

محاسبه توزیع حجم بلوک‌های برجای توده‌سنگ دارای درزه‌های پایا با استفاده از ابر نقاط سه‌بعدی به دست آمده از روش‌های درزنگاری نوین

سید احمد مهری شال*^۱

پذیرش مقاله: ۹۹/۰۶/۰۲

دریافت مقاله: ۹۸/۱۲/۱۲

چکیده

در پروژه‌های مهندسی سنگ، با اطلاع از وضعیت ساختاری و ابعاد بلوک‌های توده‌سنگ، به میزان زیادی در هزینه‌ها صرفه‌جویی خواهد شد. ظهور فناوری‌های جدید نقشه‌برداری این امکان را فراهم کرده است تا به کمک مدل‌های سه‌بعدی رخنمون دیجیتال توده‌سنگ، عوارض ساختاری به آسانی شناسایی و برداشت شوند. این تحقیق، فرآیندی را ارائه می‌دهد که در آن با استفاده از داده‌های ابر نقاط متراکم و با تلفیق قابلیت‌های چند برنامه کامپیوتری، مقادیر جهت‌داری و فاصله‌داری دسته‌درزه‌های پایای موجود در توده‌سنگ و همچنین نمودار توزیع حجم بلوک‌های توده-سنگ برآورد می‌شود. تعلق نقاط مختصاتی به صفحات ناپیوستگی‌ها با اجرای آزمون کوپلناریتی محاسبه شده و به کمک روش‌های آماری دسته-بندی می‌شوند. به دلیل پراکندگی فضایی نقاط متعلق به دسته‌ناپیوستگی‌ها، نقاط خوشه‌بندی شده و بر هر خوشه، صفحه واحدی برازش شد. به این ترتیب تمامی صفحات ناپیوستگی قابل رویت موجود در توده‌سنگ به صورت هندسی و با فرض پایایی، شبیه‌سازی شدند. از طرفی دیگر با کمک داده‌های ابر نقاط متراکم، یک مدل حجمی از توده‌سنگ ایجاد شد. با تلفیق هندسه مدل سه‌بعدی درزه‌ها و مدل حجمی توده‌سنگ، بلوک‌های موجود شبیه‌سازی شده و نمودار توزیع حجم بلوک به دست آمد. به منظور اعتبارسنجی راه و روش ارائه شده در این تحقیق از یک مدل هندسی با سیستم درزه‌داری متعامد منظم که دارای حل تحلیلی دقیق است، استفاده شد.

کلید واژه‌ها: درزه نگاری دیجیتال، برداشت نیمه خودکار ناپیوستگی‌ها، خصیصه‌دهی توده‌سنگ، نرم‌افزار استخراج دسته درزه‌ها.

۱. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ahmad.mehri@uma.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

قسمت عمده توده سنگ، مخصوصاً آنهایی که در سطح زمین تا اعماق چندصد متری قرار دارند به صورت یک محیط ناپیوسته رفتار می کنند و ناپیوستگی های موجود در آنها به شدت رفتار مکانیکی توده سنگ را کنترل می کنند. موسسه ملی ایمنی و بهداشت شغلی آمریکا (National Institute for Occupational Safety and Health) اعلام کرده است که: "ناپایداری های ناشی از عوارض ساختاری، یکی از اصلی ترین علت ریزش در معادن آمریکا است" (Monsalve, 2019). از طرف دیگر یکی از دلایل عمده عدم سوددهی کافی معادن سنگ ساختمانی نیز نبود پیش بینی اولیه نسبت به حجم بلوک های برجای توده سنگ است، زیرا پیش بینی اولیه از اندازه نسبی قطعات، به بهینه سازی تولید سنگ ساختمانی کمک خواهد کرد (Mosch et al. 2011; Sousa, 2010; امینی و خسرو، ۱۳۹۶).

ابعاد بلوک های موجود در توده سنگ به وسیله صفحات ناپیوستگی که در آن حضور دارند محدود می شوند. محدوده تغییرات اندازه این بلوک های سنگی اصطلاحاً توزیع ابعاد بلوک های برجا (یا In-situ Block Size Distribution) گفته می شود. از اینرو، مشخصه توزیع ابعاد بلوک های سنگی یک خصیصه مهم از توده سنگ است که در بسیاری از مطالعات مهندسی مرتبط با فضاهای زیرزمینی و روباز مثل فعالیت های معدنی و عمرانی از قبیل مطالعات اقتصادی معادن سنگ تزئینی، رده بندی و تحلیل پایداری توده سنگ، طراحی روش حفاری، تعیین پارامترهای آتشفباری و تحلیل های هیدروژئولوژی باید مورد توجه قرار گیرد (ملایی و همکارانش، ۱۳۹۸؛ Elmouttie and Propat, 2012; Yarahmadi et al, 2014).

مهمترین عوامل کنترل کننده اندازه یا حجم بلوک های برجای توده سنگ، پارامترهای هندسی ناپیوستگی ها از قبیل فاصله داری، تداوم و فرکانس (Frequency) یا شدت درزه داری است. بنابراین اولین گام در برآورد حجم بلوک ها در توده سنگ، برداشت یا اندازه گیری هندسه ناپیوستگی ها است (Priest and Hudson, 1976; Bieniawski, 1989). مهندسین

ژئوتکنیک در گذشته به کمک مشاهدات بصری و برداشت های دستی اقدام به اندازه گیری خصیصه های توده سنگ می نمودند و رایج ترین روش درزه نگاری نیز استفاده از کمپاس و شیب سنج بود (Palmstrom et al., 2001). استفاده از تکنیک های سنجش از دور و تحلیل مدل های رخنمون دیجیتال سه بعدی (Digital Outcrop Model) از توده سنگ برای استخراج خواص هندسی و ژئوتکنیکی ناپیوستگی های توده سنگ در دهه اخیر بسیار توسعه یافته است و بنابه دلایل زیر استفاده از این روش ها به تدریج جایگزین برداشت های دستی و روش های سنتی شده است (Kemeny, 2003; Gaich et al. 2006; Haneberg, 2008):

- نتایج عینی بوده و بارها قابلیت تولید مجدد و بررسی و اندازه گیری را دارند.
 - زمان برداشت و اشتباهات انسانی را بسیار کاهش داده و دقت اندازه گیری ها را به شدت افزایش داده است.
 - مقدار داده های بیشتری با جزئیات بیشتری قابل برداشت هستند.
 - ایمنی کار بسیار افزایش یافته و خطرات جانی تقریباً حذف شده و نقاط دور از دسترس قابل برداشت شده اند.
 - اطلاعات به دست آمده این قابلیت را دارند که عملیات تحلیل و تفسیر آنها به کمک کامپیوتر و با روش های نیمه خودکار یا تمام خودکار انجام شوند.
- تکنیک های دورسنجی لیدار (Light Detection and Ranging) مثل اسکنر لیزری دیجیتال زمینی (Terrestrial Digital Laser Scanning) و تکنیک فتوگرامتری دیجیتال محدوده نزدیک (Close Range Terrestrial Digital Photogrammetry) می توانند مدل های سه بعدی از سطوح با رزولوشن (یا وضوح) بسیار زیاد فراهم نمایند که شامل هزاران نقطه با فواصل کمتر از میلیمتر از هم است (Jaboyedoff et al. 2012). برداشت یا اسکن لیزری یک تکنولوژی است که با ارسال سریع اشعه های لیزر به اطراف و تحلیل اشعه های انعکاسی می تواند موقعیت عوارض اطراف خود را با دقت میلیمتر به صورت نقاط مختصاتی اندازه گیری نماید (Monsalve, 2019). در روش فتوگرامتری نیز با استفاده

۲. روش‌های نوین درزه‌نگاری

پیشرفت‌های زیادی طی سال‌های اخیر در فنون نقشه‌برداری رخ داد که ابزارهای جدید و روش‌های نوینی برای مهندسی زمین‌شناس فراهم کرد تا بتوانند اطلاعات ناپیوستگی‌ها را برداشت کرده، ذخیره نموده و تحلیل کنند. این پیشرفت‌ها شامل همه‌گیر شدن استفاده از تلفن‌های همراه هوشمند، تبلت‌ها و برنامه‌های کاربردی که بر روی آنها نصب می‌شود است و این تکنولوژی می‌تواند جای کمپاس-شیب‌سنج را در برداشت‌های صحرایی بگیرد. بعلاوه استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور در علوم زمین، ابزارهای برداشت لیزری و فتوگرامتری و بسته‌های نرم‌افزاری این امکان را فراهم کردند تا توده‌سنگ به صورت سه‌بعدی به کمک ابر نقاط مختصاتی مدل‌سازی شده و خواص ناپیوستگی‌ها از سرتاسر آن به صورت عینی برداشت شوند. تکنولوژی‌های جدید دور سنجی مثل اسکنر لیزری زمینی یا فتوگرامتری دیجیتال محدوده نزدیک می‌توانند مدل‌های سه‌بعدی از سطوح (3D Surface Model) با وضوح بسیار زیاد فراهم نمایند.

یکی از مناسب‌ترین ابزارهایی که تاکنون برای برداشت عوارض ساختاری توده سنگ معرفی شده است مدل رخنمون دیجیتال (DOM) نام دارد (Powers et al. 1996). مدل DOM در واقع نوعی نمایش توده سنگ با کیفیت زیاد به صورت سه‌بعدی است که زمین‌شناسان را قادر می‌سازد به صورت مجازی اقدام به برداشت ناپیوستگی‌های توده سنگ نمایند. پرکاربردترین روش‌هایی که اغلب برای ساختن مدل‌های DOM از آنها استفاده می‌شود یکی استفاده از اسکنر لیزری سیار و دیگری روش فتوگرامتری دیجیتال است.

اسکنرهای لیزری علی‌رغم دقت قابل قبولی که دارند بسیار گران بوده و تجهیزات وابسته آنها نیز دست و پاگیر هستند و این در حالی است که استفاده از فتوگرامتری دیجیتال هم کم هزینه بوده و هم کاربر پسند است و نیاز به تجهیزات چندان پیچیده‌ای هم ندارد. توسعه و پیشرفت دوربین‌های RGB و همچنین پرنده‌های هدایت پذیر از راه دور (پهپاد) موجب

از عکسبرداری دو بعدی متداول با همپوشانی ۶۰ درصدی و استفاده از نرم‌افزارهای خاص، می‌توان مدل‌های سه‌بعدی از رخنمون‌های سنگی تهیه کرد (Sturzenegger and Stead, 2009 & 2011).

امروزه با توجه به پیشرفت‌های چشمگیری که در قدرت پردازش کامپیوترها رخ داده است، امکان مدل‌سازی عددی توده‌سنگ‌ها، طوری که بسیار نزدیک به واقعیت باشد، فراهم شده است (Bonilla-Sierra et al. 2012; Riquelme et al. 2012; Lato and Voge, 2014); اما همچنان یکی از کارهای پر ابهام در خصیصه‌دهی توده‌سنگ، تعیین فاصله‌داری و تداوم دسته ناپیوستگی‌ها است. ابهامات و دشواری‌ها در خصوص اندازه تداوم یا پایایی یک ناپیوستگی به مراتب بیشتر است؛ به همین دلیل در اغلب مطالعات مربوط به خصیصه‌دهی توده-سنگ، تمامی ناپیوستگی‌ها در میدان عمل پروژه، پایا فرض می‌شوند (Buyer and Schubert, 2017). این فرض موجب می‌شود تا فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها کمتر از واقعیت تخمین زده شده و در نهایت ابعاد بلوک‌های سنگی نیز کمتر از مقدار واقعی برآورد شوند (Riquelme et al. 2015).

این مقاله با استفاده از مدل رخنمون دیجیتال توده‌سنگ، یک روش کاربردی برای برآورد احجام بلوک‌های سنگی موجود در توده سنگ به صورت برجا ارائه داده است؛ به طوری که یک مدل قطعی با انطباق مناسب بر واقعیت ایجاد می‌کند. این روش بر اساس برداشت خصوصیات ناپیوستگی‌ها به کمک نرم‌افزارهای مبتنی بر تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی هندسی سه‌بعدی توده‌سنگ ارائه شده است. اگرچه در تخمین دقیق اندازه و شکل بلوک‌های توده‌سنگ، آگاهی از میزان واقعی تداوم یا پایایی ناپیوستگی بسیار مهم است، اما به دلیل محدودیت‌های موجود در امکان برداشت میزان تداوم ناپیوستگی‌ها در دل توده‌سنگ، در این تحقیق نیز همانند مطالعات پیشین، تمامی ناپیوستگی‌ها، اعم از سیستماتیک و تصادفی، همگی پایا فرض شده است. روش ارائه شده در این تحقیق توسط مدل‌های هندسی بدیهی که دارای احجام قابل اندازه‌گیری هستند اعتبارسنجی شده است.

در چنین مواردی روش‌های نوین چندان نمی‌تواند ابزار مناسبی برای برداشت ناپیوستگی‌ها باشند.

مدل رخنمون سه‌بعدی توده‌سنگی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است با کمک روش فتوگرامتری و با استفاده از نرم‌افزار Agisoft Metashape ایجاد شده است. مدل DOM مربوط به این رخنمون از سایت www.sketchfab.com دانلود شده و به ابر نقاط تبدیل شده و سپس مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل از یک دامنه سنگی به طول حدودی ۲۵۰ متر و ارتفاع ۹۰ متر برداشت شده است. تصویر مدل مذکور در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳. ارزیابی ناپیوستگی‌ها در مدل‌های ابر نقاط سه بعدی

داده‌های رقومی فراهم شده با روش‌های نوین درزه‌نگاری، راه را برای استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر کامپیوتر باز کرده است. ابزارها و برنامه‌های تجاری و یا متن باز مختلفی جهت بررسی‌های داده‌های ابر نقاط و استخراج عوارض و ناپیوستگی‌های توده‌سنگ وجود دارد (Henberg, 2008; Riquelme et al., 2014; Lato and Voge, 2012).

شده است که پهناد فتوگرامتری دیجیتال در علوم زمین کاربرد گسترده‌ای پیدا کند (Chesley et al. 2017; Tannant, 2015). توجه شود، چنانچه برداشت تعداد زیادی ناپیوستگی مورد نیاز باشد، استفاده از روش‌های نوین با چشم‌پوشی از هزینه‌های تجهیزات، نسبت به روش‌های سنتی به مراتب اقتصادی‌تر است. بعلاوه در مواردی که توده‌سنگ دارای ناهنجاری‌های مغناطیسی بوده یا اینکه دامنه ناپایدار و یا دور از دسترس باشد، استفاده از این روش‌ها، تنها راه برای برداشت درزه و ناپیوستگی‌ها است.

ناگفته نماند، در روش‌های نوین، جهت‌داری ناپیوستگی‌های بزرگ اغلب با دقت قابل قبولی برآورد می‌شود و در ناپیوستگی‌های کوچک با کم شدن مساحت سطح قابل رویت ناپیوستگی، دقت این روش‌ها نیز به شدت کاهش می‌یابد. بعلاوه در روش فتوگرامتری، بعضی از منابع مهم خطایی وجود دارند که بایستی مورد توجه قرار گیرند و عبارتند از: عدم اطلاع دقیق از پارامترهای اجزای داخلی دوربین، دقت برداشت نقاط کنترلی، شدت نور و سایه اجسام، کرویت زمین و غیره. گاهی در سنگ‌های دگرشکل شده و هوازده، تشخیص ناپیوستگی‌ها و عوارض زمین‌شناسی از یکدیگر دشوار است.



شکل ۱. مدل رخنمون سه بعدی توده سنگ برگرفته از sketchfab.com (۲۰۱۸).

©3GSM GmbH) یا نرم‌افزار 3D Analyst (از مجموعه ADAM Technology)، یا نرم‌افزارهایی توسعه داده شده

از جمله این موارد می‌توان بسته‌های نرم‌افزاری تجاری مانند: ShapeMetriX3D (از مجموعه SMX Analyst) گروه

هایی که تاکنون برای خصیصه‌دهی دسته ناپیوستگی‌ها از روی ابر نقاط سه‌بعدی از آن تبعیت می‌کنند این است که: چنانچه صفحات ناپیوستگی‌ها علی‌رغم زبری، تموج و اعوجاجی که دارند، به صورت یک صفحه صاف فرض شوند، در هندسه تحلیلی می‌توان آن را به کمک معادله‌ای مشابه رابطه ۱ بیان کرد.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

طبق یافته‌های تئوری، دو صفحه مجزا ولی موازی هم (یا دو درزه جدا از یک دسته درزه) در فضا دارای بردار نرمال (A, B, C) یکسانی بوده و مقادیر D آنها که مربوط به موقعیت قرارگیری صفحه در فضا است با یکدیگر متفاوت است. بنابراین با استخراج صفحات از ابر نقاط می‌توان تا حدودی در خصوص ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها قضاوت کرد.

۳-۱. تشخیص خط اثر ناپیوستگی‌ها در رخنمون

همواره برداشت و تشخیص شیب و امتداد درزه‌هایی که عمود بر سینه‌کار هستند، به دلیل اینکه سطح ناپیوستگی در دسترس و یا قابل رویت نیست، بسیار دشوار هستند. برای این منظور دنبال کردن خطوط اثر این قبیل درزه‌ها در رخنمون‌ها می‌تواند در تشخیص آن کمک کند.

داده‌های ابر نقاط تولید شده توسط روش‌های برداشت لیزری یا فتوگرامتری می‌توانند هم شامل اطلاعات هندسی و هم شامل اطلاعات بافت یا ریخت ظاهری (Texture) توده‌سنگ باشند. اطلاعات هندسی به صورت مقادیر x, y, z بیان شده و برای هر نقطه، اطلاعات مربوط به بافت آن به صورت کدهای رنگ RGB مشخص می‌شوند. بر این اساس زیاتنگ-ژو و همکارانش (Jiateng Guo et al. 2019) با ترکیب تئوری گرافیکی کامپیوترها و پردازش تصویر اقدام به شناسایی خطوط اثر ناپیوستگی‌ها در رخنمون کرده‌اند. نتیجه مطالعات ایشان منجر به ارائه یک نرم‌افزار تحقیقاتی با عنوان Discontinuity Trace Extractor شد که در این تحقیق نیز برای شناسایی طول اثر ناپیوستگی‌ها و تشخیص درزه‌هایی که

توسط (Slob et al., 2005), (Jaboyedoff et al., 2007) همچنین الگوریتم توسعه یافته بر پایه متلب توسط (Gigli and Casgli, 2011) و (Voge et al., 2013) را نام برد. در بین برنامه‌های کامپیوتری مختلف موجود، ابزار پلاگین FACETS در نرم‌افزار CloudCompare (توسعه یافته توسط (Dewez et al., 2016) و همچنین برنامه Discontinuity Set Extractor در متلب (توسعه یافته توسط (Riquelme et al., 2014) به دلیل رایگان بودن، کاربرد پسند بودن و استفاده آسان و دقت مناسب نتایج تولید شده در شناسایی نیمه خودکار صفحات ناپیوستگی‌ها با استفاده از ابرنقاط، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین ابزار پلاگین Compass در نرم‌افزار کلودکمپار (توسعه یافته توسط (Thiele et al. 2017) نیز برای آن دسته از افراد که برخلاف روش‌های نیمه خودکار علاقمند به تشخیص و استخراج دستی صفحات ناپیوستگی از بین ابرنقاط هستند، مراتبی از محبوبیت را کسب کرده است.

در کارهای صحرائی، اغلب ناپیوستگی‌ها با رخنمون و طول اثرشان شناسایی می‌شوند. بنابراین اگر اثر وجود ناپیوستگی در موقعیت‌های مختلف در توده‌سنگ از بین رفته باشد یا مانعی در مقابل آن وجود داشته باشد، دشوار است که بتوان تشخیص داد این ناپیوستگی مربوط به صفحه یا دسته خاصی هست یا نه. این موضوع در مورد روش‌های جدید درزه‌نگاری نیز صادق است. ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ عموماً صفحات پایایی نبوده و تداوم زیادی ندارند، بجز در مواردی که ناپیوستگی ناشی از صفحات لایه‌بندی باشد که در این صورت اغلب دارای تداوم کامل هستند. از اینرو تمام اطلاعاتی که در مورد ناپیوستگی‌ها به دست می‌آید ناشی از آنچه است که مشاهده می‌شود.

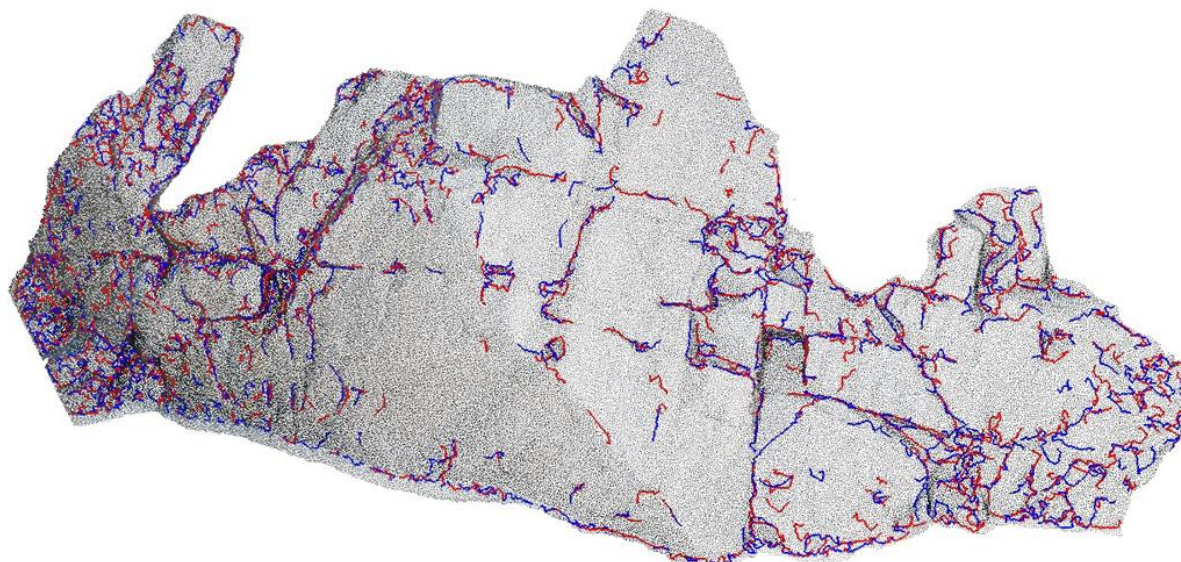
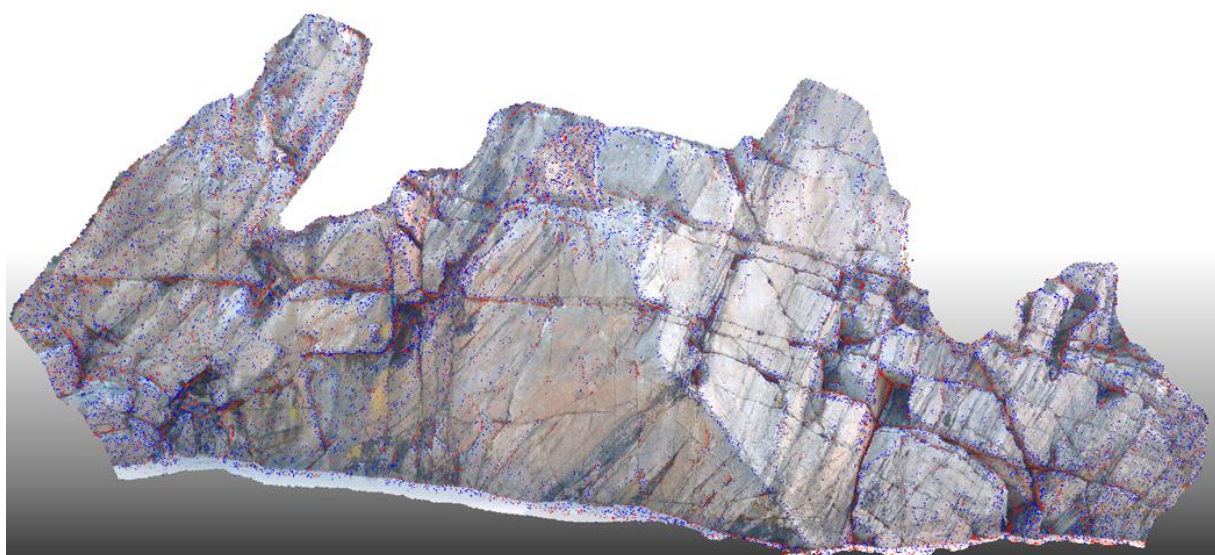
روش‌های دیجیتال موجود پس از اختصاص نقاط مختصاتی به سطوح رخنمون توده‌سنگ، اقدام به خصیصه‌دهی مشاهدات کرده و در نهایت با تکیه بر تحلیل‌های آماری و قضاوت مهندسی، ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها مورد تجزیه تحلیل قرار می‌گیرد. اما اصل اساسی که تقریباً تمامی روش‌

بر نقاط به دست آمده از خطوط اثر درزه‌ها، شیب و امتداد آن با دقت قابل قبولی اندازه‌گیری خواهد شد.

۳-۲. جهت‌داری صفحات ناپیوستگی در رخنمون جهت‌داری ناپیوستگی‌ها را می‌توان با روش سه نقطه به دست آورد. با این روش تنها کافی است که مختصات سه نقطه مختلف از صفحه ناپیوستگی یا لایه در اختیار باشد. روش‌های مبتنی بر ابرنقاط سه‌بعدی نیز بر همین اساس اقدام به شناسایی دسته درزه‌ها و ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ می‌کنند. در این تحقیق از نرم‌افزار DSE برای این

عمود بر سطح رخنمون توده سنگ هستند مورد استفاده قرار گرفته است.

در این تحقیق به کمک نرم‌افزار DTE و پلاگین compass در نرم‌افزار CloudCompare ابتدا خطوط اثر این ناپیوستگی‌ها (به صورت نیمه‌خودکار) در فضای ابر نقاط سه‌بعدی شناسایی شد. نتایج به دست آمده از تشخیص طول اثر ناپیوستگی‌های موجود در رخنمون مورد مطالعه این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه با برآزش صفحه



شکل ۲. کلاسه‌بندی نقاط به دست آمده از طول اثر ناپیوستگی‌ها در رخنمون توده سنگ با نرم‌افزار DTE.

به کمک این نرم‌افزار می‌توان دسته درزه‌های موجود در توده سنگ را به دست آورد. ورودی این روش، ابر نقاط سه بعدی

منظور استفاده شده است (که از طریق لینک <https://personal.ua.es/en/ariquelme> قابل دسترس است).

دسته درزه‌ها و همچنین سطوح قابل رویت آنها به کمک رنگ‌های متفاوت برای هر دسته درزه در شکل ۳ نشان داده شده است. اطلاعات شیب و جهت شیب متوسط دسته ناپیوستگی‌های شناسایی شده نیز در شکل ۴ آورده شده است.

۳-۳. برآورد فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها

علی‌رغم ابهاماتی که در تعریف و نحوه اندازه‌گیری فاصله‌داری وجود دارد، در حال حاضر تکنیک‌های موجود این امکان را فراهم کرده است تا بتوان اندازه‌گیری و برآورد واقعی‌تر و دقیق‌تری را از فاصله‌داری عمودی دسته ناپیوستگی به صورت سه بعدی ارائه داد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار DSE فاصله عمودی بین ناپیوستگی‌ها به عنوان کمترین فاصله (یا فاصله اورتوگنال) بین صفحات دارای رخنمون در راستای عمود بر یکی از آنها محاسبه می‌شود. در این نرم‌افزار مقدار فاصله‌داری با توجه به مقدار پارامتر D رابطه ۱ به دست می‌آید. به طوری که صفحات بر اساس مقدار D آنها به ترتیب صعودی مرتب شده، سپس الگوریتم یک مجموعه نقاط R ایجاد می‌کند که شامل تمام نقاط عضو دسته ناپیوستگی با حذف نقاط مربوط به خودش است. برای هر نقطه از این خوشه، الگوریتم دنبال نزدیکترین فاصله بین سایر نقاط از R می‌گردد. نزدیکترین نقطه مربوط به نزدیکترین خوشه خواهد بود. بنابراین فاصله بدست آمده مربوط به فاصله‌داری این دو خوشه است. الگوریتم به دنبال خوشه پیدا شده در لیست Dهای مرتب شده (Dsorted) گشته و آن را حذف می‌کند تا هیچ فاصله‌داری دوباره حساب نشود. برای خوشه‌های باقی مانده در لیست، دوباره این عملیات تکرار می‌شود. در پایان لیستی از مقادیر فاصله‌داری-ها ایجاد می‌شود که در مقابل هر کدام شماره خوشه مربوط قید شده است (Riquelme et al., 2015). بدین ترتیب نمودار توزیع و متوسط مقادیر فاصله‌داری‌های یک دسته‌درزه قابل محاسبه است. توزیع خوشه‌های ابر نقاط مربوط به دسته‌درزه‌های شناسایی شده توده‌سنگ مورد مطالعه به همراه صفحات پلی‌گونال برازش شده بر ابر نقاط متراکم هر خوشه در شکل

بوده که در آن چگالی توزیع بردار نرمال نقاط به کمک آزمون کوپلناریتی، مورد تحلیل قرار گرفته، دسته‌بندی شده، صفحات ناپیوستگی‌ها شناسایی و ابر نقاط براساس دسته‌درزه‌های موجود طبقه‌بندی (یا کلاس‌بندی) می‌شوند.

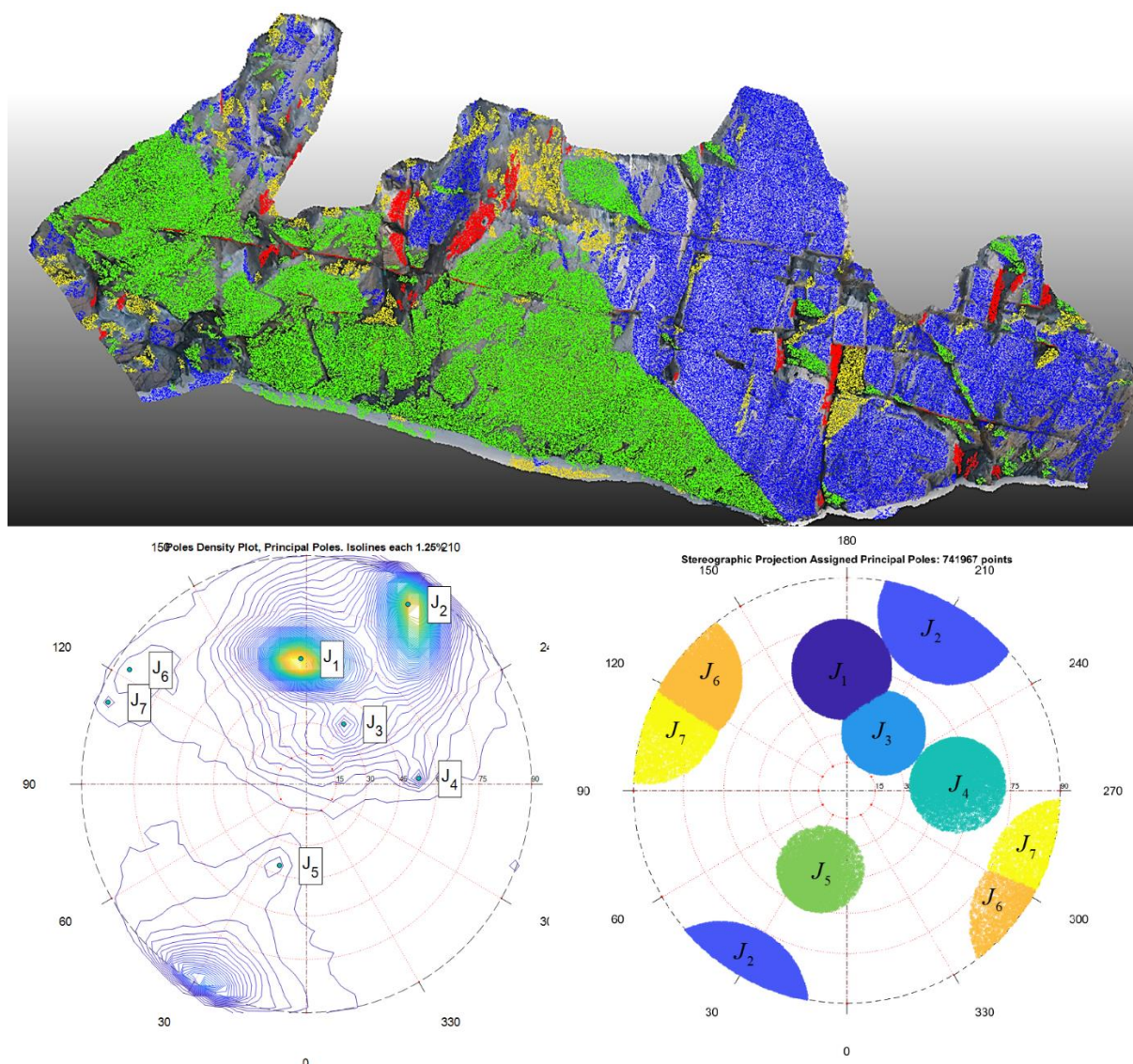
روش DSE به طور خودکار دسته‌ناپیوستگی‌های اصلی را به کمک یک تابع چگالی شناسایی می‌کند و این روش بدان معنی است که داده‌های شیب و جهت شیب برای ناپیوستگی‌های خاص و ناپیوستگی‌هایی با اهمیت کم آماری را مستقیماً نمی‌توان از DSE به دست آورد. اما ناگفته نماند که DSE قادر است ناپیوستگی‌هایی را که مربوط به اثر ساختاری یکسانی هستند ولی با سایر عوارض و یا دلایل دیگری قطع شده و از همدیگر جدا شده‌اند و یا در جای دیگری رخنمون پیدا کرده‌اند را نیز شناسایی کند.

توجه شود که این نرم‌افزار بطور خودکار تمامی صفحات هم‌راستا را شناسایی می‌کند که البته باید با قضاوت منطقی آنها را مورد بررسی قرار داد و از کاربری کورکورانه اجتناب شود. بنابراین برای اینکه نتایج مطلوبی حاصل شود، کاربر بایستی پیش زمینه خوبی از مکانیک سنگ و زمین شناسی مهندسی داشته باشد. از اینرو پارامترهای آماری ورودی مدل با توجه به پیشنهادات تحقیقات پیشین (Riquelme et al., 2015; Buyer and Schubert, 2017) و تجربیات این تحقیق، تعیین شدند. به طوری که در این برنامه بردارهای نرمال با استفاده از ۱۵ نقطه در همسایگی با حداکثر انحراف مجاز ۰/۲ محاسبه شد. انحراف زوایای بردار نرمال‌های دسته‌ناپیوستگی‌های اصلی بایستی بزرگتر از ۱۰ درجه باشد. در نهایت ۱۰ تا از قطب-هایی که تمرکز نقاط واضحی نشان داده‌اند به عنوان دسته درزه انتخاب شدند. بیشترین زاویه بین بردار نرمال اختصاصی یک نقطه با بردار نرمال قطب اصلی ۲۰ درجه انتخاب شد. انحراف استاندارد برای اتصال خوشه‌ها به یکدیگر برابر با ۱/۵ (مقدار پیش فرض) در نظر گرفته شد و خوشه‌های دارای کمتر از ۱۰۰ نقطه حذف شدند.

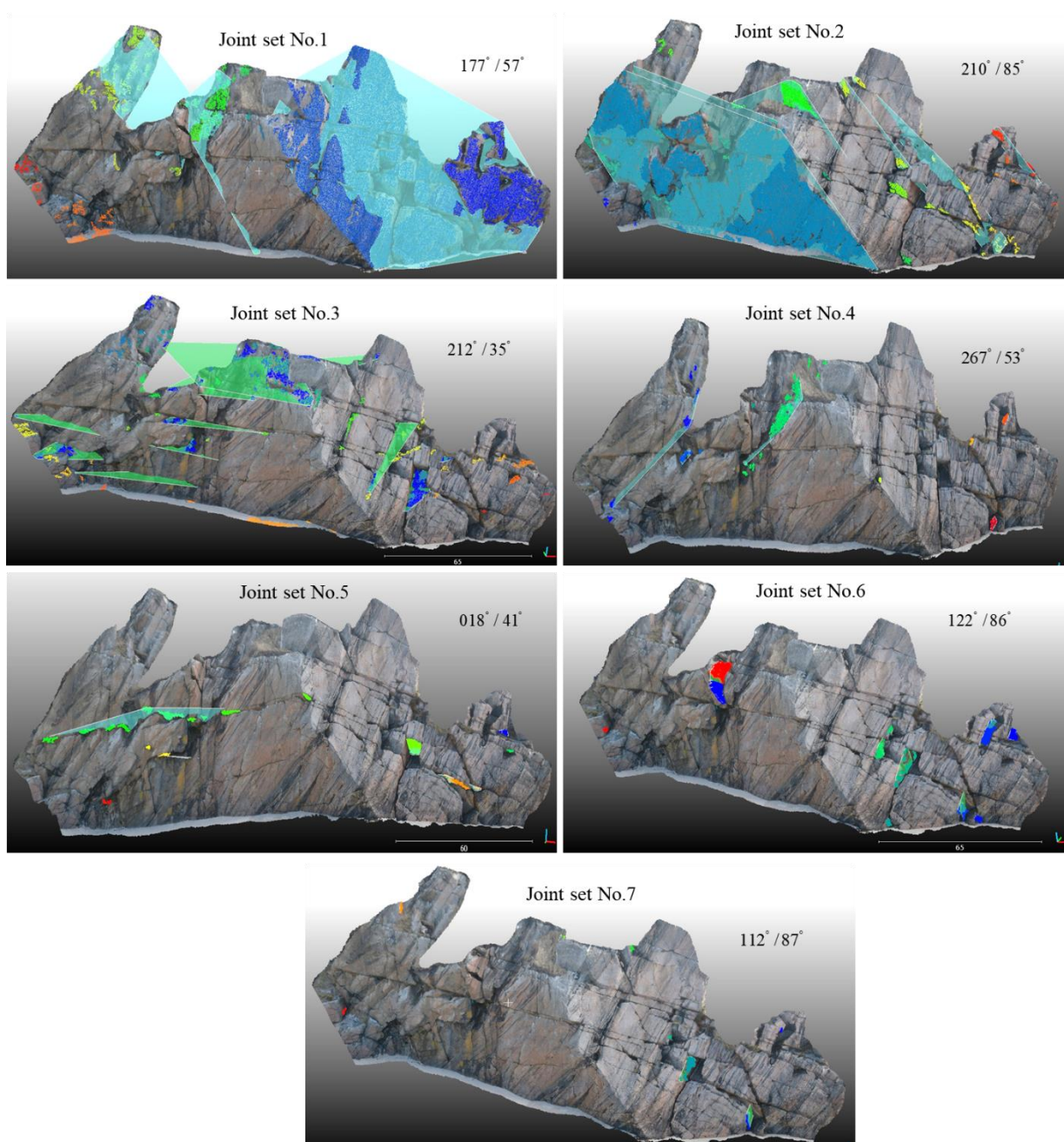
بدین ترتیب تعداد ۷ دسته درزه در این رخنمون شناسایی شدند که تصاویر استریونت به دست آمده از شیب و امتداد

۳-۴. ایجاد مدل هندسی حجم توده سنگ مدل‌های رخنمون سطوح سنگی (DOM) عموماً به صورت رویه‌های سه‌بعدی هستند و اغلب یک قسمت از هندسه مدل باز است. بنابراین از این قبیل مدل‌ها نمی‌توان به عنوان هندسه مدل در تجزیه تحلیل‌های عددی و یا سایر مطالعات مهندسی مبتنی بر کامپیوتر استفاده کرد. برای این منظور لازم است که

۴ نشان داده شده است. در ادامه، طبق روش فوق‌الذکر، فاصله‌داری سیستم درزه‌های شناسایی شده در این توده سنگ، با فرض پایایی تمامی ناپیوستگی‌ها، اندازه‌گیری شد و مقادیر فاصله‌داری میانگین برای دسته درزه‌های شماره ۱ الی ۷ به ترتیب برابر با ۳/۱، ۴/۲، ۳/۶، ۹/۵، ۷/۴، ۱۶/۶ و ۱۹/۹ متر برآورد شد. نمودار فراوانی فاصله‌داری‌ها برای دو حالت تداوم و عدم تداوم درزه‌ها به همراه مقادیر متوسط فاصله‌داری در شکل ۵ آورده شده است.



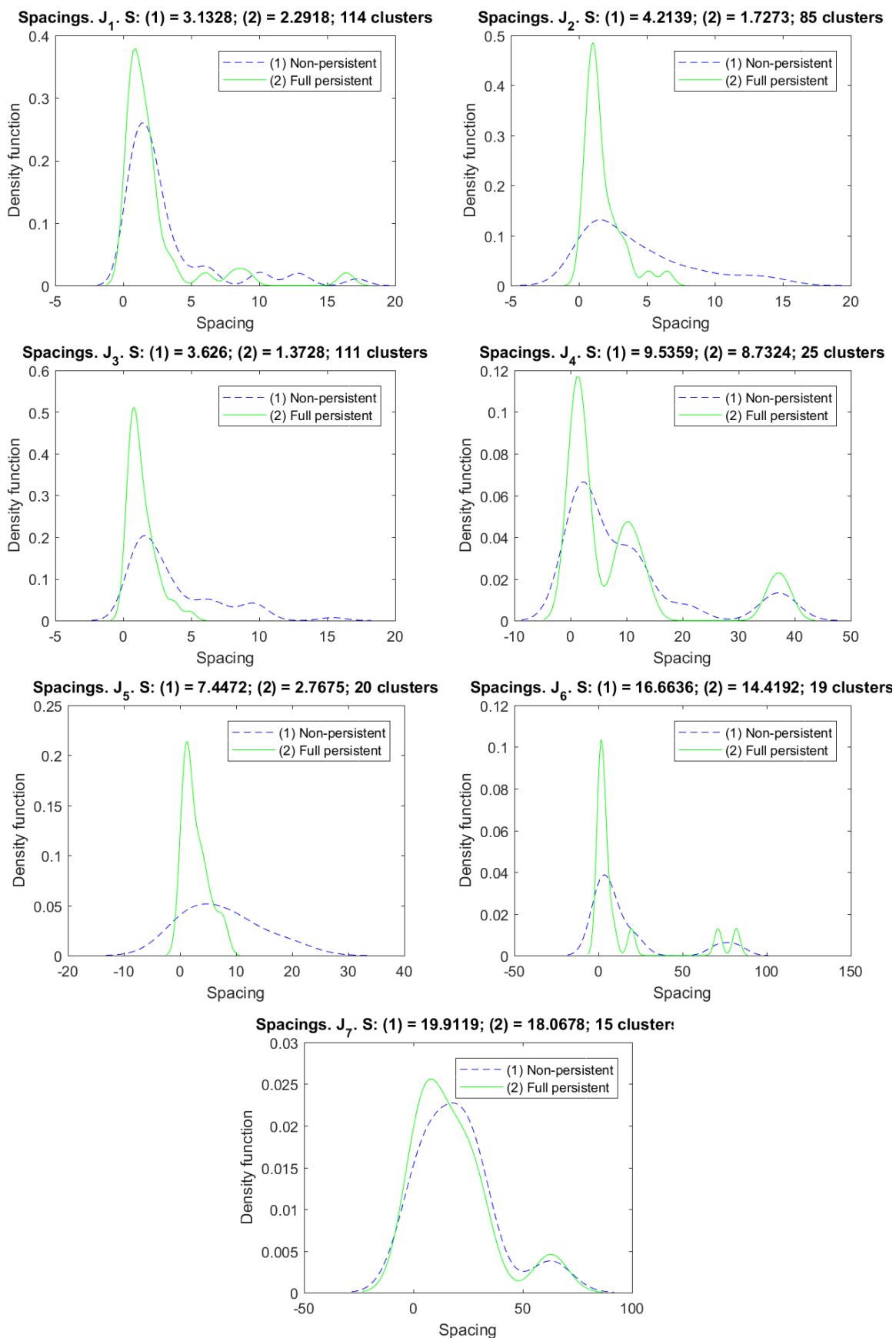
شکل ۳. تصاویر شبکه استریونت حاصله از توزیع قطب صفحات ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ به همراه نمایش سطوح دسته درزه‌ها در رخنمون سنگی به تفکیک رنگ.



شکل ۴. دسته‌درزه‌های شناسایی شده در توده‌سنگ توسط DSE و برازش صفحه‌پلی‌گونال (چند ضلعی) بر ابر نقاط مربوط به هر دسته درزه به کمک CloudCompare.

نرم‌افزار متن باز CloudCompare است. در این تحقیق از روش دوم استفاده شده است. در اینجا ابتدا ابر نقاط متراکم مربوط به سطوح رخنمون توده‌سنگ از روی مدل DOM تولید شده و سپس با روش بازسازی سطوح Dirichlet (که در این پلاگین تعریف شده است) رویه سه‌بعدی باز توده-سنگ تبدیل به یک رویه بسته حجمی می‌شود. حجم این مدل

یک حجم بسته از این مدل‌های رخنمونی ایجاد شود. برای تولید حجم از روی مدل‌های DOM، دو روش شناسایی شده است. روش اول استفاده از نرم‌افزار تجاری Slide3 از گروه نرم‌افزاری rocscience و اکستروود کردن رویه‌های هندسی (Drawing Exchange Format) DXF رخنمون توده‌سنگ است. روش دوم استفاده از پلاگین PoissonRecon



شکل ۵. منحنی توزیع فراوانی فاصله‌داری‌ها به تفکیک دسته درزه.

پارامتر J_v در این روابط، درزه‌داری حجمی بوده و به تعداد درزه‌هایی که حجم مشخصی از توده سنگ را قطع کرده‌اند اطلاق می‌شود و به صورت تعداد درزه در هر مترمکعب سنگ بیان می‌شود. محاسبه J_v با استفاده از فاصله‌داری دسته درزه‌ها توسط Sen and Eissa, (1992) ارائه شده است:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n} \quad (5)$$

که در آن S فاصله‌داری دسته درزه‌های متناظر است. همچنین درزه‌های تصادفی را نیز می‌توان با لحاظ کردن فاصله‌داریشان (S_f) در این رابطه در نظر گرفت. تجربه نشان داده است که می‌توان فاصله‌داری درزه‌های تصادفی را $S_f=5$ m فرض کرد. بنابراین اگر تعداد درزه‌های تصادفی در حجم مشخصی از توده سنگ برابر با N_f باشد، مقدار درزه‌های حجمی آن برابر خواهد بود با:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{N_f}{5} \quad (6)$$

مقدار J_v را می‌توان با برداشت‌های معمول فاصله‌داری دسته درزه‌ها و تعداد درزه‌ها محاسبه کرد. در مواردی که درزه‌داری غالباً نامنظم و تصادفی هستند، مقدار J_v را می‌توان با شمارش تعداد درزه‌های موجود در مساحت مشخصی از توده سنگ به دست آورد.

۴-۱. اعتبار سنجی روش و مقایسه با روش‌های پیشین

به منظور اعتبار سنجی روش و مقایسه نتایج با روش‌های پیشین اندازه‌گیری حجم بلوک در توده سنگ، از دو مثال عملی در این بخش استفاده شده است. مثال اول مربوط به یک بلوک سنگی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ متر است که توسط سه دسته درزه متعامد قطع شده است. مثال دوم نیز مربوط به یک بلوک سنگی با ابعاد مشابه است که توسط سه دسته درزه غیر متعامد به بلوک‌هایی تقسیم شده است. خصوصیات دسته درزه‌ها از قبیل فاصله‌داری، شیب و جهت شیب، زاویه بین صفحات درزه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. با جاگذاری مقادیر ارائه شده در جدول ۱ در رابطه ۲، مقدار اندازه بلوک

برابر با ۶۲۶۶۴۴ مترمکعب برآورد شد. در ادامه برای اینکه مدل حجمی مذکور قابل استفاده در نرم‌افزارهای CAD یا برنامه‌های تحلیل عددی باشد، مش‌بندی شده و به صورت مدل هندسی با پسوند .dxf ذخیره می‌شود. مدل حجمی ایجاد شده از توده‌سنگ مورد بررسی در این تحقیق در شکل ۶ نشان داده شده است.

۴. برآورد حجم بلوک‌های ناشی از درزه‌های پایا

بلوک‌هایی که توسط درزه‌ها در توده‌سنگ ایجاد می‌شوند در گذشته با روش‌های مختلفی خصیصه‌دهی شده‌اند. زمانی که درزه‌داری نسبتاً منظم باشد، می‌توان با کمک سیستم ارائه شده توسط Dearman, (1991) اقدام به خصیصه‌دهی الگوی درزه‌داری و شکل بلوک‌ها کرد. اگرچه در اغلب موارد الگوی درزه‌داری منظم در توده‌سنگ وجود ندارد ولی این قبیل روش‌های خیلی تقریبی، گاهاً کارایی خوبی در عمل دارند. به همین دلیل ابتدا مروری بر این گونه روش‌ها ارائه می‌شود. زمانیکه سه دسته درزه در توده سنگ وجود داشته باشد، حجم بلوک‌های حاصله از آنها برابرند با:

$$V_b = S_1 \times S_2 \times S_3 \times (\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3) \quad (2)$$

که در آن S_1 ، S_2 و S_3 فاصله‌داری دسته‌داری متناظر بوده و γ_1 ، γ_2 و γ_3 نیز زوایای بین بردارنرمال‌های صفحات دسته‌داری درزه‌ها هستند.

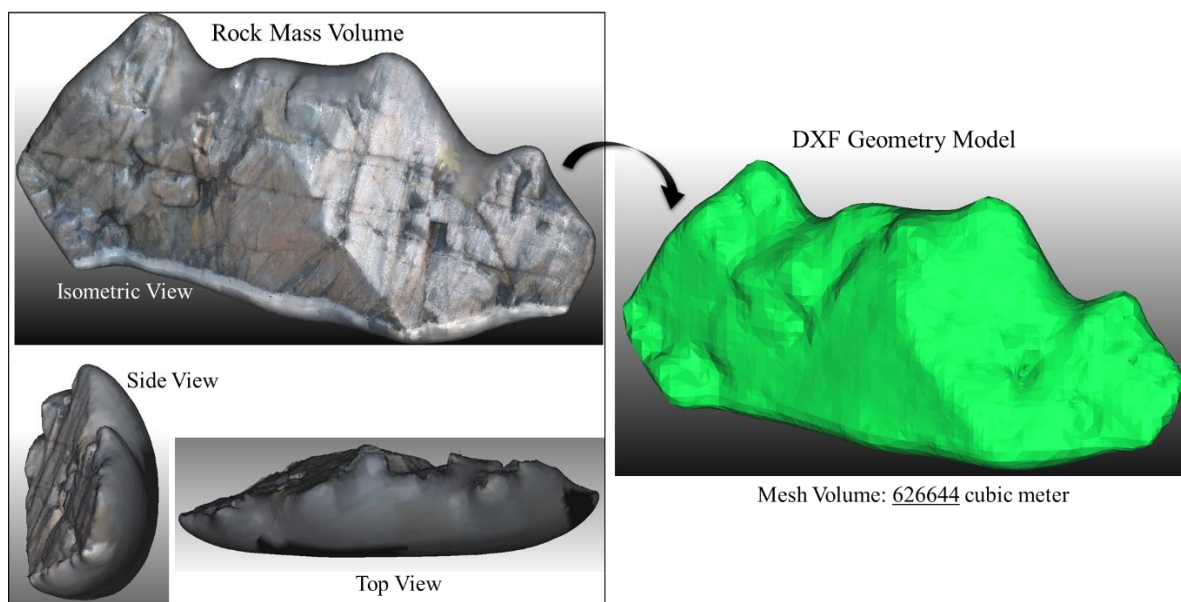
یک روش دیگر در تخمین حجم بلوک حاصله از تقاطع سه دسته درزه که با یکدیگر زوایای γ_1 ، γ_2 و γ_3 دارند به صورت رابطه ۳ است:

$$V_b = \beta \times J_v^{-3} \frac{1}{\sin \gamma_1 \times \sin \gamma_2 \times \sin \gamma_3} \quad (3)$$

که در آن β فاکتور شکل بلوک بوده و برابر است با:

$$\beta = \frac{(\alpha_2 + \alpha_2 \times \alpha_3 + \alpha_3)^3}{(\alpha_2 \times \alpha_3)^2} \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \frac{S_2}{S_1} \quad \alpha_3 = \frac{S_3}{S_1}$$



شکل ۶. مدل هندسی بیانگر حجم فرضی از توده سنگ مورد مطالعه.

جدول ۱. ویژگی‌های دسته درزه‌های موجود در مثال‌های فرضی ۱ و ۲.

Block Voume (m ³)	Factors	Spacing (m)	Dip Direction (degree)	Dip (degree)	Joint Set	
Eq.2 V _b =15.625	$\gamma_{1-2} = 90$	2.5	000	00	J1	Example.1
	$\gamma_{1-3} = 90$	2.5	000	90	J2	
	$\gamma_{2-3} = 90$					
Eq.3 V _b =15.625	$J_v=1.2$					
	$\alpha_2=1, \alpha_3=1$	2.5	090	90	J3	
Eq.2 V _b =12.396	$\gamma_{1-2} = 45$	2.5	000	00	J1	Example.2
	$\gamma_{1-3} = 26.56$	4.5	000	45	J2	
	$\gamma_{2-3} = 50.76$					
Eq.3 V _b =206.737	$J_v=0.84$					
	$\alpha_2=1.8, \alpha_3=1.8$	4.5	090	30	J3	
	$\beta=30.48$					

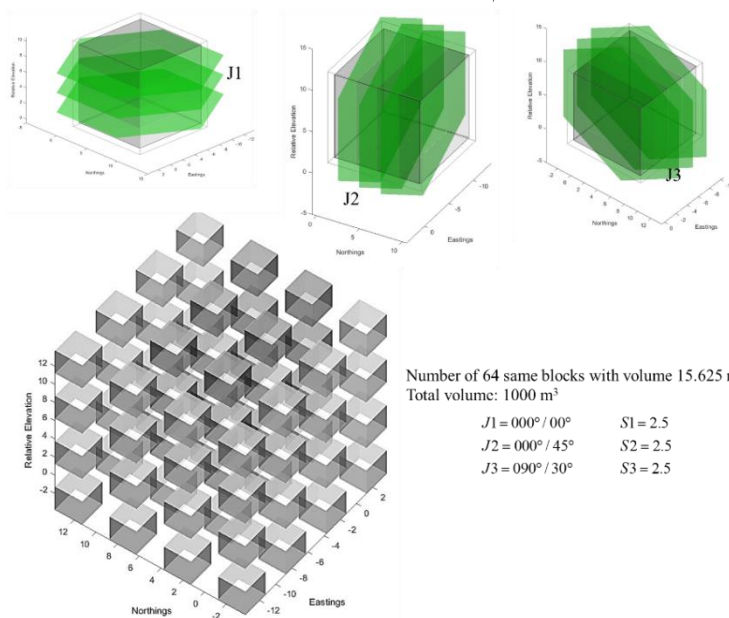
شبیبه سازی هندسی در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در مثال اول، توده سنگ به ۶۴ بلوک با ابعاد یکسان و حجم ۱۵/۶۲۴ مترمکعب تقسیم می‌شود. حجم محاسبه شده توسط این شبیه سازی دقیقاً با حجم بدست آمده از روابط ۲ و ۳ مطابقت دارد (جدول ۱). اما در بررسی نتایج شبیه سازی مثال دوم مشاهده شد که توده سنگ در اثر تقاطع درزه‌ها به ۴۴ بلوک با اندازه‌های مختلف تقسیم شده است؛ به طوری که کوچکترین بلوک دارای حجم ۰/۰۳ مترمکعب و بزرگترین آنها نیز ۱۱۱/۹۲ مترمکعب حجم دارد و در کل حجم میانگین بلوک‌های ایجا شده مقدار ۲۲/۷۳ مترمکعب برآورد شده است. مشاهده می‌شود که حجم بلوک

برای مثال ۱ برابر با $V_b = 15/625$ مترمکعب و برای مثال ۲ برابر با $V_b = 12/396$ مترمکعب محاسبه می‌شود. همچنین با جاگذاری مقادیر ارائه شده در جدول ۱ در رابطه ۳، مقدار اندازه بلوک برای مثال ۱ برابر با $V_b = 15/625$ مترمکعب و برای مثال ۲ برابر با $V_b = 206/737$ مترمکعب تخمین زده می‌شود.

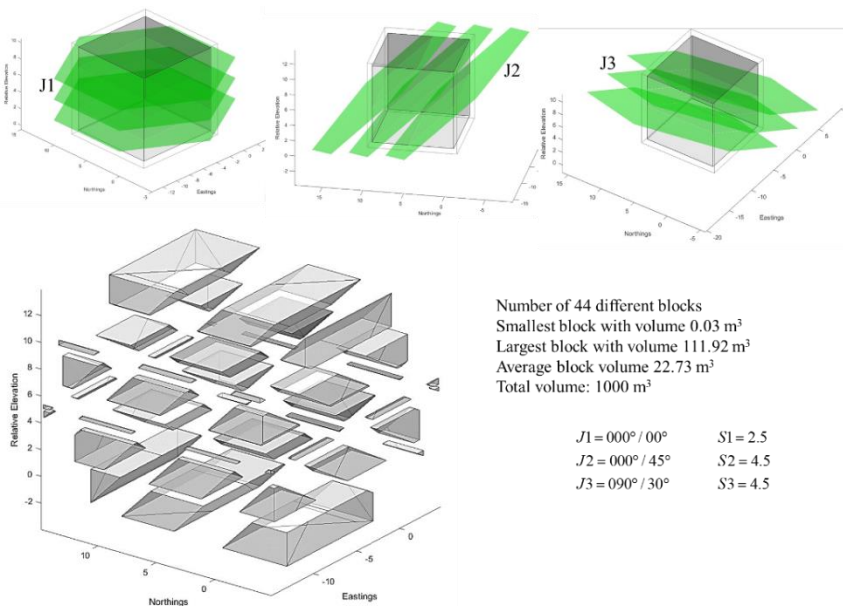
در ادامه با کمک نرم افزار تحلیل پایداری معادن روباز (Open Pit Siro Model) گروه تحقیقاتی CSIRO، هندسه مدل‌های فرضی ارائه شده در مثال ۱ و ۲ شبیه سازی شده و به کمک محاسبات هندسی دقیق، اعتبار روش‌های فوق‌الذکر در برآورد حجم بلوک‌های توده سنگ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج

توده‌سنگ درزه‌دار چندان قابل اعتماد نیستند. از طرفی دیگر روابط مزبور عموماً برای حالت خاص وجود سه دسته درزه با فاصله‌داری یکسان و وجود یک یا دو درزه تصادفی ارائه شده است؛ حال آنکه در بسیاری از توده‌سنگ‌ها بیش از سه دسته درزه با زوایای مختلف، در راستاهای مختلف و با فاصله‌داری نامنظم وجود داشته و در چنین مواردی استفاده از روابط ارائه شده به شدت دارای محدودیت هستند.

به دست آمده از روابط ۲ و ۳ کاملاً با مقادیر واقعی متفاوت هستند. توجه شود، فاکتور شکل بلوک ($\beta=30.48$) به دست آمده از این روابط که بیانگر بلوک‌های دارای ابعاد متناسب هست با واقعیت هندسی مدل انطباق مناسبی داشته و همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود اغلب بلوک‌های ایجاد شده در تمامی ابعاد تقریباً متناسب هستند. اما آنچه که مسلم است این است که روابط مذکور در برآورد حجم بلوک



شکل ۷. هندسه مربوط به مثال اول توده‌سنگ با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ متر که توسط سه دسته درزه متعامد قطع شده است.



شکل ۸. هندسه مربوط به مثال دوم توده‌سنگ با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ متر که توسط سه دسته درزه غیر متعامد با زوایای بردار نرمال $\gamma_{1-2}=45^\circ$ ، $\gamma_{1-2}=26.56^\circ$ و $\gamma_{1-2}=50.76^\circ$ قطع شده است.

کوچکترین بلوک نیز ۰/۴۷ سانتی متر مکعب حجم دارد. چنانچه بلوک‌ها برحسب اندازه‌های مشخصی دسته‌بندی شده و درصد فراوانی تجمعی بلوک‌های کوچکتر از هر دسته نسبت به حجم کل محاسبه شود، نموداری مشابه نمودار دانه-بندی خاک‌ها به دست خواهد آمد که به منحنی توزیع ابعاد بلوک (IBSD) موسوم است (شکل ۱۰). علاوه بر بیشترین و کمترین اندازه بلوک‌ها، خصیصه‌دهی کردن بلوک‌ها با احجام مشخصه اهمیت زیادی دارد. در خصیصه‌دهی کردن اندازه بلوک‌ها با تحلیل‌های آماری، استفاده از چارک اول ($V_{b25\%}$)، چارک دوم یا میانه ($V_{b50\%}$) و چارک سوم ($V_{b75\%}$) می‌تواند بسیار مفید باشد. به عنوان مثال در خصوص این توده سنگ اینطور می‌توان قضاوت کرد که ۵۰٪ بلوک‌های موجود، دارای حجم کمتر از ۶۰ متر مکعب هستند همچنین می‌توان دریافت فراوانی بلوک‌های بزرگ، بیشتر از بلوک‌های کوچک است.

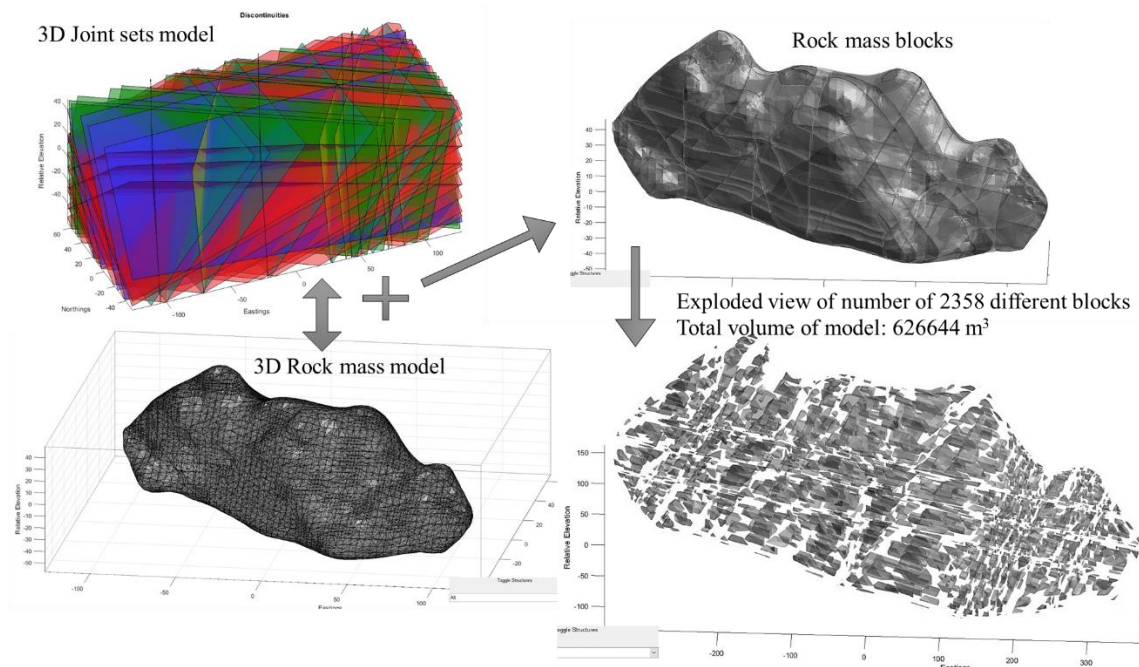
۵. بحث و نتیجه‌گیری

آگاهی از شکل و توزیع حجم بلوک‌ها در مسائل تحلیل پایداری و همچنین استخراج سنگ‌های ساختمانی بسیار با اهمیت است. ناپیوستگی‌ها در توده سنگ موجب ایجاد بلوک-ها می‌شوند و شکل و ابعاد بلوک‌ها توسط تعداد دسته ناپیوستگی‌ها، فاصله‌داری، جهت‌داری و امتداد یا راستای سینه‌کار کنترل می‌شود. اما یکی از کارهای دشوار در زمینه تعیین شکل و اندازه بلوک‌های برجا، برداشت اطلاعات ناپیوستگی‌ها است که برای این منظور روش‌های متعددی از قبیل برداشت از رخنمون ناپیوستگی‌ها در سطح، برداشت از مغزه‌های حاصله از گمانه‌های اکتشافی و برداشت از طریق مطالعات ژئوفیزیکی ارائه شده است. اخیراً با پیشرفت فناوری تصویر برداری دقیق با پرنده‌های هدایت پذیر از راه دور (پهپاد) و پردازش خودکار تصاویر استریوسکوپیک رقومی (فتوگرامتری) و همچنین اسکنرهای لیزری، عملیات درزه-نگاری و برداشت هندسه توده‌سنگ، فارغ از محدودیت‌های روش‌های سنتی، به مراتب آسان‌تر و دقیق‌تر شده و حجم عظیمی از اطلاعات با این روش‌ها قابل حصول است.

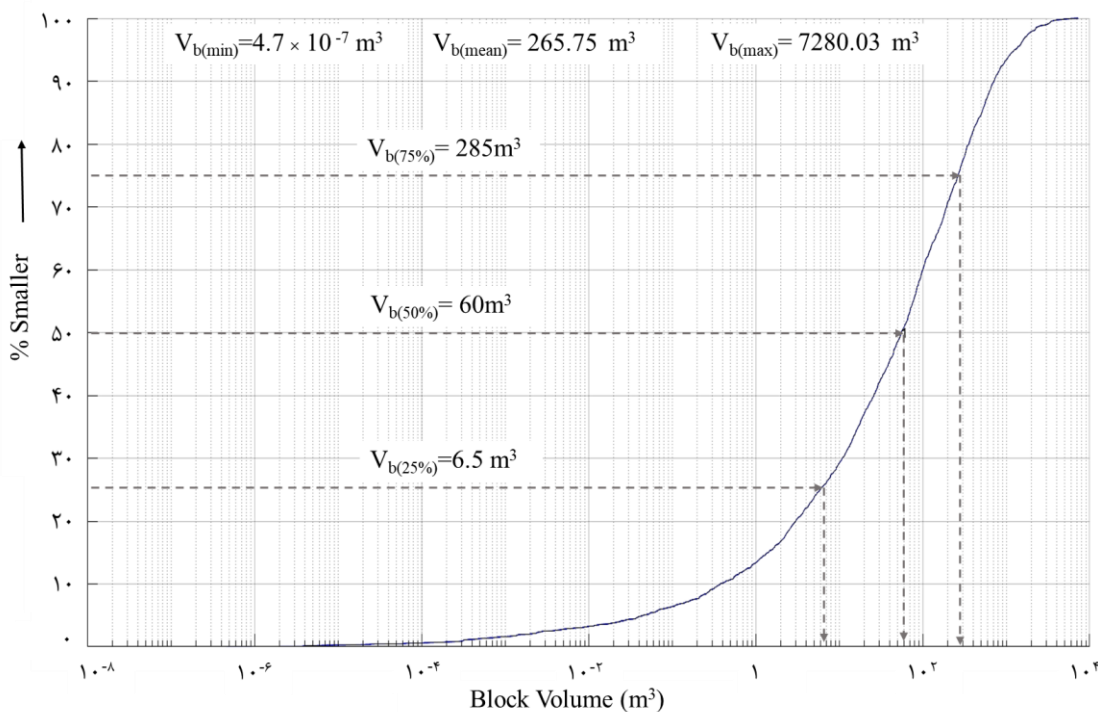
۴-۲. شبیه‌سازی سه‌بعدی حجم بلوک‌های برجای توده سنگ با توجه به محدودیت‌های روش‌های پیشین در برآورد اندازه بلوک‌های تشکیل دهنده توده سنگ به نظر می‌رسد استفاده از برنامه‌های شبیه‌سازی هندسی کامپیوتری در این خصوص بسیار مفید باشد. اگرچه امروزه کامپیوترها بسیار سریع و دقیق می‌توانند در اجرای این قبیل محاسبات مفید واقع شوند اما مشکل اصلی، فراهم آوردن اطلاعات ورودی درست و منطبق بر واقعیت است. زیرا با اینکه قدرت تحلیل‌های کامپیوتری نسبت به گذشته به شدت پیشرفت کرده است اما متأسفانه روش‌های جمع‌آوری اطلاعات و اندازه‌گیری پارامترها، چه در مقیاس آزمایشگاهی و چه در مقیاس صحرایی، تفاوت چندانی با گذشته نداشته و متأسفانه هنوز در خصوص تعریف و بیان برخی مفاهیم اساسی، در بین محققین اتفاق نظر دقیقی وجود ندارد. بنابراین به نظر می‌رسد چنانچه بتوان هر آنچه که در طبیعت وجود دارد را عیناً در مدل‌های هندسی انعکاس داد، احتمالاً در بهبود کیفیت نتایج حاصله از تجزیه تحلیل‌های کامپیوتری موثر باشد. البته این امر نیازمند برداشت و تحلیل حجم عظیمی از اطلاعات است که البته با روش‌های سنتی درزه‌نگاری و تحلیلی امکان‌پذیر نیست.

در اینجا تلاش شده است تا با تلفیق داده‌های هندسی به دست آمده، مدل واقعی‌تری از توزیع حجم و اشکال بلوک-های تشکیل دهنده توده سنگ ارائه شود. برای این منظور مدل‌های هندسی به دست آمده از رخنمون توده سنگ (شکل ۶) و همچنین هندسه تمامی صفحات ناپیوستگی موجود در توده سنگ (شکل ۴)، مطابق با آنچه که در توده سنگ قابل رویت بوده و برداشت شده است به صورت فایل‌های هندسی DXF در نرم‌افزار OPS بارگذاری شده و از نظر توزیع ابعاد بلوک‌های ایجاد شده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی مذکور به طور خلاصه در شکل ۹ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در این توده سنگ، بلوک‌های موجود دارای ابعاد و اشکال مختلفی هستند. به طوری که بزرگترین بلوک دارای حجم ۷۲۸۰ متر مکعب و



شکل ۹. مراحل تلفیق مدل‌های هندسی توده‌سنگ و دسته‌درزه‌ها و شبیه‌سازی هندسی بلوک‌های ایجاد شده در توده‌سنگ.



شکل ۱۰. منحنی توزیع ابعاد بلوک‌های برجای (IBSD) در توده‌سنگ مورد مطالعه.

درزه‌ها، فاکتور درزه‌داری حجمی و یا استفاده از چگالی وزنی درزه‌داری، حجم بلوک‌های برجای را تخمین زده و در خصوص شکل کلی آنها قضاوت می‌کردند. تلاش‌هایی که در

اغلب روش‌های پیشین تخمین حجم بلوک‌های برجای توده‌سنگ، مبتنی بر نتایج حاصله از درزه‌نگاری‌های خطی یا دوبعدی بوده و عموماً با استفاده از فاصله‌داری متوسط دسته

گذشته توسط برخی محققین در راستای تخمین حجم بلوک-های برجای توده سنگ انجام شده است بسیار ارزشمند بوده و البته دارای برخی محدودیت‌هایی بودند. به عنوان مثال: عدم اطلاع از میزان گسترش ناپیوستگی‌ها در داخل توده سنگ و عدم توانایی در برداشت صحیح تداوم، یکی از ضعف‌های مهم و اصلی تمامی مطالعات پیشین است. بعلاوه استفاده از مقدار فاصله‌داری متوسط ناپیوستگی‌های موجود در یک سیستم درزه و عدم وجود اتفاق نظر بین محققین در تشریح مفهوم فاصله‌داری نیز از دیگر مواردی است که در بررسی-های پیشین دیده می‌شود. همچنین محدودیت در وارد کردن اطلاعات بیش از سه دسته درزه و ضعف در محاسبه زوایای بین صفحات ناپیوستگی از دیگر معایب روش‌های موجود در محاسبات ابعاد بلوک‌های برجا در توده سنگ است. در مجموع این محدودیت‌ها منجر به آن می‌شود که درزه‌داری و بلوکی بودن توده سنگ متفاوت با واقعیت محاسبه می‌شود. این مقاله با بهره‌گیری از داده‌های ابر نقاط متراکم به دست آمده از روش فتوگرامتری و با تلفیق قابلیت‌های ابزارهای نرم‌افزاری موجود، یک فرآیند کاربردی برای برآورد احجام بلوک‌های سنگی موجود در توده سنگ به صورت برجا ارائه داده است؛ به طوری که یک مدل قطعی با انطباق مناسب بر واقعیت شبیه‌سازی می‌کند. در این تحقیق، فاصله عمودی بین

صفحات ناپیوستگی به عنوان فاصله‌داری در نظر گرفته شده و صفحات ناپیوستگی‌ها کاملاً منطبق با همان موقعیتی که در واقعیت وجود داشته و برداشت شده است، در مدل هندسی به صورت سه‌بعدی وارد شده است. در نهایت با ادغام مدل‌های هندسی ناپیوستگی‌ها در مدل حجمی توده سنگ، بلوک‌های برجای تشکیل شده مورد بررسی قرار گرفتند. اگرچه در تخمین دقیق اندازه و شکل بلوک‌های توده سنگ، آگاهی از میزان واقعی تداوم یا پایایی ناپیوستگی بسیار مهم است، اما به دلیل محدودیت‌های موجود در امکان برداشت شکل، اندازه یا تداوم ناپیوستگی‌ها در دل توده سنگ، در این تحقیق نیز همانند مطالعات پیشین، تمامی ناپیوستگی‌ها کاملاً صفحه‌ای و پایا فرض شده است. بنابراین ناتوانی روش ارائه شده در این تحقیق در شناسایی بلوک‌های دارای وجوه مقعر که خود ناشی از فرض پایایی کامل صفحات ناپیوستگی است، مشهود است. بعلاوه از دیگر محدودیت‌های تحقیق پیش‌رو، که البته از مهمترین ضعف‌های تمامی روش‌های نیمه خودکار مبتنی بر ابر نقاط متراکم مختصاتی در شناسایی عوارض ساختاری توده سنگ نیز است، ناتوانی در برداشت و خصیصه‌دهی چین خوردگی‌ها است. از اینرو توسعه مطالعات در زمینه شناسایی الگوریتم‌های خودکار تشخیص و خصیصه‌دهی چین-خوردگی‌ها در آینده بسیار ارزشمند خواهد بود.

منابع

- امینی، ا. خوشرو، س، ح. ۱۳۹۶. تخمین حجم بلوک‌های برجای سنگ با استفاده از فاصله‌داری درزه‌ها در معادن تراورتن آذرشهر. نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن.
- ملایی امامزاده، ا. بهال‌الدینی، م. سعیدی، غ. محمدی، م. ۱۳۹۸، تعیین حجم بلوک و شاخص مقاومت زمین‌شناسی GSI با استفاده از روش فتوگرامتری: مطالعه موردی معدن گل گهر سیرجان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن.
- Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons.
- Bonilla-Sierra, V., Donzé, F. V., Scholtès, L., & Elmoultie, M. K., 2012. The use of photogrammetry and 3D Discrete Element Models to better assess Rock Slope Stability.
- Buyer, A., Schubert, W., 2017. Calculation the spacing of discontinuities from 3D point clouds. *Procedia engineering*, 191, 270-278.
- Chesley, J. T., Leier, A. L., White, S., & Torres, R., 2017. Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA. *Sedimentary Geology*, 354, 1-8.
- Dearman W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth - Heinemann Ltd., Oxford.
- Dewez, T., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., & Rohmer, J., 2016. Facets: A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds.
- Elmoultie, M. K., Poropat, G. V., 2012. A method to estimate in situ block size distribution. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(3), 401-407.
- Gaich, A., Poetsch, M., & Schubert, W., 2006. Acquisition and assessment of geometric rock mass features by true 3D images. In *Golden Rocks, The 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association.
- Gigli, G., Casagli, N., 2011. Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(2), 187-198.
- Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M.H., Locat, J., Turmel, D., 2007. New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D imaging cloud points: Coltop-3D software. In: Francis, T. (Ed.), *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*. Proceedings of the 1st Canada-U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, May 27-31, pp. 61-68.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini, A., 2012. Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Nat. Hazards* 61, 5-28.
- Guo, J., Liu, Y., Wu, L., Liu, S., Yang, T., Zhu, W., & Zhang, Z. (2019). A geometry-and texture-based automatic discontinuity trace extraction method for rock mass point cloud. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 124, 104132.
- Kemeny, J., Post, R., 2003. Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Computers & Geosciences*, 29(1), 65-77.
- Lato, M.J., Voge, M., 2012. Automated mapping of rock discontinuities in 3D LiDAR and photogrammetry models. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 54, 150-158.
- Monsalve, J. J., 2019. Integrating Laser Scanning with Discrete Element Modeling for Improving Safety in Underground Stone Mines (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- Mosch, S., Nikolayew, D., Ewiak, O., & Siegesmund, S., 2011. Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environmental Earth Sciences*, 63(7-8), 1911-1924.
- Palmstrom, A., Sharma, V. I., & Saxena, K., 2001. In-situ characterization of rocks. Chapter 2: Measurement and characterization of rock mass jointing. *balkema publ*, 1-40.
- Powers, P. S., Chiarle, M., & Savage, W. Z., 1996. A digital photogrammetric method for measuring horizontal surficial movements on the Slumgullion earthflow, Hinsdale county, Colorado. *Computers & Geosciences*, 22(6), 651-663.
- Priest, S., Hudson, J., 1976. Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Elsevier, pp. 135-148.

- Riquelme, A. J., Abellán, A., & Tomás, R., 2015. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds. *Engineering Geology*, 195, 185-195.
- Riquelme, A., Cano, M., Tomás, R., & Abellán, A., 2017. Identification of rock slope discontinuity sets from laser scanner and photogrammetric point clouds: A comparative analysis. *Procedia engineering*, 191, 838-845.
- Riquelme, A., Tomás, R., Cano, M., Pastor, J. L., & Abellán, A., 2018. Automatic mapping of discontinuity persistence on rock masses using 3D point clouds. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(10), 3005-3028.
- Riquelme, A.J., Abellán, A., Tomás, R., Jaboyedoff, M., 2014. A new approach for semiautomatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Comput. Geosci.* 68, 38–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.03.014> (URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300414000740>)
- Sen, Z., Eissa, E. A., 1992. Rock quality charts for log-normally distributed block sizes. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 29, No. 1, pp. 1-12). Pergamon.
- Slob, S., van Knapen, B., Hack, R., Turner, K., Kemeny, J., 2005. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning. *Transp. Res. Rec.* 1913, 187–194.
- Sousa, L. M. O. (2010). Evaluation of joints in granitic outcrops for dimension stone exploitation. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43(1), 85-94.
- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009a. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Eng. Geol.* 106, 163–182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.004> (URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795209000556>).
- Sturzenegger, M., Stead, D., 2009b. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 267–287.
- Sturzenegger, M., Stead, D., Elmo, D., 2011. Terrestrial remote sensing-based estimation of mean trace length, trace intensity and block size/shape. *Eng. Geol.* 119, 96–111.
- Tannant, D. D. (2015). Review of photogrammetry-based techniques for characterization and hazard assessment of rock faces. *International Journal of Georesources and Environment-IJGE (formerly Int'l J of Geohazards and Environment)*, 1(2), 76-87.
- Thiele, S. T., Grose, L., Samsu, A., Micklethwaite, S., Vollgger, S. A., & Cruden, A. R., 2017. Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data. *Solid Earth*, 8(6), 1241.
- Yarahmadi, R., Bagherpour, R., Kakaie, R., Mirzaie, N. H., & Yari, M., 2014. Development of 2D computer program to determine geometry of rock mass blocks. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(2), 191-194.