

## تعیین حجم بلوک و شاخص مقاومت زمین‌شناسی GSI با استفاده از روش فتوگرامتری: مطالعه موردی معدن گل‌گهر سیرجان

امین ملایی امامزاده<sup>۱</sup>، مجتبی بهالدینی<sup>۲\*</sup>، غلامرضا سعیدی<sup>۳</sup>، حمیدرضا محمدی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، بخش مهندسی معدن، مجتمع آموزش عالی زرنده، زرنده؛ aminmollaei67@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ m\_bahaaddini@uk.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار استخراج معدن، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ gsaeedi@uk.ac.ir

<sup>۴</sup> سرپرست واحد زمین‌شناسی و ژئوتکنیک، شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان؛ hamid\_azizabadi@yahoo.com

### چکیده

غالباً ناپیوستگی‌ها در دیواره‌های سنگی با استفاده از روش خط برداشت تعیین می‌گردند که این روش دارای معایب متعددی همچون ایمنی برداشت پایین، محدودیت برداشت ناپیوستگی‌ها و دقت برداشت پایین می‌باشد. همچنین تعیین حجم بلوک‌های سنگی تشکیل شده بوسیله ناپیوستگی‌ها و محاسبه شاخص مقاومت زمین‌شناسی از دیگر چالش‌های موجود در تعیین خواص توده سنگ می‌باشند. معدن سنگ آهن گل‌گهر سیرجان نیز با مشکلات ذکر شده مواجه بوده و با توجه به دیواره‌های خرد شده معدن شماره یک و احتمال ریزش در این دیواره‌ها، نیاز به یک روش جامع‌تر و دقیق‌تر برای اندازه‌گیری خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها الزامی می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق ارائه روشی نوین جهت تعیین میانگین حجم بلوک، شاخص کیفی سنگ RQD و شاخص مقاومت زمین‌شناسی GSI توده‌سنگ می‌باشد. از این رو، برداشت خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها در پله شماره ۱۴ دیواره شمال غربی معدن شماره یک گل‌گهر، در یک سینه‌کار از سنگ آهن، از طریق روش فتوگرامتری انجام شد. در ابتدا با استفاده از نقشه‌برداری، نقاط کنترلی در سینه‌کار ایجاد و در ادامه عکس‌برداری از سینه‌کار مورد مطالعه صورت پذیرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزارهای 3DM Analyst و 3DM CalibCam عکس سه بعدی از دیواره تهیه و خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها برداشت شد. برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها از نرم‌افزار FracMan بهره گرفته و شبکه ناپیوستگی مجزا (DFN) ایجاد شد و در نهایت میانگین حجم بلوک و GSI، متوسط فاصله‌داری هر دسته درزه و RQD توده‌سنگ مورد مطالعه تعیین شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که مقدار متوسط حجم بلوک برابر با ۰/۱۳ مترمکعب و مقدار GSI برابر با ۶۵ می‌باشد. همچنین متوسط فاصله‌داری سه دسته درزه موجود در این دیواره تعیین و مقدار RQD برابر با ۷۵/۷۶ درصد محاسبه شد. جهت بررسی اعتبار نتایج، از داده‌های ۲۸ حفاری ژئوتکنیکی بهره گرفته شد که نتایج حاکی از انطباق مناسب نتایج این تحقیق با نتایج برداشت‌های درجا می‌باشد.

### کلمات کلیدی:

روش فتوگرامتری، ناپیوستگی‌ها، شبکه ناپیوستگی مجزا DFN، شاخص مقاومت زمین‌شناسی GSI و معدن گل‌گهر سیرجان.

## ۱- مقدمه

برای تعیین صفحه نماینده یک ناپیوستگی، چندین نقطه روی سطح ناپیوستگی رقومی شده و میانگین صفحه عبوری از این نقاط به عنوان نماینده آن ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین جهت‌داری این ناپیوستگی، حاصل برازش چندین نقطه به ناپیوستگی است که دارای دقت بالاتری است، اما در روش خط برداشت از آن جایی که مقدار کوچکی از سطح ناپیوستگی جهت برداشت جهت‌داری استفاده می‌شود، می‌تواند باعث ایجاد خطا شود [۲، ۱۰].

تعیین خصوصیات جهت‌داری و هندسی ناپیوستگی‌ها تأثیر بسزایی در کلیه فعالیت‌های عمرانی و معدنی از طراحی سطوح شیب‌دار سنگی تا حتی انفجار و زهکشی معادن ایفا می‌کند. بنابراین اندازه‌گیری این خصوصیات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با پیشرفت‌های اخیر در علم رایانه و ارائه دوربین‌های دیجیتال با توانایی عکس‌برداری با کیفیت وضوح بالا، روش فتوگرامتری به روش بسیار محبوب برای مواجهه با چالش‌های موجود در بسیاری از شاخه‌های مهندسی عمران و معدن حتی در معادن زیرزمینی تبدیل شده است [۱۱].

از آن جایی که با استفاده از روش فتوگرامتری، برداشت ناپیوستگی‌ها به صورت ایمن‌تر (بدون نیاز به دسترسی فیزیکی به سینه‌کار)، سریع‌تر، کامل‌تر و دقیق‌تر انجام می‌شود، در نتیجه به همان نسبت، بررسی و اندازه‌گیری مقادیر جهت‌داری و فاصله‌داری<sup>۶</sup> ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش فتوگرامتری کامل‌تر و دقیق‌تر انجام شده و با بکارگیری تکنیک‌هایی مانند DFN<sup>۷</sup> می‌توان میانگین حجم بلوک‌های سنگی و پارامترهای مهم ژئومکانیکی RQD<sup>۸</sup> و GSI<sup>۹</sup> را با دقت بالاتری تعیین نمود. در سال‌های اخیر، محققین مختلفی سعی نموده‌اند که با استفاده از روش فتوگرامتری خواص ژئومکانیکی ناپیوستگی‌ها را برداشت نمایند و همچنین با استفاده از قابلیت‌های این روش، چالش‌های عدیده موجود در کاراکتریزه کردن ناپیوستگی‌ها و توده سنگ را حل نمایند.

روش غالب برای اندازه‌گیری خصوصیات جهت‌داری<sup>۱</sup> و هندسی ناپیوستگی‌ها<sup>۲</sup> در معادن روباز، روش خط برداشت<sup>۳</sup> می‌باشد که با ایجاد یک خط برداشت در پای پله و برداشت تک‌تک ناپیوستگی‌ها انجام می‌پذیرد. انجام این عمل به علت ناهمواری پاشنه پله و شیب زیاد آن دارای مخاطرات زیادی می‌باشد. از طرف دیگر به علت وسعت کم خط برداشت و خاصیت خطی بودن آن، تعداد بسیار محدودی از درزه‌ها برداشت می‌شوند [۱، ۲] که برای حل این مشکل، محققین مختلف استفاده از چندین خط برداشت در راستاهای مختلف را توصیه نموده‌اند [۳-۵]. علاوه بر موارد ذکر شده، به علت موازی بودن خط برداشت با دیواره پله، ناپیوستگی‌هایی که دارای بحرانی‌ترین موقعیت در مباحث مربوط به پایداری شیب و عقب‌زدگی انفجار هستند، برداشت نمی‌شوند [۱، ۲]. روش رایج دیگر برای برداشت ناپیوستگی‌ها، روش برداشت پنجره‌ای<sup>۴</sup> می‌باشد که در آن تمامی ناپیوستگی‌های دارای رخنمون در محدوده پنجره‌ای مشخص برداشت می‌گردند. این روش نیز دارای معایب نیاز به دسترسی مستقیم، ایمنی پایین برداشت، دقت کم و هزینه بر بودن (هم از نظر زمانی و هم از نظر نیروی انسانی) می‌باشد [۶-۸].

یکی از روش‌های جدید و موثر در بحث برداشت ناپیوستگی‌ها، استفاده از روش فتوگرامتری<sup>۵</sup> می‌باشد. در این روش می‌توان با استفاده از روش عکس‌برداری دو بعدی متداول و استفاده از نرم‌افزارهای خاص، تصاویر سه‌بعدی تهیه و به تعیین خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها پرداخت. در این روش، محدوده بزرگی از دیواره‌های معدن را می‌توان به آسانی و بدون نیاز به دسترسی فیزیکی و همچنین بدون اخلاص در پروسه فعالیت معدنی در زمانی کم و با دقت بالا برداشت نمود [۸-۱۰]. یکی دیگر از مزیت‌هایی که روش فتوگرامتری نسبت به روش خط برداشت دارد، این است که در روش فتوگرامتری

6- Spacing

7- Discrete Fracture Network

8- Rock Quality Designation

9- Geological Strength Index

1- Orientation

2- Discontinuity

3- Scanline

4- Window Mapping

5- Photogrammetric

سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ای بر روی فتوگرامتری دیجیتال زمینی کوتاه برد و لیزر اسکن زمینی برای توصیف ناپیوستگی‌ها در سنگ‌ها انجام دادند، که در این تحقیق، به بررسی کاربرد فتوگرامتری دیجیتال زمینی کوتاه برد و لیزر اسکن زمینی برای توصیف ناپیوستگی‌های موجود در سنگ پرداخته شد. این محققین نشان دادند که تکنیک‌های زمینی سنجش از دور می‌توانند به طور فزاینده‌ای به عنوان مکمل روش‌های سنتی خط برداشت و برداشت پنجره‌ای مورد استفاده قرار گرفته و اطلاعات جامع‌تری در مورد ناپیوستگی‌های سنگی ارائه دهند. همچنین این تکنیک‌ها اجازه نقشه برداری از رخنمون‌های غیر قابل دسترس را مهیا نموده و ایمنی کاربران را افزایش می‌دهند [۸]. فیرپو<sup>۸</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱، مطالعه‌ای بر روی استفاده از فتوگرامتری دیجیتال زمینی در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی انجام دادند و ترکیب روش فتوگرامتری و روش‌های عددی المان مجزا را به عنوان روشی توانمند در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی پیشنهاد نمودند [۱۵]. کیم<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از آنالیز برگشتی به بررسی گسیختگی رخ داده در یک شیب سنگی درزه‌دار در ساحل گلدکوست ایالت کوینزلند استرالیا پرداختند. در این تحقیق با استفاده از روش فتوگرامتری، خصوصیات هندسی سطح لغزش تعیین و با بکارگیری نرم افزار المان مجزا 3DEC خواص مکانیکی سطوح لغزش تعیین گردید [۱۶]. بونیللا - سیرا<sup>۱۰</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ با مطالعه بر روی یک گسیختگی سنگی رخ داده، استفاده از روش فتوگرامتری را بعنوان مکمل روش‌های المان مجزای سه بعدی، برای ارزیابی دقیق‌تر پایداری شیب‌های سنگی پیشنهاد نمودند [۱۷].

مروری بر تحقیقات ذکر شده حاکی از گسترش روز افزون روش فتوگرامتری در توصیف خصوصیات توده سنگ می‌باشد. در این مقاله، هدف اصلی تعیین جهت‌داری، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و همچنین محاسبه حجم بلوک و پارامترهای رده‌بندی توده سنگ RQD و GSI با استفاده از ترکیب روش

ویات<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۶ مطالعه‌ای جامع بر روی تکنیک‌های پیشرفته برای برداشت ساختارهای زمین‌شناسی در مدل‌سازی توده‌سنگ در دو سایت واقع در آلپ انجام دادند. ویات و همکاران با بررسی روش‌های سنتی برداشت ناپیوستگی‌ها و روش‌های جایگزین، استفاده از دو روش فتوگرامتری و لیزر اسکن را برای برداشت ساختارهای زمین‌شناسی سینه کارهای سنگی پیشنهاد نمود [۶]. تانون<sup>۲</sup> و کانسستیت<sup>۳</sup> با برداشت یک رخنمون سنگی با استفاده از روش فتوگرامتری به تعیین تعداد دسته درزه‌ها، جهت‌داری، طول اثر و همچنین زبری ناپیوستگی‌ها پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که فتوگرامتری، زمانی که برای توصیف توده‌سنگ بکار برده می‌شود، نتایج قابل اعتماد و قابل تکراری ارائه می‌دهد و این روش می‌تواند با اعتماد در صنعت بکار گرفته شود [۱۲]. پروپات<sup>۴</sup> با مطالعه بر روی برداشت سه بعدی از راه دور ساختارهای توده‌سنگ، نشان داد که تحلیل داده‌های مکانی سنجش از راه دور می‌تواند تخمین‌های دقیقی از موقعیت و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها را ارائه کند [۱۳]. هانبرگ<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۸ مطالعه‌ای بر روی استفاده از فتوگرامتری دیجیتال زمینی کوتاه برد برای مدل‌سازی سه بعدی شیب‌های سنگی و نقشه برداری ناپیوستگی‌ها انجام داد. هانبرگ نشان داد که مدل‌های سطحی سه بعدی دارای وضوح بالا بوده و دارای مزیت‌های متعددی نسبت به ابر نقاط لیزر اسکن زمینی می‌باشند. از جمله این مزیت‌ها می‌توان به هزینه اندک، تجهیزات قابل حمل و توانایی در نظر گرفتن ناپیوستگی‌هایی که به صورت آثار خطی به نظر می‌رسند، می‌باشد. همچنین این مدل‌های سه بعدی با دوربین‌های دیجیتال در دسترس ساخته شده و نرم افزارهای موجود، امکان نقشه برداری مجازی را فراهم نموده و به کاربر اجازه شناسایی و محاسبه جهت‌داری ناپیوستگی‌های را مهیا می‌سازد [۱۴]. استارزنجر<sup>۶</sup> و استد<sup>۷</sup> در

- 1- Voyat
- 2- Tonon
- 3- Kottenstette
- 4- Poropat
- 5- Haneberg
- 6- Sturzenegger
- 7- Stead

8- Firpo

9- kim

10- Bonilla – Sierra

تجهیزات مورد استفاده برای انجام فتوگرامتری شامل دوربین دیجیتالی Canon مدل DMKII-0244، شاسی دوربین، پایه‌های دوربین، اسپری رنگی، دوربین نقشه برداری Total Station و ژالون به همراه واحد نقشه برداری برای برداشت نقاط کنترلی می‌باشند.

مرحله اول قبل از عکس برداری، تعیین پارامترهای دوربین<sup>۲</sup> دوربین<sup>۱</sup> می‌باشد که در اصطلاح به آن کالیبراسیون می‌گویند. پارامترهای کالیبراسیون دوربین شامل فاصله کانونی (C)، انحراف لنز شعاعی ( $K_1, K_2, K_3, K_4$ )، افسست نقطه اصلی در جهات X و Y ( $X_p, Y_p$ )، انحراف عدم تمرکز ( $P_1, P_2$ ) و فاکتور مقیاس ( $B_1, B_2$ ) می‌باشند که این پارامترها وابسته به نوع دوربین، نوع لنز و فاصله عکس برداری می‌باشند. کالیبراسیون به منظور جلوگیری از انحراف در تصاویر صورت می‌گیرد [۱۹].

در مرحله دوم بایستی قبل از عکس برداری، چند نقطه کنترلی بر روی سینه کار مورد نظر در نظر گرفته شود (حداقل ۳ نقطه کنترلی نیاز است). نقاط کنترلی به منظور داشتن مقیاس واقعی از تصاویر و همچنین مشخص بودن موقعیت سینه کار مورد مطالعه در معدن مورد نیاز می‌باشند. پراکندگی نقاط کنترلی در سینه کار بایستی به گونه‌ای باشد که این نقاط تشکیل مثلث دهند [۱۹]. بخشی از پله مورد مطالعه به همراه تعدادی از نقاط کنترلی نقشه برداری شده، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- بخشی از پله مورد مطالعه که در آن موقعیت چهار نقطه از نقاط کنترلی مشخص شده است (فاصله بین نقاط کنترلی ۳ و ۴، ۱۳/۹۵ متر می‌باشد).

فتوگرامتری و شبکه شکستگی مجزا در مطالعه موردی معدن سنگ آهن گل گهر سیرجان می‌باشد. یکی از چالش‌های موجود در تعیین مقدار GSI، وابستگی شدید این روش به تجربه می‌باشد. برای حل این مشکل، کیم<sup>۱</sup> و همکاران استفاده از حجم بلوک و فاکتور شرایط سطح درزه را پیشنهاد نمودند [۱۸]. اما برای محاسبه حجم بلوک به روش سنتی، مشکلات عدیده‌ای وجود دارد. در این مقاله، روشی جدید و کارا برای محاسبه حجم بلوک و مقدار GSI ارائه گردیده است. برای این منظور، ابتدا یکی از پله‌های دیواره معدن گل گهر سیرجان با استفاده از روش فتوگرامتری برداشت شده و ناپیوستگی‌های موجود در دیواره با استفاده از عکس‌های سه بعدی مورد تحلیل قرار گرفته است. سپس برای ایجاد شبکه ناپیوستگی‌ها از روش DFN و نرم افزار FracMan بهره گرفته شده است. در نهایت، بر اساس توزیع حجم بلوک‌های سنگی محاسبه شده و با تعیین شرایط سطح درزه، مقدار GSI محاسبه گردیده است. بنابراین، با استفاده از این تحقیق اهداف زیر متصور است:

- برداشت خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها در یک سینه کار از معدن شماره یک گل گهر با استفاده از روش فتوگرامتری.
- تعیین حجم بلوک، فاصله‌داری و مقدار RQD (شاخص کیفیت سنگ) و همچنین تعیین مقدار GSI (اندیس مقاومت زمین شناسی) در سینه کار مورد نظر با استفاده از روش‌های فتوگرامتری و DFN.
- ارائه روشی نوین جهت تخمین حجم بلوک و مقدار GSI که بتواند مشکلات عدم قطعیت و خطای بالای حجم بلوک را حل نماید.

## ۲- ابزار و روش

### ۲-۱- برداشت ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش فتوگرامتری

برداشت ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش فتوگرامتری در یک سینه کار از پله ۱۴ دیواره شمال غربی معدن شماره ۱ گل گهر سیرجان صورت گرفت. زمین‌شناسی موجود در سینه کار مورد مطالعه، مگنتیت و ناپیوستگی‌های موجود در این سینه کار از نوع درزه، شیب پله ۶۵ درجه و ارتفاع آن ۱۵ متر می‌باشد.

ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، خصوصیات هندسی این صفحات رنگی، همان خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها خواهد بود [۱۹].

## ۲-۲- تعیین حجم بلوک، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) و شاخص کیفیت سنگ (RQD) با استفاده از روش DFN

برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها، از نرم‌افزار FracMan بهره گرفته شد که نتایج حاصل از برداشت ناپیوستگی‌ها در روش فتوگرامتری، بعنوان ورودی‌های این نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل شیب و جهت شیب، ابعاد و مختصات مرکزی صفحات ناپیوستگی می‌باشند. در این نرم‌افزار برای محاسبه میانگین حجم بلوک، از روش فاصله‌داری چند بعدی ( $MDS^2$ ) استفاده می‌شود. در این روش تعدادی نقاط و بلوک و همچنین سه جهت حرکت به نرم‌افزار داده می‌شود و نرم‌افزار نقاط داده شده را به صورت تصادفی در فضای بین ناپیوستگی‌ها توزیع کرده، سپس از هر نقطه در سه جهت که توسط کاربر تعیین شده (هر جهت، عمود بر میانگین جهت‌داری هر دسته درزه انتخاب شد)، شروع به حرکت کرده و فاصله‌داری‌های بین ناپیوستگی‌ها را در سه جهت محاسبه می‌کند. براساس فاصله‌داری‌های محاسبه شده، میانگین حجم بلوک‌ها قابل تعیین می‌باشد [۲۰]. همچنین منحنی توزیع حجمی بلوک، هیستوگرام حجم و هیستوگرام‌های فاصله‌داری (در سه جهت)، بر اساس تعداد بلوک‌ها رسم می‌شوند.

سپس، مقدار RQD را می‌توان با استفاده از نتایج خروجی نرم‌افزار FracMan توسط رابطه (۱) محاسبه نمود [۲۱]:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v \quad (1)$$

که در این رابطه پارامتر  $J_v$  شمارش درزه حجمی می‌باشد و مقدار آن را می‌توان از طریق رابطه (۲) محاسبه نمود [۲۱]:

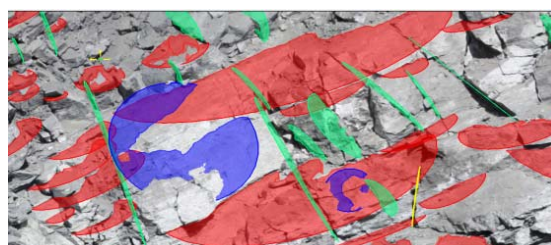
$$J_v = \frac{S_2 \times S_3 + S_1 \times S_3 + S_1 \times S_2}{V_b \times \sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3} \quad (2)$$

$S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  متوسط فاصله‌داری دسته درزه‌های اول، دوم و

سپس در سومین گام، عکس‌برداری انجام می‌گیرد. برای این منظور قبل از عملیات عکس‌برداری از سینه‌کار، عملیات لقی‌گیری سینه‌کار به طور کامل صورت گرفت تا شکستگی‌های حاصل از انفجار تا حد ممکن پاکسازی گردد. موقعیت مکانی دوربین با استفاده از روش‌های نقشه‌برداری تعیین گردید که فاصله عکس‌برداری از سینه‌کار حدود ۵۰ متر می‌باشد. برای عکس‌برداری از سینه‌کار، از دو ایستگاه عکس‌برداری استفاده شد که فاصله بین این دو ایستگاه، یک پنجم فاصله عکس‌برداری می‌باشد. سپس از دیواره‌های معدن عکس دیجیتالی که دارای ۶۰ درصد همپوشانی می‌باشند، تهیه گردید [۱۹].

برای تهیه عکس‌های سه‌بعدی، عکس‌های گرفته شده و موقعیت‌های برداشت شده وارد نرم‌افزار 3DM CalibCam شده و نرم‌افزار با استفاده از روش درون‌یابی، موقعیت‌های مجهول را محاسبه نمود. در نتیجه آن، ابری از نقاط از منطقه برداشت شده تشکیل گردید. با استفاده از ابر نقاط و بکارگیری نرم‌افزار 3DM Analyst، تصاویر سه‌بعدی از پله مورد مطالعه تهیه شد، که این تصاویر از شبکه‌ای از مثلث‌های بهم پیوسته تشکیل شده که در اصطلاح به آن  $DTM^1$  می‌گویند [۱۹].

در ادامه، ناپیوستگی‌ها در نرم‌افزار 3DM Analyst برداشت گردید. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده، صفحات رنگی به گونه‌ای بر روی سطوح قابل تشخیص یا خط اثرهای موجود در تصویر سه‌بعدی ترسیم می‌شوند که این صفحات رنگی دقیقاً منطبق بر ناپیوستگی‌ها شوند.



شکل ۲- برداشت ناپیوستگی‌ها در نرم‌افزار 3DM Analyst

برای این منظور، چندین نقطه روی سطح ناپیوستگی رقومی شده و میانگین صفحه عبوری از این نقاط به عنوان نماینده آن

مغزه‌های ژئوتکنیکی و رابطه (۵) بهره گرفته شد [۲۲]:

$$GSI = \frac{52 J_r}{1 + \frac{J_r}{J_a}} + \frac{RQD}{2} \quad (5)$$

که در آن  $J_r$  و  $J_a$  به ترتیب عدد مربوط به زبری و هوازدگی سطح درزه می‌باشند.

GSI	Joint or Block Wall Condition						Block Volume, $V_b$ (cm <sup>3</sup> )
	Very good Fresh unweathered surfaces	Good Rough slightly weathered from island surfaces	Fair Smooth, moderately weathered or altered surfaces	Poor Disintegrated highly weathered surfaces with compact coating or flings of angular fragments	Very poor Strenuously highly weathered surfaces with soft clay compaction fillings		
<b>Massive</b> - very well interlocked undisturbed rock mass blocks formed by three or less discontinuity sets with very wide joint spacing. Joint spacing > 100 cm	12	4.6	1.7	0.67	0.26	0.09	10E+6
<b>Blocky</b> - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three or four orthogonal discontinuity sets. Joint spacing > 30 - 100 cm	10	7.0	2.5	1.0	0.4	0.15	1E+6 (1 m <sup>3</sup> )
<b>Very Blocky</b> - interlocked, partially disintegrated rock masses with interlocking angular blocks formed by four or more discontinuity sets. Joint spacing 10 - 30 cm	8	5.0	1.8	0.7	0.28	0.1	10E+3
<b>Blocky/disturbed</b> - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Joint spacing 3 - 10 cm	6	3.0	1.2	0.4	0.15	0.04	10E+2 (10 m <sup>3</sup> )
<b>Disintegrated</b> - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces. Joint spacing < 3 cm	4	2.0	0.8	0.25	0.1	0.02	100
<b>Foliated/laminated/sheared</b> - thinly laminated or foliated, fractionally sheared weak rock, closely spaced discontinuity parallel over any other discontinuity set, resulting in complete face or backscree. Joint spacing < 1 cm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	10

شکل ۳- نمودار کمی‌سازی مقادیر GSI بر اساس متوسط حجم بلوک و شرایط سطح درزه [۱۸].

#### ۴- بحث و نتایج

##### ۴-۱- نتایج روش فتوگرامتری

خصوصیات هندسی قابل برداشت ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش فتوگرامتری شامل شیب و جهت شیب، ابعاد (طول اثر ناپیوستگی) و مختصات مرکزی صفحات ناپیوستگی‌ها می‌باشد. تعداد ۹۸۹ عدد درزه، شامل سه دسته درزه به همراه تعدادی درزه اتفاقی<sup>۱</sup> برداشت گردید. نمایش استریوگرافیک ناپیوستگی‌های برداشت شده و دسته درزه‌های موجود در این دیواره در شکل (۴) نشان داده شده است. در جدول (۱) تعداد درزه‌ها و میانگین جهت‌داری هر دسته درزه نمایش داده شده و همچنین مقدار زاویه بین دسته درزه‌ها با استفاده از نرم‌افزار

سوم و  $\gamma_1$ ،  $\gamma_2$  و  $\gamma_3$  زوایای بین دسته درزه‌ها و  $V_b$  حجم بلوک می‌باشند. متوسط فاصله‌داری هر دسته درزه و حجم بلوک را می‌توان در نرم‌افزار FracMan تعیین نمود.

در سال ۲۰۰۷، آقای کیم و همکاران، برای محاسبه پارامتر GSI روشی بر اساس پارامترهای کمی ارائه نمودند [۱۸]. برای تعیین مقادیر GSI، در این روش به دو پارامتر نیاز می‌باشد:

۱- حجم (اندازه) بلوک ( $V_b$ ).

۲- شرایط سطح درزه (یا فاکتور شرایط سطح درزه ( $J_c$ )).

پارامتر میانگین حجم بلوک ( $V_b$ ) با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار FracMan، قابل تعیین می‌باشد. پارامتر دیگر، شرایط سطح درزه می‌باشد که این پارامتر ابتدا توسط پالمستروم [۲۱] در سیستم رده بندی توده سنگ RMI تعریف گردید و سپس در سایر مباحث مربوطه مورد استفاده قرار گرفت. پارامتر شرایط سطح درزه، معرف زبری سطح، مقیاس درزه، و هوازدگی و پرتشدگی درزه می‌باشد که از طریق بازدید سایت (سینه‌کار) مورد نظر و استفاده از جداول مربوطه قابل تعیین می‌باشد. بعد از تعیین این دو پارامتر، می‌توان مقادیر GSI را با استفاده از رابطه (۳) یا نمودار نشان داده شده در شکل (۳) تعیین نمود.

$$GSI = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_c + 0.9 \ln V_b}{1 + 0.0151 \ln J_c - 0.0253 \ln V_b} \quad (3)$$

که  $J_c$  در آن پارامتری بدون بعد بوده و واحد  $V_b$  بر حسب  $(cm^3)$  می‌باشد [۱۸].

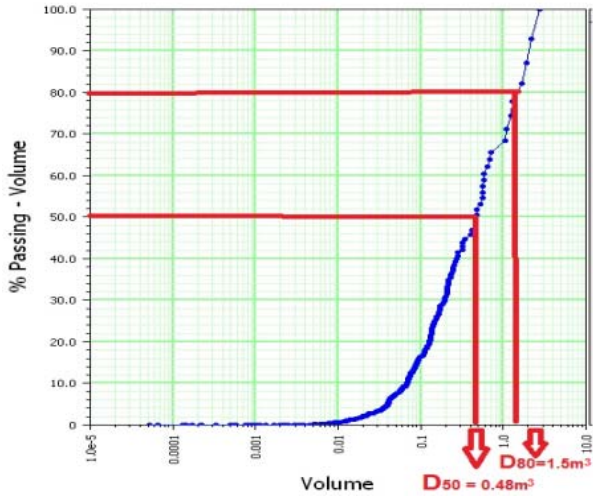
برای بررسی اعتبار مقادیر GSI و RQD محاسبه شده بر اساس روش فتوگرامتری و DFN، از اطلاعات ۲۸ مغزه ژئوتکنیکی اجرا شده در معدن شماره یک گل‌گهر بهره گرفته شده است. مقدار RQD از طریق مغزه‌های گمانه‌های ژئوتکنیکی و رابطه (۴) محاسبه شده است.

$$RQD = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{L} \times 100 \quad (4)$$

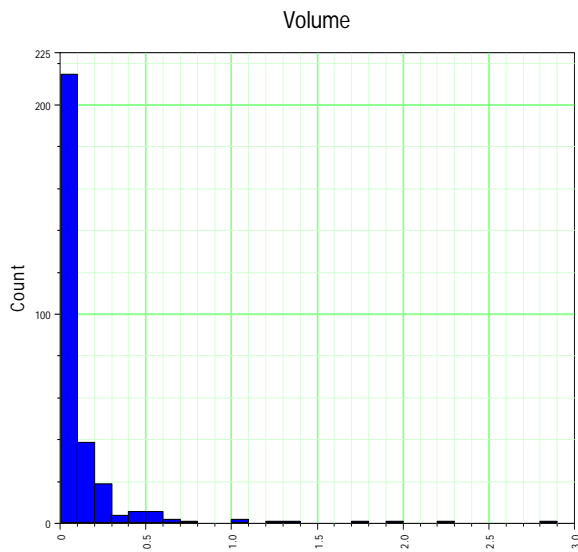
که  $l_i$  طول قطعه  $i$  - ام مغزه که طول آن بزرگتر از ۱۰ سانتی‌متر می‌باشد و  $L$  طول کل مغزه حفاری شده و  $n$  تعداد قطعات مغزه می‌باشد [۲۱].

برای بررسی اعتبار مقدار محاسبه شده GSI، از اطلاعات

1- Random Joint



شکل ۶- منحنی توزیع حجمی بلوک‌ها.



شکل ۷- هیستوگرام حجم بلوک‌ها.

هیستوگرام‌های فاصله‌داری در جهت عمود بر دسته درزه اول ( $S_1$ )، دوم ( $S_2$ ) و سوم ( $S_3$ ) به ترتیب در شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) نمایش داده شده‌اند.

میانگین حجم بلوک در نرم‌افزار FracMan برابر با ۰/۱۳ مترمکعب تعیین گردید. همچنین، میانگین حجم بلوک از رابطه (۶) نیز محاسبه گردید [۲۱]:

$$V_b = \frac{S_1 \times S_2 \times S_3}{\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3} \quad (6)$$

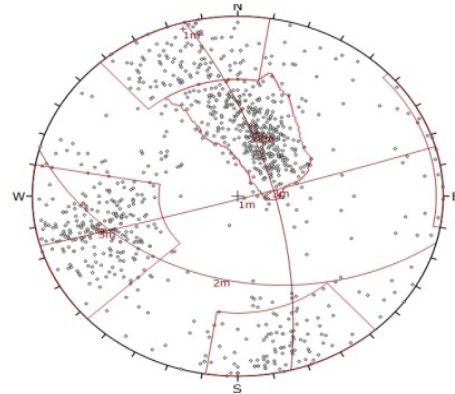
Dips تعیین و در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱- تعداد درزه‌ها و میانگین جهت‌داری هر دسته درزه.

Joint Set	1	2	3	Random
Number of Joint	200	402	240	147
Dip (Deg.)	88	40	70	0
Dip Direction (Deg.)	164	195	75	0

جدول ۲- مقادیر زاویه بین دسته درزه‌ها.

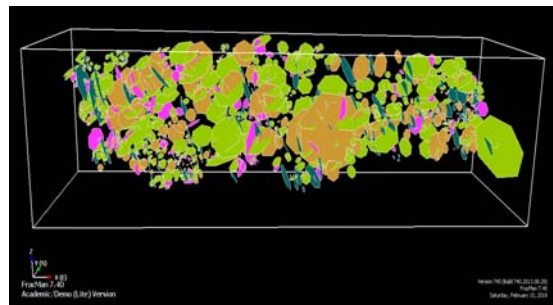
Joint Set	1&3	1&2	2&3
Angle (Deg.)	88	87.7	54



شکل ۴- نمایش استریوگرافیک ناپیوستگی‌های موجود.

۴-۲- نتایج شبیه‌سازی شبکه درزه

نمایی از مدل شبکه درزه ایجاد شده در نرم افزار FracMan در شکل (۵) آورده شده است. با استفاده از این مدل، منحنی توزیع حجمی بلوک محاسبه گردید که در شکل (۶) نمایش داده شده است. هیستوگرام حجم بلوک‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. با استفاده از این منحنی توزیع، مقادیر  $D_{80}$  و  $D_{50}$  به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۰/۴۸ مترمکعب تعیین گردید.



شکل ۵- مدل‌سازی کل درزه‌ها در نرم‌افزار FracMan.

با توجه به بازدید صورت گرفته از سینه کار مورد مطالعه، شرایط سطح درزه، به صورت خوب، زیر و کمی هوازده در نظر گرفته شد و در نتیجه مقدار فاکتور شرایط درزه (J<sub>C</sub>) برابر با ۳/۱ حاصل شد.

مقدار GSI با استفاده از میانگین حجم بلوک که از طریق رابطه (۶) و همچنین روش‌های فتوگرامتری و DFN توسط رابطه (۳) محاسبه گردید و در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۳) می‌توان نتیجه گرفت که هر دو روش دارای نتایج نزدیک به یکدیگر بوده و یک عامل که می‌تواند باعث ایجاد مقداری اختلاف در دو روش شود، وجود درزه‌های اتفاقی در محاسبات روش فتوگرامتری و DFN می‌باشد که در رابطه (۶) در نظر گرفته نشده است.

جدول ۳- مقایسه میانگین حجم بلوک و GSI حاصل از رابطه (۶) و روش‌های فتوگرامتری و DFN.

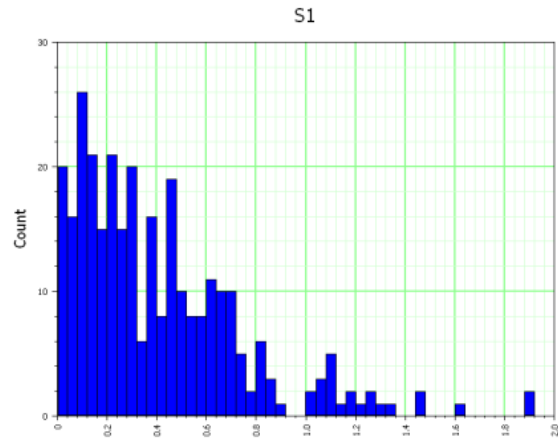
Measurement Methods	Photogrammetric & DFN	Eq. (6)
Mean Block Volume (m <sup>3</sup> )	0.13	0.28
GSI	65	68

همچنین مقادیر متوسط فاصله‌داری هر دسته درزه در نرم‌افزار FracMan محاسبه گردید و در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به مقادیر متوسط فاصله‌داری هر دسته درزه و روابط (۱) و (۲)، مقدار RQD سینه کار مورد مطالعه، با استفاده از روش فتوگرامتری و DFN برابر با ۷۵/۷۶ درصد محاسبه گردید.

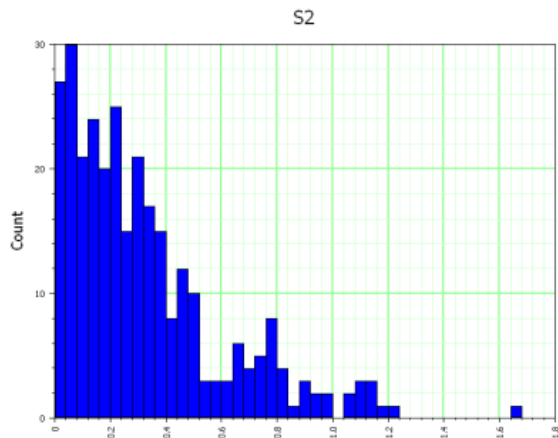
جدول ۴- متوسط فاصله‌داری هر دسته درزه.

Joint Set	1	2	3
Mean Spacing (m)	0.48	0.38	1.24

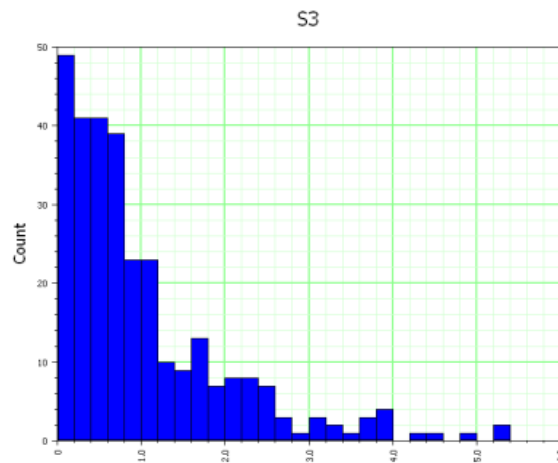
برای بررسی اعتبار نتایج بدست آمده، از گمانه‌های ژئوتکنیکی استفاده شد. مقادیر GSI و RQD حاصل از رابطه‌های (۴) و (۵) برای ۲۸ مغزه از جنس سنگ آهن، از گمانه‌های ژئوتکنیکی واقع در معدن شماره یک گل‌گهر در جدول (۵) نشان داده شده است که مقدار میانگین، انحراف معیار GSI به ترتیب برابر با ۶۲ و ۸/۹۶ و مقدار حداقل و حداکثر GSI به ترتیب ۴۶ و ۸۱ می‌باشد. همچنین مقدار میانگین و انحراف معیار RQD به ترتیب برابر با ۷۴ و ۱۴/۳۵ و مقدار حداقل و



شکل ۸- هیستوگرام فاصله‌داری در جهت عمود بر دسته درزه اول.



شکل ۹- هیستوگرام فاصله‌داری در جهت عمود بر دسته درزه دوم.



شکل ۱۰- هیستوگرام فاصله‌داری در جهت عمود بر دسته درزه سوم.



حداکثر RQD به ترتیب ۲۹ و ۹۹ درصد تعیین گردید. در جدول (۶) میانگین مقادیر GSI و RQD حاصل از اندازه گیری مغزه‌های حفاری با مقادیر حاصل از روش فتوگرامتری و DFN مقایسه شده است.

جدول ۵- مقادیر GSI و RQD حاصل از رابطه‌های (۴) و (۵)، به همراه سایر مشخصات برای ۲۸ مغزه از گمانه‌های ژئوتکنیکی واقع در معدن شماره یک گل‌گهر [۲۳].

Borehole ID	From(m)	to (m)	Run(m)	RQD (%)	Lithology	Jr	Ja	GSI
GB11	152	167	15	70	MG	2	2	61
GB15	150	165	15	74	MG	1.6	2	60
GB15	165	180	15	67	MG	2	2	60
1313	156	171	15	29	MG	3	2	46
1313	171	186	15	86	MG	3	2	74
1313	186	201	15	99	MG	3	2	81
1306	30	45	15	76	MG	3	2	67
1306	45	60	15	69	MG	3	2	63
1306	60	75	15	80	MG	3	2	69
1306	75	90	15	91	MG	3	2	74
1306	90	105	15	89	MG	3	2	73
1306	105	120	15	69	MG	3	2	63
1306	120	135	15	93	MG	3	2	75
1306	135	150	15	82	MG	3	2	70
1306	150	165	15	68	MG	3	2	63
1325	238	253	15	59	MG	2	3	50
1325	253	268	15	56	MG	2	3	49
1325	268	283	15	68	MG	2	3	55
1325	283	298	15	60	MG	2	3	51
1326	280	295	15	59	MG	2	2	56
1326	295	310	15	79	MG	2	2	66
1326	310	325	15	83	MG	2	4	59
1326	325	340	15	83	MG	2	4	59
1326	340	349	9	83	MG	2	4	59
1328	164	179	15	74	MG	2	4	54
1328	179	194	15	69	MG	2	4	52
1328	194	209	15	70	MG	2	4	53
1328	284	299	15	97	MG	3	4	71

جدول ۶- مقایسه میانگین مقادیر GSI و RQD حاصل از مغزه‌های حفاری با مقادیر روش فتوگرامتری و DFN.

Measurement Methods	Photogrammetry & DFN	Core logs
RQD	75.76	74
GSI	65	62

همانطور که در جدول (۶) ملاحظه می‌شود، مقادیر GSI و RQD حاصل از مغزه‌های حفاری با روش فتوگرامتری و DFN انطباق مناسبی داشته و صحت روش ارائه شده را تأیید می‌کند.

##### ۵- نتیجه گیری

یکی از چالش‌های موجود در تعیین خواص مکانیکی توده

سنگ، محاسبه حجم بلوک و شاخص مقاومت زمین‌شناسی GSI می‌باشد. در این تحقیق سعی شده با ترکیب روش‌های فتوگرامتری و شبکه شکستگی مجزا روشی نوین برای تعیین این پارامترها ارائه گردد.

برداشت ناپیوستگی‌ها غالباً از طریق روش‌های متداول خط برداشت و پنجره برداشت صورت می‌گیرد که این روش‌ها نیازمند دسترسی مستقیم به رخنمون سنگی بوده و همراه با مخاطرات زیادی می‌باشند. این موضوع در پله‌های معدنی بدلیل شیب زیاد پله و ناهمواری پاشنه پله محسوس تر بوده، بگونه‌ای که عملاً امکان برداشت میسر نبوده و یا تعداد محدود

## ۶- منابع

- [1] Watkins H., Bond C. E., Healy D., Butler R. W. H.; 2015; “**Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop**”. *Journal of Structural Geology*, 72, 67-82.
- [2] Mohammadi H. R., Mansouri H., Jalalifar H.; 2015; “**Determining the direction of discontinuities using photogrammetric method**”, case study of Gol-e-gohar No. 1 mine. *Earth Sciences (Geology of Engineering and the Environment)*, Year Twenty Fourth, 95: 203-210 (In Persian).
- [3] Hooker J. N., Laubach S. E., Gomez L., Marrett R., Eichhubl P., Diaz-Tushman K., Pinzon E.; 2011; “**Fracture size, frequency and strain in the Cambrian Eriboll Formation sandstones**”, NW Scotland. *Scott. J. Geol.* 47(1), 45-56.
- [4] Barbier M., Hamon Y., Callot J., Floquet M., Daniel J.; 2012; “**Sedimentary and diagenetic controls on the multiscale fracturing pattern of a carbonate reservoir: the Madison Formation (Sheep Mountain, Wyoming, USA)**”. *Mar. Petrol. Geol.* 29, 50-67.
- [5] Inigo J. F., Laubach S. E., Hooker J. N.; 2012; “**Fracture abundance and patterns in the Subandean fold and thrust belt, Devonian Huamampampa Formation petroleum reservoirs and outcrops**”, Argentina and Bolivia. *Mar. Petrol. Geol.* 35, 201-218.
- [6] Voyat I., Roncella R., Forlani G., Ferrero A. M.; “**Advanced techniques for geo structural surveys in modelling fractured rock masses: application to two Alpine sites**”. *American Rock Mechanics Association, The 41<sup>st</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden, Colorado*, 97-108.
- [7] Strouth A., Eberhardt E.; 2006; “**The use of LiDAR to overcome rock slope hazard data collection challenges at Afternoon Creek, Washington**”. *American Rock Mechanics Association, The 41<sup>st</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden, Colorado*, 109-120.
- [8] Sturzenegger M., Stead D.; 2009; “**Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts**”, *Engineering Geology*, 106(3-4), 163-182.
- ناپیوستگی قابل برداشت بوده که همراه با مخاطرات زیاد و دقت برداشت پایین می‌باشد. در این تحقیق، از روش فتوگرامتری برای برداشت ناپیوستگی‌ها در یک پله معدنی معدن سنگ آهن گل گهر سیرجان بهره گرفته شده که اساس کار بر مبنای ایجاد عکس‌های سه بعدی بوده و دارای دقت بالاتر، ایمنی بیشتر، عدم نیاز به دسترسی به سینه کار، سرعت بالاتر و هزینه پایین تر می‌باشد. سپس، اطلاعات مربوط به ناپیوستگی‌های برداشت شده با استفاده از روش فتوگرامتری، وارد نرم افزار FracMan گردیده و مدل شبکه ناپیوستگی‌های این پله معدنی ایجاد گردید. با ایجاد این مدل، توزیع حجمی بلوک‌های سنگی و فاصله‌داری دسته درزه‌ها تعیین گردید. با تعیین این پارامترها و مشخص نمودن شرایط سطحی درزه‌ها، به راحتی می‌توان تخمین مناسبی از GSI و پارامتر RQD فراهم نمود. درحالیکه، تعیین شاخص GSI با استفاده از روش متداول آن، بشدت وابسته به تجربه فرد می‌باشد. از طرفی، مقدار RQD نیز غالباً از طریق برداشت در یک بعد تعیین می‌گردد، در صورتی که در روش ارائه شده در این تحقیق، این پارامتر بر اساس توزیع حجمی درزه‌ها در سه بعد تعیین می‌گردد. برای سنجش اعتبار روش، از نتایج مربوط به ۲۸ گمانه ژئوتکنیکی بهره گرفته شد که نتایج این بررسی حاکی از توانایی این روش در تخمین شاخص GSI و پارامتر RQD می‌باشد.
- علاوه بر موارد ذکر شده، از روش پیشنهادی می‌توان در بحث عدم قطعیت مربوط به خواص مکانیکی توده‌سنگ نیز بهره گرفت. بدین این صورت که بر اساس روش پیشنهادی در این تحقیق، مدل‌هایی آماری از پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها تهیه و در ادامه مدل‌هایی از شبکه ناپیوستگی‌های مجزا ایجاد نمود و با در دست داشتن توزیع آماری دیگر پارامترهای مکانیکی سنگ، به بررسی عدم قطعیت در خواص مکانیکی و رفتاری توده سنگ پرداخت.

- [18] Kim B. H., Cai M., Kaiser P. K., Yang H. S.; 2007; **“Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Non-persistent Joints”**. Rock Mechanics and Rock Engineering, 40(2), 169-192.
- [19] ADAM Technology; 2010; **3DM Analyst Mine Mapping Suite 2.3.4 User’s Manual**.
- [20] Golder Associates; 2013; **Manual of FracMan Software, version 7.4**.
- [21] Palmstrom A; 1996; **“Characterizing rock mass by the RMI for use in practical rock engineering”**; Part 1: The development of the Rock Mass index (RMI). Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, 11(2), 175-188.
- [22] Hoek E., Carter T.G., Diederichs M.S.; 2013; **“Quantification of the geological strength index chart”**. American Rock Mechanics Association, the 47<sup>th</sup> US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA.
- [23] Mineral and Industrial Co. Golgohar, 2017. **Geotechnical Studies Report** (In Persian).
- [9] Bliss A., Hudyma N., Brown S., Oglesby J., Harris A.; 2017; **“Qualitative assessment of surface roughness of limestone specimens from the orientation of unwrapped triangulated point clouds”**, Proceedings of the SoutheastCon 2017, 1-5.
- [10] Tannant D. D.; 2015; **“Review of photogrammetry-based techniques for characterization and Hazard assessment of rock faces”**, International Journal of Geohazards and Environment, 1(2), 76-87.
- [11] Slaker B. A., Mohamed K. M.; 2017; **“A practical application of photogrammetry to performing rib characterization measurements in an underground coal mine using a DSLR camera”**. International Journal of Mining Science and Technology, 27(1), 83-90.
- [12] Tonon F., Kottenstette J. T.; 2006; **“Summary Paper on the Morrison Field Exercise”**. American Rock Mechanics Association, The 41<sup>st</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden, Colorado, 77-96.
- [13] Poropat, G. V.; 2006; **“Remote 3D mapping of rock mass structure: laser and photogrammetric methods for rock face characterization”**, The 41<sup>st</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden, Colorado, 63-76.
- [14] Haneberg W. C.; 2008; **“Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States”**. Bull. Eng. Geol. Environ., 67, 457-469.
- [15] Firpo G., Salvini R., Francioni M., Ranjith P. G.; 2011; **“Use of digital terrestrial photogrammetry in rocky slope stability analysis by Distinct Elements Numerical Methods”**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 48, 1045-1054.
- [16] Kim D. H., Gratchev I., Balasubramaniam A.; 2014; **“A Photogrammetric approach for stability analysis of weathered rock slopes”**. Geotechnical and Geological Engineering, 33(3), 443-454.
- [17] Bonilla - Sierra V., Donzé F. V., Scholtès L., Elmouttie M. K.; 2015; **“The use of photogrammetry and 3D Discrete Element Models to better assess Rock Slope Stability”**. Acta Geotechnica, 10(4), 497-511.