

## پایش، مدل‌سازی سه‌بعدی و تعیین میزان ذخیره استخراجی معادن با استفاده از فتوگرامتری توسط پهپاد، مطالعه موردی: معدن شن و ماسه قدس لنجان اصفهان

رضا احمدی<sup>۱\*</sup> و کامیار حسن پور<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

نویسنده مسئول: Rezahmadi@gmail.com \*

نوع مقاله: مطالعه موردی

پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۹

دریافت: ۹۹/۸/۱۶

### چکیده

فتوگرامتری با پهپاد یک رویکرد سریع، دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای بدست آوردن اطلاعات مکانی با تفکیک‌پذیری بالاست. مراحل اصلی فرآیند، اخذ تصاویر دارای همپوشانی از هدف، تولید ابرنقطه سه‌بعدی متریک، مدل رقومی ارتفاعی و ارتوموزاییک از سطح محدوده و ارزیابی دقت آن‌ها با استفاده از تعداد مشخصی نقطه کنترل زمینی می‌باشد. در پژوهش حاضر به‌منظور پایش، مدل‌سازی سه‌بعدی و تعیین میزان ذخیره برداشت شده و باقیمانده معدن شن و ماسه قدس واقع در ناحیه لنجان اصفهان از فتوگرامتری با پهپاد استفاده شد. بر اساس وسعت و شکل محدوده، تعداد ۹ خط پرواز با فاصله حدودی ۳۷ متر از یکدیگر با ارتفاع پرواز ۱۱۴ متر طراحی و پیمایش شد. با پوشش طولی ۷۵ درصد و عرضی ۶۵ درصد برای تصاویر، تعداد کل عکس‌های برداشت شده نیز ۲۲۵ عدد می‌باشد. هم‌چنین تعداد ۶ نقطه کنترلی (۵ نقطه کنترلی و ۱ نقطه چک) بطور پراکنده در سطح محدوده انتخاب شد که دامنه تغییرات خطا در این نقاط از ۱/۵- تا ۱/۵ میلی‌متر و خطای کلی نقاط کنترل نیز حدود ۶/۸ میلی‌متر، دقت مناسبی می‌باشد. دقت کلی عملیات پیمایش محدوده بوسیله پهپاد از طریق مقایسه با نقطه چک زمینی توسط سامانه موقعیت‌یاب مکانی سه‌فراکانسه دقیق، مورد ارزیابی قرار گرفت که میزان خطای برداشت محدوده در سه راستای مختصاتی، بسیار ناچیز و کمتر از ۵ سانتی‌متر است. در نهایت حجم ناحیه استخراج شده و ماده معدنی باقیمانده، تعیین گردید و از ضرب حجم در جرم مخصوص متوسط ( $1/4 \text{ g/cm}^3$ )، میزان ماده معدنی برداشت شده  $3657/43$  تن و ذخیره باقیمانده کانسار،  $82942/55$  تن محاسبه شد.

**واژه‌های کلیدی:** پایش، مدل‌سازی سه‌بعدی و تعیین تغییرات ذخیره معادن؛ فتوگرامتری؛ پهپاد؛ معدن شن و ماسه قدس لنجان اصفهان

### پیشگفتار

سریع، دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای بدست آوردن اطلاعات مکانی با تفکیک‌پذیری بالا و مدل‌سازی سه‌بعدی اشیاء در کاربری‌های متعدد همانند تهیه نقشه‌های توپوگرافی، برنامه‌ریزی شهری، تولید عکس نقشه (ارتوفتو) و مدل‌سازی زمین می‌باشد (لویت، ۲۰۱۷). پهپاد فتوگرامتری عمل تصویربرداری هوایی را با استفاده از سخت‌افزارها و نرم‌افزارهای مختلف انجام می‌دهد. بخش سخت‌افزاری شامل ناوبری<sup>۳</sup>، مخابرات، برداشت داده و ایستگاه زمینی و بخش نرم‌افزاری شامل کنترل ناوبری، طراحی پرواز، آماده‌سازی و پردازش تصاویر دریافتی از سطح زمین، تهیه مدل سه‌بعدی، نقشه مدل رقومی ارتفاعی زمین<sup>۴</sup> (DEM) و غیره است (آیزن‌بیس، ۲۰۰۹).

گام نخست در مدل‌سازی توده‌های کانساری غیرفلزی و ارزیابی و تخمین ذخایر آن‌ها، تهیه نقشه تاحدممکن دقیق، سریع و کم‌هزینه است. برحسب اندازه و ابعاد هدف، امکانات و تجهیزات مورد استفاده، برای جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مکانی از تمامی عوارض سطح زمین و تهیه نقشه، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود. تهیه نقشه به‌روش زمینی برای بسیاری از کانسارها به دلیل شرایط زمین‌ریخت‌شناسی<sup>۱</sup>، بسیار دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است اما با پرواز بر روی این مناطق می‌توان علاوه بر برداشت آسان، حجم توده‌ها را نیز با دقت زیاد محاسبه نمود. نقشه‌برداری با پهپاد (پرنده هدایت‌پذیر از دور) یا فتوگرامتری مبتنی بر سامانه پهپاد، یک رویکرد

<sup>2</sup>- Ortho Photo

<sup>3</sup>- Navigation

<sup>4</sup>- Digital Elevation Model

<sup>1</sup>- Geomorphology

۳۶ هکتار امروزه به‌طور فعال بهره‌برداری می‌شود و عمق آن نیز به ۵۰ متر می‌رسد. به‌دلیل غیرقابل دسترس بودن بسیاری از قسمت‌های این معدن، نقشه‌برداری زمینی از سطح زمین میسر نیست. تیوسی و همکاران (۲۰۱۹) نظارت و محاسبه حجم زباله‌های جمع‌آوری شده وارد زنجیره بازیافت شده را با استفاده از یک هواپیمای بدون سرنشین و به‌روش فتوگرامتری انجام دادند. این آزمایش با دو جلسه پرواز پهپاد با پیکربندی دوربین عمودی و مایل و با استفاده از یک اسکتر لیزری زمینی برای اندازه‌گیری نقاط کنترل زمین انجام شد. مدل‌های سه‌بعدی نیز با استفاده از این نقاط تولید شد.

امروزه نظارت و ارزیابی پیوسته معدن به منظور بررسی وضعیت کلی معدنکاری از نظر تعیین میزان استخراج ماده معدنی، نحوه استخراج، محاسبه میزان ذخیره باقی‌مانده، رعایت یا عدم رعایت حدود قانونی محدوده مجاز، تاثیرات زیست‌محیطی معدنکاری و غیره، یک ضرورت است. بنابراین در پژوهش حاضر به‌منظور پایش، نظارت، مدلسازی و ارزیابی ذخیره برداشت شده و باقی‌مانده معدن شن و ماسه قدس واقع در حومه شهر لنجان استان اصفهان به‌عنوان یک مطالعه موردی، از روش سریع، دقیق و نسبتاً ارزان فتوگرامتری به‌کمک سامانه پهپاد استفاده شده است.

#### موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه با مساحت تقریبی ۰/۱۱ کیلومتر مربع مطابق شکل ۱ در فاصله ۵۰ کیلومتری غرب شهر اصفهان و ۸ کیلومتری شمال لنجان قرار دارد. برای دسترسی به این محدوده می‌توان از شهر اصفهان به سمت نجف‌آباد و جلال‌آباد حرکت کرده و به محدوده مورد نظر رسید. ماده معدنی موجود در این محدوده، شن و ماسه است که از جمله مواد معدنی غیرفلزی باارزش می‌باشد. منطقه مورد مطالعه بخش بسیار کوچکی از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ لنجان (زاهدی و صمدیان، ۱۳۵۵) را تشکیل می‌دهد. این منطقه به لحاظ زمین‌شناسی و لیتولوژی، پیچیدگی چندانی ندارد و عمدتاً از پادگانه‌ها و مخروط‌افکنه‌های شنی جوان و پهنه‌های شنی کواترنری و نیز سنگ‌آهک خاکستری شامل اربیتولین و آمونیت مربوط به آپتین کرتاسه تشکیل شده است.

نقشه‌برداری و مدلسازی معادن یکی از پیچیده‌ترین کاربردهای بکارگیری این سامانه‌ها بوده که در آن طراحی و انجام پرواز در فضای محدود با توپوگرافی پیچیده، تغییرات ارتفاعی شدید در پهنه‌های کوچک، دسترسی مشکل، وجود خطوط شکست مختلف و شرایط بد هوایی در آن مطرح است (هررا، ۲۰۱۰). در حال حاضر استفاده از فتوگرامتری با سامانه پهپاد به‌منظور ارزیابی، نظارت و تخمین ذخایر معدنی در مراحل اولیه کار خود می‌باشد و در اینجا به فعالیت‌های انجام شده در این خصوص در ایران و جهان پرداخته می‌شود.

گروه نقشه‌برداری شرکت آیسان‌مپ (۱۳۹۷) نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ معادن سنگ ساختمانی لاشتر اصفهان را از طریق تصویربرداری هوایی با استفاده از پهپاد، در وسعت ۲۵۰۰ هکتار انجام داد. در این پروژه به‌دلیل تغییرات ارتفاعی نسبتاً زیاد محدوده (اختلاف کمینه و بیشینه ارتفاع حدود ۲۰۰ متر) و به‌منظور کاهش خطا، خطوط پرواز در ارتفاع‌های مختلف و متناسب با افزایش شیب محدوده برداشت، طراحی شدند. به‌منظور کاهش خطای مسطحاتی و ارتفاعی نیز بیش از ۳۵۰ نقطه کنترل زمینی، طراحی و برداشت شد.

گروه نقشه‌برداری شرکت طراح‌گراد سپاهان (۱۳۹۸) نقشه‌برداری هوایی معدن ماسه و آسفالت شهر مرزن‌آباد واقع در استان مازندران را با هدف تهیه نقشه توپوگرافی، نقشه وضع موجود معدن، مدل سه‌بعدی معدن و نیز ارزیابی و بررسی خطرات و تاثیرات محیطی معدن بر روی مناطق اطراف، در وسعت ۲۰۰ هکتار انجام داد. به‌دلیل وسعت، خطرات احتمالی و هم‌چنین ناهم‌واری اراضی معدن، نقشه‌برداری با پهپاد، مناسب‌ترین گزینه برای نقشه‌برداری این معدن شناخته شد. ولگر و همکاران (۲۰۱۵) در ساختگاه‌های مختلف آزمایشی استرالیا با استفاده از پهپادها، اطلاعات مکانی دقیق را درباره ساختارهای زمین‌شناسی از مدل‌های فتوگرامتری سه‌بعدی استخراج کردند. علاوه بر این در مورد محدودیت‌های فنی و قانونی اخیر در مورد استفاده از پهپادها نیز بحث نموده‌اند.

گروچاک و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از پهپادهای فتوگرامتری به محاسبه حجم و میزان ذخیره معدن بازالت رفالووکا واقع در منطقه ریون اوکراین پرداختند. وسعت این معدن بیش از ۷۰ هکتار است که از این مقدار



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به معدن شن و ماسه قدس لنجان در نقشه Google Earth. محدوده مورد مطالعه با نشانه ستاره قرمز رنگ در سمت چپ نقشه مشخص شده است.

## مواد و روش‌ها

اگرچه پایش، نظارت و ارزیابی ذخیره معادن بطور مداوم و در زمان‌های مختلف، لازم و ضروری است اما انجام چنین کاری با روش‌های سنتی امکان‌پذیر نبوده و در صورت انجام، زمان‌بر و پرهزینه است. معمولاً تخمین ذخیره دقیق کانسارها نیز فقط در مرحله اکتشاف تفصیلی صورت می‌گیرد، حال آنکه آگاهی از میزان برداشت (استخراج) ماده معدنی و میزان ذخیره باقیمانده موجود، بطور دائمی و در زمان‌های مختلف، مورد نیاز است. در پژوهش حاضر برای پایش و ارزیابی ذخیره استخراج شده و باقیمانده معدن شن و ماسه قدس لنجان از فتوگرامتری با سامانه پهپاد استفاده شده است. مراحل اصلی فرآیند تصویربرداری، تولید ابرنقطه متراکم<sup>۱</sup> و ارزیابی دقت آن‌هاست که ابتدا تصویربرداری توسط پهپاد انجام شده، میزان دقت آن‌ها با استفاده از تعداد مشخصی نقطه کنترل زمینی<sup>۲</sup> افزایش یافته، با نقطه چک مقایسه گردیده و بهترین روش برای تهیه مدل DEM و تولید نقشه سه‌بعدی محدوده در شرایط ایده‌آل پیدا می‌شود. به‌منظور پردازش تصاویر اخذ شده توسط پهپاد، از قابلیت‌های مختلف نرم‌افزار Agisoft Metashape Professional نسخه 1.6.1 استفاده شده است.

## مبانی نظری فتوگرامتری با پهپاد

در فتوگرامتری از هدف مورد نظر (معمولاً در سطح زمین) در حالت‌های متفاوت تصاویر دارای همپوشانی اخذ شده و در نتیجه می‌توان از فضای دوبعدی تصویر به فضای سه‌بعدی زمین (فضای ثانویه) رسید. با استفاده از معادلات تبدیل<sup>۳</sup> همانند Projective, Affine, Conformal و DLT, Polynomial، شرط هم‌خطی و غیره می‌توان بین فضای تصویر و فضای زمین، ارتباط برقرار کرد (همراه، ۱۳۹۱؛ مفیت و میکایل، ۱۹۸۰).

دستیابی به فضای سه‌بعدی زمینی از فضای دوبعدی تصویر، مطابق شکل ۲ به دو طریق امکان‌پذیر است (مفیت و میکایل، ۱۹۸۰): ۱- مسیر فضای تصویر-توجیه داخلی-توجیه نسبی-توجیه مطلق- فضای زمینی و ۲- مسیر فضای تصویر-توجیه داخلی-توجیه خارجی- فضای زمینی.

## فرآیند تصویربرداری از یک منطقه

نحوه پیمایش و طراحی پرواز، متناسب با دوربین و لنز دوربین، نوع پهپاد مورد استفاده، حساسیت و دقت مدلسازی و مقیاس هدف مورد مطالعه انجام می‌گیرد (مفیت و میکایل، ۱۹۸۰). به‌منظور تنظیم<sup>۴</sup> کالیبراسیون (هندسی دوربین، ابتدا بایستی پارامترهای

<sup>۳</sup>- Transformation

<sup>۴</sup>- Calibration

<sup>۱</sup>- Dense point cloud

<sup>۲</sup>- Ground control point

سطح نشان‌دهنده سطح زمین و تمام عوارض موجود در آن است.

### بحث و نتایج

**فتوگرامتری معدن شن و ماسه قدس لنجان با پهپاد**  
مشخصات سامانه پیمایش (پهپاد) و دوربین استفاده شده برای عکس‌برداری از محدوده مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس وسعت و شکل منطقه مورد مطالعه، تعداد ۹ خط پرواز با فاصله حدودی ۳۷ متر از یکدیگر برای پوشش کل سطح محدوده طراحی شد. برای این منظور نقشه منطقه مورد مطالعه بر روی سامانه اتوپیلوت پهپاد بارگذاری گردید و با استفاده از آن مساحت سطح محدوده برداشت، تعداد رن‌های پروازی و مدت زمان پیمایش، محاسبه شد. شکل ۳ موقعیت خطوط پرواز و دوربین پهپاد در لحظه عکس‌برداری بر روی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت دوربین پهپاد در لحظه عکس‌برداری با دواير توپر سفیدرنگ نمایش داده شده است.

برای پیمایش، ارتفاع پرواز از سطح زمین ۱۱۴ متر انتخاب شد تا دقت ارتفاعی مناسب وجود داشته باشد. همچنین از پوشش طولی ۷۵ درصد و پوشش عرضی ۶۵ درصد برای تصاویر استفاده شد تا استحکام شبکه افزایش یابد و ضعف غیرمتریک بودن دوربین که موجب ایجاد خطاهای زیاد در مدل سه‌بعدی می‌شود، تا حد زیادی جبران گردد. در این پیمایش فاصله طولی دو نقطه عکس‌برداری از یکدیگر حدوداً ۲۰ متر، فاصله عرضی آن‌ها حدوداً ۳۷ متر و تعداد کل عکس‌های برداشت شده از محدوده نیز ۲۲۵ عدد می‌باشد. وسعت محدوده عکس‌برداری شده حدود ۰/۲۲ کیلومتر مربع است که از سطح محدوده معدن (حدود ۰/۱۱ کیلومتر مربع) بیش‌تر می‌باشد زیرا محدوده معدن حائز اهمیت بوده و بایستی تمام بخش‌های آن در تعداد عکس کافی وجود داشته باشد تا در قسمت‌های گوشه، اعوجاج بسیار کمی ایجاد شود. برای آنکه اعوجاجات ناشی از برداشت تا حد زیادی کاهش یابد، مطابق شکل ۴ تعداد پنج نقطه کنترل و یک نقطه چک بطور پراکنده در سطح محدوده انتخاب شد، به‌گونه‌ای که نقطه شماره ۵ در بالاترین و نقطه شماره ۶ در پایین‌ترین قسمت محدوده و بقیه نقاط در اطراف

توجیه داخلی تصاویر همزمان با سرشکنی شبکه به‌همراه پارامترهای توجیه خارجی، محاسبه شوند (ترنر، ۲۰۱۴). پس از تولید ابرنقطه سه‌بعدی نامتراکم<sup>۵</sup> از سطح محدوده، ابرنقطه سه‌بعدی متراکم و سپس مدل رقومی ارتفاعی و اورتوموزاییک<sup>۶</sup> منطقه با استفاده از روش‌های تناظریابی تولید می‌شوند. در سطح محدوده یک سری نقاط به‌عنوان نقاط کنترل در نظر گرفته می‌شوند که از بخشی از این نقاط برای بالا بردن دقت در تولید مدل سه‌بعدی و از بعضی از آن‌ها به‌منظور ارزیابی دقت مدل سه‌بعدی تولید شده استفاده می‌شود (www.researchgate.net). نقاط کنترل سه‌بعدی با توزیع مناسب در سرتاسر محدوده، توسط روش تعیین موقعیت زمینی دقیق (مانند استفاده از GPS‌های دو یا سه فرکانسه)، قرائت شده و به مدل اعمال می‌شود.

### نحوه تولید ابرنقطه

ابتدا عوارض نقطه‌ای به‌عنوان نقاط کلیدی<sup>۷</sup> از تصاویر استخراج می‌شوند. سپس برای توجیه تصاویر با استفاده از این مجموعه عوارض نقطه‌ای، سرشکنی باندا اجسمنت<sup>۸</sup> متوالی انجام می‌گیرد و به‌طور متوالی مدل سه‌بعدی نامتراکم ساخته شده و همزمان پارامترهای توجیه خارجی برای همه تصاویر بدست می‌آیند (هیرشمولر، ۲۰۱۱). به‌منظور تولید ابرنقطه متراکم معمولاً از روش تشابه شبه‌سراسری استفاده می‌شود. این روش، تناظریابی توسط اطلاعات متقابل در سطح پیکسل را جایگزین روش تناظریابی بر اساس درجات خاکستری، با هدف جبران اختلافات بین درجات خاکستری بین تصاویر ورودی می‌کند (هیرشمولر، ۲۰۰۵).

### مدل رقومی ارتفاعی و سطح زمین

مدل رقومی ارتفاعی زمین مدل رقومی یا نمایشی سه‌بعدی از سطح زمین است که معمولاً برای نمایش ناهمواری‌های زمین و با استفاده از داده‌های ارتفاع از سطح دریا تهیه می‌شود. در واقع مدل رقومی ارتفاع، پستی و بلندی زمین را توسط یک شبکه سلولی (پیکسلی) نمایش می‌دهد (www.usgs.gov). مدل رقومی

۵- Sparse

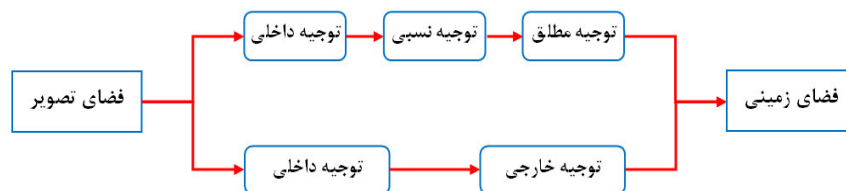
۶- Orthomosaic

۷- Key points

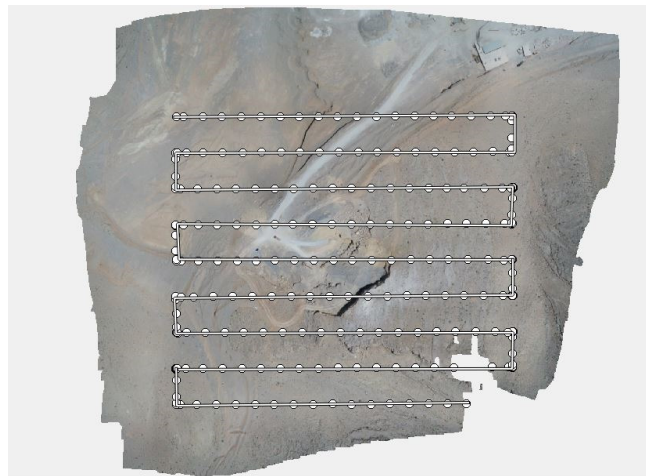
۸- Bundle adjustment

دامنه خطا در نقاط کنترلی محدوده از ۱/۵- میلی‌متر تا ۱/۵ میلی‌متر متغیر بوده و توزیع خطا نیز در نقاط مختلف به صورت یکنواخت نمی‌باشد. نقطه شماره ۲ در محاسبات شرکت داده نشده و به عنوان یک نقطه چک برای ارزیابی کار مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول ۲ مجذور میانگین مربعات خطای نقاط کنترل محدوده مورد مطالعه در راستای سه محور مختصات و در سطح مسطحاتی آورده شده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهند که خطای کلی نقاط کنترل حدود ۶/۸ میلی‌متر است که دقت مناسبی می‌باشد.

آن‌ها در سطح محدوده پراکنده شدند. سپس موقعیت این نقاط با استفاده از دستگاه GPS سه‌فرکانسه Geopos G9 برداشت شد. افزودنی است که در عمل تعداد نقاط کنترل بر اساس ایجاد یک توازن بین مدت زمان انجام عملیات پیمایش، هزینه، تعداد عکس‌های برداشتی (در نتیجه حافظه کامپیوتری مورد نیاز برای ذخیره‌سازی اطلاعات و مدت زمان پردازش) و دقت مورد نیاز انتخاب می‌شود. در شکل ۴ علاوه بر موقعیت نقاط کنترل در سطح محدوده، میزان دقت آن‌ها نیز با استفاده از بیضی‌های رنگی خطا نمایش داده شده است. مطابق راهنمای رنگی این شکل،



شکل ۲. روش‌های تبدیل فضای دوبعدی تصویر به فضای سه‌بعدی زمینی



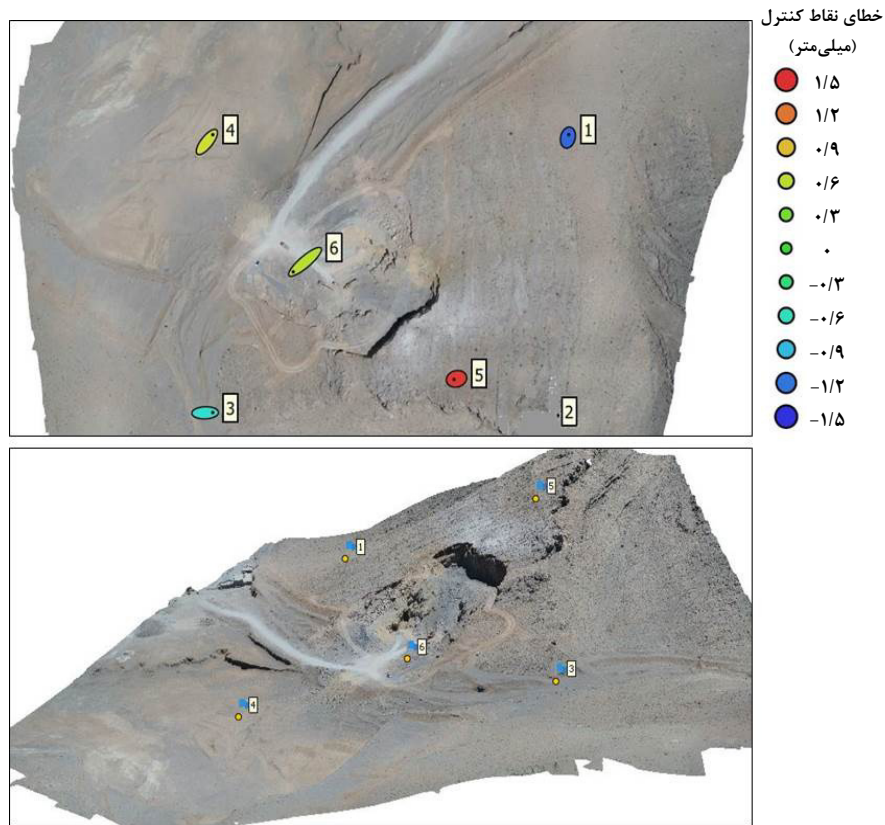
شکل ۳. موقعیت خطوط پرواز و دوربین پهپاد در لحظه عکس‌برداری (دوایر توپر سفیدرنگ) بر روی محدوده مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات سامانه پهپاد و دوربین مورد استفاده

مشخصات دوربین		مشخصات پهپاد	
مدل	FC6310	مدل	فانتوم ۴ پیشرفته
فاصله کانونی	۸/۸ میلی‌متر	مدت زمان پرواز	۳۰ دقیقه
تفکیک‌پذیری	۵۴۷۲×۳۶۴۸	وزن	۱۳۸۸ گرم
ابعاد سنسور	۲/۴۱ میکرومتر	بیشترین ظرفیت کارت	SD ۱۲۸ گیگابایت

جدول ۲. مجذور میانگین مربعات خطای نقاط کنترل

تعداد نقاط کنترل	خطای X (میلی‌متر)	خطای Y (میلی‌متر)	خطای Z (میلی‌متر)	خطای XY (میلی‌متر)	خطای کل (میلی‌متر)
۵	۵/۲۴۸۷۴	۴/۱۲۶۷۹	۱/۰۰۲۱۵	۶/۶۷۶۸	۶/۷۵۱۵۹



شکل ۴. موقعیت نقاط کنترل در سطح محدوده با نمایش میزان دقت آن‌ها

تصویر خروجی ابرنقطه محدوده مورد مطالعه مطابق شکل ۵ می‌باشد. اگرچه این تصویر تنها یک ابرنقطه است، ولی به دلیل تراکم بسیار زیاد نقاط، طرح کلی محدوده مورد مطالعه در آن به وضوح نمایان است. سپس مدل DEM از طریق درون‌یابی و هم‌چنین رسترسازی<sup>۱</sup> روی ابرنقطه ایجاد شده، تولید شد. در نهایت برای تولید ارتوفتوموزاییک<sup>۲</sup> پس از تصحیح تیلت<sup>۳</sup>، ناهمواری و عوارض سطح زمین با استفاده از سطح تراز مدل رقومی ارتفاعی زمین، اتصال تصاویر صورت گرفت که قابلیت زمین مرجع شدن<sup>۴</sup> را دارد. تصاویر مدل سه‌بعدی کانسار از نماهای مختلف نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل حدودمرز ماده معدنی با خط‌چین قرمز رنگ مشخص شده و یک ناحیه با کیفیت در بخش میانی محدوده، بهره‌برداری شده است.

بعد از عملیات پیمایش محدوده توسط پهپاد و اخذ تصاویر، عملیات پردازش با استفاده از نرم‌افزار Agisoft Metashape Professional صورت گرفت. مهم‌ترین بخش در فتوگرامتری با پهپاد، مثلث‌بندی هوایی است چون چهارچوب و اسکلت هندسی نقشه در این مرحله شکل می‌گیرد. بنابراین در ادامه باید بلوک فتوگرامتری ایجاد شود که شامل فراخوانی تصاویر اخذ شده، حذف تصاویر نامناسب، معرفی نقاط کنترل و هم‌چنین معرفی مشاهدات کمکی GPS به‌عنوان مقادیر اولیه (در صورت پایین بودن دقت) است. از آنجایی‌که در پیمایش انجام شده، گیرنده GPS موجود بر روی پهپاد فانتوم ۴ پیشرفته از دقت بالایی برخوردار نیست، بنابراین از آن به‌عنوان مقادیر اولیه استفاده شد. در ادامه محاسبات اولیه بلوک فتوگرامتری شامل استخراج نقاط گرهی، تناظریابی، محاسبه تقریبی پارامترهای توجیه خارجی و سپس معرفی نقاط کنترل بر روی تمام عکس‌هایی که این نقاط در آن‌ها دیده می‌شوند، یعنی تمام عکس‌های موجود از آن منطقه صورت گرفت.

1- Rastering

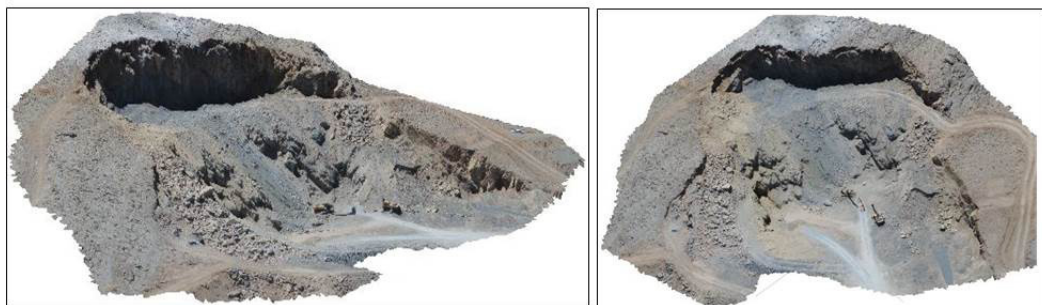
2- Orthophotomosaic

3- Tilt

4- Georeference



شکل ۵. تصویر ابرنقطه متراکم محدوده مورد مطالعه



شکل ۶. تصاویر مدل سه‌بعدی کانسار از نماهای مختلف

در ARC SCENE وارد کرده تا بتوان هم آن را بصورت مدل سه‌بعدی مشاهده نمود و هم تحلیل‌های مربوطه را انجام داد (شکل ۹). علاوه بر سه‌بعدی‌سازی لایه‌ها و عوارض موجود در آن‌ها، در این محیط ویرایش عوارض سه‌بعدی نیز امکان‌پذیر است. با استفاده از Create Steepest Path هر نقطه‌ای که بر روی مدل انتخاب شود، همانند آن است که یک قطره آب از آن نقطه رها شود و بدین طریق مسیر حرکت آن مشخص می‌گردد. در واقع در هر نقطه میزان شیب و جهت شیب، محاسبه شده و براساس آن حرکت آن مشخص می‌شود (منحنی‌های سفیدرنگ در شکل ۹).

### ارزیابی دقت عملیات پیمایش

دقت کلی عملیات پیمایش محدوده مورد مطالعه بوسیله سامانه پهپاد از طریق مقایسه با داده‌های نقطه چک زمینی برداشت شده توسط GPS سه‌فرکانسه بسیار دقیق به‌عنوان مرجع، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج برداشت داده‌ها با استفاده از سامانه پهپاد و GPS سه‌فرکانسه در راستای سه محور مختصاتی در جدول ۳ آورده شده است. مطابق داده‌های این جدول میزان خطای برداشت محدوده توسط سامانه پهپاد در هر سه راستا، بسیار ناچیز و کمتر از ۵ سانتی‌متر است که نتیجه بسیار مطلوبی می‌باشد.

در نهایت نتایج محاسبه میزان حجم و ذخیره کانسار شن و ماسه معدن قدس لنجان در جدول ۴ خلاصه شده است. در محاسبه ذخیره کانسار با این روش، حدود ۳۰۰۰۰۰ کانسار، اندکی کمتر از محدوده ثبتی مجاز توسط دارنده پروانه اکتشاف و به مرز واقعی ماده معدنی (خط‌چین قرمز رنگ در شکل ۶) محصور شده است. با برش این حدود ۳۰۰۰۰۰ و استخراج آن از مدل سه‌بعدی کلی محدوده، حجم ناحیه استخراج (تخلیه) شده و ماده معدنی باقی‌مانده بدست آمد و از ضرب حجم در جرم مخصوص آن، میزان ذخیره ماده معدنی استخراج (برداشت) شده و باقی‌مانده کانسار محاسبه شد. جرم مخصوص متوسط ماده معدنی نیز در سرتاسر کانسار تقریباً ثابت و برابر با  $1/4 \text{ gr/cm}^3$  منظور شده است.

### تهیه نقشه شیب و جهت شیب محدوده مورد مطالعه

یکی از مباحث مهم در بررسی‌های زمین‌شناسی، انجام آنالیزهای مکانی، نظارت و اندازه‌گیری دائمی تغییرات ریخت و فرم زمین بر اثر عوامل مختلف همانند فرسایش، برداشت بی‌رویه یا حتی استخراج و بهره‌برداری مجاز مواد معدنی از محیط می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، اندازه‌گیری پیوسته شیب و جهت شیب در نقاط مختلف سطح زمین، لازم و ضروری است. برای تهیه نقشه‌های شیب و جهت شیب لازم است که اندازه‌گیری‌ها بصورت پیوسته، منظم، سریع، دقیق و غیرحضوری در محل صورت گیرد. در پژوهش حاضر امکان‌پذیری انجام این فرآیند از طریق فتوگرامتری و با استفاده از نقشه DEM منطقه، نشان داده شده است. محاسبه شیب یک پیکسل از طریق DEM منطقه قدری مشکل است، زیرا در هر یک از جهات هشت‌گانه شیب وجود دارد؛ بنابراین با استفاده از میانگین‌گیری تغییرات ارتفاع در راستای محورهای X و Y شیب آن نقطه با استفاده از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود.

$$\text{slope\_radians} = \arctan(\sqrt{[dz/dx]^2 + [dz/dy]^2}) \quad (1)$$

$$\text{slope\_degrees} = \arctan(\sqrt{[dz/dx]^2 + [dz/dy]^2}) * 57.29578 \quad (2)$$

جهت شیب برای یک پیکسل هم به صورت زیر محاسبه می‌شود.

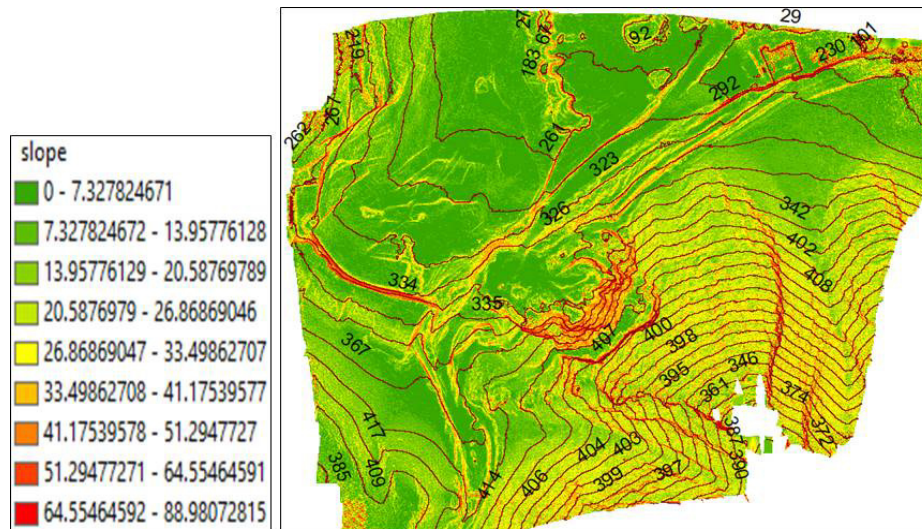
```
aspect=57.29578*atan2([dz/dy],[-dz/dx])
if aspect<0
cell=90.0-aspect
else if aspect>90.0
cell=360.0-aspect+90.0
else cell=90.0-aspect
```

نقشه DEM تهیه شده در نرم‌افزار AGISOFT METASHAPE وارد نرم‌افزار ARCGIS شده و نقشه‌ها با استفاده از توابع قدرتمند موجود در این نرم‌افزار، تولید می‌شوند. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نقشه شیب و جهت شیب محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهند. بر روی این شکل‌ها منحنی‌های میزان مشخص‌کننده تغییرات ارتفاعی نسبت به سطح مسطح زمین هستند.

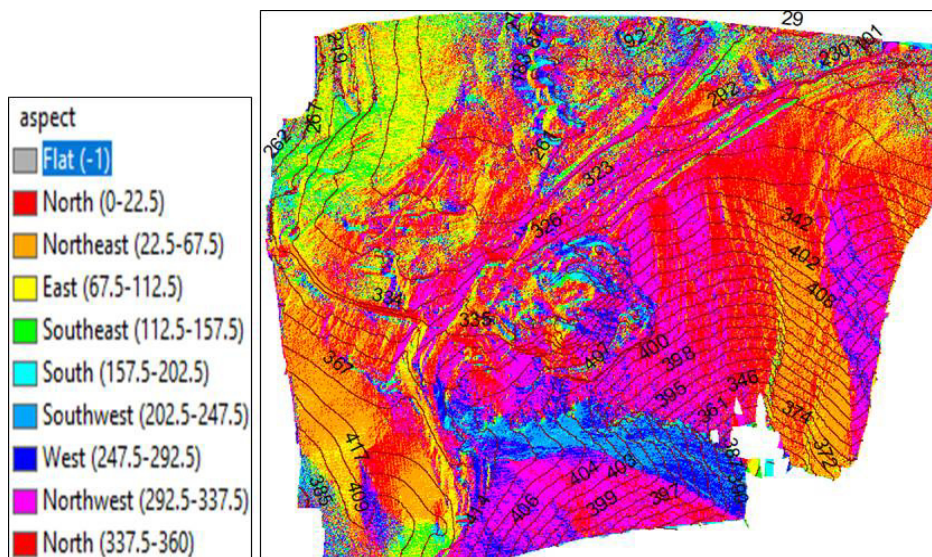
سپس با استفاده از ابرنقاط منطقه، شبکه مثلث‌بندی نامنظم<sup>۱</sup> (TIN) ایجاد می‌شود. این شبکه نامنظم مثلثی را

<sup>۱</sup>- Triangulated Irregular Network

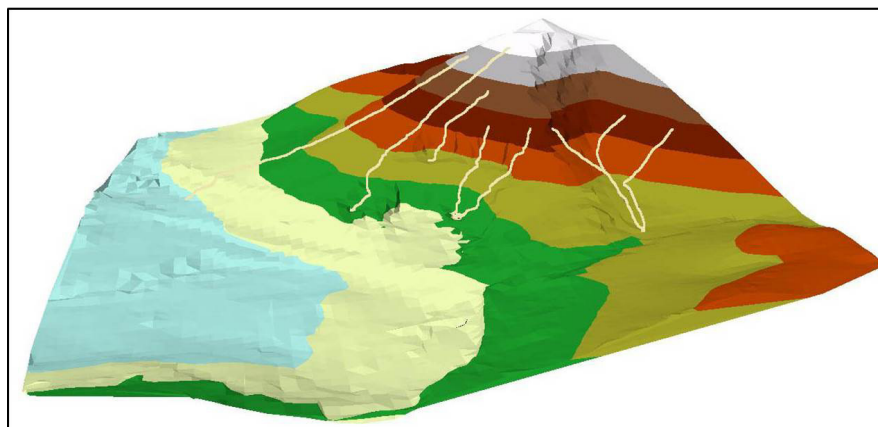




شکل ۷. نقشه میزان شیب در نقاط مختلف محدوده مورد مطالعه



شکل ۸. نقشه جهت شیب در نقاط مختلف محدوده مورد مطالعه



شکل ۹. نمایش چند مسیر حرکت براساس محاسبه میزان شیب و جهت شیب در نقاط انتخابی، بر روی شبکه نامنظم مثلثی سه‌بعدی محدوده مورد مطالعه

جدول ۳. مقایسه نتایج برداشت داده‌های محدوده مورد مطالعه توسط سامانه پهباد و GPS سه‌فرکانسه

ابزار اندازه‌گیری	X (متر)	Y (متر)	Z (متر)
GPS سه‌فرکانسه	۵۲۷۷۹۱/۷۴۷۳	۳۶۰۱۰۲۷/۹۷۴۴	۱۹۳۳/۳۴۹۰
نرم‌افزار Agisoft PhotoScan	۵۲۷۷۹۱/۷۰۱۱	۳۶۰۱۰۲۸/۰۰۱۲	۱۹۳۳/۳۹۸۶
میزان اختلاف (خطا)	۰/۰۴۶۲	-۰/۰۲۶۸	-۰/۰۴۹۶

جدول ۴. جزئیات حجم و ذخیره کانسار شن و ماسه معدن قدس لنجان

پارامتر اندازه‌گیری	مقدار	واحد
محیط محدوده معدن	۴۲۰/۵۷	متر
مساحت سطح محدوده معدن	۱۱۹۳۵/۱۵	متر مربع
حجم ناحیه استخراج (تخلیه) شده	۲۶۱۲/۴۵	متر مکعب
ذخیره ناحیه استخراج (تخلیه) شده	۳۶۵۷/۴۳	تن
حجم کانسار باقی‌مانده	۵۹۲۴۴/۶۸	متر مکعب
ذخیره کانسار باقی‌مانده	۸۲۹۴۲/۵۵	تن

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از تکنیک فتوگرامتری بوسیله پهباد برای پایش فعالیت معدنکاری در معدن شن و ماسه لنجان اصفهان استفاده شد. با استفاده از این روش، مدلسازی سه‌بعدی کانسار صورت گرفت؛ حدود و مساحت سطح محدوده آن تعیین شد و به‌منظور پایش فرم و ریخت منطقه، نقشه‌های شیب و جهت شیب نیز ترسیم گردید. در این عملیات، سطح محدوده‌ای به مساحت ۰/۲۲ کیلومتر مربع در مدت زمان کوتاه ۳۰ دقیقه با خطای کلی نقاط کنترل در حدود ۶/۸ میلی‌متر پیمایش شد. میزان خطای برداشت محدوده مورد مطالعه توسط سامانه پهباد از طریق مقایسه با داده‌های نقطه چک زمینی برداشت شده بوسیله GPS سه‌فرکانسه بسیار دقیق، در سه راستای X، Y و Z بسیار ناچیز و کمتر از ۵ سانتی‌متر است که نتیجه بسیار مطلوبی می‌باشد. در زمان انجام پژوهش میزان ماده معدنی بهره‌برداری شده از معدن برابر با ۳۶۵۷/۴۳ تن و میزان ذخیره باقی‌مانده در معدن برابر با ۸۲۹۴۲/۵۵ تن محاسبه شد. علاوه بر مدلسازی کانسار و تخمین میزان ماده معدنی بهره‌برداری شده و باقی‌مانده معدن، نتایج بصورت نقشه‌ها و تصاویر سه‌بعدی نیز ارائه شد تا درک و تجسم درستی از وضعیت کانسار در شرایط فعلی صورت گیرد و بررسی تغییرات ایجاد شده در آن نسبت به حالت اولیه کانسار امکان‌پذیر باشد.

براساس نتایج پژوهش حاضر کارایی تکنیک فتوگرامتری بوسیله پهباد در زمینه علوم‌زمین نیز به اثبات رسید. ارائه

نتایج بصورت تصویری و در نتیجه امکان درک شرایط واقعی منطقه، امکان انجام عملیات در زمان‌های مختلف با دقت و سرعت عمل بالا به‌منظور مقایسه وضعیت کانسار با مراحل قبل و در نتیجه امکان نظارت، پایش و ارزیابی دایمی کانسار، از جمله مزایای بکارگیری این روش می‌باشد.

امروزه پژوهش‌های فتوگرامتری با پهباد عمدتاً بر روی ساخت پرنده‌های پیشرفته‌تر و دقیق‌تر متمرکز شده است. با رشد چشم‌گیر و پرشتاب پیشرفت‌های اخیر در زمینه ساخت تجهیزات پهبادی و تولید نرم‌افزاری، پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نه‌چندان دور مسیر رشد و ترقی این شاخه از علم با سرعت بیش‌تری طی شود، اغلب نقشه‌برداری‌ها با این روش صورت گیرد و کاربرد آن‌ها در زمینه‌های نیازمند تفکیک‌پذیری و دقت بالا بویژه پایش فعالیت‌های معدنی توسعه بیش‌تری پیدا کند.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از داوران محترم این نشریه که در جهت ارتقای کیفیت این مقاله، پیشنهادات ارزنده‌ای ارائه نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

### منابع

زاهدی، م.، صمدیان، م. ر (۱۳۵۵) نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ لنجان، شماره ۶، ۲۵۴، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

شرکت آيسان‌مپ، مشاور: شرکت افراز پيمایش پارس (۱۳۹۸)  
گزارش پروژه نقشه‌برداری معادن لاشتر اصفهان،  
[www.aysanmap.com](http://www.aysanmap.com)

شرکت طراح گراد سپاهان (۱۳۹۸) گزارش پروژه نقشه‌برداری  
معادن ماسه و آسفالت شمال ایران، استان مازندران، شهر  
مرزن‌آباد، [www.tarhgerad.ir](http://www.tarhgerad.ir).

همراه، م (۱۳۹۱) مبانی فتوگرامتری نقشه‌برداری هوایی،  
انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۶۳۵  
ص.

Eisenbeiss, H (2009) UAV Photogrammetry, Ph.D.  
Thesis, Eidgenössische Technische  
Hochschule Zürich (ETHZ) University,  
Zurich.

Gorkovchuk, D., Gorkovchuk, J., Hutnyk, B  
(2017) Exploring consumer-grade copters for  
quarry mapping low-cost UAS  
Photogrammetry for Mining”, GIM  
international. <https://www.gim-international.com/content/article/low-cost-uas-photogrammetry-for-mining>.

Herrera, M. J (2010) Mapping ground movements  
in open pit mining areas using differential  
SAR interferometry, *International Journal of  
Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (7):  
1114-1125.

Hirschmuller, H (2005) Accurate and efficient  
stereo processing by semi-global matching  
and mutual information, In the IEEE  
Computer Society Conference on Computer  
Vision and Pattern Recognition, San Diego.

Hirschmüller, H (2011) Semi-Global Matching  
Motivation, Developments and Applications,  
In Wichmann/VDE Verlag, Belin.

[https://www.researchgate.net/figure/Ground-control-points-and-checkpoints-a-The-design-of-the-GCP-configurations-4\\_fig3\\_316588344](https://www.researchgate.net/figure/Ground-control-points-and-checkpoints-a-The-design-of-the-GCP-configurations-4_fig3_316588344)  
[https://www.usgs.gov/faqs/what-are-digital-elevation-models-dems?qt-news\\_science\\_products=0#qt-news\\_science\\_products](https://www.usgs.gov/faqs/what-are-digital-elevation-models-dems?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products).

Lovitt, M. J (2017) Assessing the Value of UAV  
Photogrammetry for Characterizing Terrain in  
Complex Peatlands, *Remote Sensing*, 9,  
7:715, DOI:10.3390/rs9070715.

Moffitt, F. H., Mikhail, E. M (1980)  
Photogrammetry, Harper & Row, 648 pages.

Turner, L (2014) Direct georeferencing of  
ultrahigh-resolution UAV imagery, *IEEE  
Transactions on Geoscience and Remote  
Sensing*, 52 (5): 2738-2745,

Vollgger, S.A., Micklethwaite, S., Cruden, A.R  
(2015) Applications of UAVs in mining  
geology and mineral exploration. Conference:  
SEG, At Hobart.

## Monitoring, 3D modeling and determination of mines extracted reserves using photogrammetry by UAV, case study: sand and gravel mine of Ghods, Lanjan, Isfahan

R. Ahmadi<sup>1\*</sup> and K. Hasanpour<sup>2</sup>

1- Assist. Prof., Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak

2- B. S. Student, Surveying Engineering, Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak

\* Rezahmadi@gmail.com

Received: 2020/11/6 Accepted: 2021/1/18

### Abstract

Photogrammetry with UAV (unmanned aerial vehicle) is a fast, accurate and cost-effective approach to obtain high-resolution spatial information. Taking overlapped photos of the target, production of 3-D dense point cloud, digital elevation model and orthomosaic from the region surface as well as verifying their accuracy using a definite number of ground control points, are main stages of the process. In the present research, photogrammetry through UAV was used for monitoring, modeling and evaluation of exploited and residual ore reserve of Qods sand and gravel mine in Lanjan district of Isfahan. Based on dimensions and form of the region, nine flight lines with approximately 37m interspacing and 114m flight altitude were designed and traversed. The total number of photos taken from the region is 225 with 75% and 65% longitudinal and transverse coverage for the images, respectively. The number of six control points (five control points and one check point) were also scattered at the region so that the error range from -1.5 to 1.5mm with the total error of about 6.8mm is the appropriate precision. Total accuracy of the survey operation using the UAV was validated through comparing with ground check point via accurate three frequency GPS. The survey errors in the three coordinate directions are negligible, less than 5cm. At the end, the volume of exploited part and residual deposit was determined and with multiplying by average density ( $1.4 \text{ gr/cm}^3$ ), the amount of extracted and residual ore reserve was calculated 3657.43 and 82942.55 tones, respectively.

**Keywords:** Monitoring, 3D modeling and determination of mines reserve changes, Photogrammetry, UAV, Sand and gravel mine of Ghods, Lanjan, Isfahan