

تعیین جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها با استفاده از تصاویر پهپادی (مطالعه موردی پله در تراز ۲۴۵۰ دیواره غربی معدن مس سرچشمه)

محسن علمی^۱؛ مسلم شاهی مریدی^۱؛ مهدی محمدی^{۲،۳*}؛ حسن محمدرضایی^۲؛ عباس بنی‌اسدی شهربابکی^۱

- ۱- امور معدن مجتمع مس سرچشمه، رفسنجان، ایران.
- ۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان، ایران.
- ۳- امور تحقیق و توسعه، مجتمع مس سرچشمه، رفسنجان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

* نویسنده مسئول: mehdi.mohammadi@vru.ac.ir

چکیده

بررسی پایداری دیواره‌های معادن در محدوده نهایی، یکی از مهمترین مباحث در علم مکانیک سنگ است. در این راستا، تعیین جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از روش‌های نوین برای برداشت ناپیوستگی‌ها، روش فتوگرامتری است. در این روش برای تصویربرداری از دوربین استفاده می‌شود. اما در معادن بزرگ مقیاس، با توجه به ارتفاع دیواره‌ها و وسعت معدن، تصویربرداری با دوربین بسیار زمان‌بر و بعضاً امکان‌پذیر نیست. هدف از این تحقیق بهبود کارایی روش فتوگرامتری با استفاده از تصاویر پهپادی در ارزیابی ناپیوستگی‌ها است. برای این منظور مطالعه‌ای در معدن مس سرچشمه، دیواره غربی، پله ۲۴۵۰ انجام شده است. ابتدا، منطقه مورد مطالعه با استفاده از پهپاد تصویربرداری شده است. در گام بعد به منظور پردازش تصاویر از نرم افزار Agisoft Metashape استفاده شده و تصویر سه‌بعدی از ناحیه مورد نظر جهت مطالعات بعدی ساخته شده است. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Sirovision، جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌های موجود در تصاویر تعیین و با استفاده از نرم‌افزار Dips وضعیت ناپیوستگی‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ارزیابی نتایج، برداشت ناپیوستگی به روش برداشت پنجره‌ای نیز انجام شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد دقت نتایج با استفاده از تصاویر پهپادی نسبت به روش برداشت پنجره‌ای افزایش قابل توجهی داشته است. همچنین روش مورد نظر علاوه بر کارایی بالاتر، زمان برداشت ناپیوستگی‌ها را کاهش داده و از سطح اطمینان بالاتری برخوردار است.

معدن مس سرچشمه، جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها، روش فتوگرامتری، برداشت پنجره‌ای، تصویربرداری پهپادی.

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

ریسک می‌شود. از طرفی زاویه شیب بهینه می‌تواند در کاهش باطله‌برداری و در نتیجه کاهش هزینه‌ها اثرگذار باشد. به طوری که در معادن روباز بزرگ مقیاس تغییر ۲ تا ۳ درجه‌ای در زاویه شیب می‌تواند ارزش پروژه را تغییر دهد [2].

تحلیل پایداری دیواره‌های سنگی در معادن روباز یکی از مباحث اساسی در معدنکاری سطحی می‌باشد [1]. زیرا پایداری دیواره‌های سنگی باعث افزایش ایمنی و کاهش

همکاران^۱ در سال ۲۰۰۶ در دو سایت واقع در آلپ، برای برداشت ناپیوستگی‌ها از روش‌های سنتی و روش‌های فتوگرامتری پهبادی استفاده کردند و نتایج قابل قبولی با استفاده از روش فتوگرامتری بدست آوردند [13]. تانوم و کاتنستیت^۲ با برداشت یک رخنمون سنگی با استفاده از روش فتوگرامتری زمینی یا برد کوتاه به تعیین تعداد دسته درزه‌ها، جهت‌یافتگی، طول اثر و همچنین زبری ناپیوستگی‌ها پرداختند. نتایج نشان داد فتوگرامتری، زمانیکه برای توصیف توده‌سنگ بکار برده می‌شود، نتایج قابل اعتماد ارائه می‌دهد [14]. هانبرگ^۳ در سال ۲۰۰۸ مطالعه‌ای بر روی استفاده از فتوگرامتری دیجیتالی زمینی کوتاه‌برد برای مدل‌سازی سه‌بعدی شیب‌های سنگی و نقشه‌برداری ناپیوستگی‌ها انجام داد. هانبرگ نشان داد که مدل‌های سطحی سه‌بعدی 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، اشاره کرد [15]. استارزنجر و استد^۴ در سال ۲۰۰۹ مطالعه‌ای بر روی فتوگرامتری دیجیتالی زمینی کوتاه‌برد و لیزر اسکن زمینی برای توصیف ناپیوستگی‌ها در سنگ‌ها انجام دادند، این محققین نشان دادند که تکنیک‌های زمینی سنجش از دور می‌توانند به طور فزاینده‌ای به عنوان مکمل روش‌های سنتی برداشت خطی و برداشت پنجره‌ای مورد استفاده قرار گرفته و اطلاعات جامع‌تری در مورد ناپیوستگی‌های سنگی ارائه دهند [16]. فیرپو و همکاران^۵ در سال ۲۰۱۱ مطالعه‌ای بر روی استفاده از فتوگرامتری دیجیتالی زمینی در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی انجام دادند و ترکیب روش فتوگرامتری و روش‌های عددی المان مجزا را به‌عنوان روشی توانمند در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی پیشنهاد نمودند [17]. بونیلا و همکاران^۶ در سال ۲۰۱۵ با مطالعه بر روی یک گسیختگی سنگی رخ داده، استفاده از روش فتوگرامتری را به‌عنوان مکمل روش‌های المان مجزای سه بعدی، برای ارزیابی دقیق‌تر پایداری شیب‌های سنگی پیشنهاد نمودند [18]. ملایی و همکاران در سال ۲۰۱۹

یکی از مراحل تحلیل پایداری، تعیین مطالعه دقیق ناپیوستگی‌ها و اطلاع از وضعیت قرارگیری آنها در ناحیه مورد مطالعه است. هرچند در ابتدا، در دهه ۱۹۶۰ خواص سنگ بکر مورد توجه محققان قرار گرفت. اما در دهه ۱۹۸۰ با تحقیقاتی که توسط هوک و براون انجام شد، مشخص شد که داده‌های ساختاری یکی دیگر از جنبه‌های حیاتی در درک واکنش سنگ به حفاری‌ها و استخراج است [2]. از این رو مطالعه‌ی توده‌سنگ از اهمیت خاصی برخوردار است. توده‌سنگ، ترکیبی ناهمگن از انواع مختلف سنگ، مرز سازند و درزه‌ها با جهت‌گیری‌های مختلف است [3,4]. همچنین ویژگی‌های درزه‌ها را می‌توان به صورت هندسی (شیب، جهت شیب) و غیرهندسی (سختی و پیرشدگی و...) در نظر گرفت [5]. بنابراین برای طراحی مؤثر یک شیروانی سنگی، هر دو مؤلفه ساختار و خواص مقاومتی سنگ و تعامل بین آنها اهمیت دارد. در واحدهای سنگی مقاوم‌تر احتمال بیشتری وجود دارد که ساختارها عامل کنترل‌کننده باشند، در حالی که در ساختار ضعیف‌تر، مقاومت سنگ بکر ممکن است حیاتی‌تر باشد [6]. برای تعیین جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها از روش‌های سنتی شامل: روش برداشت خطی *scan line* و برداشت پنجره‌ای (*window mapping*) استفاده می‌شود. در این خصوص مطالعات مختلفی انجام شده است و معایب و محدودیت‌های این روش‌ها تعیین و بررسی شده‌اند [7-12]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این روش‌ها با معایب همراه هستند. برخی از معایب این روش در معادن روباز بزرگ مقیاس عبارتند از: زمان‌بر بودن برداشت و ثبت داده‌ها، قرارگیری کارشناس در سطح رخنمون سنگ به منظور اندازه‌گیری و برداشت داده‌ها و افزایش ریسک برای سلامتی کارشناس، عدم برداشت درزه‌هایی که موازی با خط برداشت قرار دارند و همچنین احتمال عدم برداشت ریزدرزه‌ها در مقایسه با درزه‌های بزرگتر.

یکی از روش‌های مناسب برای برداشت ناپیوستگی‌ها استفاده از روش فتوگرامتری است. در دو دهه گذشته، پژوهشگران مختلفی سعی کرده‌اند با استفاده از روش فتوگرامتری خصوصیات ناپیوستگی‌ها را برداشت نمایند. ویات و

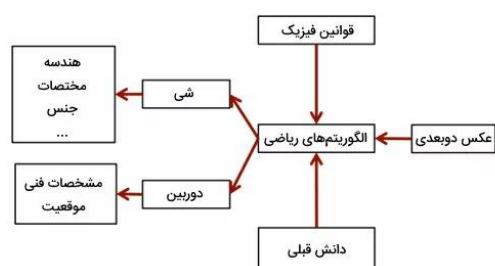
5- Firpo
6 - Bonilla

1-Voyat et al.
2- Tonon& Kottenstette
3- Haneberg
4- Sturzenegger& Stead

- برداشت ناپیوستگی‌ها با استفاده از تصاویر تهیه شده از پهپاد
- تعیین جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها
- و به‌طور کلی توسعه روشی برای بهبود برداشت ناپیوستگی‌ها در ارتفاعات مختلف معادن بزرگ مقیاس با دقت بالاتر مورد نظر است.

۲- برداشت ناپیوستگی‌ها به روش فتوگرامتری

فتوگرامتری، فرآیند اندازه‌گیری یک منطقه یا ناحیه با استفاده از عکس است. فتوگرامتری، مختصات نقاط موجود در فضای مورد نظر را بر اساس پارامترهای دوربین، مختصات عکس اندازه‌گیری شده و نقاط کنترل در زمین توصیف می‌کند [20]. به‌طور کلی فتوگرامتری به دو روش صورت می‌گیرد: فتوگرامتری زمینی یا برد کوتاه، در صورتی که فاصله بین شی مورد نظر تا دوربین تصویربرداری، کمتر از ۳۰۰ متر باشد، از آن با عنوان فتوگرامتری برد کوتاه یاد می‌شود. در این روش معمولاً از دوربین به همراه سه‌پایه استفاده می‌شود. فتوگرامتری هوایی: یکی از روش‌های تهیه مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی از روی عکس‌های هوایی است. فتوگرامتری هوایی در ساخت مدل‌های سه‌بعدی از سطح زمین در پروژه‌های عمرانی، زمین‌شناسی و نقشه‌برداری کاربرد دارد. این روش، معمولاً با تصویربرداری یک ناحیه از دو یا چند زاویه متفاوت اجرا می‌شود. از تجهیزات مورد استفاده برای اجرای فتوگرامتری هوایی می‌توان به هواپیما، هلیکوپتر و پهپاد اشاره کرد [21-26]. فرآیند فتوگرامتری در شکل ۱ نمایش داده شده است.



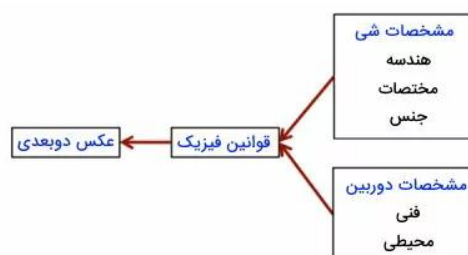
ب- فرآیند تعیین مشخصات هندسی از روی تصویر

با استفاده از تصاویر به‌دست آمده از روش فتوگرامتری زمینی، حجم بلوک و شاخص مقاومت زمین‌شناسی را برای معدن سنگ‌آهن گل‌گهر سیرجان تخمین زدند [19].

مروری بر مطالعات ذکر شده حاکی از گسترش روز افزون روش فتوگرامتری در توصیف خصوصیات توده‌سنگ دارد. هدف از این تحقیق بهبود و توسعه روشی برای برداشت ناپیوستگی‌ها در معادن روباز بزرگ مقیاس با استفاده از تصاویر پهپادی با دقت بالاتر نسبت به روش‌های ذکر شده است. یکی از چالش‌های موجود در برداشت ناپیوستگی‌ها، به روش‌های برداشت پنجره‌ای و فتوگرامتری زمینی در معادن بزرگ مقیاس مانند معدن مس سرچشمه که وسعت زیادی دارد، زمان‌بر و هزینه‌بر بودن است و بعضاً نیز با توجه به ارتفاع دیواره‌های معدن، برداشت امکان‌پذیر نیست. از اینرو بهبود کارایی روش فتوگرامتری با استفاده از تصاویر پهپادی در ارزیابی ناپیوستگی‌ها از اهداف این تحقیق است. برای این منظور مطالعه‌ای در معدن مس سرچشمه، دیواره غربی، پله ۲۴۵۰ انجام شده است. ابتدا، منطقه مورد مطالعه با استفاده از پهپاد، تصویربرداری شد، سپس برای پردازش تصاویر از نرم افزار *Agisoft Metashape* استفاده گردید و تصویر سه‌بعدی از ناحیه مورد نظر جهت مطالعات بعدی ساخته شد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار *Sirovision*، جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌های موجود در تصاویر تعیین و با استفاده از نرم‌افزار *Dips* وضعیت ناپیوستگی‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است.

بنابراین در این تحقیق اهداف به شرح زیر قابل تصور است:

- تصویربرداری از پله کاری ۲۴۵۰ دیواره غربی از معدن مس سرچشمه به روش فتوگرامتری پهپادی



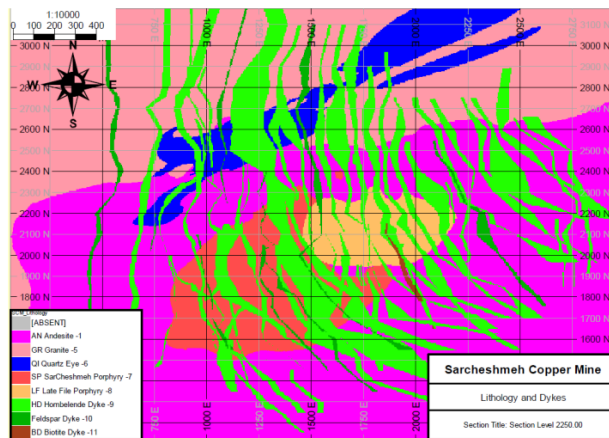
الف- فرآیند تهیه تصویر دوبعدی و یا سه بعدی

شکل ۱- مراحل تهیه عکس تا تعیین مشخصات هندسی ناپیوستگی

مشخصات هندسی ناپیوستگی بایستی طی شود.

بر اساس شکل ۱ دو فرآیند از آغاز تصویربرداری تا تعیین

پورفیری در سطح جهان است. این معدن در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غرب کرمان و ۵۰ کیلومتری جنوب غرب رفسنجان و در ارتفاع ۲۶۰۰ متری از سطح دریا واقع شده است. راه‌های دسترسی به معدن از طریق جاده‌های آسفالتی کرمان رفسنجان سرچشمه و سیرجان پاریز سرچشمه است. زمین‌شناسی منطقه بیشتر شامل مجموعه سنگ‌های آتشفشانی رسوبی دوره ائوسن و الیگومیوسن است. بر اساس مطالعات انجام شده هشت واحد سنگی در معدن مس سرچشمه وجود دارد که شامل آندزیت، گرانودیوریت، کوارتز دیوریت (کوارتزچشمی)، گرانودیوریت پرفیری (سرچشمه پورفیری)، کوارتز مونزونیت پرفیری (لیت فاین) و دایک‌هایی از جنس هورنبلندگرانودیوریت، بیوتیت گرانودیوریت، فلدسپات گرانودیوریت می‌باشند (شکل ۲) [27].



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی معدن مس سرچشمه

نحوه‌ی استخراج ماده معدنی در این معدن به روش کلاسیک روباز است. ارتفاع پله‌ها در این معدن ۱۲/۵ متر با شیب ۶۵- ۷۰ درجه و شیب دیواره نهایی با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی و آلتراسیون در قسمت‌های مختلف معدن از ۳۵ تا ۵۰ درجه متفاوت است.

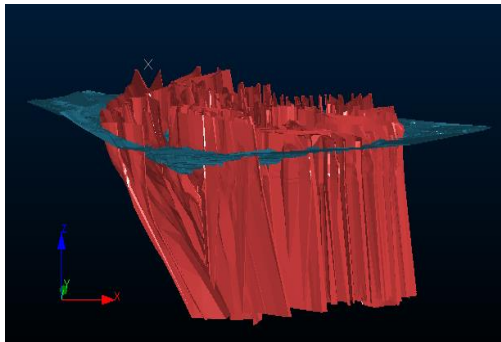
مراحل اجرای فتوگرامتری شامل: ۱- تصویربرداری، برای شروع فرآیند فتوگرامتری، مجموعه‌ای از تصاویر از منطقه مورد نظر تهیه می‌شود. این تصاویر باید با یکدیگر همپوشانی داشته باشند. ۲- بارگذاری تصویر، منظور بارگذاری تصاویر ثبت شده از شی یا محدوده مورد مطالعه در یک نرم‌افزار تخصصی است. ۳- پردازش تصاویر و ساخت مدل سه بعدی؛ در این مرحله تناظریابی تصویر و استخراج عوارض در فتوگرامتری صورت می‌گیرد. ۴- تصویرسنجی یا پردازش ثانویه، در مرحله آخر مدل‌های سه‌بعدی حاصل از پردازش تصاویر، معمولاً عیب و نقص‌های مختلفی دارند، بنابراین، کارشناس بایستی این عیب و نقص‌ها را تشخیص و رفع نماید. ۳- زمین‌شناسی و زمین‌ساخت منطقه سرچشمه معدن مس سرچشمه یکی از مهمترین معادن مس مولیبدن

این معدن بر روی کمر بند آتشفشانی ارومیه دختر قرار دارد، این کمر بند در اثر برخورد صفحات ایران و عربستان حدود ۲۵ میلیون سال قبل در امتداد رشته کوه زاگرس ایجاد شده است. منطقه کانی‌سازی شده سرچشمه محدوده بیضی شکل به ابعاد حدود ۱۵۰۰×۳۵۰ متر است.

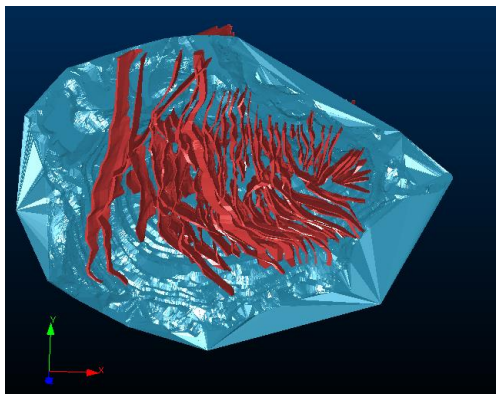
معدن مس سرچشمه در یک پهنه‌ی برشی راستگرد بین گسل‌های رفسنجان و شهرباک واقع شده است. چهار روند غالب گسلی شامل گسل‌های شرقی غربی، شمال شرقی- جنوب غرب، شمالی جنوبی و شمال غرب - جنوب شرق، تحت تاثیر همین پهنه برشی شکل گرفته‌اند. شکل ۳ روند گسل‌های ذکر شده را نشان می‌دهد. رنگ قرمز نشان داده شده در شکل بیانگر روند گسل‌ها می‌باشد [27].



الف- نحوه گسترش و امتداد نمونه‌ای از دایک‌ها در دیواره معدن



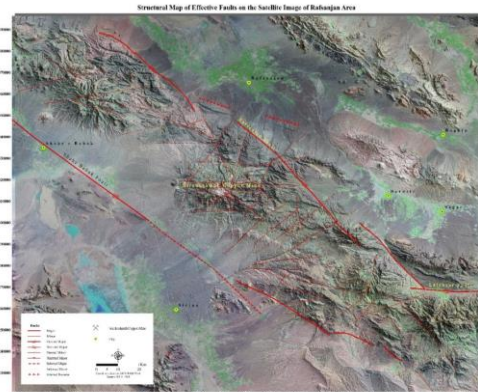
ب- دید از پهلو



ج- دید از بالا

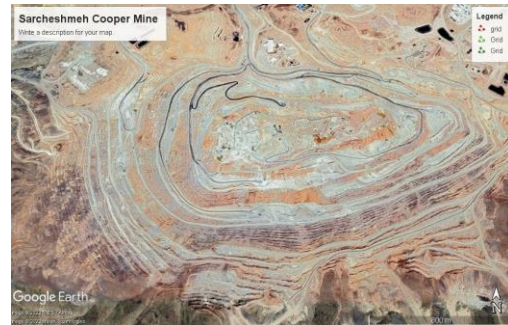
شکل ۵- دایک‌های شبیه‌سازی شده در معدن مس سرچشمه

وجود دایک‌ها و همچنین سایر ناپیوستگی‌ها سبب ناپایداری موضعی در دیواره‌ها و پله‌های معدن می‌شود. شکل ۶ نمونه‌ای



شکل ۳- نقشه ساختاری گسل‌ها بر روی تصویر ماهواره‌ای منطقه‌ی رفسنجان

شکل ۴ نقشه هوایی معدن مس سرچشمه را نمایش می‌دهد. بالاترین تراز در معدن ۲۹۰۰ و در حال حاضر معدن در تراز ۲۲۵۰ قرار دارد. به عبارت دیگر بلندترین دیواره معدن، دیواره غربی معدن در حال حاضر بیش از ۶۰۰ متر ارتفاع دارد و بتدریج ارتفاع سایر دیواره‌ها نیز در حال افزایش است.



شکل ۴- نقشه هوایی معدن مس سرچشمه و نحوه استخراج معدن

از طرفی دایک‌های موجود در منطقه، دیواره‌های معدن را قطع نموده است و با افزایش عمق معدن، دایک‌ها اثر بیشتری بر پایداری دیواره‌های معدن دارند. شکل ۵ نمونه‌ای از نحوه گسترش و روند دایک‌های موجود در دیواره معدن را نشان می‌دهد. بنابراین نحوه گسترش و امتداد دایک‌ها در عمق را می‌توان در معدن با کمپاس اندازه‌گیری کرد. همچنین شکل ۵ب و ۵ج مدل شبیه‌سازی شده دایک‌های موجود در معدن را نمایش می‌دهد. برای مدل‌سازی دایک‌ها از داده‌های بدست آمده از گمانه‌های اکتشافی و گمانه‌های ژئوتکنیکی استفاده می‌شود.

ج- نمونه‌ای از ناپیوستگی‌های موجود در سنگ

گرانودیوریت پرفیری

شکل ۶- نمونه‌ای از شکستگی‌های موضعی تحت تاثیر

ساختارهای صفحه‌ای

۴- تصویر برداری هوایی و پردازش تصاویر و

برداشت ناپیوستگی‌ها

در گام اول عملیات، طراحی شبکه فتوگرامتری و تنظیم پارامترهای دوربین انجام می‌شود. در طراحی شبکه فتوگرامتری، مواردی از قبیل تعیین ارتفاع پرواز، پوشش‌های طولی و عرضی بهینه، سرعت مناسب پهپاد، تعیین فاصله کانونی و غیره بررسی می‌گردد. همچنین در تنظیم پارامترهای دوربین مواردی از قبیل تعیین پارامترهای کالیبراسیون دوربین اهمیت دارد. پارامترهای کالیبراسیون دوربین شامل فاصله کانونی، انحراف لنز شعاعی، افست نقطه اصلی و فاکتور مقیاس می‌باشد که این پارامترها به نوع دوربین، نوع لنز و فاصله تصویربرداری بستگی دارد. کالیبراسیون به منظور جلوگیری از انحراف در تصاویر انجام می‌شود [28].

در گام دوم جهت اخذ تصاویر باکیفیت و تولید محصولات فتوگرامتری، قبل از انجام عملیات پرواز، مواردی از قبیل شناسایی منطقه مورد نظر، بررسی شرایط توپوگرافی، وضعیت نور، آب و هوا، جهت باد، محدودیت‌های مخابراتی و مقررات داخلی بررسی می‌شود. پس از انجام موارد فوق، طراحی پرواز با توجه به پارامترهایی همچون دقت تصاویر، پوشش تصاویر، ارتفاع پرواز، فاصله کانونی، محل نقاط کنترل و همچنین محل نشست و پرواز پهپاد انجام می‌گردد [29].

در مرحله سوم، چند نقطه کنترلی بر روی سینه‌کار مورد نظر در نظر گرفته می‌شود (حداقل ۳ نقطه کنترلی نیاز است). نقاط کنترلی به منظور داشتن مقیاس واقعی از تصاویر و همچنین مشخص بودن موقعیت سینه‌کار مورد مطالعه در معدن مورد نیاز است. پراکندگی نقاط کنترلی در سینه‌کار بایستی به گونه‌ای باشد که این نقاط تشکیل مثلث دهند [28]. بنابراین در این مطالعه ۶ نقطه کنترلی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۷ الف و ب موقعیت نقاط کنترلی را بر روی بخشی از پله نشان می‌دهد و شکل ۷ ج موقعیت شش نقطه را نمایش می‌دهد. مختصات این نقاط که بعنوان نقاط کنترلی در نرم‌افزارهای پردازش تصویر استفاده شده با GPS

از شکستگی‌ها در پله‌ها و دیواره‌های غربی معدن را نشان می‌دهد.

از اینرو با توجه به شرایط موجود بررسی پایداری دیواره‌ها نیاز است. بنابراین برداشت ناپیوستگی‌ها و ساختارهای مستعد لغزش امری اجتناب ناپذیر است. اما با توجه به وسعت معدن که حدود ۸۰۰ هکتار است و همچنین دیواره‌های مرتفع، نیاز است که تصویربرداری با پهپاد انجام شود تا در زمان و هزینه صرفه جویی شود.



الف- نمونه‌ای از شکستگی‌ها در دیواره غربی تراز



ب- نمونه از شکستگی‌ها در دیواره غربی تراز

(از زاویه دیگر)



استخراجی استفاده می‌شود).

جدول ۱- مشخصات دوربین به کار گرفته شده در

پهپادهای مورد نظر

مشخصات	فانتوم ۴ پرو
فاصله کانونی (mm)	۸/۸
کیفیت دوربین	۲۰
ابعاد عکس	۵۴۷۲*۳۶۴۸
ابعاد حسگر (mm)	۱۳/۲*۸/۸

دو فرکانسه قرائت می‌شوند. دقت GPS دوفرکانسه ۲ سانتی‌متر است.

در گام چهارم، تصویربرداری با پهپاد انجام می‌شود. به منظور تهیه تصاویر هوایی از پهپاد فانتوم ۴ پرو که توسط شرکت DJI تولید شده، استفاده می‌گردد (شکل ۸).



شکل ۸- تصویر پهپاد فانتوم ۴

برای تصویربرداری، رخنمونی از سنگ‌های آندزیتی در پله‌ی با ارتفاع ۲۴۵۰ از سطح دریا در دیواره غربی معدن مس سرچشمه و در مختصات UTM با مشخصات ۳۸۹۶۴۳ و عرض ۳۳۱۲۵۱۳ انتخاب شد. زمان تصویربرداری در اردیبهشت ماه ۱۴۰۲ و طی ساعات ۱۱ الی ۱۲ بوده است. قبل از عملیات تصویربرداری، عملیات لق‌گیری سینه‌کار به طور کامل صورت گرفت تا شکستگی‌های حاصل از انفجار تا حد ممکن پاکسازی شود. محدوده تصویربرداری به صورت مستطیل شکل در ابعادی حدود ۱۲/۵*۱۰۰ متر است و در ۳ مرحله پرواز، تصویربرداری انجام شد. در مرحله اول ارتفاع از



الف- نقاط کنترلی شماره ۲ و ۱



ب- نقاط کنترلی شماره ۵ و ۶

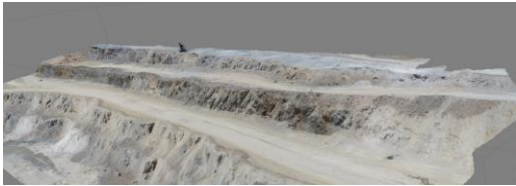


ج- موقعیت شش نقطه کنترلی بر رخنمون

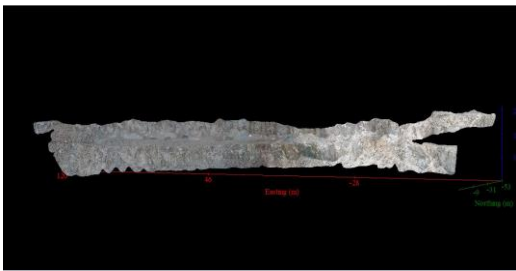
شکل ۷- نقاط کنترلی بر روی رخنمون

این پهپادها توسط کنترلر هدایت می‌شوند و دارای یک دوربین غیرمتریک با مشخصات جدول ۱ می‌باشد. (پهپاد مورد نظر متعلق به معدن مس سرچشمه است و برای تعیین احجام

الف- خطوط پروازی پهباد برای تهیه‌ی تصاویر



ب- تصویر پله‌ی ۲۴۵۰ دیواره غربی معدن مس سرچشمه



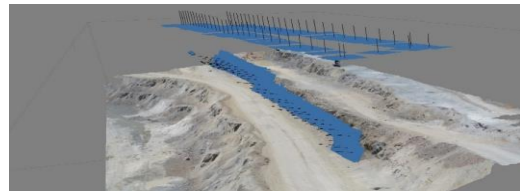
ج- تصویر سه بعدی پردازش شده با نرم افزار متاشیپ پله ۲۴۵۰ دیواره جنوبی.

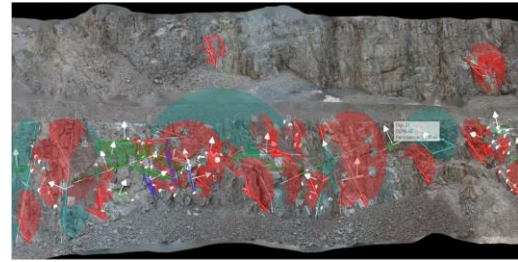
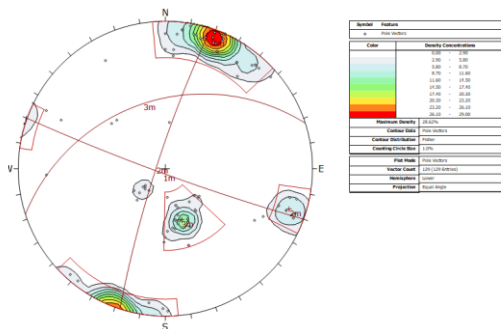
شکل ۹- تصاویر پهبادی و پردازش شده با نرم افزار متاشیپ

در ادامه، برای تعیین شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها از نرم افزار *SiroVision* استفاده می‌گردد. این نرم افزار قابلیت‌های متعددی در زمینه تعیین ساختارها مانند تعیین طول و فاصله داری ناپیوستگی‌ها دارد [30]. شکل ۱۰ صفحات ناپیوستگی را نشان می‌دهد (شکل ۱۰ دو پله با ارتفاع ۲۴۵۰ و ۲۴۶۲/۵ را نشان می‌دهد؛ با توجه به محدودیت‌های عملیاتی برای برداشت ناپیوستگی‌ها به روش پنجره‌ای در پله ۲۴۶۲/۵، بنابراین صفحات ناپیوستگی پله ۲۴۵۰ در نظر گرفته شده است). شیب و جهت شیب دامنه پله مورد نظر به ترتیب ۷۵ و ۸۸ درجه است. طبق شکل صفحات رنگی به گونه‌ای بر روی سطوح قابل تشخیص یا خط اثرهای موجود در تصویر سه بعدی ترسیم می‌شوند که این صفحات رنگی دقیقاً منطبق بر ناپیوستگی‌ها باشند. برای این منظور، چندین نقطه روی سطح ناپیوستگی رقومی شده و میانگین صفحه عبوری از این نقاط به عنوان نماینده آن ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، خصوصیات هندسی این صفحات رنگی، همان خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها خواهد بود [30].

سطح پله ۵۰ متر و در مرحله دوم ۲۵ متر و مرحله سوم ۱۲/۵ متر در نظر گرفته شد. در دو مرحله‌ی اول تصویربرداری از بالا و در مرحله‌ی دوم و سوم تصویربرداری از مقابل رخنمون انجام می‌شود. دقت تصویربرداری دستگاه حدود ۳ سانتیمتر در ارتفاع متوسط ۵۰ متر می‌باشد. بنابراین تصاویر از دقت بالایی برخوردار هستند. تصاویر به گونه‌ای برداشت شدند که تقریباً ۶۰ درصد هم‌پوشانی دارند. پرواز در مدت زمان ۴۰ دقیقه صورت گرفته است.

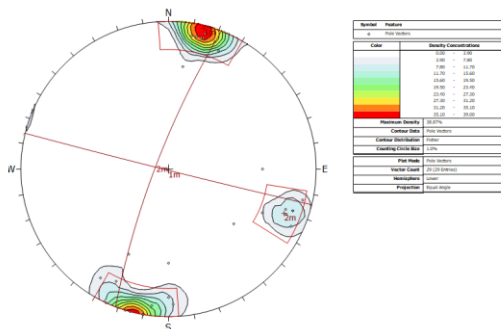
برای تهیه عکس‌های سه‌بعدی، از نرم‌افزار *Metashape Agisoft* استفاده می‌شود. این نرم افزار قابلیت‌های متعددی از قبیل پردازش تصاویر چند طیفی، بررسی دقیق سطوح تصویر، اندازه گیری ارتفاع سطوح موجود در عکس، خروجی ژئورفرنس، اندازه گیری فاصله‌ها، مناطق و حجم‌ها و غیره را دارد [29]. تصاویر و موقعیت‌های برداشت شده وارد نرم افزار *Agisoft Metashape* گردیده و با استفاده از روش درون‌یابی، موقعیت‌های مجهول محاسبه می‌شود. در نتیجه آن، ابری از نقاط از منطقه برداشت شده تشکیل می‌گردد. با استفاده از ابر نقاط و بکارگیری نرم افزار تصاویر سه بعدی از پله مورد مطالعه تهیه شد. این تصاویر از شبکه‌ای از مثلث‌های بهم پیوسته تشکیل شده است [29]. شکل ۹ تصاویر را با دقتی معادل دقت ۲/۷ سانتی متر و ابر نقطه رنگی با تراکم ۱۳۷۲ در یک متر مربع را نشان می‌دهد.





شکل ۱۰- تعیین جهت یافتگی ناپیوستگی با نرم افزار سایروویژن

الف. دسته درزه های شناسایی شده در روش فتوگرامتری



ب. دسته درزه های شناسایی شده با روش برداشت دستی (برداشت پنجره‌ای)
شکل ۱۱- مقایسه نتایج حاصل از برداشت ناپیوستگی به روش فتوگرامتری و سنتی

۵- بحث

با استفاده از روش فتوگرامتری، شیب و جهت شیب و مختصات مرکزی صفحات ناپیوستگی‌ها تعیین شد. تعداد ۱۲۹ عدد درزه، شامل سه دسته درزه به همراه تعدادی درزه اتفاقی برداشت شد. نمایش استریوگرافیک ناپیوستگی‌های برداشت شده و دسته درزه‌های موجود در این دیواره در شکل ۱۱ الف نشان داده شده است. در جدول ۲ تعداد درزه‌ها و میانگین جهت یافتگی هر دسته درزه نمایش داده شده است. برای ارزیابی و بررسی بیشتر روش توسعه داده شده، از همین رخنمون برداشت درزه‌ها به روش برداشت پنجره‌ای نیز انجام و شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها به روش مهندسی و با استفاده از کمپاس برانتون برداشت می‌شود. اساس برداشت به روش برداشت پنجره‌ای، اندازه‌گیری پارامترهای مختلف همه ناپیوستگی‌های قطع شده به وسیله پنجره برداشت است. در پنجره نمونه‌برداری نیز پارامترهای همه ناپیوستگی‌هایی که درون پنجره قرار دارند برداشت می‌شود [31].

با توجه به موقعیت دیواره‌ها از نظر ایمنی و عدم دسترسی به درزه‌ها، تنها تعداد ۲۹ درزه برداشت شد، در صورتی که با استفاده از تصاویر پهپادی تعداد ۱۲۹ درزه برداشت شده است. نتایج بدست آمده از روش برداشت پنجره‌ای در شکل ۱۱ ب و جدول ۲ نمایش داده شده است. جدول ۲ نشان می‌دهد که با استفاده از داده‌های به دست آمده از روش دستی دو دسته درزه و با روش تصویربرداری سه دسته درزه تعیین شده است. جدول ۲ نشان می‌دهد که دسته درزه‌های اصلی (دسته درزه ۱ و ۲) در هر دو روش قابل تشخیص است. اما در مقدار شیب و جهت شیب اختلاف ۵ تا ۱۰ درجه‌ای دیده می‌شود که می‌تواند ناشی از تعداد بیشتر درزه‌های برداشت شده در روش فتوگرامتری باشد.

دسته درزه ۳ در روش برداشت پنجره‌ای دیده نمی‌شود زیرا راستای این دسته درزه به گونه‌ای است که روش برداشت پنجره‌ای نمی‌تواند آنرا برداشت نماید. این نکته بعنوان یک محدودیت از روش برداشت پنجره‌ای است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش فتوگرامتری نسبت به روش دستی از دقت و صحت بالاتری برخوردار است و در معادن عمیق کاربرد فراوانی در تحلیل پایداری شیب‌ها می‌تواند داشته باشد.

جدول ۲- دسته درزه‌های شناسایی شده در محدوده مورد مطالعه

دسته درزه	روش برداشت پنجره‌ای	روش فتوگرامتری
---	Dip/Dip direction (Deg.)	Dip/Dip direction (Deg.)
۱	۸۰/۲۹۰	۸۵/۲۹۰
۲	۸۵/۱۹۴	۸۵/۲۰۰
۳	--/--	۴۰/۳۴۰

۶- نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های موجود در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی در معادن عمیق مانند معدن مس سرچشمه، برداشت ناپیوستگی‌ها می‌باشد. برداشت ناپیوستگی‌ها معمولاً از طریق روش‌های متداول برداشت خطی و پنجره‌ای 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 محسوس‌تر بوده، به طوری که عملاً امکان برداشت میسر نبوده و یا تعداد محدودی ناپیوستگی برداشت می‌شود. در این مطالعه با توجه به وسعت معدن، از روش فتوگرامتری پهپادی، برداشت ناپیوستگی‌ها در پله ۲۴۵۰ دیواره غربی معدن مس سرچشمه بهره گرفته شده است. 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 پایین‌تر می‌باشد. پس از تهیه تصاویر هوایی، در گام بعد به منظور پردازش تصاویر از نرم افزار *Agisoft Metashape* استفاده شده و تصویر سه بعدی از ناحیه مورد نظر جهت مطالعات بعدی ساخته شد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار *Sirovision*، جهت یافتگی ناپیوستگی‌های موجود در تصاویر تعیین و با استفاده از نرم‌افزار *Dips* وضعیت ناپیوستگی‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ارزیابی نتایج، برداشت ناپیوستگی به روش پنجره‌ای نیز انجام شد. نتایج نشان می‌دهد: در روش فتوگرامتری جهت تعیین صفحه

نماینده یک ناپیوستگی چندین نقطه روی سطح ناپیوستگی راقومی شده و میانگین صفحه عبوری از این نقاط به عنوان نماینده آن ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین جهت‌یافتگی این ناپیوستگی حاصل برازش چندین نقطه به ناپیوستگی است که دارای دقت بالاتری است. اما در روش برداشت پنجره‌ای از آنجایی که مقدار کوچکی از سطح ناپیوستگی برای برداشت جهت‌یافتگی استفاده می‌شود بنابراین می‌تواند دارای دقت پایین‌تری باشد.

با توجه به اینکه در روش فتوگرامتری ناپیوستگی از کل سطح پله برداشت می‌شود؛ بنابراین نمونه آماری کاملتری را نسبت به روش‌های مرسوم ارائه می‌نماید در نتیجه با توجه به افزایش تعداد برداشت ناپیوستگی‌ها در روش فتوگرامتری دقت بالاتر است.

از آنجا که کلیه ناپیوستگی‌ها در روش فتوگرامتری قابل برداشت است بنابراین مختصات دسته درزه بحرانی در این روش نسبت به روش برداشت پنجره‌ای دقیق‌تر است.

در این مطالعه در روش فتوگرامتری ۳ دسته درزه و در روش برداشت پنجره‌ای ۲ دسته درزه تعیین شد. دسته درزه ۳ در روش برداشت پنجره‌ای دیده نمی‌شود زیرا راستای این دسته درزه به گونه‌ای است که روش برداشت پنجره‌ای نمی‌تواند آنرا برداشت نماید. این نکته بعنوان یک محدودیت از روش برداشت پنجره‌ای است.

در مجموع با توجه به وسعت معادن بزرگ، برداشت ناپیوستگی‌ها با روش فتوگرامتری پهپادی، هزینه و زمان را کاهش می‌دهد و دقت در نتایج بالاتر است.

منبع‌ها

- [1] Ren, Sh., Tao, Zh., He, M., Pang, Sh., Li, M., & Xu, H. (2020). Stability analysis of open-pit gold mine slopes and optimization of mining scheme in Inner Mongolia China. *Journal of Mountain Science* (17) pp. 2997–3011.
- [2] Hudson, J.A., & Harrison, J. (1997). *Engineering Rock Mechanics*. Pergamon Press, London. ISBN 978-0-08-043864-1.
- [3] Grenon, M., Hadjigeorgiou, J., & Liu, Q. (1998). Quantifying in-situ rock block size and resulting fragment size distributions due to blasting. *International Journal for Blasting and Fragmentation Fragblast* pp. 205–218.
- [4] Wyllie, D.C., & Mah, C.W. (2005). *Rock Slope Engineering*, 4th ed. Taylor & Francis Group. ISBN 978-0415280013.

- [5] Slob, S., Turner, A. k., Bruining, J., & Hack, H. (2010). Automated rock mass characterization using 3-D terrestrial laser scanning.
- [6] Read, J., Stacey, P. (Eds.) (2011). Guidelines for Open Pit Slope Design. *CSIRO Publishing*. ISBN 978-0415874410.
- [7] Zhang, L., & Einstein, H.H. (1998). Estimating the Mean Trace Length of Rock Discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (31) pp. 217–235.
- [8] Dershowitz, W.S., & Einstein, H.H. (1988). Characterizing rock joint geometry with joint system models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (21) pp. 21–51.
- [9] Baffoe, P. E., Boah, F. N., & Afam, M. (2018). Mapping 3D Geological Structures and Predicting the Kinematics of the Pitwalls Using Photogrammetric Techniques: A Case Study. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. pp. 64-76.
- [10] Tuckey, Z. (2012). An Integrated Field Mapping-Numerical Modelling Approach to Characterizing Discontinuity Persistence and Intact Rock Bridges in Large Open Pit Slopes. *Simon Fraser University*.
- [11] Fillion, M., Hadjigeorgiou, J., Grenon, M., & Caumartin, R. (2019). Practical Considerations in Establishing the Statistical Reliability of Geomechanical Data. *Geotechnical and Geological Engineering* (38) pp. 169- 190.
- [12] Medinac, F., & esmaeil., K. (2020). Integrating unmanned aerial vehicle phtogrammetry in design compliance audits ans structural modeling of pit walls. : *Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth*, pp. 1439-1454.
- [13] Voyat, I., Roncella, R., Forlani, G., & Ferrero, A. M. (2006). Advanced techniques for geo structural surveys in modelling fractured rock masses: application to two Alpine sites. *American Rock Mechanics Association, The 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden, Colorado*, pp.97-108.
- [14] Tonon, F., Kottenstette, J. T. (2006). Summary Paper on the Morrison Field Exercise. *American Rock Mechanics Association, The 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden, Colorado*, pp.77-96.
- [15] Haneberg, W. C. (2008). Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (67) pp. 457-469.
- [16] Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*. (106) pp. 163-182.
- [17] 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) pp. 1045-1054.
- [18] 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) pp. 497-511.

[۱۹] ملایی امام زاده، امین، بهال‌الدینی، مجتبی، سعیدی، غلامرضا، محمدی، حمیدرضا. (۱۳۹۸). تعیین حجم بلوک و شاخص

مقاومت زمین شناسی GSI با استفاده از روش فتوگرامتری در معدن گل گهر سیرجان. نشریه مهندسی معدن ۱۴(۴۲): ۴۷-۵۸

[20] Wolf, P. R. & Dewitt, B. A. (2000). Elements of photogrammetry, with applications in GIS. *Third Edition. McGraw-Hill, Boston*. ISBN 9780071761123.

[۲۱] شگری، امیرحسین، صادقیان، سعید. (۱۴۰۰). پیاده سازی کاداستر سه بعدی بر مبنای روش فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد بدون استفاده از نقاط کنترل زمینی. فصلنامه علمی - پژوهشی اطالعات جغرافیایی. ۶۵-۷۸.

[۲۲] محمدی، حمیدرضا، منصور، حمید، جلالی فر، حسین، (۱۳۹۴). تعیین جهت‌داری ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش فتوگرامتری مطالعه موردی: معدن شماره ۱ گل‌گهر. علوم زمین. ۲۰۳-۲۱۰.

[23] Wang, S., Zhang, W., Zhao, X., Sun, Q., & Dong, X. (2024). Automatic identification and interpretation of discontinuities of rock slope from a 3D point cloud based on UAV nap-of-the-object photogrammetry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. (178) 105774.

[24] Kong, D., Saroglou, C., Wu, F., Sha, P., & Li, Bo. (2021). Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. (141) 104729.

[25] Hartwig, M.E., & Santos, G.G. (2024). Enhanced discontinuity mapping of rock slopes exhibiting distinct structural frameworks using digital photogrammetry and UAV imagery. *Environmental Earth Sciences*. (83) 624.

[26] Shahriari, H., Honarmand, M., Mirzaei, S., & Saffari, A. (2022). Application of Drone-Based Data for Directing Exploration Activities and Estimating Resources in Emperor Marble Quarry, Kerman Province, Iran. *Journal of Mining and Environment*. (13) PP. 253-267.

[۲۷] محمدی، مهدی، محمدرضایی، حسن، علمی، محسن، اسفندیاریور، اکبر، بنی‌اسدی شهربایگی، عباس، امین زاده، مجید، شاهی مریدی، مسلم. (۱۴۰۲). بررسی پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ کوارتز مونزونیت پرفیری (لیت فاین)، معدن مس سرچشمه. پنجمین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران.

[28] ADAM Technology, (2010). 3DM Analyst Mine Mapping Suite 2.3.4 User's Manual.

[۲۹] فخری، سید آریا، ذاکری، حمزه، ورشوساز، مسعود، سرشت، محمدسعادت. (۱۴۰۱). ارزیابی توانایی روش فتوگرامتری پهپاد در آشکارسازی ترک روسازی جاده‌ها. نشریه مهندسی عمران/میرکبیر. دوره ۵۴، شماره ۵، صفحات ۱۷۰۵ تا ۱۷۳۰.

[30] Coel, M., (2006). THE BENEFIT TO OPEN PIT ROCK SLOPE DESIGN OF GEOTECHNICAL DATABASES. *International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering At: Cape Town, South Africa*. PP.97-116.

[31] Priest, S. D., (1993). Discontinuity analysis for rock engineering. *Chapman and Hall*, London. 473.



Determining the Orientation of Discontinuities Using the Photogrammetric Method (A Case Study of the Bench at the 2450 Level of the West Wall of Sarcheshme Copper Mine)

Elmi M.¹; Shahi Moridi M.²; Mohammadi M.^{3*}; Mohammadrezaei H.⁴; Baniasadi Shahrababaki A.⁵
1,2,4,5 - M.Sc., Copper Sarcheshmeh Mining, Rafsanjan, Iran.
3- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

Received: 02. October. 2023 Accepted: 21. December. 2023
(*Corresponding author :mehdi.mohammadi@vru.ac.ir)

Keywords

Sarcheshme Copper Mine
Discontinuity Orientation
Photogrammetric Method
Scan Window Method
Drone Photography

Final English Extended Abstract

Investigating the stability of mine walls in the final range is one of the most important topics in rock mechanics. In this regard, determination of the orientation of rock mass discontinuities is inevitable. One of the new methods for scanning discontinuities is the photogrammetric that uses camera for imaging. But in large-scale mines, due to the height of the walls and the size of the mine, imaging by camera is very time-consuming and sometimes not possible. The main purpose of this research is to improve the efficiency of the

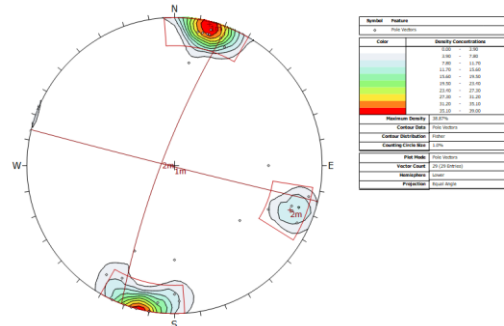
photogrammetric method using the images obtained from the drone in evaluating the discontinuities. Hence, a study is conducted on 2450 bench, Western wall, Sarcheshme copper mine. First, the considered area is captured using a drone. In the next step, Agisoft Metashape software is used to process the images and a 3D image of the desired area is made for further studies. Finally, using Sirovision software, the orientation of discontinuities in the images is determined and by Dips software, the status of discontinuities is studied. In order to evaluate the results, discontinuity scanning is done using the Window method. Investigations show that the accuracy of the obtained results applying the photogrammetric method has increased significantly in comparison with the scan window method. In addition to higher efficiency, the proposed method reduces the time of scanning discontinuities and has a higher level of reliability.

Summary

The main objective of this research is to improve the efficiency of the photogrammetric method using the drone images in evaluating discontinuities. For this purpose, a study is conducted on 2450 step, Western wall, Sarcheshme copper mine. Investigations show that the accuracy of the results with the photogrammetric method increases significantly. In addition to higher efficiency, the proposed method reduces the time of scanning discontinuities and has a higher level of reliability.

Introduction

In open pit mines, the scan line method is a common method for measuring the direction of discontinuities. This method has low accuracy due to ignoring all discontinuities in one bench. Another approach for measuring discontinuities is window mapping. In this method, all the discontinuities that are placed in a specific window are measured. Disadvantages of this method are low safety, low accuracy and high costs. Photogrammetry is a new technique in measuring the characteristics of discontinuities. In this method, 3D images are prepared by using images and also by special software, and discontinuities are checked on the images. By using this method, a wide view of the mine walls can be checked with high accuracy in a short period of time and more secure. Therefore, the geometric characteristics of discontinuities such as orientation can also be measured with related software. This approach can be used with techniques such as Discrete Fracture Network (DFN) to overcome the difficulties in determining the geomechanical parameters of the rock mass, such as the Geological Strength Index (GSI). Usually, in this method, a camera is used for imaging. But in large-scale mines, due to the height of the walls, imaging with camera is very time-consuming



B. The joint set identified by the conventional method (scan window method)
 Figure 1- Comparison of the results of discontinuity surveyed by photogrammetric and conventional method

Table 1- The joint set identified in the study area

Photogrammetric method	Window method
Dip/Dip direction (Deg.)	Dip/Dip direction (Deg.)
85/290	80/290
85/200	85/194
40/340	--/---

[1]Baffoe, P. E., Boah, F. N., & Afam, M. (2018). Mapping 3D Geological Structures and Predicting the Kinematics of the Pitwalls Using Photogrammetric Techniques: A Case Study. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. pp. 64-76.

[2]Fillion, M., Hadjigeorgiou, J., Grenon, M., & Caumartin, R. (2019). Practical Considerations in Establishing the Statistical Reliability of Geomechanical Data. *Geotechnical and Geological Engineering* (38) pp. 169- 190.

[3]Medinac, F., & esmaeil., K. (2020). Integrating unmanned aerial vehicle phtogrammetry in design compliance audits ans structural modeling of pit walls. : *Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth*, pp. 1439-1454.

[4]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) pp. 497-511.

[5]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) pp. 1045-1054.

[6]Sturzenegger, M., & Stead, D. (2009). Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*. (106) pp. 163-182.