

# تعیین جهت‌داری ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش فتوگرامتری مطالعه موردی: معدن شماره ۱ گل‌گهر

حمیدرضا محمدی<sup>۱\*</sup>، حمید منصوری<sup>۲</sup> و حسین جلالی‌فر<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکترا، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان؛ واحد زمین‌شناسی و ژئوتکنیک، شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، سیرجان، ایران  
<sup>۲</sup>دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران  
<sup>۳</sup>دانشیار، گروه مهندسی نفت و گاز، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۳۱

## چکیده

هدف این مقاله بررسی کارایی روش فتوگرامتری در تعیین جهت‌داری ناپیوستگی‌ها است. استفاده از روش فتوگرامتری به عنوان روشی مکمل در تشخیص ناپیوستگی‌ها در روش‌های خط برداشت در حال افزایش است. در روش خط برداشت به دلیل عدم دسترسی، امکان برداشت ناپیوستگی‌های موجود در بخش بالای پله‌سنگی (که ممکن است دارای ویژگی‌های متفاوت از بخش پایینی پله باشند) میسر نیست. از طرف دیگر در این روش امکان برداشت ناپیوستگی‌هایی بیشتر است که زاویه‌ای نزدیک‌تر به قائم با خط برداشت داشته باشند و ناپیوستگی‌های تقریباً موازی با خط برداشت شانس کمتری برای برداشت شدن دارند. با استفاده از دو روش یادشده ناپیوستگی‌ها در یک پله سنگی در معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان برداشت شد. در روش خط برداشت ۴۲ ناپیوستگی و در روش فتوگرامتری ۲۵۸ ناپیوستگی برداشت شد. در روش خط برداشت ۲ دسته‌درزه و در روش فتوگرامتری ۳ دسته‌درزه تشخیص داده شد. دو دسته درزه J1 و J2 در هر دو روش با تفاوت کمی در جهت‌داری وجود دارند. اما دسته‌درزه J3 که یک دسته درزه بحرانی از منظر پایداری شیب است فقط در روش فتوگرامتری برداشت شد. همچنین نتایج نشان داد از آنجایی که در روش فتوگرامتری برای تعیین میانگین جهت‌داری یک صفحه ناپیوستگی از تعداد زیادی از نقاط آن صفحه استفاده می‌کند، دارای جهت‌داری دقیق‌تری است.

**کلیدواژه‌ها:** جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، روش خط برداشت، پایداری شیب، روش فتوگرامتری، معدن شماره ۱ گل‌گهر.

E-mail: Hamid\_azizabadi@yahoo.com

\*نویسنده مسئول: حمیدرضا محمدی

## ۱- پیش‌نویس

جهت‌داری ناپیوستگی‌ها است. برای این منظور در یک دیواره از جنس مگنتیت ابتدا ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش خط برداشت سنتی و استفاده از کلینورول برداشت شد. سپس با استفاده از روش فتوگرامتری نیز ناپیوستگی‌ها برداشت شدند. سپس دسته‌درزه‌های اصلی با استفاده از دو روش تعیین و با یکدیگر مقایسه شدند.

ناپیوستگی یک واژه کلی است که برای بسیاری از ویژگی‌ها مانند درزه‌ها، گسل‌ها، صفحات لایه‌بندی و شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ استفاده می‌شود. وجود ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ، مقاومت و همسانگردی آن را کاهش داده و نقش بسیار مهمی در ناپایداری شیب‌روانی به عهده دارد.

## ۲- زمین‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی محدوده معدن شماره ۱ گل‌گهر

این ناحیه معدنی در ۵۳ کیلومتری جنوب باختری سیرجان در محدوده طول‌های جغرافیایی ۵۵ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۲۴ دقیقه خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۷ دقیقه شمالی واقع شده است. دسترسی به معدن از طریق جاده اختصاصی معدن که از کیلومتر ۵۰ جاده سیرجان-نیریز-شیراز منشعب می‌شود، ممکن است.

محدوده معدن سنگ آهن گل‌گهر در بخش جنوب خاوری پهنه سندانج-سیرجان قرار دارد. در واقع گسل دهشیر-بافت به عنوان یک مرز ساختاری پهنه جنوب خاوری سندانج-سیرجان را از پهنه شمال باختری آن جدا می‌کند. پهنه سندانج-سیرجان به گونه یک نوار دگرگونی با روند شمال باختری-جنوب خاوری (از ارومیه و سندانج در شمال باختری تا سیرجان و اسفندقه در جنوب خاوری ایران) به موازات پهنه زاگرس بر روی حاشیه جنوب باختری ایران مرکزی شکل گرفته است. رژیم رسوب‌گذاری و ساختار پهنه سندانج-سیرجان مشابه ایران مرکزی است و تمام ناپیوستگی‌های اصلی مزوزویک و تشریری موجود در ایران مرکزی و شمال ایران، در این پهنه نیز شناخته شده‌اند که برخی از آنها در زاگرس وجود ندارند. تفاوت پهنه سندانج-سیرجان از ایران مرکزی در تشابه روندهای آن با روند ساختمانی زاگرس، نبود ولکانیسم تشریری و توسعه کمتر سازندهای تشریری خلاصه می‌شود (Stocklin, 1968).

جهت‌داری ناپیوستگی یکی از موارد مهم در بحث پایداری شیب‌روانی‌ها است که می‌توان آن را با روش‌های خط برداشت و یا روش‌های جدید مانند فتوگرامتری تعیین کرد. در روش خط برداشت به دلیل اینکه در پاشنه پله برداشت صورت می‌گیرد، داده‌های برداشت شده نمی‌توانند نماینده کل پله یا رخنمون باشند، تعداد ناپیوستگی‌های برداشت‌شده کم است و به دلیل ریزش سنگ از بخش‌های بالاتر می‌تواند خطراتی را برای فرد به دنبال داشته باشد. همچنین به دلیل موازی بودن خط برداشت با امتداد پله، ناپیوستگی‌هایی که از منظر ناپایداری دارای اهمیت می‌باشند برداشت نمی‌شوند. اما روش فتوگرامتری می‌تواند بسیاری از این معایب را رفع کند و حتی جانشین روش خط برداشت شود. چند پژوهشگر پتانسیل این روش را برای برداشت ناپیوستگی‌ها بیان کرده‌اند (Haneberg et al., 2006; Trinks et al., 2006; Tonon & Kottenstette, 2007). بعضی از مزایای این روش که آنها ذکر کرده‌اند عبارتست از:

- روش فتوگرامتری توانایی نمونه‌برداری از پنجره گسترده‌ای که به پاشنه رخنمون محدود نشده را دارا است.
- می‌توان رخنمون‌های بلند، پرشیب و غیر قابل دسترس را اندازه‌گیری کرد.
- در روش فتوگرامتری از آنجایی که اندازه‌گیری در محلی امن خارج از منطقه پرتاب سنگ انجام می‌گیرد، دارای ایمنی بسیار بالایی است.
- می‌توان اندازه‌گیری‌های دائم از وضعیت رخنمون‌های سنگی را در زمان‌های مشخص فراهم کرد.

هدف اصلی این پژوهش بررسی کارایی و مزیت روش فتوگرامتری در برداشت

در گستره اطراف معدن گسل‌های جوان در قالب گسل‌های معکوس و

فاکتور تصحیح باید برای آن دسته از ناپیوستگی‌هایی که نرمال آنها دارای زاویه حاده نسبت به نرمال خط برداشت یا پنجره برداشت می‌باشند، اعمال گردد (Priest, 1993; Terzaghi, 1965). این تصحیح هندسی (W) بر اساس معادله زیر صورت می‌گیرد.

$$w = \frac{1}{\cos \delta} \quad (2)$$

که در آن  $\delta$  زاویه حاده بین نرمال دسته ناپیوستگی‌ها و خط برداشت یا پنجره نمونه‌برداری است (شکل ۲). وقتی زاویه به ۹۰ درجه نزدیک می‌شود، کسینوس به صفر نزدیک شده و مقدار W به بی‌نهایت می‌رود که باعث بیش برآورد چگالی می‌شود (Priest, 1993).

#### ۴- اصول و کاربرد روش فتوگرامتری

فتوگرامتری تحلیلی واژه‌ای است که محاسبات ریاضی مختصات نقاط موجود در فضای شی را بر اساس پارامترهای دوربین، مختصات عکس اندازه‌گیری شده و نقاط کنترل در زمین توصیف می‌کند (Wolf & Dewitt, 2000). فتوگرامتری تحلیلی بر اساس نظریه اختلاف دید (برجسته‌بینی) است که جابه‌جایی ظاهری در موقعیت یک شی با توجه به موقعیت دوربین است. در شکل ۳ اختلاف منظر نقطه شی A تفاوت میان مؤلفه x از نقاط عکس a1 و a2 است. موقعیت سه‌بعدی نقطه شی A سپس به وسیله روابط بین موقعیت نسبی آن روی دو عکس و مرکز تصویر دوربین اندازه‌گیری می‌شود. به معنای دیگر، اگر جهت‌داری‌های خارجی دو دوربین با مراکز تصویر O1 و O2 معلوم باشند، مختصات (XA, YA, ZA) از نقطه شی A، با اندازه‌گیری مختصات عکس (x1, y1) و (x2, y2) از a1 و a2 متناظر آن می‌تواند محاسبه شود (Atkinson, 1996). این فرایند که تعیین موقعیت سه‌بعدی یک نقطه از شی در فضای سه‌بعدی است، تقاطع (intersection) نامیده می‌شود.

فرایند دیگری که جهت‌داری‌های خارجی یک دوربین را بر اساس تعدادی از نقاط شی از مختصات عکس محاسبه می‌کند برش (resection) نامیده می‌شود. شش عنصر جهت‌داری خارجی یک دوربین موقعیت‌های X, Y, Z از مرکز تصویر و زوایای  $\omega$ ,  $\phi$  و  $K$  هستند (شکل ۴). برش می‌تواند با استفاده از مختصات نسبی یا مطلق حداقل ۷ نقطه از شی روی عکس انجام گردد و شش عنصر جهت‌داری خارجی و مقیاس به‌دست آید (Adam Technology, 2007). سپس برآورد برش اولیه می‌تواند با استفاده از یک الگوریتم که تطابق خوشه‌ای (bundle adjustment) نامیده می‌شود تصحیح شود. این الگوریتم با استفاده از معیار حداقل مربعات برای تعیین بهترین برآورد از ۶ پارامتر جهت‌داری خارجی از هر دوربین پایه‌گذاری شده است (Chandler, 1999).

یک فرض بسیار مهم در هر دوی فرایندهای برش و تقاطع، قانون در یک خط مستقیم بودن است که بیان می‌کند که نقطه روی شی، مرکز تصویر و یک نقطه عکس روی صفحه کانونی دوربین در امتداد یک خط مستقیم واقع شده است (Wolf & Dewitt, 2000). به منظور تبعیت از این قانون باید هندسه داخلی دوربین در حین عکس‌برداری معلوم باشد. افزون بر آن اگر تصحیح مربوط به خطاها و دیگر پارامترها انجام نشود، قاعده در یک خط مستقیم بودن اجرا نمی‌شود. سه عنصر اصلی جهت‌داری داخلی، فاصله کانونی و مختصات  $x_0$  و  $y_0$  از نقطه مبدأ هستند. دیگر پارامترها شامل شعاع لنزها (K1, K2, K3, Kn) و انحراف مماسی (P1, P2) هستند. جهت‌داری داخلی در طول فرایند کالیبراسیون تعیین می‌شود (Adam Technology, 2007).

#### ۵- برداشت ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش فتوگرامتری

فتوگرامتری تحلیلی به عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری سه‌بعدی ناپیوستگی‌ها استفاده می‌شود. در ابتدا از فوتوتئودولیت (ترکیب دوربین عکس‌برداری زمینی با یک

امتدادلغز قابل مشاهده هستند. در محدوده معدن نیز افزون بر گسل‌های امتدادلغز و معکوس، گسل‌های نرمال و درزه‌های بزرگ کششی با بازشدگی قابل ملاحظه قابل مشاهده هستند. آنچه که در به‌وجود آمدن گسل‌های جوان در قالب گسل‌های معکوس و امتدادلغز و نرمال دخیل بوده است وجود یک گسل زیرسطحی امتدادلغز راست‌بر با راستای NW-SE است که در راستای خود خمش به سمت چپ پیدا کرده است. این وضعیت سبب به‌وجود آمدن پهنه لنزی شکل فشارشی در گستره شده است که مرزهای شمال‌خاوری و جنوب‌بختری آن به ترتیب گسل‌های راندگی با شیب به سمت جنوب‌باختر و شمال‌خاور هستند. پهنه یادشده در مقطع ساختاری عمود بر امتداد خود ساختار گل‌مانند (Flower Structure) دارد (شکل ۱) (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).

مطابق بررسی‌های به‌عمل آمده، معدن گل‌گهر در پهنه ساختاری عدسی شکلی قرار گرفته است که سنگ‌های تشکیل‌دهنده آن به صورت کمپلکس متامورفیک شامل سنگ‌های فیلیت، شیست، آمفیبولیت، گنیس، مارن‌ها و دیگر سنگ‌های دگرگونی همراه با گرانیت (Syntectonic) است که در پالتوزوییک بالایی و مزوزوییک پایینی دگرگون و دگرشکل شده‌اند. این پهنه در شمال‌خاور و جنوب‌باختر بر روی واحدهای جوان‌تر رانده شده است. واحدهای جوان‌تر در جنوب‌باختر پهنه نامبرده شامل سری‌های توپیدیتی ژوراسیک (واحد J) و در شمال‌خاور واحدهای فلیشی ترشیری (واحدهای Ef و O<sup>ca</sup>) هستند. آثار راندگی در آبرفت‌های جوان کواترنری (واحد Q<sup>nl</sup>) نیز دیده می‌شود که نشان از جوان بودن گسلش در منطقه دارد (قلمقاش، ۱۳۸۹).

#### ۳- برداشت ناپیوستگی‌ها به روش خط برداشت

روش‌های کنونی مورد استفاده برای نمونه‌برداری اصولی و صحیح پارامترهای ناپیوستگی‌ها، روش خط برداشت و پنجره برداشت است و باید روی رخنمون‌های سنگی تقریباً صفحه‌ای که وسعت آنها در مقایسه با اندازه و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بزرگ باشد اعمال شود. حداقل باید ۲۰۰ ناپیوستگی به منظور به‌دست آوردن یک نمونه جامع برداشت شود (Priest, 1993). اساس روش اندازه‌گیری به روش خط برداشت، اندازه‌گیری پارامترهای مختلف همه ناپیوستگی‌های قطع شده به وسیله خط برداشت است. به روش مشابه در پنجره نمونه‌برداری نیز پارامترهای همه ناپیوستگی‌هایی که درون پنجره هستند با آن را قطع می‌کنند برداشت می‌شوند.

جهت‌داری یک ناپیوستگی معمولاً با شیب و جهت شیب پرشیب‌ترین خط موجود در صفحه ناپیوستگی اندازه‌گیری می‌شود. جهت شیب در جهت عقربه‌های ساعت نسبت به شمال واقعی اندازه‌گیری می‌شود. هنگام بررسی ناپیوستگی‌ها به صورت دسته می‌توان از توزیع‌های کروی مانند توزیع فیشر استفاده کرد (Martin & Tannant, 2004). توزیع فیشر یک توزیع متقارن از جهت‌داری حول یک میانگین را توصیف می‌کند. یک شاخص از درجه خوشه‌بندی با ضریب پراکندگی فیشر (K) فراهم می‌شود که مقدار زیاد آن نشان‌دهنده یک خوشه بسته است. تابع توزیع احتمال به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f(\theta) = \frac{K \sin \theta e^{K \cos \theta}}{e^k - e^{-(k)}} \quad (1)$$

که در این فرمول  $\theta$  مقدار جهت‌داری ناپیوستگی‌ها است.

جهت‌داری ناپیوستگی‌ها معمولاً برای مشخص کردن محدوده‌های ساختاری استفاده می‌شود. یک محدوده، حجمی از توده سنگ است که دارای ویژگی‌های ثابت مانند جهت‌داری ثابت (یک دسته ناپیوستگی) و خواص مقاومتی ثابت توده سنگ است (Priest, 1993).

خطای جهت‌داری زمانی رخ می‌دهد که خط برداشت یا پنجره عمود بر ناپیوستگی‌ها نباشند. به منظور کاهش این خطا باید خط برداشت یا پنجره‌های دیگری نیز در روی رخنمون با جهت‌داری‌های دیگر ایجاد شود. همچنین یک

و دقت مورد انتظار دست پیدا کرد. در عمل محدودیت‌های توپوگرافی در صحرا باعث کاهش انعطاف‌پذیری در انجام شبکه برداشت می‌شود. به‌ویژه آنکه بیشتر شیب‌های مورد بررسی فقط می‌تواند از پایین اندازه‌گیری شود و دسترسی به دامنه شیب امکان‌پذیر نیست. دقت نهایی یک مدل سه‌بعدی تابعی از کیفیت فرایند گرفتن عکس‌ها است. روش‌های مختلفی می‌تواند برای گرفتن عکس‌ها در مدل سه بعدی اتخاذ شود.

#### ۶- برداشت ناپیوستگی‌ها در معدن شماره ۱ سنگ آهن گل‌گهر

به منظور برداشت ناپیوستگی‌ها در معدن شماره ۱ گل‌گهر سیرجان یک رخنمون سنگی در دیواره شمالی این معدن که جنس سنگ آن غالباً از مگنتیت تشکیل شده بود انتخاب شد. از دو ایستگاه برای عکس‌برداری استفاده شد. فاصله دو ایستگاه از یکدیگر برابر با ۱۰/۸ متر و فاصله آنها از رخنمون سنگی ۳۳ متر انتخاب شد. از دوربین Canon مدل 5DMK II 0244 با فاصله کانونی ۵۰ میلی‌متر استفاده شد. از هر ایستگاه ۵ عکس از رخنمون به‌گونه‌ای تهیه شد که عکس‌ها تقریباً ۶۰ درصد همپوشانی داشته باشند. همچنین در روی رخنمون، ۸ نقطه به وسیله رنگ مشخص و مختصات دقیق آنها به وسیله دوربین نقشه‌برداری خوانده شد. از این نقاط به عنوان نقاط کنترلی در نرم‌افزار استفاده شد. سپس در پاشنه این رخنمون برداشت درزه‌ها به روش خط برداشت انجام شد. از آنجایی که مگنتیت دارای خاصیت مغناطیسی است، استفاده از کمپاس به منظور اندازه‌گیری جهت شیب ناپیوستگی‌ها غیر ممکن می‌شود. برای این کار دو میخ چوبی به دو طرف سینه کار متصل شد. یک متر پارچه‌ای بین آنها بسته و مختصات میخ‌ها به وسیله دوربین نقشه‌برداری خوانده شد. سپس مقدار شیب ناپیوستگی‌های قطع‌کننده متر پارچه‌ای به وسیله کمپاس و جهت شیب آنها به وسیله خط کش کلینورول برداشت شد. نمایی از وضعیت ناپیوستگی‌ها و خط برداشت در شکل ۵ نشان داده شده است.

سپس عکس‌ها و نقاط کنترلی به نرم‌افزار 3DM Analyst Mine Mapping Suite وارد و مدل سه‌بعدی آن ساخته شد. توصیف ناپیوستگی‌ها با برآزش دستی صفحات روی سطوح قابل تشخیص یا خط‌اثرهای موجود در مدل سه‌بعدی انجام گرفت. در روش فتوگرامتری 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 برآزش چندین نقطه به ناپیوستگی است که دارای دقت بالاتری است. اما در روش خط برداشت از آنجایی که مقدار کوچکی از سطح ناپیوستگی جهت برداشت جهت‌داری استفاده می‌شود بنابراین می‌تواند دارای خطا باشد. مقطع یک درزه بزرگ در جهت شیب به همراه خط‌های مماس شده به آن در بخش‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود بخش‌های مختلف آن دارای شیب متفاوتی است و در نظر گرفتن یک شیب میانگین برای آن (که در اینجا برابر با ۳۷ درجه است) ضروری است. در همه این نرم‌افزارها فرض می‌شود که ناپیوستگی‌ها دایره‌ای هستند. دسته درزه‌های مشخص شده به همراه مدل سه بعدی در شکل ۷ نشان داده شده است.

#### ۷- تحلیل و مقایسه نتایج

تعداد درزه‌های برداشت شده در روش خط برداشت برابر با ۴۲ درزه و در روش فتوگرامتری برابر با ۲۵۸ درزه است. قطب درزه‌های برداشت شده و صفحه میانگین دسته‌درزه‌ها برای دو روش در شکل ۸ و جهت‌داری دسته درزه‌های اصلی در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. جهت‌داری رخنمون پله معدن برابر با ۶۰/۲۰۵ است. همانطور که دیده می‌شود در روش خط برداشت ۲ دسته درزه وجود دارد، در صورتی که در روش فتوگرامتری تعداد ۳ دسته درزه مشخص شده است. دسته‌درزه شماره J1

زاویه‌یاب) برای اندازه‌گیری نقاط سه‌بعدی در طول یک ناپیوستگی خاص برای اندازه‌گیری جهت‌داری آن استفاده می‌شود. خواص ناپیوستگی‌هایی که با این روش برداشت می‌شود با مقادیر سه‌بعدی دست آمده از روش‌های استاندارد دستی مطابقت خوبی نشان می‌دهد (Wickens & Barton, 1971; Allam, 1978).

آنالیز عکس‌های دوبعدی به وسیله پژوهشگران زیادی به عنوان ابزاری برای برداشت خط اثر استفاده شده است. به طور خاص این ابزار برای کمی کردن طول اثر ناپیوستگی، فاصله‌داری و اندازه بلوک استفاده شده است (Franklin et al., 1988). افزون بر آن عکس‌ها می‌توانند مناطق غیرقابل دسترس را پوشش دهند که می‌تواند نمونه‌های جامعی از برش سنگی را فراهم کند. پژوهشگران زیادی تلاش کردند تا فرایند پردازش برداشت خط اثر را به صورت اتوماتیک درآورند (Franklin et al., 1988; Reid & Harrison, 2000; Lemy & Hadjigeorgiou, 2003). استفاده از فتوگرامتری تحلیلی در رخنمون‌های سنگی در گذشته محدود بود. اما پیشرفت‌های اخیر در کارایی کامپیوترها و استفاده فراوان از عکس‌های دیجیتالی منجر به پیشرفت‌های زیادی در نرم‌افزارهای فتوگرامتری شده که می‌توان با آنها مدل‌های سه‌بعدی را با سرعت بالا ساخت. بنابراین فتوگرامتری دیجیتالی زمینی در اختیار افرادی قرار گرفت که در این امر متخصص نبودند و نیز کاربرد بسیار وسیعی در مهندسی ژئوتکنیک پیدا کرد.

فتوگرامتری دیجیتالی زمینی برد کوتاه (CRTDP) (Close-range terrestrial digital photogrammetry) به طور گسترده‌ای برای توصیف پارامترهای ناپیوستگی‌ها استفاده می‌شوند. در صورتی که فاصله دوربین تا شی کمتر از ۳۰۰ متر باشد به آن فاصله نزدیک اطلاق می‌شود (Wolf & Dewitt, 2000). پتانسیل این روش به‌وسیله Haneberg et al. (2006) به اثبات رسیده است. بسته‌های نرم‌افزاری روش‌های فتوگرامتری توسط Birch (2006)، Gaich et al. (2006) و Poropat (2008) معرفی شده‌اند. روش‌هایی که تشخیص ناپیوستگی‌ها را در مدل‌های سه‌بعدی دورسنجی به صورت اتوماتیک درآورده‌اند، این تکنیک‌ها را برای مهندسان جذاب‌تر کرده است. (Matthew & Vöge (2012) و Firpo et al. (2011) نیز به منظور تحلیل پایداری شیب یک معدن به منظور برداشت ناپیوستگی‌ها از روش فتوگرامتری استفاده کردند. از روش فتوگرامتری به منظور مشاهده جابه‌جایی زمین با گرفتن عکس در زمان‌های مختلف استفاده شده است (Kenner et al., 2014). همچنین Assali et al. (2014) به منظور برداشت ناپیوستگی‌ها از روش فتوگرامتری استفاده و آنها را با روش برداشت دستی مقایسه کردند.

بسته به وسعت منطقه مورد برداشت چندین دسته عکس مورد نیاز است. وقتی که بخشی از رخنمون از یک ایستگاه قابل مشاهده نباشد، جفت عکس‌های جداگانه‌ای باید از زوایای مختلف گرفته شود و دسته داده‌ها باید به طور جداگانه مورد پردازش قرار گیرد و در نهایت به منظور ایجاد یک ابر نقاط واحد با هم ترکیب شوند. انسداد (Occlusion) زمانی رخ می‌دهد که بخش‌هایی از رخنمون سنگی به علت خاصیت برآمدگی مشخص نبوده و در نتیجه نمی‌تواند نمونه‌گیری شود. انسداد باعث تشکیل حفره‌ها یا زون‌های تاریک شده و نقاط فضایی آنها در مدل سه‌بعدی وجود ندارد. خطای جهت‌داری زمانی رخ می‌دهد که خط دید دوربین تقریباً موازی یک ناپیوستگی باشد که منجر به تشکیل یک خط اثر خطی می‌شود. خطای جهت‌داری زمانی کاهش می‌یابد که خط‌اثرهای موجود با برجستگی کافی در مدل سه‌بعدی وجود نداشته باشند. هر دو پدیده انسداد و خطای جهت‌داری می‌تواند به صورت افقی و قائم وجود داشته باشد. یک مشاهده دقیق از هندسه رخنمون سنگی و زمین‌شناسی ساختاری پیش از به‌کارگیری تکنیک‌های دورسنجی زمینی به منظور کاهش انسداد و خطای جهت‌داری پیشنهاد می‌شود (Sturzenegger & Stead, 2009).

بهتر است که موقعیت دوربین به‌گونه‌ای انتخاب شود تا بتوان به تفکیک‌پذیری

گل‌گهر با روش خط برداشت و روش جدید فتوگرامتری برداشت و نتایج مورد مقایسه قرار گرفتند. نکات زیر گفتنی است:

- به دلیل آنکه در روش فتوگرامتری ناپیوستگی‌ها از تمامی سطح رخنمون برداشت می‌شوند بنابراین نمونه آماری کامل‌تری را نسبت به روش خط برداشت که محدود به پاشنه پله است فراهم می‌کنند.

- روش خط برداشت توانایی اندازه‌گیری دسته درزه‌هایی که امتداد آنها موازی خط برداشت است ندارد. این دسته درزه‌ها در مبحث پایداری شیب دارای وضعیت بحرانی‌تری نسبت به دیگر دسته درزه‌ها هستند. اما روش فتوگرامتری این دسته درزه‌ها را به خوبی برداشت می‌کند.

- در روش فتوگرامتری جهت 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 آنجایی که مقدار کوچکی از سطح ناپیوستگی برای برداشت جهت‌داری استفاده می‌شود بنابراین می‌تواند دارای خطا باشد.

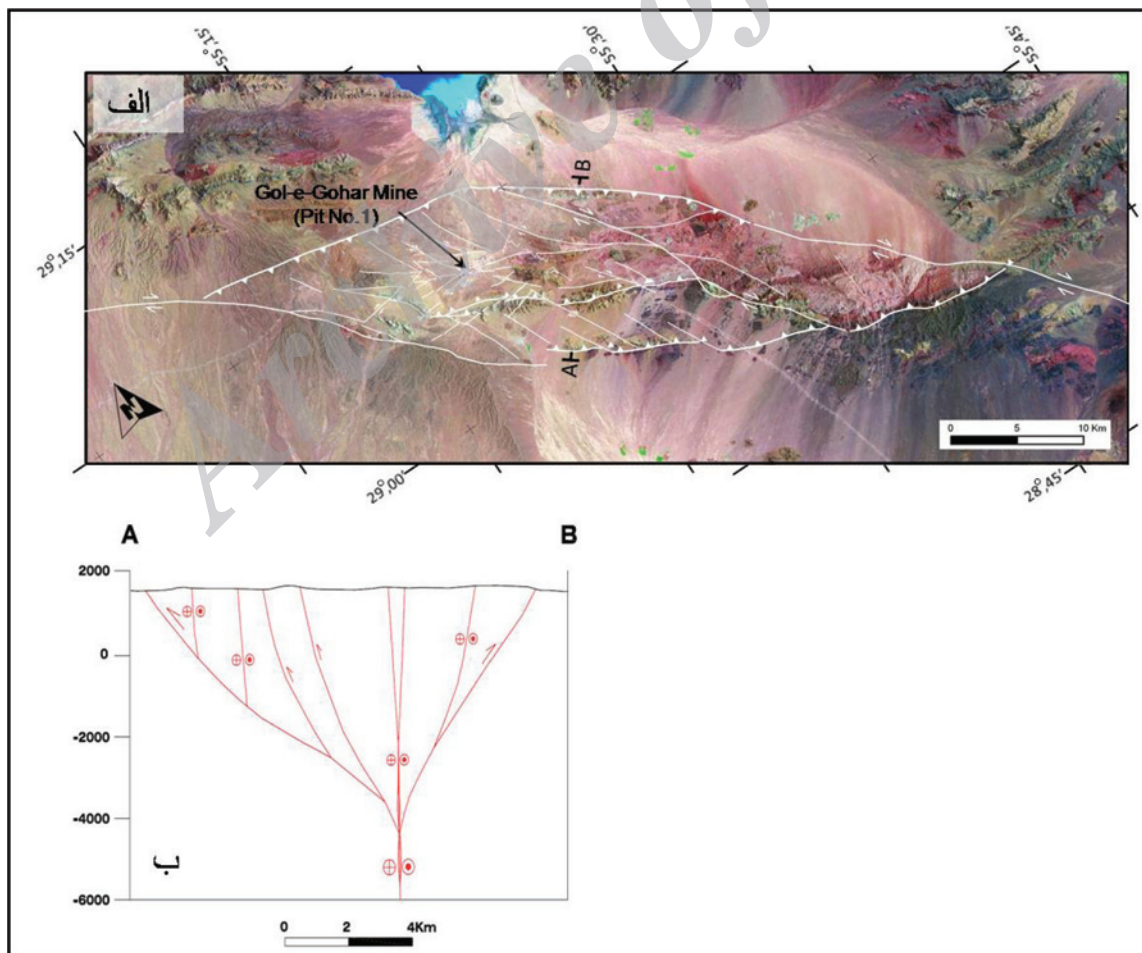
### سپاسگزاری

از جناب آقای مهندس مهدی غنی‌زاده و آقای مهندس حسین زارع که نگارندگان را در گرفتن عکس‌ها یاری کردند سپاسگزاری می‌گردد.

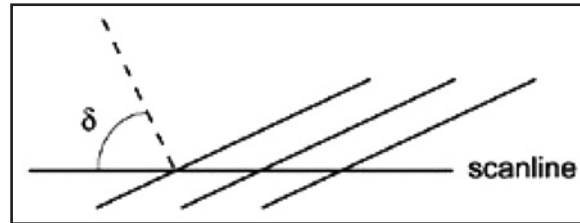
دارای شیب تقریباً مشابه در هر دو روش است، اما جهت شیب آن دارای اختلاف ۲۴ درجه‌ای است که علت آن برداشت تعداد درزه‌های بسیاری از این دسته درزه در بخش‌های بالاتر شیب با استفاده از روش فتوگرامتری است. در جدول ۲ میزان خطا در برداشت جهت‌داری‌ها نشان داده شده است. دسته درزه J2 نیز دارای اختلاف شیب ۱۰ درجه و جهت شیب ۵ درجه است که دلیل آن تعداد زیاد درزه‌های برداشت شده و جامعه آماری بیشتر این دسته درزه در روش فتوگرامتری است. اما دسته درزه J3 (که دسته درزه بحرانی از منظر پایداری شیب می‌باشد) فقط در روش فتوگرامتری برداشت شده است و در روش خط برداشت تنها تعداد دو درزه از آن وجود دارد. این دسته درزه دارای امتداد تقریباً موازی با خط برداشت است که باعث می‌شود احتمال برداشت آن کم شود. همچنین به دلیل موازی بودن امتداد دیواره‌های در حال کار با امتداد شیروانی معدن، رخنمون‌های عمود بر رخنمون برداشت شده جهت برداشت درزه‌ها به روش خط برداشت وجود ندارد و همچنین به دلیل مسائل ایمنی و نبود تجهیزات نمی‌توان درزه‌ها را در یک خط برداشتی عمود بر خط برداشت اول و یا به روش پنجره‌ای برداشت کرد. از طرف دیگر به علت آنکه جهت شیب این دسته درزه تقریباً با جهت شیب پله یکسان است، می‌تواند ناپایداری صفحه‌ای را به دنبال داشته باشد.

### ۸- نتیجه‌گیری

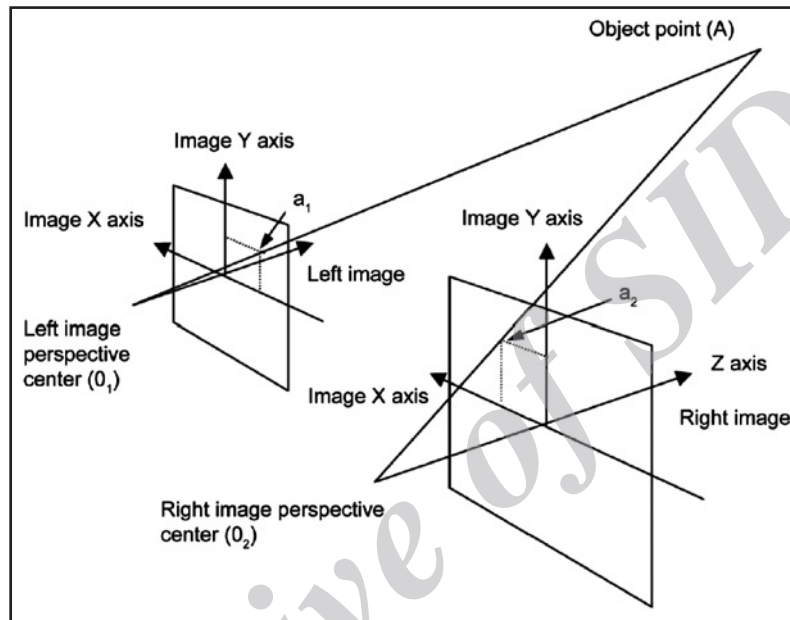
در این پژوهش ناپیوستگی‌های موجود در سنگ مگنتیت در معدن سنگ آهن



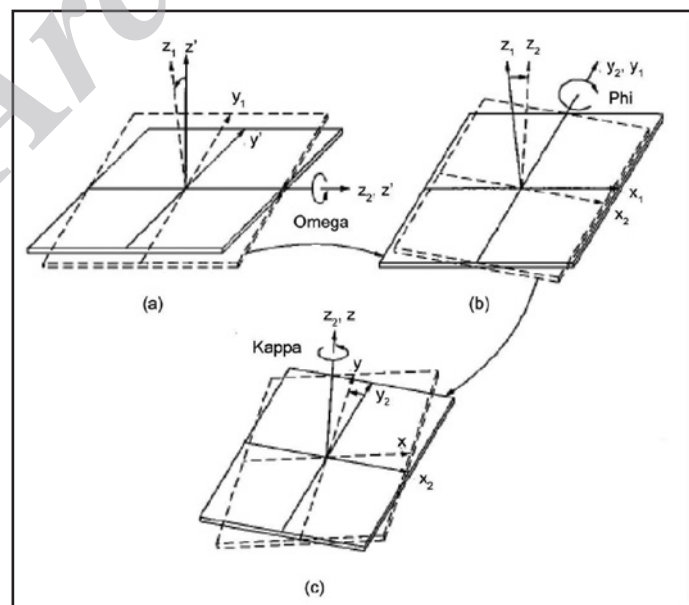
شکل ۱- الف) پهنه لژی شکل فشارشی حاصل از خمش به سمت چپ گسل امتداد لغز راست‌بر؛ ب) برش ساختاری در عرض پهنه لژی شکل که نشان‌دهنده ساختار گل‌مانند است (حسن‌پور و همکاران، ۱۳۹۰).



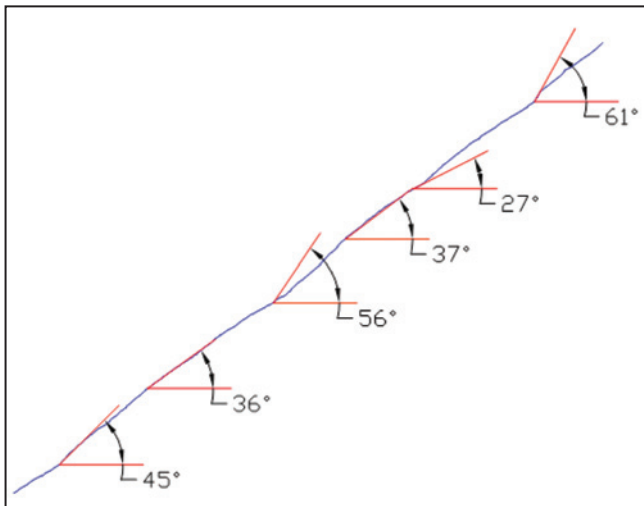
شکل ۲- تصحیح خطای جهت‌داری (Priest, 1993).



شکل ۳- هندسه تعیین موقعیت نقطه A از شی. عکس‌های سمت چپ و راست در برابر مراکز چشم‌انداز دوربین قرار دارند (Sturzenegger, 2010).



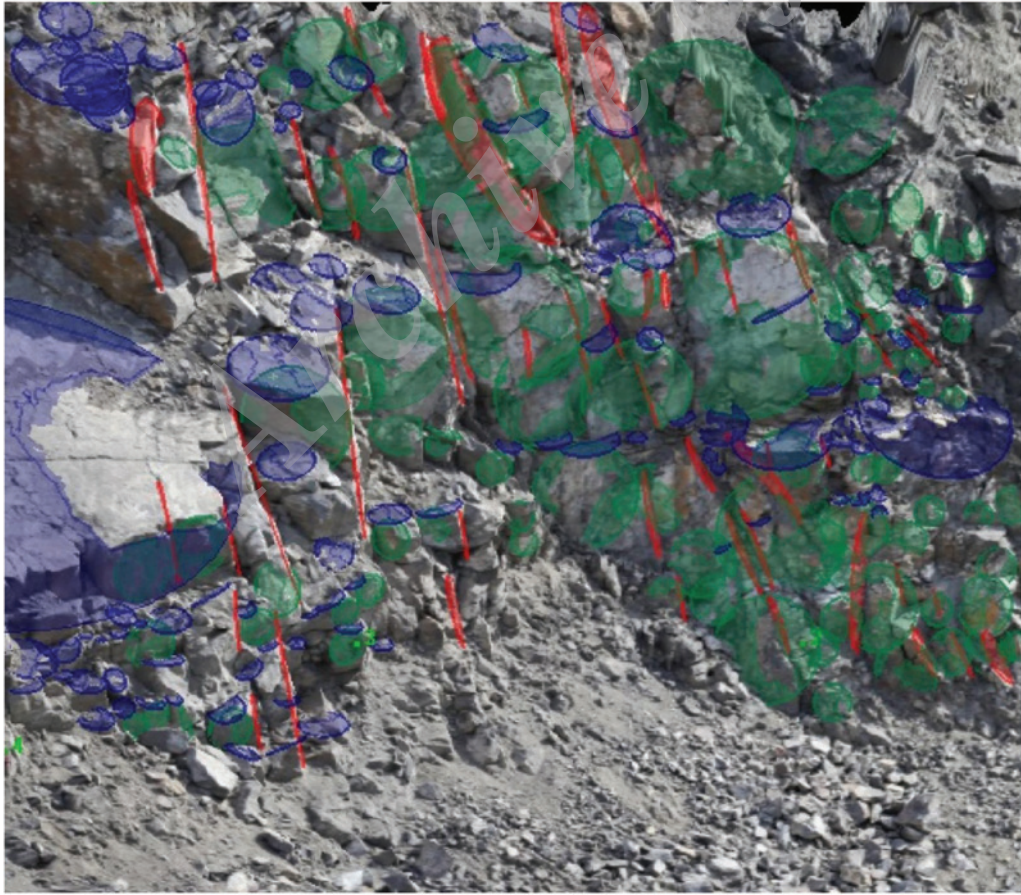



شکل ۴- زوایای (a)  $\omega$  و  $\Phi$  (b) و  $\text{K}$  از عکس‌های شیب‌دار برای جهت‌داری خارجی از عکس (Sturzenegger, 2010).



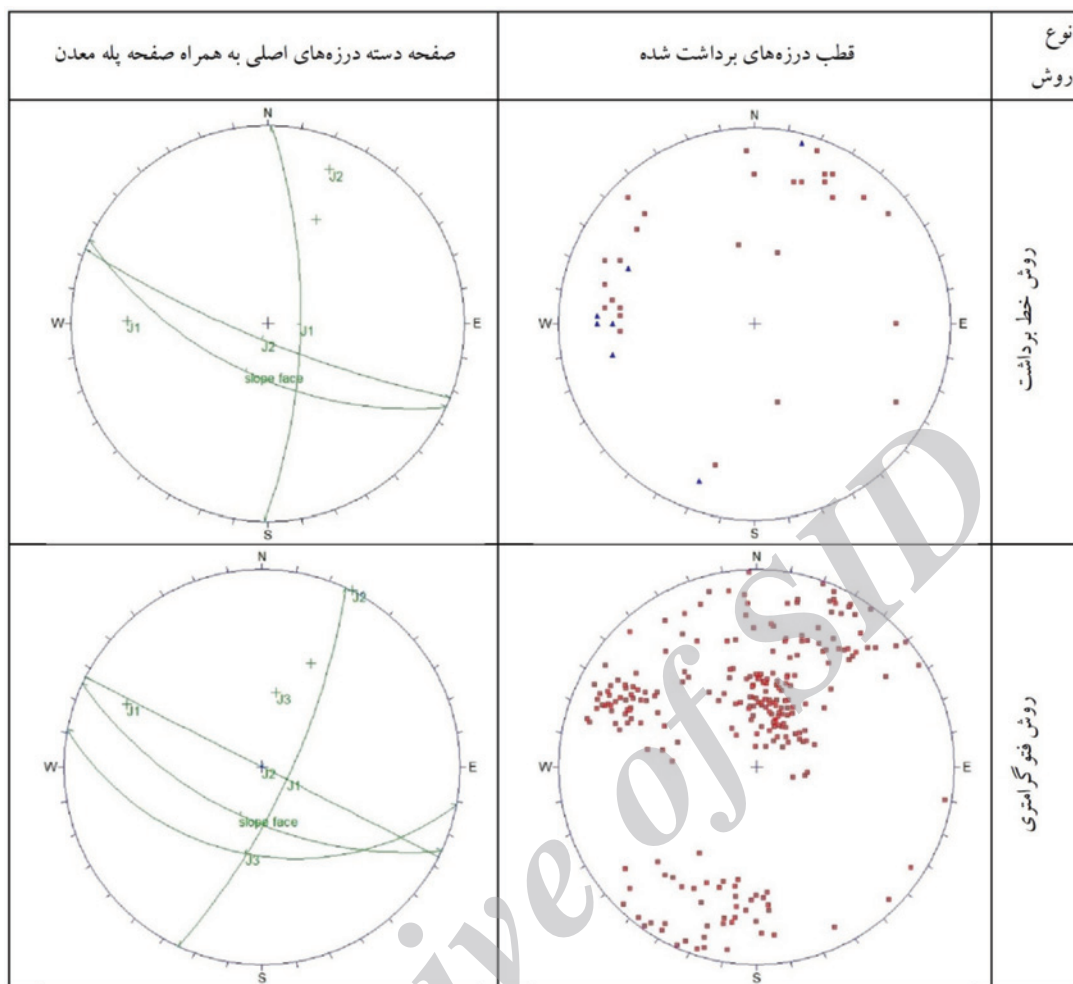
شکل ۶- مقطع یک درزه بزرگ به همراه شیب‌های مماس شده به آن در بخش‌های مختلف.



شکل ۵- نمایی از وضعیت ناپیوستگی‌ها و خط برداشت.

شماره دسته درزه	راه‌نمای دسته درزه	شماره درزه	
		۱	۲
		۱	۲
			۳
			

شکل ۷- نمایی از دسته‌درزه‌های مشخص شده به همراه مدل سه‌بعدی.



شکل ۸- دایره استرونت ناپوستگی‌های برداشت شده.

جدول ۱- ویژگی‌های جهت‌داری دسته‌دازه‌های اصلی.

جهت شیب	شیب	شماره دسته درزه	نوع روش
91	71	J1	روش خط برداشت
202	80	J2	
115	74	J1	روش فتوگرامتری
207	90	J2	
191	42	J3	

جدول ۲- میزان خطا در برداشت جهت‌داری دسته‌دازه‌های اصلی به روش خط برداشت.

میزان خطا در مقدار جهت شیب (درجه)	میزان خطا در مقدار شیب (درجه)	شماره دسته درزه
24	3	J1
5	10	J2
-	-	J3

## کتابنگاری

حسن پور، ج.، طریق‌ازلی، ص. و صادقی، ش.، ۱۳۹۰- گزارش نهایی مطالعات زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی معدن گل‌گهر (بیت شماره ۱). قلمقاش، ج.، ۱۳۸۹- شرح زمین‌شناسی نقشه ۱:۲۵۰۰۰ گل‌گهر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

## References

- Adam Technology, 2007- 3DM Analyst 2.1 and 3DM CalibCam 2.1 users manuals. <http://www.adamtech.com.au>.
- Allam, M. M., 1978- The estimation of fractures and slope stability of rock faces using analytical photogrammetry. *Photogrammetria*, 34, 89-99.
- Assali, P., Grussenmeyer, P., Villemin, T., Pollet, N. & Viguier, F., 2014- Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection. *Journal of Structural Geology*, 66: 102–114.
- Atkinson, K. B. (Editor), 1996- Close Range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing, 371 pp.
- Birch, J. S., 2006- Using 3DM Analyst mine mapping suite for rock face characterization. In: Tonon, F. and Kottenstette, J. (Eds.), *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization*, ARMA, 13-32.
- Chandler, J., 1999- Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth surface processes and landforms*, 24: 51-63.
- 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 and Mining Sciences*, 48 (7): 1045–1054.
- Franklin, J. A., Maerz, N. H. & Bennett, C. P., 1988- Rock mass characterization using photoanalysis. *International Journal of Mining and Geological Engineering* 6 (2): 97-112.
- Gaich, A., Pösch, M. & Schubert, W., 2006- Acquisition and assessment of geometric rock mass feature by true 3D images. In *Proceedings: 41st U.S. Symposium on rock mechanics (USRNS)*, Golden, Colorado, June 17-21.
- Haneberg, W. C., Norrish, N. I. & Findley, D. P., 2006- Digital outcrop characterization for 3 Dstructural mapping and rock slope design along interstate 90 near Snoqualmie Pass. Washington. In *Proceedings: 57th annual highway geology symposium*, Breckenridge, Colorado, Sept. 27-29.
- Kenner, R., Bühler, Y., Delaloye, R., Ginzler, C. & Phillips, M., 2014- Monitoring of high alpine mass movements combining laser scanning with digital airborne photogrammetry. *Geomorphology* 206: 492–504.
- Lemy, F. & Hadji-georgiou, J., 2003- Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40: 903- 917.
- Martin, M. W. & Tannant, D. D., 2004- A technique for identifying structural domain boundaries at the EKATI Diamond Mine. *Engineering Geology* 74: 247-264.
- Matthew, J. L. & Vöge, M., 2012- Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 54: 150–158.
- Poropat, G. V., 2008- Remote characterization of surface roughness of rock discontinuities. *Proceedings 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, Perth, 2: 447-458.
- Priest, S. D., 1993- *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman and Hall, London, 473.
- Reid, T. R. & Harrison, J. P., 2000- A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37: 1073-1089.
- .Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran, *A review*, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 52: 1229-1258
- Sturzenegger, M. & Stead, D., 2009- Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology* 106: 163-182.
- Sturzenegger, M., 2010- Multi-scale characterization of rock mass discontinuities and rock slope geometry using terrestrial remote sensing technique. Phd thesis, Simon Fraser University.
- Terzaghi, R. D., 1965- Sources of error in joint surveys. *Geotechnique* 15(3): 287-304.
- Tonon, F. & Kottenstette, J. T., 2007- Laser and photogrammetric methods for rock face characterization. Report on a Workshop Held in Golden, Colorado, June 17–18, 2006. American Rock Mechanics Association.
- Trinks, I., Clegg, P., McCaffrey, K., Jones, R., Hobbs, R., Holdsworth, B., Holliman, N., Imber, J., Waggott, S. & Wilson, R., 2006- Mapping and analyzing virtual outcrops. *Visual Geosciences*, 10: 13–19.
- Wickens, E. H. & Barton, N. R., 1971- The application of photogrammetry to the stability of excavated rock slopes. *Photogrammetric Record*, 7 (37): 46-54.
- Wolf, P. R. & Dewitt, B. A., 2000- *Elements of photogrammetry, with applications in GIS*. Third Edition. McGraw-Hill, Boston, 608 pp.