاصله‌داری (متر)	درازا (متر)	امتداد	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	کمی زبر و ناهموار	رس و ماسه	۱-۵	۰/۱-۰/۲	۳-۱۰	۱۳۳	امتداد	دسته درزه ۱
					۰/۱۵		۸۳	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	زبر و ناهموار	رس و ماسه	۱-۵	۰/۲-۰/۶	۳-۱۰	۲۱۶	امتداد	دسته درزه ۲
					۰/۴		۶۵	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	زبر و ناهموار	رس و ماسه	۱-۵	۰/۲-۰/۶	۳-۱۰	۳۰۳	امتداد	دسته درزه ۳
					۰/۴		۵۶	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	زبر و ناهموار	رس و ماسه	۱-۵	۰/۱-۰/۲	۳-۱۰	۲۴۷	امتداد	دسته درزه ۴
					۰/۱۵		۸۷	شیب	
مشخصات مربوط به ناپیوستگی‌های اندازه‌گیری شده بخش $T_2$									
خشک تا مرطوب	متوسط	بسیار زبر و ناهموار	کلسیت	۱-۵	۰/۵-۱	>۲۰	۱۸۵	امتداد	لایه‌بندی
					۰/۷۵		۶۴	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط	بسیار زبر و ناهموار	کلسیت	۱-۵	۰/۵-۱	۱۰-۲۰	۱۳۸	امتداد	دسته درزه ۱
					۰/۷۵		۶۰	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط	بسیار زبر و ناهموار	کلسیت	۱-۵	۰/۴-۰/۶	۱۰-۲۰	۹۱	امتداد	دسته درزه ۲
					۰/۵		۵۹	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط	بسیار زبر و ناهموار	کلسیت	۱-۵	۰/۴-۰/۶	۱۰-۲۰	۲۴۵	امتداد	دسته درزه ۳
					۰/۵		۸۵	شیب	
مشخصات مربوط به ناپیوستگی‌های اندازه‌گیری شده بخش $T_3$									
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۳-۵	>۲۰	۱۳۳	امتداد	دسته درزه ۱
					۴		۴۹	شیب	
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۱-۳	۱۰-۲۰	۳۱۴	امتداد	دسته درزه ۲
					۲		۸۲	شیب	
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۱-۳	۱۰-۲۰	۲۵۱	امتداد	دسته درزه ۳
					۲		۵۴	شیب	
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۳-۵	>۲۰	۴۵	امتداد	دسته درزه ۴
					۴		۴۵	شیب	
مشخصات مربوط به ناپیوستگی‌های اندازه‌گیری شده بخش $T_4$									
خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	کمی زبر و ناهموار	کلسیت و اکسید آهن	۱-۵	۰/۱-۰/۲	۳-۱۰	۲۱۰	امتداد	دسته درزه ۱
					۰/۱۵		۸۳	شیب	

خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	کمی زبر و ناهموار	کلسیت و اکسید آهن	۱-۵	۰/۱-۰/۲	۳-۱۰	۱۰۲	امتداد	دسته درزه ۲
					۰/۱۵		۷۵	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	کمی زبر و ناهموار	کلسیت و اکسید آهن	۱-۵	۰/۱-۰/۲	۳-۱۰	۰۶۳	امتداد	دسته درزه ۳
					۰/۱۵		۸۲	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	کمی زبر و ناهموار	کلسیت و اکسید آهن	۱-۵	۰/۰۵-۰/۱۵	۳-۱۰	۱۶۴	امتداد	دسته درزه ۴
					۰/۱		۶۹	شیب	
خشک تا مرطوب	متوسط تا زیاد	کمی زبر و ناهموار	کلسیت و اکسید آهن	۱-۵	۰/۱-۰/۲	۳-۱۰	۳۳۱	امتداد	دسته درزه ۵
					۰/۱۵		۱۸	شیب	
<b>مشخصات مربوط به ناپوستگی‌های اندازه گیری شده بخش T5</b>									
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت و رس	۳-۵	۰/۳-۰/۵	>۲۰	۱۰	امتداد	لایه‌بندی
					۰/۴		۳۷	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۰/۵-۱/۱۰	۱۰-۲۰	۱۱۶	امتداد	دسته درزه ۱
					۰/۷۵		۶۵	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۰/۵-۰/۱۸	۱۰-۲۰	۲۰۰	امتداد	دسته درزه ۲
					۰/۶۵		۵۹	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت و رس	۰/۱-۱	۰/۴-۰/۱۸	۵-۱۰	۲۷۴	امتداد	دسته درزه ۳
					۰/۶		۵۶	شیب	
<b>مشخصات مربوط به ناپوستگی‌های اندازه گیری شده بخش T6</b>									
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت	۳-۵	۰/۳-۰/۵	>۲۰	۱۰۰	امتداد	لایه‌بندی
					۰/۴		۴	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت	۱-۳	۰/۵-۱/۱۰	۱۰-۲۰	۱۶۸	امتداد	دسته درزه ۱
					۰/۷۵		۸۶	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۰/۵-۰/۱۸	۱۰-۲۰	۲۵۵	امتداد	دسته درزه ۲
					۰/۶۵		۷۵	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت و رس	۱-۳	۰/۴-۰/۱۸	۵-۱۰	۳۰	امتداد	دسته درزه ۳
					۰/۶		۷۵	شیب	
<b>مشخصات مربوط به ناپوستگی‌های اندازه گیری شده بخش T7</b>									
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۰/۳-۰/۵	>۲۰	۱۵	امتداد	لایه‌بندی
					۰/۴		۲۹	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۰/۵-۱/۱۰	۵-۱۵	۸۰	امتداد	دسته درزه ۱
					۰/۷۵		۸۷	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۰/۴-۰/۱۶	۵-۱۵	۳۵۵	امتداد	دسته درزه ۲
					۰/۵		۸۶	شیب	
خشک تا مرطوب	کم تا متوسط	زبر و ناهموار و موج	کلسیت و رس	۱-۵	۲-۴	۵-۱۰	۲۸۷	امتداد	دسته درزه ۳
					۳		۴۹	شیب	
<b>مشخصات مربوط به ناپوستگی‌های اندازه گیری شده بخش T8</b>									
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۳-۵	>۲۰	۲۹۳	امتداد	دسته درزه ۱
					۴		۸۶	شیب	
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۱-۳	۱۰-۲۰	۱۴۶	امتداد	دسته درزه ۲
					۲		۴۵	شیب	
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۳-۵	۵-۱۰	۰۴۰	امتداد	دسته درزه ۳
					۴		۷۵	شیب	
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۳-۵	۵-۱۰	۱۹۰	امتداد	دسته درزه ۴
					۴		۹۰	شیب	
خشک تا مرطوب	کم	ناهموار و موج	کلسیت	۱-۵	۳-۵	>۲۰	۰۸۰	امتداد	دسته درزه ۵



شکل ۳. تصاویر استریوگرافی و سیکلوگرافی تمرکز قطب و صفحات معرف ناپیوستگی‌های بخش‌های هشت‌گانه تونل حاجی‌آباد در شبکه هم‌مساحت اشمیت

Fig. 3. Stereographic and cyclographic images of the pole concentration and representative planes of the discontinuities of the eight parts of the Hajiabad tunnel in the Schmidt equal area network

سنگ‌ها، حفاری، استخراج و اکتشاف منابع قرضه، پایداری سازه‌های سنگی، تعیین مقاومت توده‌سنگ ارتباط دارند (وفائیان، ۱۹۹۶). در جدول ۳ مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های اخذ شده از ساختگاه تونل حاجی‌آباد ارائه شده است.

۳-۳- خواص مهندسی سنگ‌های ساختگاه تونل  
 ۳-۳-۱- خواص فیزیکی سنگ‌های ساختگاه تونل  
 شناخت ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها از ابتدایی‌ترین بخش مطالعه سنگ‌ها می‌باشد. این خصوصیات در طبقه‌بندی



در فصول بارش به دلیل وجود درز و شکافها احتمال هدایت محدودی از آب بارندگی به عمق وجود دارد.

### ۳-۲- خواص مکانیکی سنگ‌های ساختگاه تونل

در این پژوهش جهت اندازه‌گیری خواص مکانیکی سنگ‌های ساختگاه تونل حاجی‌آباد آزمون‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت فشاری سه‌محوری بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه حفاری شده ساختگاه انجام شده و نتایج بدست آمده در جدول‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. نتایج آزمایش سه‌محوری تحکیم نیافته زهکشی نشده (UU) سنگ‌های ساختگاه تونل بیانگر این است که با افزایش عمق و افزایش فشار محصور کننده مقدار افزایش تنش انحرافی و مدول یانگ و همچنین پارامترهای  $c$  و  $\phi$  توده‌سنگ نیز افزایش یافته که بیانگر افزایش کیفیت توده‌سنگ از سطح به عمق می‌باشد.

نتایج آزمایش‌های فیزیکی بیانگر این است که با افزایش عمق میزان رطوبت موجود در نمونه‌های حاصل از گمانه ساختگاه تونل افزایش یافته و میزان تخلخل با افزایش عمق افزایش یافته و دانسیته نمونه‌ها با افزایش عمق کاهش یافته است. در منطقه احتمال وجود ریزترک‌ها و پدیده کارست در منطقه وجود دارد همچنین با مقایسه میزان درصد تخلخل و درصد آب محتوا مشاهده می‌شود که نمونه‌های مورد آزمایش اشباع نیستند و این مسئله بیانگر این است که سطح آب زیرزمینی احتمالاً باید پایین‌تر از تراز کف تونل باشد. از سوی دیگر با افزایش عمق درصد آب محتوا افزایش پیدا می‌کند. بررسی‌های سطحی منطقه نشان دهنده شکستگی‌های فراوانی است، به دلیل گسترش شکستگی‌ها احتمال هدایت آب به درون زمین در زمان بارندگی وجود دارد. از سویی در رخنمون‌های سطحی سنگ‌آهک‌ها آثار و حفرات کارستیک نیز دیده می‌شود. لذا

جدول ۳. نتایج آزمایش دانسیته و تخلخل و تعیین رطوبت نمونه‌های حاصل از ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 3. Density and porosity test results and moisture determination of samples obtained from Hajiabad tunnel site

ردیف	شماره نمونه	عمق (m)	دانسیته خشک (g/cm <sup>3</sup> )	دانسیته مستغرق (g/cm <sup>3</sup> )	تخلخل (%)	آب محتوا (%)
۱	HJBH4-1	۳/۴۵-۳/۸۷	۲/۷۲	۲/۷۲	۰/۶۰	۰/۲۲
۲	HJBH4-2	۴/۴۲-۴/۹۵	۲/۷۰	۲/۷۱	۰/۷۴	۰/۲۷
۳	HJBH4-3	۷/۴۰-۷/۸۰	۲/۷۰	۲/۷۰	۰/۳۲	۰/۱۲
۴	HJBH4-4	۱۷/۳۸-۱۷/۸۷	۲/۶۹	۲/۷۰	۰/۸۳	۰/۳۱
۵	HJBH4-5	۲۰/۰۰-۲۰/۳۲	۲/۶۹	۲/۷۰	۰/۷۶	۰/۲۸
۶	HJBH4-6	۲۳/۰۰-۲۳/۳۰	۲/۶۸	۲/۶۹	۱/۰۰	۰/۳۷
۷	HJBH4-7	۱۱/۳۰-۱۱/۶۰	۲/۶۷	۲/۶۸	۱/۳۵	۰/۵۱
۸	HJBH4-8	۳۱/۰۵-۳۱/۳۵	۲/۶۹	۲/۷۰	۱/۰۵	۰/۳۹
۹	HJBH4-9	۵/۲۰-۵/۴۳	۲/۷۱	۲/۷۱	۰/۴۶	۰/۱۷
۱۰	HJBH4-10	۵/۴۵-۵/۸۰	۲/۵۶	۲/۶۳	۷/۳۳	۲/۸۷
۱۱	V2	۰	۲/۵۲	۲/۵۷	۴/۸۱	۱/۹۱

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 4. The result of uniaxial compressive strength of rocks test in Hajiabad tunnel site

ردیف	شماره نمونه	عمق (m)	قطر (cm)	ارتفاع برحسب (cm)	نسبت D/H	شرایط رطوبت	میانگین مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	مقاومت فشاری (MPa)
۱	HJBH4-3	۷/۴۰-۷/۸۰	۷/۰۲	۱۹/۰۶	۲/۷۲	طبیعی	۶۹/۵۵	۰/۲۰	۷۴/۴۴
۲	HJBH4-5	۲۰/۰۰-۲۰/۳۲	۷/۱۱	۱۸/۲۳	۲/۵۶	طبیعی	۸۴/۴۰	۰/۲۴	۷۳/۸۳
۳	HJBH4-7	۱۱/۳۰-۱۱/۶۰	۷/۱۱	۱۸/۳۳	۲/۵۸	طبیعی	۷۳/۸۱	۰/۲۴	۵۲/۱۲
۴	HJBH4-8	۳۱/۰۵-۳۱/۳۵	۷/۱۱	۱۶/۳۸	۲/۳۰	طبیعی	۸۶/۹۹	۰/۲۹	۵۵/۶۳
۵	HJBH4-9	۵/۲۰-۵/۴۳	۷/۱۸	۱۶/۲۲	۲/۲۶	طبیعی	۸۳/۰۴	۰/۲۱	۸۵/۲۴
۶	V2	۰	۵/۲۵	۱۱/۰۱	۲/۱۰	طبیعی	۶/۱۱	۰/۲۱	۷/۲۹

جدول ۵. نتایج آزمایش سه‌محوری سنگ‌های ساختگاه تونل

Table 5. Triaxial test results of tunnel site rocks

ردیف	شماره نمونه	عمق (m)	شرایط رطوبت	فشار محدود کننده (MPa)	تنش انحرافی (MPa)	میانگین مدول یانگ (GPa)	درصد فشار محوری	c (MPa)	∅ (degrees)
۱	HJBH4-1	۳/۴۵-۳/۷۸	طبیعی	۰/۴	۶۹/۴۴	۲۹/۹۲	۰/۲۶	۱۲/۸	۴۷/۹
۲	HJBH4-1	۳/۴۵-۳/۷۸	طبیعی	۰/۸	۷۱/۴۴	۲۹/۴۶	۰/۳۱		
۳	HJBH4-1	۳/۴۵-۳/۷۸	طبیعی	۱	۷۲/۹۴	۲۹/۶۶	۰/۲۷		
۴	HJBH4-4	۱۷/۲۸-۱۷/۷۸	طبیعی	۲	۱۲۰/۷۵	۳۷/۶	۰/۴۸	۱۹/۲	۴۹/۹
۵	HJBH4-4	۱۷/۲۸-۱۷/۷۸	طبیعی	۵	۱۳۵/۶۴	۳۵/۹۱	۰/۴۲		
۶	HJBH4-4	۱۷/۲۸-۱۷/۷۸	طبیعی	۱۰	۱۷۲/۰۵	۴۱/۲۸	۰/۵۰		

## ۴- نتایج و بحث

## ۴-۱- تحلیل پایداری ساختگاه تونل به روش تجربی

برای تحلیل پایداری ساختگاه تونل روش‌های متفاوتی وجود دارند که از میان آن‌ها دو روش تجربی و تعادل حدی برای تحلیل پایداری ساختگاه تونل حاجی‌آباد استفاده شده است. روش تجربی شامل استفاده از طبقه‌بندی‌های مهندسی توده به روش ارزیابی کیفی توده‌سنگ (RQD<sup>۱</sup>) (دبیر، ۱۹۶۴)، امتیاز توده‌سنگ (RMR<sup>۲</sup>) (بینیواسکی، ۱۹۸۹)، ارزیابی کیفیت توده‌سنگ (روش NGI<sup>۳</sup> یا Q) (بارتن و همکاران، ۱۹۷۴) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI<sup>۴</sup>) (هوک و مارینوس، ۲۰۰۰) می‌باشند. روش تعادل حدی با استفاده از نرم‌افزار Unwedge v.3.0 برای تحلیل پایداری تونل حاجی‌آباد در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

## ۴-۱-۱- ارزیابی کیفی توده‌سنگ (RQD)

با توجه به اینکه در مرحله مطالعاتی، گمانه‌های اکتشافی برای تونل حاجی‌آباد حفر نشده، به منظور تخمین شاخص کیفی سنگ از نتایج برداشت‌های زمینی استفاده شده است. برای این منظور با توجه به فاصله‌داری درزه‌ها و استفاده از روش پالمستروم (۲۰۰۵)، با استفاده از روابط ۱ و ۲ مقادیر این شاخص تعیین گردید. جدول ۶ شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD) برای واحدهای مختلف ساختگاه تونل حاجی‌آباد را نشان می‌دهد.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$RQD = 110 - 2.5WJD \quad (\text{رابطه ۲})$$

در این روابط RQD شاخص کیفی توده‌سنگ،  $J_v$  تعداد درزه‌ها در واحد حجم سنگ و  $WJD$  میزان درزه‌داری

بلوک‌های سنگی است. بعد از مطالعات درزه‌نگاری منطقه و با استفاده از طبقه‌بندی RQD سنگ‌های واحدهای دهگانه ساختگاه تونل با استفاده از روش‌های ذکر شده در بالا در رده‌های بسیار ضعیف تا خوب قرار گرفتند. که واحدهای  $T_1$ ،  $T_4$ ،  $T_{11}$ ،  $T_{12}$  با RQD کمتر از ۲۵ در رده بسیار ضعیف، واحدهای  $T_2$ ،  $T_5$ ،  $T_6$ ،  $T_7$  با RQD حدود ۷۵-۵۰ در رده متوسط و در نهایت واحدهای  $T_3$ ،  $T_8$  با RQD ما بین ۹۰-۷۵ در رده خوب قرار گرفتند.

## ۴-۱-۲- ارزیابی توده‌سنگ به روش ژئومکانیکی (RMR)

با توجه به اندازه‌گیری‌ها و تحلیل برداشت‌های صورت گرفته از شرایط امتداد، شیب و خصوصیات سطح ناپیوستگی‌های توده‌سنگ‌های ساختگاه تونل حاجی‌آباد و همچنین چین‌خوردگی محتمل در مسیر این تونل، وضعیت ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ‌های ساختگاه تونل به شرح جدول ۷ می‌باشد.

با جمع‌بندی امتیازات بدست آمده همانطور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود و همچنین با توجه به امتیاز بدست آمده برای بخش‌های مختلف مطابق شکل ۴، بیشترین زمان خود ایستایی با فرض تونلی با عرض دهانه ۸ متر، بر اساس طبقه‌بندی RMR به مدت بیش از ۲ ماه برای واحدهای  $T_3$  و  $T_8$  و حدود یک هفته برای واحدهای  $T_2$ ،  $T_5$ ،  $T_6$  و  $T_7$  خواهد بود. سایر واحدها برای تونل با عرض دهانه سقف ۸ متری به محض حفاری ناپایدار می‌باشند. زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه‌های این واحدها بر اساس طبقه‌بندی RMR بین ۱۵ تا ۴۵ درجه است. همچنین این واحدها دارای مقاومتی بین ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال هستند.

4. Geological strength index  
5. Volumetric joint  
6. Weghted joint density

1. Rock quality designation  
2. Rock mass rating  
3. Norwegian geotechnical institute

جدول ۶. شاخص کیفیت توده‌سنگ واحدهای مختلف ساختگاه تونل حاجی‌آباد (مهندسی مشاور طوس آب، ۲۰۱۵)

Table 6. Rock mass quality index of different units of Hajiabad tunnel site (Toosab Consulting Engineers, 2015)

ردیف	توصیف کیفیت	شاخص کیفیت توده‌سنگ (%)	توده‌سنگ تونل
۱	بسیار ضعیف	کمتر از ۲۵	T <sub>1</sub> , T <sub>4</sub> , T <sub>f1</sub> , T <sub>f2</sub>
۲	ضعیف	۲۵-۵۰	
۳	متوسط	۵۰-۷۵	T <sub>2</sub> , T <sub>5</sub> , T <sub>6</sub> , T <sub>7</sub>
۴	خوب	۷۵-۹۰	T <sub>3</sub> , T <sub>8</sub>
۵	بسیار خوب	۹۰-۱۰۰	

جدول ۷. طبقه‌بندی RMR برای واحدهای مختلف تونل

Table 7. Classification of RMR for different tunnel units

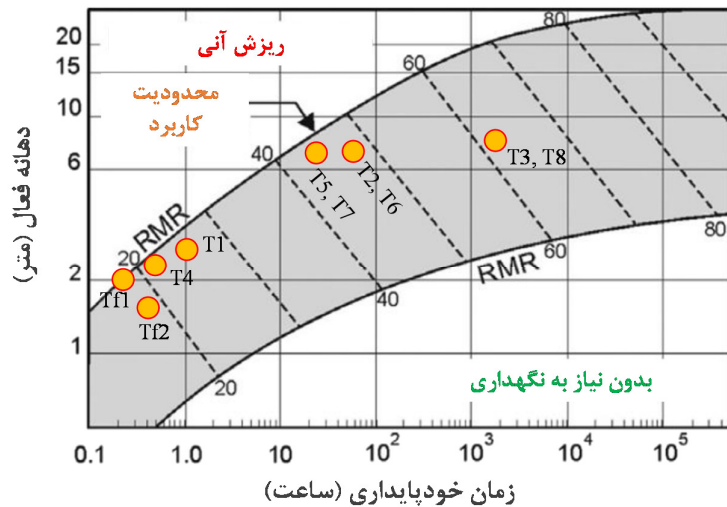
طبقه‌بندی بر اساس امتیاز توده‌سنگ (بینیواسکی)											بخش‌بندی طول تونل	چگونگی و حدود مقادیر عوامل مؤثر بر توده سنی
T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>f1</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>f2</sub>	T <sub>8</sub>	نشانه		
۱+۵۰۰	۱+۵۵۷	۱+۵۸۷	۱+۶۸۳	۲+۱۷۵	۲+۲۳۷	۲+۴۳۴	۲+۵۹۱	۲+۹۷۱	۲+۹۸۷	از کیلومتر		
۱+۵۵۷	۱+۵۸۷	۱+۶۸۳	۲+۱۷۵	۲+۲۳۷	۲+۴۳۴	۲+۵۹۱	۲+۹۷۱	۲+۹۸۷	۳+۰۶۸	تا کیلومتر		
۵۷	۳۰	۹۶	۴۹۲	۶۲	۱۹۷	۱۵۷	۳۸۰	۱۶	۸۱	طول (متر)		
۱۰-۲۰	۶۰-۸۰	-۱۲۰ ۱۰۰	۱۰-۲۰	<۱۰	۸۰-۱۰۰	۸۰-۱۰۰	۸۰-۱۰۰	<۱۵	-۱۲۰ ۱۰۰	مقاومت فشاری تک‌محوری (مگا پاسکال)		
۱۰-۲۰	۶۰-۷۰	۸۰-۹۰	۰-۱۰	۰-۱۰	۵۰-۶۰	۵۰-۶۰	۵۰-۶۰	۰-۱۰	۸۰-۹۰	شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD)		
۰/۱-۰/۶	۰/۴-۱/۰	۱/۰-۰/۵	-۰/۲ ۰/۱	--	۰/۳-۰/۱	۰/۱-۲/۰	۰/۳-۰/۴	--	۱/۰-۵/۰	بیشترین -کمترین		
۰/۲۵	۰/۶	۳	۰/۱۵	۰/۱	۰/۵	۰/۸	۰/۶	۰/۱	۳	میانگین		
۳-۱۰	۱۰-۲۰	۱۰-۲۰	۳-۱۰	۱-۳	۵-۲۰	۵-۲۰	۵-۲۰	۱-۳	۵-۲۰	طول (متر)		
۱-۵	۱-۵	۱-۵	۱-۵	۱-۵	۱-۵	۱-۵	۱-۵	۱-۵	۱-۵	بازشدگی (میلی‌متر)		
زبر و ناهموار	بسیار زبر و ناهموار	ناهموار و موج	کمی زبر و ناهموار	کمی زبر و ناهموار	زبر، ناهموار و موج	زبر، ناهموار و موج	زبر، ناهموار و موج	کمی زبر و ناهموار	ناهموار و موج	وضعیت زبری		
رس و ماسه	کلسیت	کلسیت	کلسیت و اکسید آهن	کلسیت رس و سیلت	کلسیت رس و سیلت	کلسیت رس و سیلت	کلسیت رس و سیلت	کلسیت رس و سیلت	کلسیت	نوع پرشدگی		
متوسط تا زیاد	متوسط	کم	متوسط تا زیاد	زیاد	کم تا متوسط	کم تا متوسط	کم تا متوسط	زیاد	کم	هوازدهی نسبی		
خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	خشک تا مرطوب	وضعیت آب زیرزمینی		
۲	۷	۱۰	۲	۱	۹	۹	۹	۱	۱۰	مقاومت فشاری تک‌محوری		
۴	۱۲	۱۷	۳	۳	۱۱	۱۱	۱۱	۳	۱۷	شاخص RQD		
۸	۱۱	۲۰	۷	۶	۱۱	۱۳	۱۱	۶	۲۰	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها		
۱۰	۱۵	۱۵	۱۱	۸	۱۲	۱۲	۱۲	۹	۱۵	شرایط دسته درزه‌ها		
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	وضعیت آب زیرزمینی		
۳۶	۵۷	۷۴	۳۵	۳۰	۵۵	۵۷	۵۵	۳۱	۷۴	جمع امتیازات BRMR		
بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	بسیار نامساعد	چگونگی		
-۱۲	-۱۲	-۱۲	-۱۲	-۱۲	-۱۲	-۱۲	-۱۲	-۱۲	-۱۲	امتیاز		
۲۴	۴۵	۶۲	۲۳	۱۸	۴۳	۴۵	۴۳	۱۹	۶۲	امتیاز کلی TRMR		
IV	III	II	IV	V	III	III	III	V	II	طبقه‌بندی نهایی		

می‌شود. در این خصوص واحدهای  $T_1, T_2, T_4$  و  $T_4$  کلاس ۶ نگهداری با سیستم نگهداری پیشنهادی شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت ۱۲ تا ۱۵ سانتی‌متر و بولت به همراه قاب فولادی شاتکریت و بولت، واحد  $T_1$  کلاس ۵ نگهداری با سیستم پیشنهادی شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت ۹ تا ۱۲ سانتی‌متر و بولت، واحد  $T_2$  کلاس ۴ نگهداری با سیستم پیشنهادی شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت ۶ تا ۹ سانتی‌متر و بولت، واحدهای  $T_3, T_5, T_6, T_7$  و  $T_8$  نزدیک به کلاس ۳ نگهداری با سیستم پیشنهادی بولت سیستماتیک و شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت ۵ تا ۶ سانتی‌متر هستند.

۴-۱-۳- ارزیابی کیفیت توده‌سنگ به روش Q

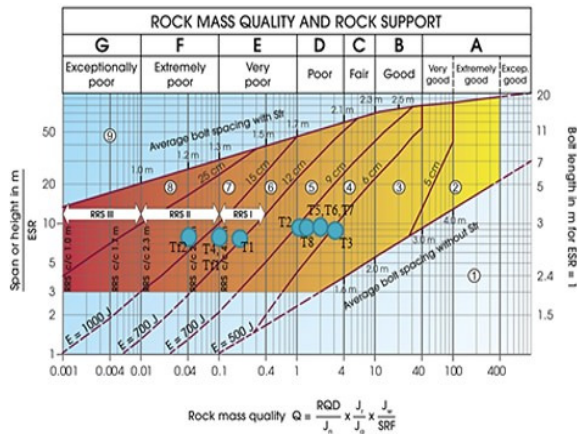
بر اساس روش ارزیابی کیفیت توده‌سنگ (Q)، هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه تونل حاجی‌آباد مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج بدست آمده در جدول ۸ ارائه شده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول فوق، مقدار عددی شاخص Q کمتر از ۰/۰۴ در زون‌های خرد شده تا ۲/۸۳ برای واحدهای مختلف تونل تخمین زده شد. با توجه به مقادیر بدست آمده و بر پایه پیشنهادات پیشنهاد بارتن و همکاران (۱۹۷۴) سیستم نگهداری در این سطح از مطالعات برای واحدهای مختلف مطابق شکل ۵ پیشنهاد



شکل ۴. نمودار پایداری تونل با شرایط مختلف پس از حفاری بدون سیستم نگهداری (بیناوسکی، ۱۹۸۹)

Fig. 4. Diagram of the stability of the tunnel with different conditions after digging without a maintenance system (Beniawski, 1989)



فصله‌داری مرتبط به عدد Q	RRS	طیفه نگهداری
S30/6 Ø16-20 (Span 10m)	I	۱) بدون نیاز به نگهداری یا بولت فعالی
D40/6+2 Ø16-20 (Span 10m)		۲) بولت تنه ای (SB)
S35/6 Ø16-20 (Span 5m)	II	۳) بولت سیستماتیک شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت ۶ تا ۵ سانتی‌متر و بولت $B+Sfr$
D45/6 +2 Ø16-20 (Span 10m)		۴) شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت ۱ تا ۶ سانتی‌متر و بولت $Sfr+E500+B$
D55/6+4 Ø20 (Span 20m)	III	۵) شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت ۱۲ تا ۹ سانتی‌متر و بولت $Sfr+E700+B$
D40/6+4 Ø16-20 (Span 5m)		۶) شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت ۱۵ تا ۱۲ سانتی‌متر و بولت + قاب فولادی، شاتکریت و بولت $Sfr+E700+RRS I+B$
D65/6 +4 Ø20 (Span 10m)	III	۷) شاتکریت تقویت شده با مش به ضخامت بیش از ۱۵ سانتی‌متر + قاب فولادی، شاتکریت و بولت +RRS II $Sfr+E1000+B$
Special evaluation (Span 20m)		۸) لاینک یا سنگت شتی، CCA یا $Sfr+E1000+RRS III+B$
	S30/6	۹) ارزیابی خاصی
	D	فصله پوشاها بر اساس ۲۰۰mm (از آن شده است).
	Ø16	E - جانب گریز بر متن (شاتکریت) تقویت شده
	c/c	ESR - نسبت نگهداری ظاهری
		نقاط خط چین فقط داده بحرالی است.

شکل ۵. سیستم نگهداری تونل به پیشنهاد بارتن و همکاران (۱۹۷۴)

Fig. 5. Tunnel maintenance system based on Barton et al. (1974)

جدول ۸. طبقه‌بندی Q برای واحدهای مختلف تونل

Table 8. The Q classification of different tunnel units

طبقه‌بندی براساس کیفیت توده سنگ (بارتن - Q)										
نشانه	T <sub>8</sub>	T <sub>12</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>11</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>
بخش‌بندی تونل	از کیلومتر	۲+۹۸۷	۲+۹۷۱	۲+۵۹۱	۲+۴۳۴	۲+۲۳۷	۲+۱۷۵	۱+۶۸۳	۱+۵۵۷	۱+۵۰۰
	تا کیلومتر	۳۰+۶۸	۲+۹۸۷	۲+۹۷۱	۲+۵۹۱	۲+۴۳۴	۲+۱۷۵	۱+۶۸۳	۱+۵۵۷	۱+۵۰۰
	طول (متر)	۸۱	۱۶	۳۸۰	۱۵۷	۱۹۷	۶۲	۴۹۲	۳۰	۵۷
چگونگی عوامل روش Q در امتداد ساختمانی تونل و اعداد قابل اطلاق به آنها	توده سنگ (RQD%) شاخص کیفی	۸۰-۹۰	۱-۱۰	۵۰-۶۰	۵۰-۶۰	۵۰-۶۰	۱-۱۰	۱-۱۰	۶۰-۷۰	۱۰-۲۰
دست‌درزها	تعداد	۴ دسته ناپیوستگی تصادفی	خرده شده	۴ دسته ناپیوستگی	۴ دسته ناپیوستگی	۴ دسته ناپیوستگی	خرده شده	۴ دسته ناپیوستگی	۴ دسته ناپیوستگی	۴ دسته ناپیوستگی
	مقدار (Jn)	۱۵	۲۰	۱۵	۱۵	۱۵	۲۰	۱۷	۱۵	۱۵
زبری سطوح درزها	چگونگی	مواج ناهموار و موج	کمی زبر و ناهموار	زبر ناهموار و موج	زبر ناهموار و موج	زبر ناهموار و موج	کمی زبر و ناهموار	کمی زبر و ناهموار	بسیار زبر و ناهموار	کمی زبر و ناهموار
	مقدار (Jr)	۲/۵	۲/۵	۲	۲	۲	۲/۵	۲/۵	۲	۲/۵
هوازدگی و پرشدگی درزها	چگونگی	هوازدگی سطحی - پرشدگی کلسیت	هوازدگی متوسط تا شدید - پرشدگی با رس	هوازدگی متوسط - پرشدگی با رس	هوازدگی متوسط - پرشدگی با رس	هوازدگی متوسط - پرشدگی با رس	هوازدگی متوسط تا شدید - پرشدگی با رس	هوازدگی متوسط تا شدید - پرشدگی با رس	هوازدگی متوسط - پرشدگی با رس	هوازدگی متوسط تا شدید - پرشدگی با رس
	مقدار (Ja)	۲	۲	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲	۲	۲	۲
آبداری درزها	چگونگی	خشک تا جریان محدود	خشک تا جریان محدود	خشک تا جریان محدود	خشک تا جریان محدود	خشک تا جریان محدود	خشک تا جریان محدود	خشک تا جریان محدود	خشک تا جریان محدود	خشک تا جریان محدود
	مقدار (Jw)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
ضریب کاهش تنش	چگونگی	عمیق تونل کمتر از ۵۰ متر	عمیق تونل کمتر از ۵۰ متر	عمیق تونل بیشتر از ۵۰ متر	عمیق تونل بیشتر از ۵۰ متر	عمیق تونل بیشتر از ۵۰ متر	عمیق تونل بیشتر از ۵۰ متر	عمیق تونل بیشتر از ۵۰ متر	عمیق تونل بیشتر از ۵۰ متر	عمیق تونل کمتر از ۵۰ متر
	مقدار (SRF)	۵	۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۵
مقدار شاخص (Q)										
مقدار Jn در پرتال ورودی و خروجی تونل باید در عدد ۲ ضرب شود.										

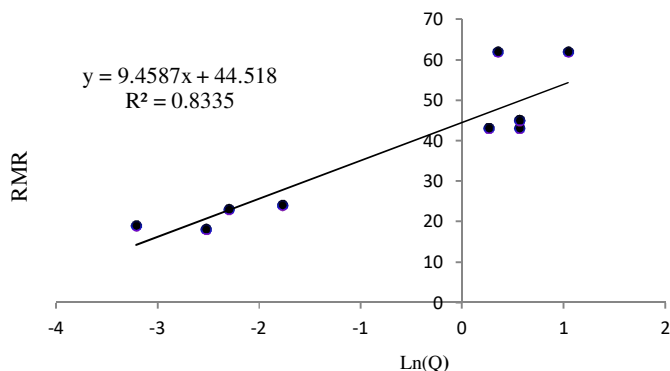
۴-۱-۴- رابطه بین RMR و Q

با برآزش مقدار RMR و Q با رسم نمودار خط راست و استخراج معادله این خط (معادله زیر)، رابطه بین RMR و Q توده‌سنگ‌های ساختمانی تونل با ضریب تعیین  $R^2=0.83$  به صورت شکل (۶) است. مقدار RMR حاصل از معادله زیر به همراه RMR تعدیل شده (T RMR) در جدول (۹)

ارائه شده است. در شکل (۷) نتایج بین TRMR و RMR حاصل از معادله خطی فوق برای تدقیق نتایج ارائه شده است که نشان می‌دهد بین این دو پارامتر همبستگی نزدیکی  $R^2=0.90$  وجود دارد.

(رابطه ۳)

$$RMR = 9.45 \ln Q + 44.51$$

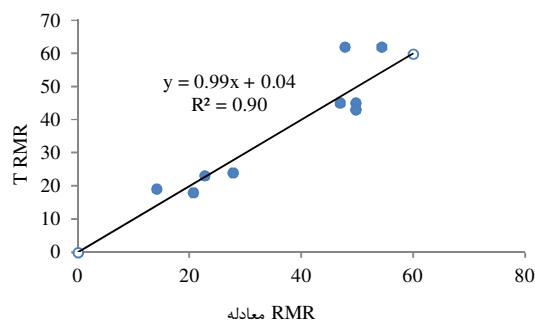


شکل ۶. هم‌ارزی بین RMR و Q برای سنگ‌های ساختگاه تونل  
 Fig. 6. Equivalence between RMR and Q of tunnel site rocks

جدول ۹. نتیجه TRMR و RMR حاصل از معادله

Table 9. The result of TRMR and RMR obtained from the equation

T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>n</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	واحد زمین‌شناسی
۲۴	۴۵	۶۲	۲۳	۱۸	۴۳	۴۵	۴۳	۱۹	۶۲
۲۷	۴۷	۵۵	۲۳	۲۰	۴۹	۴۹	۴۹	۱۵	۴۸
									TRMR
									RMR معادله

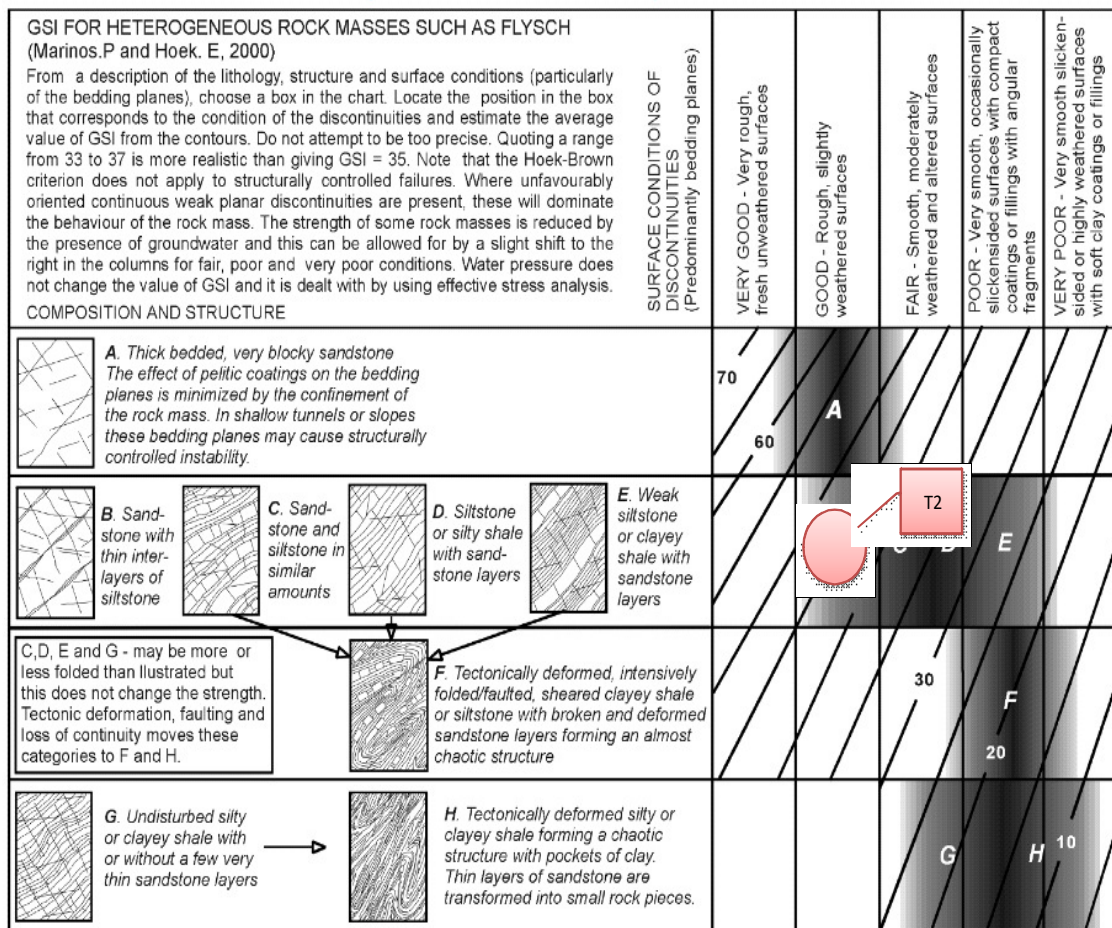


شکل ۷. هم‌ارزی بین TRMR و RMR حاصل از معادله  
 Fig. 7. Equivalence between TRMR and RMR resulting from the equation

خوب و واحد T<sub>1</sub> نیز از توده‌سنگ‌های خیلی بلوکی تشکیل و در دره متوسط و واحد T<sub>4</sub> که از سنگ‌های خرد شده و چین‌خورده تشکیل شده در رده ضعیف قرار می‌گیرد. شکل‌های ۸ و ۹ مقادیر این پارامتر را برای واحدهای مختلف تونل حاجی‌آباد نشان می‌دهد. این نمودار توسط کای و همکاران (۲۰۰۴) بر پایه ابعاد بلوک و فاصله‌داری درزه‌ها به روزرسانی گردید. همچنین سومز و اولوسی (۱۹۹۹) سعی کردند با وارد کردن شرایط سطح درزه‌ها رابطه بهتری برای این پارامتر ارائه کنند. در این پژوهش با استفاده از هر سه این روش‌ها مقدار GSI تعیین گردید که نتایج آن در جدول ۱۰ ارائه شده است.

#### ۴-۱-۵- شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)

شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) مبتنی بر ارزیابی سنگ‌شناسی، ساختار و وضعیت سطوح ناپیوستگی در توده‌سنگ است. در این خصوص هوک و مارینوس (۲۰۰۰) نموداری را برای تعیین مقدار عددی GSI ارائه داده‌اند. همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود براساس طبقه‌بندی GSI که برای هریک از واحدهای ده‌گانه ساختگاه تونل انجام شد، واحد T<sub>2</sub> که از سنگ‌های فلیشی تشکیل شده‌اند شامل ماسه‌سنگ با میان لایه‌های سیلت در کلاس B و رده خوب قرار گرفت. واحدهای T<sub>3</sub>، T<sub>5</sub>، T<sub>6</sub> که از سنگ‌های خیلی بلوکی تشکیل شده، در رده



شکل ۸. سیستم طبقه‌بندی GSI برای بخش فلیش تونل مورد مطالعه (برگرفته از هوک و مارینوس، ۲۰۰۰)

Fig. 8. GSI classification system of the studied flash tunnel parts (from Hoek and Marinos, 2000)

جدول ۱۰. طبقه‌بندی GSI برای واحدهای مختلف تونل با روش‌های GSI(S) (سونمز و اولوسی، ۱۹۹۹) و GSI(M) (هوک و مارینوس، ۲۰۰۰)  
Table 10. GSI Classification of different tunnel units with GSI(S) (Sonmez and Ulusay, 1999) and GSI (M) (Hoek and Marinos, 2000) methods

روش	بخش	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>fl</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>l2</sub>	T <sub>8</sub>
سونموز	SCR	۷	۱۳	۱۳	۸	-	۱۰	۱۰	۱۰	-	۱۳
	JV	۱۸	۷	۱,۵	۳۷	-	۷	۸	۶	-	۱,۵
	SR	۳۲	۵۵	۸۰	۲۲	-	۵۵	۵۴	۵۶	-	۸۰
	GSI(S)	۳۵	۵۲	۶۲	۳۲	-	۴۵	۴۵	۴۵	-	۶۲
مارینوس و هوک	GSI(M)	۴۰	۴۵	۶۰	۳۳	۱۵	۵۲	۵۲	۵۲	۲۰	۶۰
متوسط		۳۸	۴۹	۶۱	۳۳	۱۵	۴۹	۴۹	۴۹	۲۰	۶۱

شده، بنیواسکی (۱۹۸۴) رابطه زیر را به منظور هم‌ارز نمودن مقادیر RMR و Q پیشنهاد کرده است.  
(رابطه ۴)  $(RMR') = 9 \ln(Q) + 44$   
برای مقایسه این دو روش، نسبت RMR/RMR' مدنظر قرار می‌گیرد. هرچه نسبت یاد شده به عدد یک نزدیکتر باشد، هماهنگی بیشتری بین نتایج رده‌بندی به این دو روش

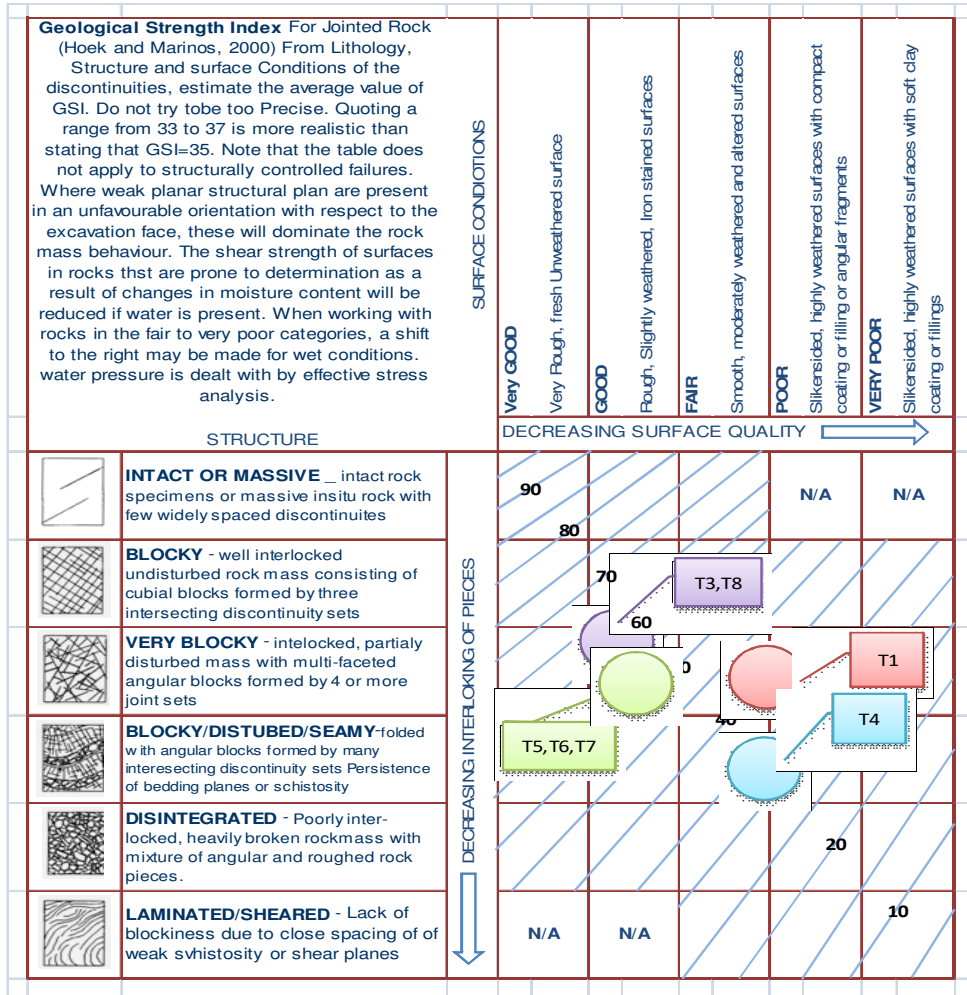
۴-۱-۶- مقایسه سه روش RMR، Q و GSI  
کاربرد هر یک از روش‌های RMR، Q و GSI در طبقه‌بندی توده‌سنگ میزبان تونل‌ها، کمک شایانی به اخذ تصمیم در خصوص مشکلات عملی، مانند نوع حفاری و حایل‌بندی به شمار می‌آید. برای ایجاد سهولت در مقایسه روش‌های یاد

در این روابط،  $Q'$  برابر است با  $(RQD/Jn) \times (Jr/Ja)$  و RMR امتیاز توده‌سنگ می‌باشند. نتایج حاصل از مقایسه روش‌های مذکور در جدول ۱۱ ارائه شده است.

برقرار است. همچنین جهت مقایسه سه روش یاد شده بالا، (هوک و براون، ۱۹۸۸) روابط زیر را پیشنهاد کردند.

$$GSI' = RMR - 5 \quad \text{For } GSI \geq 18 \text{ or } RMR \geq 23$$

$$GSI' = 9 \ln Q' + 44 \quad \text{For } GSI < 18$$



شکل ۹. سیستم طبقه‌بندی GSI برای بخش‌های مختلف تونل مورد مطالعه (برگرفته از هوک و مارینوس، ۲۰۰۰)

Fig. 9. GSI classification system for different parts of the studied tunnel (from Hoek and Marinos, 2000)

جدول ۱۱. مقایسه مقادیر RMR، Q و GSI در ساختگاه تونل حاجی‌آباد

Table 11. Comparison of the RMR, Q and GSI values in the Hajiabad tunnel site

بخش	Q	TRMR	RMR'	RMR/TRMR	GSI	GSI'	GSI/GSI'
T <sub>1</sub>	۰/۱۷	۲۴	۲۷/۸۷	۱/۱۶	۳۷/۵۰	۳۴	۰/۹۱
T <sub>2</sub>	۱/۳۰	۴۵	۴۶/۳۶	۱/۰۳	۴۸/۵۰	۵۵	۱/۱۳
T <sub>3</sub>	۲/۸۳	۶۲	۵۲/۳۷	۰/۸۶	۶۱	۷۲	۱/۱۸
T <sub>4</sub>	۰/۱۰	۲۳	۲۳/۱۰	۱	۳۲	۳۳	۱/۰۲
T <sub>f1</sub>	۰/۰۸	۱۸	۲۱/۴۶	۱/۲۰	۲۰	۲۸	۱/۴۰
T <sub>5</sub>	۱/۷۶	۴۳	۴۹/۰۹	۱/۱۴	۴۸/۵۰	۵۳	۱/۰۹
T <sub>6</sub>	۱/۷۶	۴۵	۴۹/۰۹	۱/۰۹	۴۸/۵۰	۵۵	۱/۱۳
T <sub>7</sub>	۱/۷۶	۴۳	۴۹/۰۹	۱/۱۴	۴۸/۵۰	۵۳	۱/۰۹
T <sub>f2</sub>	۰/۰۴	۱۹	۱۵/۴۰	۰/۸۱	۲۰	۲۹	۱/۴۵
T <sub>8</sub>	۱/۴۲	۶۲	۴۷/۱۳	۰/۷۶	۶۱	۷۲	۱/۱۸



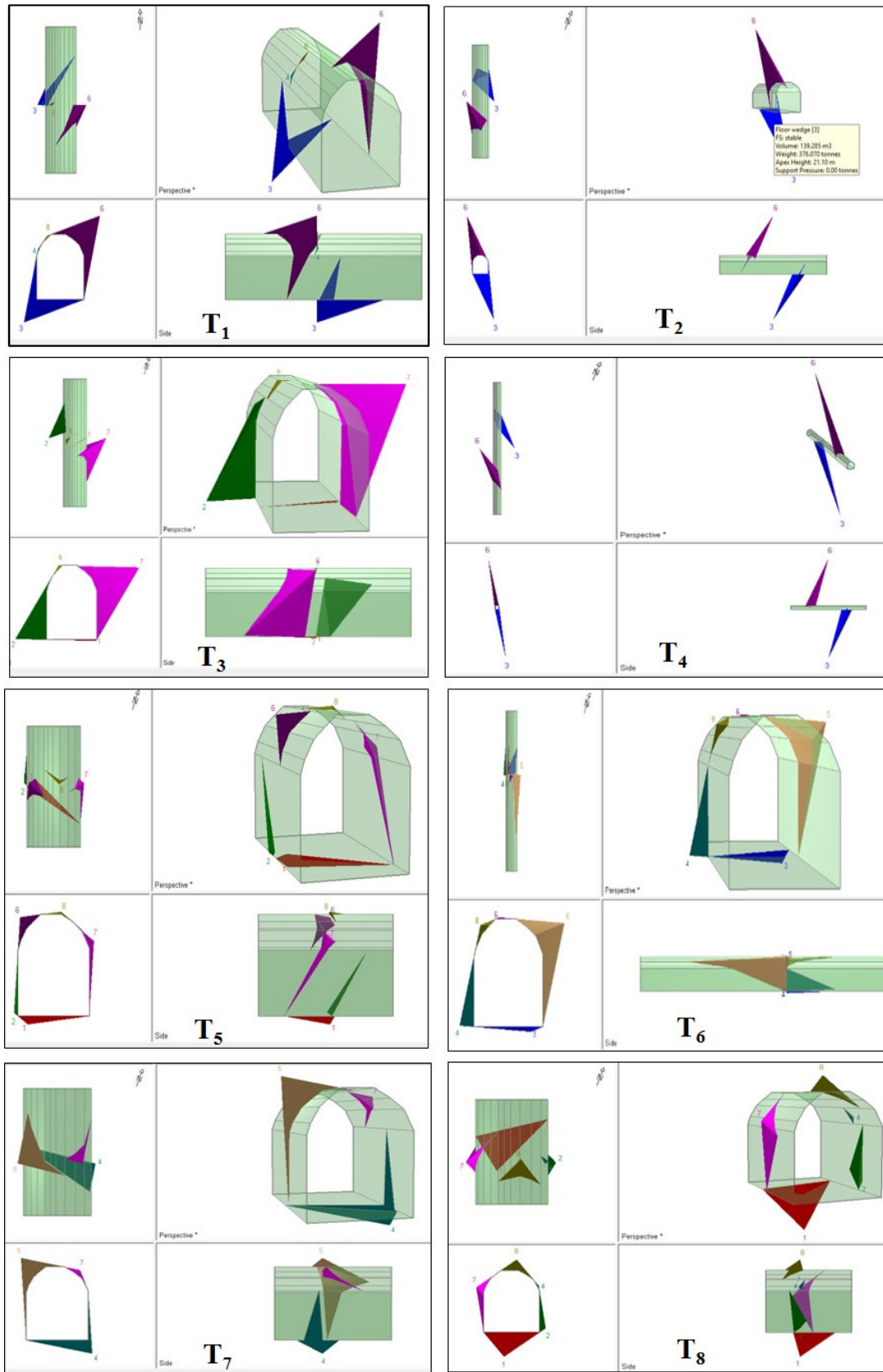
است که با نصب تعداد ۳ عدد پیچ‌سنگ با فاصله  $1 \times 0.70$  و طول  $0.2$  متر به ضریب اطمینان  $2/0.92$  رسیده است. به طور کلی ساختگاه تونل از سازندها و سنگ‌های مختلفی ساخته شده است که بخش اعظم آن را سنگ‌های آهکی تشکیل داده است که شامل سه واحد سرپانتینیتی، سنگ آهک ماسه‌ای و سنگ آهک توده‌ای است. همانطور که گفته شد ساختگاه تونل مورد مطالعه به دلیل تنوع در جنس سنگ‌ها خصوصیات ساختاری نیز تغییرات زیادی در مسیر تونل دارد به همین دلیل ساختگاه تونل به ده واحد  $T_1$  تا  $T_8$  و دو زون خردشده  $T_1$  و  $T_2$  از ورودی به سمت خروجی تقسیم‌بندی شد که قبلاً به آن اشاره گردید. واحدهای  $T_1$  و  $T_4$  از سرپانتینیت تشکیل یافته و واحد  $T_2$  از سنگ‌آهک ماسه‌ای تشکیل شده است، واحدهای  $T_3$  و  $T_5$  و  $T_6$  و  $T_7$  و  $T_8$  از سنگ‌آهک توده‌ای تشکیل یافته‌اند. سنگ‌آهک توده‌ای و ماسه‌ای به دلیل پارامترهای مقاومتی بالا و عملکرد گسل‌های رانده معمولاً صخره‌ساز هستند در مقابل واحدهای سرپانتینیتی به دلیل پارامترهای مقاومت پایین فرسایش‌پذیرتر و بیشتر هوازده می‌شوند و نواحی کم ارتفاع‌تر و فرورفته را تشکیل می‌دهند. که این علت را می‌توان به وجود سنگ‌هایی با کانی‌هایی با پایه رسی مرتبط دانست. سنگ‌آهک ماسه‌ای که بخشی از پرتال ورودی تونل را تشکیل می‌دهد دارای طیف وسیعی از سنگ‌هایی است که پارامترهای مقاومتی متفاوتی را دارا می‌باشند که این ویژگی سبب فرسایش واحدهای ضعیف‌تر و سقوط بلوک‌های سنگی که عمدتاً آهکی هستند، در دامنه‌ها شده است. همچنین ضعیف بودن واحدهای سرپانتینیتی و سنگ‌آهک ماسه‌ای به دلیل وجود کانی‌های رسی باعث افزایش ناپایداری در مقطع تونل شده است. این موضوع مهم در نتایج روش‌های تجربی و عددی مشخص است. نتایج روش عددی نشان می‌دهد که در واحدهای با سنگ ضعیف برای پایداری بلوک‌های تشکیل شده فاصله و تعداد پیچ‌سنگ‌ها افزایش یافته و فاصله آن‌ها کاهش یافته است. همچنین، ناپایداری در مقطع تونل به میزان دسته درزه‌ها و تقاطع آن‌ها با یکدیگر بستگی دارد. برای دو زون گسلی خردشده، هرچه میزان خردشدگی و ارتفاع روباره بیشتر باشد، ناپایداری افزایش یافته و احتمال پدیده لهیدگی افزایش پیدا می‌کند. واحد  $T_{f1}$  که اولین زون خورد شده  $700$  متر بعد از ورودی تونل است با  $62$  متر طول و ضخامت  $252$  متر احتمال پدیده لهیدگی وجود دارد.

همانطور که در جدول فوق مشاهده می‌شود بعد از مطالعات و بررسی و طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌های ساختگاه تونل حاجی‌آباد و تفکیک آن‌ها به واحدهای زمین‌شناسی مختلف هر یک از واحدهای ده‌گانه زمین‌شناسی به طور مجزا و جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. مقادیر بدست آمده از هر یک از واحدهای زمین‌شناسی در طول مسیر تونل بعد از محاسبه در جدول بالا قرار گرفته که پس از محاسبه مقدار TRMR و GSI مقادیر RMR و GSI محاسبه شده که با تقسیم TRMR / RMR و GSI / GSI مقادیر بدست آمده از سه روش مذکور با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اطلاعات به دست آمده نشان‌دهنده این است که نتایج سه روش مورد استفاده قرار گرفته شده در این پژوهش با یکدیگر مطابقت و همخوانی دارند.

#### ۴-۲- تحلیل پایداری ساختگاه تونل به روش تعادل حدی

در این پژوهش، تحلیل پایداری ساختگاه تونل حاجی‌آباد به روش تعادل حدی به کمک نرم‌افزار Unwedge.v.3.0 که یک برنامه کامپیوتری به‌منظور بررسی سه‌بعدی گوه‌های سنگی و تعیین سیستم نگهدارنده مناسب برای آنها می‌باشد، انجام شده است. بدین منظور هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل به‌طور جداگانه مورد بررسی و تحلیل پایداری قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از این روش در شکل ۱۰ و جدول ۱۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار Unwedge v.3.0 گوه‌هایی که در سقف و دیواره تونل تشکیل می‌شوند تعدادی پایدار و تعدادی دارای ضریب اطمینان بالاتر از  $1/5$  هستند و فقط تعدادی از گوه‌ها دارای ضریب اطمینان پایین‌تر از  $1/5$  هستند که به محض حفاری با ارائه پیچ‌سنگ به ضریب اطمینان قابل قبول (بالاتر از  $1/5$ ) دست پیدا می‌کنند. در این روش بزرگ‌ترین گوه در بخش  $T_4$  با حجم  $2019/742$  متر مکعب و وزن  $5453$  تن با ارتفاع  $98/41$  متر که ضریب ایمنی آن قبل از نصب پیچ‌سنگ  $0/205$  که فشار وارد بر ساپورت  $130$  تن بوده است که با نصب تعداد  $37$  عدد پیچ‌سنگ با فاصله  $0/4 \times 0/4$  و طول  $105$  متر به ضریب اطمینان  $1/779$  رسیده است. همچنین کوچک‌ترین گوه در بخش  $T_1$  با حجم  $0/16$  متر مکعب و وزن  $0/077$  تن با ارتفاع  $0/16$  متر است که ضریب اطمینان آن قبل از نصب پیچ‌سنگ  $0/045$  که فشار وارد بر سیستم حایل معادل  $0/26$  تن بوده



شکل ۱۰. گوه‌های تشکیل شده در بخش‌های T<sub>1</sub> تا T<sub>8</sub>  
 Fig. 10. Wedges formed in the T<sub>1</sub> to T<sub>8</sub> parts

جدول ۱۲. مشخصات گوه‌های بخش‌های  $T_1$  تا  $T_8$   
 Table 12. Specification of wedges of the parts of  $T_1$  to  $T_8$

مشخصات گوه‌های بخش $T_1$										
شماره گوه	رنگ	حجم ( $m^3$ )	وزن (تن)	ارتفاع (متر)	Fs	تعداد پیچ‌سنگ‌ها	فشار وارد به ساپورت (تن)	فاصله پیچ‌سنگ‌ها (متر)	طول پیچ‌سنگ‌ها (متر)	Fs بعد از نصب پیچ‌سنگ
۳	آبی	۱۷۰/۶۸	۴۶/۰۸۲	۳/۶۴	پایدار	-	-	-	-	-
۴	آبی روشن	۰/۰۱۶	۰/۰۷۷	۰/۱۶	۰/۰۴۵	۳	۰/۲۶	۱*۰/۷۰	۰/۲	۲/۰۹۲
۶	بنفش	۲۵/۶۴۸	۶۹/۲۴۹	۵/۰۶	۰/۱۷۰	۱۱	۶/۲۱	۱*۱	۵/۵	۱/۵۷۱
۸	سبز تیره	۰/۰۳۶	۰/۰۹۸	۰/۲۴	۰	۳	۰/۴۱	۱*۰/۷	۰/۵	۱/۷۰۷
مشخصات گوه‌های بخش $T_2$										
۲	آبی	۱۳۹/۲۸۵	۳۶۷/۰۷۰	۲۱/۱۰	پایدار	-	-	-	-	-
۶	بنفش	۹۴/۸۰۷	۲۵۵/۹۷۹	۱۸/۷۴	۰/۳۳۶	۱۳	۲۳/۸۳	۰/۶*۰/۶	۲۰	۱/۷۷۳
مشخصات گوه‌های بخش $T_3$										
۱	قرمز	۰/۰۲۸	۰/۰۷۶	۰/۱۴	پایدار	-	-	-	-	-
۲	سبز	۳۵/۱۷۷	۹۴/۹۷۸	۴/۵۹	۱۱۲	-	-	-	-	-
۷	صورتی	۹۱/۱۵۴	۲۴۶/۱۱۵	۶/۸۵	۰/۸۵۱	۹	۲/۶۰	۱*۲	۷/۵	۱/۵
۸	سبز تیره	۰/۱۵۴	۰/۴۱۵	۰/۳۵	۰	۳	۰/۵۷	۰/۷*۰/۷	۰/۴	۱/۶۸۰
مشخصات گوه‌های بخش $T_4$										
۳	آبی	۲۱۵۷	۵۸۷۵	۱۰۰/۹۴	پایدار	-	-	-	-	-
۶	بنفش	۲۰۱۹/۷۴۲	۵۴۵۳	۹۸/۴۱	۰/۲۰۵	۳۷	۱۳۰	۰/۴*۰/۴	۱۰۵	۱/۷۷۹
مشخصات گوه‌های بخش $T_5$										
۱	قرمز	۱/۴۸۱	۳/۹۹۹	۰/۷۲	پایدار	-	-	-	-	-
۲	سبز	۰/۲۸۶	۰/۷۷۲	۰/۴۱	۱/۱۱۳	۵	۰/۰۶	۱*۲	۰/۵	۱/۵۵۴
۶	بنفش	۱/۲۱۲	۳/۲۷۳	۱/۱۸	۰/۲۶۹	۳	۱/۲۲	۱*۱	۱/۳	۱/۷۴۴
۷	صورتی	۰/۷۶۳	۲/۰۵۹	۰/۷۴	۰/۳۴۷	۷	۰/۷۱	۱*۱	۱	۱/۷۲۵
۸	سبز تیره	۰/۰۶۱	۰/۱۶۶	۰/۲۴	۰	۳	۰/۳۰	۱*۱	۰/۳۵	۱/۸۱۰
مشخصات گوه‌های بخش $T_6$										
۳	آبی	۵/۷۶۲	۱۵/۵۵۷	۰/۴۰	پایدار	-	-	-	-	-
۴	آبی روشن	۲۳/۵۸۷	۶۳/۶۸۶	۱/۵۳	۱/۱۳۹	-	-	-	-	-
۵	قهوه‌ای روشن	۱۲۳/۶۶۲	۳۳۳/۸۸۸	۳/۲۰	۰/۱۸۴	۱۰	۲/۹۷	۱*۲	۳/۵	۱/۵۳۷
۶	بنفش	۰/۱۵۵	۰/۴۱۸	۰/۱۲	۰/۰۴۰	۲	۰/۱۶	۱*۱	۰/۲	۲/۱۰
۸	سبز تیره	۳/۲۷۷	۸/۸۴۷	۰/۶۶	۰	۴	۱/۱۸	۱*۱	۰/۸۵	۱/۷۸۱
مشخصات گوه‌های بخش $T_7$										
۴	آبی	۷/۳۴۹	۱۹/۸۴۲	۱/۶۷	پایدار	-	-	-	-	-
۵	قهوه‌ای روشن	۱۲/۵۴۵	۳۳/۸۷۳	۲/۷۰	۰/۰۶۵	۱۰	۲/۳۹	۱*۱	۳	۱/۸۴۴
۷	صورتی	۰/۵۷۴	۱/۵۵۱	۰/۶۷	۰/۰۴۰	۴	۱/۰۲	۱*۱	۰/۹	۱/۵۸۴
مشخصات گوه‌های بخش $T_8$										
۱	قرمز	۱۸/۲۲۴	۴۹/۲۰۴	۳/۴۲	پایدار	-	-	-	-	-
۲	سبز	۳/۱۱۵	۴/۱۲۰	۰/۸۳	۳/۱۱۵	-	-	-	-	-
۴	آبی	۰/۰۲۹	۰/۰۷۹	۰/۲۰	۰/۰۵۹	۴	۰/۲۶	۰/۵*۰/۵	۰/۳	۱/۹۹۹
۷	صورتی	۲/۸۸۹	۷/۸۰۲	۱/۱۵	۰/۲۲۵	۸	۱/۱۴	۱*۱	۱/۳۰	۱/۵۲۷
۸	سبز تیره	۱/۸۶۵	۵/۰۳۶	۱/۴۹	۰	۵	۱/۹۱	۱*۱	۱/۶۰	۱/۷۴۴

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تحلیل پایداری ساختگاه تونل حاجی‌آباد واقع در استان هرمزگان با استفاده از سه روش انجام شده است. برای این منظور در ابتدا با توجه به تفاوت در جنس و خصوصیات سنگ‌های ساختگاه تونل به منظور تفکیک واحدهای زمین‌شناسی از طبقه‌بندی BGD که توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (۱۹۸۹) پیشنهاد شده استفاده شده است. تحلیل پایداری ساختگاه تونل با استفاده از سه روش استریوگرافیک، روش‌های تجربی (RMR, RQD, Q و GSI) و روش تعادل حدی به کمک نرم‌افزار Unwedge v.3.0 انجام شده است. وضعیت زمین در مسیر تونل حاجی‌آباد از نظر توپوگرافی در کوهستان قرار می‌گیرد. آبراه‌های موجود در منطقه نشان‌دهنده این است که محل عبور آب حاصل از بارش‌های فصلی است و منطبق بر سیستم گسل‌های منطقه است. مطالعات صحرائی نشان می‌دهد که از پرتال ورودی تا خروجی تونل، علاوه بر تغییر در جنس لایه‌ها، تغییر در خصوصیات ساختاری واحدهای تشکیل‌دهنده مسیر تونل نیز وجود دارد. همین موضوع سبب شده تا واحدهای زمین‌شناسی مهندسی مختلفی در مسیر تونل تشکیل شود. بر اساس طبقه‌بندی BGD محدوده تونل به ۱۰ واحد مجزا تقسیم شد. در امتداد میسر تونل دو زون خردشده وجود دارد که زون اول از کیلومتر ۲+۱۷۵ تا ۲+۲۳۷ به طول ۶۲ متر مسیر از میان یک راندگی عبور می‌کند. آثار این راندگی را می‌توان به صورت زونی خردشده در سطح زمین مشاهده کرد. زون دوم از کیلومتر ۲+۹۷۱ تا ۲+۹۸۷ به طول ۱۶ متر می‌باشد. نتایج آزمایش‌های فیزیکی بیانگر این است که با افزایش عمق میزان رطوبت موجود در نمونه‌های حاصل از گمانه ساختگاه تونل افزایش یافته و میزان تخلخل با افزایش عمق افزایش یافته و دانسیته نمونه‌ها با افزایش عمق کاهش یافته است. که این یافته‌ها بیانگر وجود ریزترک‌ها و گسترش کارست در منطقه است. نتایج آزمایش سه‌محوری (UU) سنگ‌های ساختگاه تونل بیانگر این است که با افزایش عمق و افزایش فشار محصور کننده و افزایش تنش انحرافی مدول‌یانگ نیز افزایش یافته که بیانگر افزایش کیفیت توده‌سنگ از سطح به عمق می‌باشد. با استفاده از نتایج بدست آمده از روش ارزیابی RQD سنگ‌های ساختگاه تونل در محدوده‌های بسیار ضعیف تا خوب قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج بدست آمده از روش

RMR به سنگ‌های بخش‌های مختلف تونل امتیاز ۱۸ تا ۶۲ تعلق گرفت، که نشان‌دهنده قرار گرفتن سنگ‌های ساختگاه تونل حاجی‌آباد در رده خیلی ضعیف تا خوب است. بر این اساس بیشترین زمان خود ایستایی برای تونلی با عرض دهانه ۸ متر برای بخش‌های دارای سنگ خوب خود ایستایی بیش از دو ماه و برای بخش‌های متوسط حدود یک هفته و برای سایر بخش‌ها به محض حفاری ناپایدار خواهند بود. بر اساس نتایج بدست آمده از روش تجربی Q، به سنگ‌های بخش‌های مختلف تونل امتیاز ۰/۰۴ تا ۲/۸۳ تعلق گرفت که در رده سنگ‌های بی‌نهایت ضعیف تا ضعیف قرار می‌گیرند. برای ارزیابی خواص مقاومتی سنگ‌ها از روش تجربی GSI استفاده شد که به سنگ‌های بخش‌های مختلف تونل امتیاز ۱۵ تا ۶۱ تعلق گرفت. بر این اساس سنگ‌های بخش‌های مختلف تونل در رده‌های خیلی ضعیف تا خوب قرار می‌گیرند. بررسی نتایج نشان داد که روش‌های تجربی کاملاً با یک دیگر مطابقت و هم‌خوانی دارند. با توجه به نتایج بدست آمده از روش تعادل حدی به کمک نرم‌افزار Unwedge v.3.0، گوه‌هایی که در سقف و دیواره تونل تشکیل می‌شوند تعدادی پایدار و تعدادی دارای ضریب اطمینان بیشتر از ۱/۵ هستند و فقط تعدادی از گوه‌های ایجاد شده دارای ضریب اطمینان کمتر از ۱/۵ هستند که به محض حفاری با ارائه پیچ‌سنگ مناسب به ضریب اطمینان قابل قبول (بالتر از ۱/۵) دست پیدا می‌کنند.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت مهندسی مشاور طوس آب و جناب آقای مهندس عباسعلی صبا بخاطر در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات خام مورد استفاده در پژوهش صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

## References

- Ahmadi Khounsaraki, V., Uromeihy, A., Nikudel, M. R., & Amiri, M (2023) Angouran mine access tunnel stability assessment using the experimental classification method and fuzzy hierarchical analysis (FAHP). *New Findings in Applied Geology*, (in Persian), doi: 10.22084/nfag.2023.27215.1542.
- Barton, N. R., Lien, R., and Lunde, J (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4): 189–236. (in persian).

- behaviour of rocks on concrete lining in a large cross-section tunnel. *Geomechanics and Engineering*, 29(1): 41–51, doi.org/10.12989/gae.2022.29.1.041.
- Nikoobakht, S., Mehrnahad, H., Azarafza, M., Asghari-Kaljahi, E (2020) Deformation analyses and plastic zone expansion in the tunnel Isfahan Golab 2 rock mass by convergence-confinement and numerical methods. *New Findings in Applied Geology*, 14(27): 55–71. doi: 10.22084/nfag.2019.19766.1387.
- Palmstrom, A (1996) The weighted joint density method leads to improved characterization of jointing. *Int. Conf. on Recent Advances in Tunnelling Technology*, New Delhi, India, p. 6.
- Palmstrom, A (2005) Measurements of and correlation between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnels and underground space Technology*, 20: 326–377, doi.org/10.1016/j.tust.2005.01.005.
- Pirnia, F., Hadei, M. R., & Rashidell, A (2021) Numerical investigation of the interaction of adjacent tunnels - Influence of excavation sequence (Case: East access tunnels of Iran Mall). *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 11(26): 35-45, (in Persian), doi: 10.22034/anm.2021.1937.
- Rahimi, H (2013) *Geotechnical engineering; Subsurface investigations*, first edition, Tehran University Press. (in persian)
- Rama Sastry, V., Ram Chandar, K., Madhumitha, S., Sruthy, T.G (2016) Tunnel Stability under Different Conditions: Analysis by Numerical and Empirical Modeling. *International Journal of Geological and Geotechnical Engineering*, 1(2): 1–13.
- Ramesh, A., Hajihassani, M., Rashidell, A (2020) Ground Movements Prediction in Shield-Driven Tunnels using Gene Expression Programming. *The Open Construction & Building Technology Journal*, 14(2): 286–297, 10.2174/1874836802014010286.
- Sazid, M., Ahmed, H. A (2019) Stability Analysis of Shallow Depth Tunnel in Weak Rock Mass: 3D Numerical Modeling Approach. *Journal of City and Development*, 1(1): 18–22.
- Sonmez, H., and Ulusay, R (1999) Modification to the Geological Strength Index (GSI) and Their Applicability to Stability of Slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36: 743–760.
- Su, Ya., Su Yonghua, Zhao, Minghua, Vlachopoulos, Nicholas (2021) Tunnel Stability Analysis in Weak Rocks Using the Convergence Confinement Method. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(2): 559–582, doi.org/10.1007/s00603-020-02304-y.
- Tarigh Azali, S., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R., Hassanpour, J (2013) *Engineering geological*
- Bieniawski, Z. T (1989) *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York, p. 251.
- Cai, M., Kaiser, P. K., Uno, H., Tasaka, Y., Minami, M (2004) Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(1): 3–19, doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00025-X.
- Cao, C., Shi, C., Lei, M., Yang, W. and Liu, J (2018) Squeezing failure of tunnels: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77: 188–203, doi.org/10.1016/j.tust.2018.04.007.
- Chao Qun Liu, WenQun Fu, Wei Luo, Dan Liu, Yang Sun (2020) Sensitivity Analysis Of Influencing Factors On Tunnel Stability In Bad Geological Slope Sections, 145: 1–6, doi.org/10.1051/e3sconf/202014502049.
- Deere, D. U, and Deere, D. W (1989) Rock quality designation (RQD) after twenty years. *Contract Report GL-89-1*. US Army Corps of Engineers.
- Goel, R. K., Singh, B., Zhao, J (2012) *Underground Infrastructures: planning, design, and construction*. USA, Oxford: Butterworth-Heinemann, p. 328.
- Hoek, E., Brown, E. T (1988) The Hoek-Brown failure criterion- an update. P oc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed.J.C. Curran), 31-38. Toronto, Dep. Civil Engineering, University of Toronto. Canada.
- ISRM (International Society of Rock Mechanic) (1981) Rock characterization, testing and Monitoring. In: Brown, E.T., (Ed.), *ISRM, Suggested methods for the Quantitative Description of discontinuities in the rock mass*. Oxford, London, Pergamon, p. 211.
- Lu, H., Gutierrez, M., Kim, H (2022) Empirical approach for reliability evaluation of tunnel excavation stability using the Q rock mass classification system. *Underground Space*, 7(5): 862–881.
- Mahmudian Heris, A., Asef, M., Ganbari, A., Gorbani, H (2017) Evaluation of the geomechanical properties of rock masses freeway tunnel Pырshryf located in Arak-Khorramabad and suggested support system based on empirical and numerical methods. *New Findings in Applied Geology*, 11(21): 17–33. doi: 10.22084/nfag.2017.1921.
- Margan, B (2016) Evaluation of engineering geological features of Hajiabad tunnel site in Hormozgan province. M. Sc. Thesis in Engineering Geology, Damghan Universith, Damghan, Iran, p. 120. (in persian).
- Memarian, H (2012) *Engineering Geology and Geotechnics*, Tehran University Press. p. 922. (in persian).
- Mirzaeiabdolyousefi, M., Nikkhah, M., Zare, S (2022) Assessment of time-dependent

- investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, east-west lot of line 7, Tehran metro, Iran. *Engineering geology*, 166: 170–185.
- Toosab Consulting Engineers, (2015) Geological Report of Tunnel Engineering, Second Stage Studies, Hajiabad Tunnel Project Studies. p. 138. (in persian).
- Wafaian, M (1996) *Engineering Properties of Rocks (Theory and Practical Applications)*. Isfahan Publishing House. p. 446.
- Wang, X., Iura, T., Jiang, Y., Wang, Z. and Liu, R (2021) Deformation and mechanical characteristics of tunneling in squeezing ground: A case study of the west section of the Tawarazaka Tunnel in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109: 103–697, doi.org/10.1016/j.tust.2020.103697.

## Stability analysis of the Haji-Abad tunnel site using experimental and limit equilibrium methods

B. Margan<sup>1</sup> and D. Fereidooni<sup>2\*</sup>

1- M. Sc. of Geology, Earth Sciences Faculty, Damghan University, Damghan, Semnan, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Earth Sciences Faculty, Damghan University, Damghan, Semnan, Iran

\* d.fereidooni@du.ac.ir

Received: 2023.7.17 Accepted: 2023.10.14

### Abstract

In this research, engineering geological characteristics of the Haji-Abad tunnel site in Hormozgan province have been assessed and its stability analysis is carried out using experimental and limit equilibrium methods. The tunnel site was divided into ten geotechnical units including T<sub>1</sub>–T<sub>8</sub> and two crushed zones in Units 5 (T<sub>f1</sub>) and 9 (T<sub>f2</sub>) using the BGD method. The rock discontinuities in the tunnel site have filled by calcite and clay, with dry to wet surface conditions, and low degree of weathering. The internal friction angle of the discontinuities surfaces ranges 15°–45°, their persistence is from about 3 to more than 20m, their spacing is 0.15–4m, and their opening is 0.1–5mm. The compressive strength of the site rocks, except for the two crushed zones that have different conditions, varies 20–120MPa. The moisture content of the samples obtained from the boreholes of the tunnel site were 0.12–2.87%, and their porosity were 7.33–0.32%, respectively. The tunnel site rocks are placed in the very poor to good classes with RQD values from 25 to 90. According to the RMR classification, the rocks in the tunnel site have a score of 18–62 (very poor to good). Also, by using the Q method, the rocks of different unites of the tunnel site were given a score rang of 0.04–2.83 (extremely weak to weak). The GSI method indicated that the site constructing rocks range is 15–61 (very poor to good). By using Unwedge.v.3.0 software, the maximum and minimum weight values of the formed wedges were obtained 5875 and 0.076 tons, with heights of 100.94 and 0.12m, respectively. Also, the safety factor is 0.04–112 and the wedges that had a safety factor less than 1.5 will be reached an acceptable safety factor by installing rockbolt.

**Keywords:** Engineering geology, Site, Haji-Abad tunnel, Stability analysis, Limit equilibrium

### Introduction

In inaccessible mountainous areas, which are unsuitable for constructing surface structures in terms of geological conditions, a lot of money and time should be spent on their site. In order to save costs and time and ensure the stability of engineering structures in such areas, they must be built underground. Therefore, tunnels and underground spaces are constructed almost anywhere where it may be difficult or impossible to provide a place to build a structure on the ground surface. Underground engineering structures are permanently affected by the ground and their surrounding environment. From the point of view of engineering geology, for the design of a tunnel as an underground structure, there are various factors that are very important and must be considered during the study and construction of the tunnel. In other words, to excavate and use a safe and stable tunnel, it is

very important to study the engineering geological conditions of its site. In addition to the characteristics of the rocks and soils of the site, the stability of the tunnels is affected by many factors, first of all the in situ and induced stresses, geological structures, ground water, tunnel depth, drilling method, etc. The methods of stability analysis and support system design in tunneling projects have made significant progress over time. In this regard, the use of experimental and limit equilibrium methods are effective solutions in predicting the stability of the tunnel and checking the amount of surface and subsurface displacements of the ground caused by tunnel excavating. Many studies conducted by different researchers in this field clearly show the necessity of engineering geological studies and investigations for tunnel site. For this reason, in the present research, the stability analysis of Haji-Abad tunnel site in Hormozgan province,

southern Iran, has been done using the above-mentioned methods.

### Materials and Methods

To carry out this research, first, the office studies have been done by collecting the available information and documents including geological maps, topographic maps, satellite images, aerial photos, reports and technical notes of the existing structures in the tunnel site area. Then, by conducting the field visits and local impressions of the tunnel site, the preliminary field investigations have been conducted. Finally, by examining and analyzing the results of in-situ tests conducted on the tunnel site and laboratory tests conducted on the samples taken from the site, which are the result of exploratory excavations on the tunnel route, additional studies have been conducted. After reviewing and analyzing the information obtained from the previous steps (the field and laboratory studies and investigations), according to the difference in the type and characteristics of the rocks in the tunnel route, the BGD classification system recommended by the International Association of Rock Mechanics has been used and the tunnel site was divided into ten separate geotechnical units including  $T_1$ – $T_8$  and two crushed zones in Units 5 ( $T_{f1}$ ) and 9 ( $T_{f2}$ ). The field investigations of the discontinuities of the Haji-Abad tunnel site were done in the units and their statistical study was done using Dips v5.103 software. Also, the laboratory studies were conducted for determining physical and mechanical properties of the tunnel site rock constructing namely density, porosity moisture content, uniaxial and triaxial compressive strengths.

### Results and discussions

According to the field and laboratory investigations on the Haji-Abad tunnel site, it is found that the rock discontinuities in the tunnel site have filled by calcite and clay, with dry to wet surface conditions, and low degree of weathering. The internal friction angle of the discontinuities surfaces ranges  $15^\circ$ – $45^\circ$ , their persistence is from about 3 to more than 20m, their spacing is 0.15–4m, and their opening is 0.1–5mm. The compressive strength of the site rocks, except for the two crushed zones that have different conditions, varies 20–120MPa. The moisture content of the samples obtained from the boreholes of the tunnel site were

0.12–2.87%, and their porosity were 7.33–0.32%, respectively. The tunnel site rocks are placed in the very poor to good classes with RQD values from 25 to 90. According to the RMR classification, the rocks in the tunnel site have a score of 18–62 (very poor to good). Also, by using the Q method, the rocks of different units of the tunnel site were given a score range of 0.04–2.83 (extremely weak to weak). The GSI method indicated that the site constructing rocks range is 15–61 (very poor to good). By using Unwedge.v.3.0 software, the maximum and minimum weight values of the formed wedges were obtained 5875 and 0.076 tons, with heights of 100.94 and 0.12m, respectively. Also, the safety factor is 0.04–1.12 and the wedges that had a safety factor less than 1.5 will be reached an acceptable safety factor by installing suitable rockbolt.

### Conclusions

The stability analysis of Haji-Abad tunnel site located in Hormozgan province, southern Iran, has been done using two experimental and equilibrium methods. For this purpose, the BGD classification has been used to separate the geotechnical units. The field investigations show that along the tunnel route, the changes are clearly visible either in the material of the layers or the structural characteristics of the tunnel units. Based on the BGD classification, the tunnel site was divided into 10 separate units. Along the tunnel route, there also are two crushed zones. The results of the physical tests show that the amount of moisture content and porosity of the samples obtained from the tunnel site borehole are increased, and their densities are decreased with increasing the depth. The triaxial test results of tunnel site rocks shown that with increasing the depth, confining pressure and deviation stress, the Young's modulus also increased, which indicates an increase in the quality of the rock mass from the surface to the depth. The rock masses in the tunnel site are placed in very poor to good ranges based on the RQD method. According to the RMR method, the rocks of the different units of the tunnel were given a score of 18 to 62, which indicates that the rocks are in the category of very poor to good. Based on the Q method, the rocks of different units of the tunnel were given a score of 0.04 to 2.83, which are in the category of extremely weak to weak rocks. Based on the GSI method, the rocks of different units of the tunnel were given



a score of 15 to 61 which were classified as very weak to good rocks. It is found that the results of the experimental methods are completely coordinate with each other. According to the results obtained from the limit equilibrium method, some of the wedges

formed in the tunnel's roof and walls have safety factors greater than 1.5 and some others have a safety factor less than 1.5 that they will achieve an acceptable reliability factor (more than 1.5) by installing the appropriate rockbolts as soon as the tunnel is excavated.