

مقاله مروری

استفاده از تکنولوژی پهباد ها در طراحی استخراج معادن روباز و زیرزمینی، وضعیت کنونی، چالش های پیش رو و چشم اندازهای آینده

امیرحسین واحدی^۱، علیرضا باغبانان^{۱*}، امین ازهری^۱، احمد رحمانی شهرکی^۱

^۱ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*عهدهدار مکاتبات: bagh110@iut.ac.ir

تاریخ دریافت: 21 فروردین ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: 14 مهر ۱۴۰۳

DOI : [10.22034/ANM.2024.21440.1632](https://doi.org/10.22034/ANM.2024.21440.1632)

این نسخه "پذیرفته شده پیش از انتشار" مقاله است که در نشریه روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، پس از طی فرایند داوری، برای چاپ، قابل پذیرش تشخیص داده شده است. این نسخه پس از اعلام پذیرش و قبل از فرایند ویراستاری به صورت آنلاین منتشر می شود. مقاله پس از طی فرایند آماده سازی و انتشار نهایی، از نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار خارج و در شماره ای مشخص در وب سایت نشریه منتشر می شود. صفحه آرایی و ویراستاری فنی باعث ایجاد تغییرات صوری در مقاله خواهد شد.

چکیده

فتوگرامتری دیجیتال در حال تبدیل شدن به یک روش رایج، پرکاربرد و پرطرفدار برای نقشه برداری و مدلسازی های زمین شناسی و برداشت ویژگی های توده های سنگی است که در معادن به طور گسترده استفاده می شود. چالش ثبت داده های زمین شناسی و ساختاری در مناطق غیرقابل دسترس معادن، حتی در صورت استفاده از روش های فتوگرامتری زمینی، کماکان پابرجاست. بنابراین مدل های ژئوتکنیکی معادن و بانک داده های ژئومکانیکی معادن به صورت مجموعه داده های ناقص باقی می ماند. حفاریات عظیم زیرزمینی نگهداری نشده مانند کارگاه های استخراج، پتانسیل ایجاد ریزش های بزرگ را دارند، اما با رفع خلاء های برداشت داده های ژئوتکنیکی در مناطق غیرقابل دسترس، می توان خرابی های احتمالی را از طریق تحلیل سینماتیکی ناپیوستگی های برداشت شده منطقه پیش بینی کرد. پیاده سازی عملیات و سهولت کار با این پهباد ها در معادن زیرزمینی و پیشرفت های اخیر در سیستم های تشخیص موانع، امکان بررسی های دقیق تر و انجام فتوگرامتری در معادن را فراهم کرده است. همواره مساله مدلسازی توده سنگ درزه دار مورد توجه متخصصان و مهندسان علم مکانیک سنگ بوده است، زیرا شناخت هرچه بهتر توده سنگ اثر مستقیم بر طراحی، هندسه معدن و سیستم نگهداری دارد. در این مطالعه مروری، ابتدا درآمدی بر اهمیت مطالعه درزه سنگها و عوامل موثر بر مکانیزم تشکیل آنها بیان شده و سپس مطالعات موردی از مدلسازی توده سنگ درزه دار با استفاده از داده های هوابرد از طریق پهباد ها ارائه شده است. همچنین چالش های استفاده از انواع پهباد ها در صنعت معدنکاری برای مطالعات پیش رو ذکر شده است.

کلمات کلیدی: فتوگرامتری، مدلسازی توده سنگ، مدلسازی سه بعدی، برداشت درزه ها

۱- مقدمه

تکنیک‌های سنجش از دور که معمولاً برای جمع‌آوری داده‌ها برای آنالیزهای ژئوتکنیکی استفاده می‌شوند و به منبعی قابل اعتماد برای جمع‌آوری داده‌های نقشه‌برداری و آنالیزهای مهندسی تبدیل شده‌اند [۱]. همچنین در بیشتر مواقع، داده‌های زمین‌شناسی را می‌توان از طریق همین تکنیک‌ها نیز جمع‌آوری کرد [۲]. با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور، مهندسان قادر به تعریف جهت‌ها و ساختارهای ناپیوستگی‌ها در توده سنگ و همچنین ایجاد بانک داده‌های قابل اعتماد برای ورودی‌های نرم‌افزار جهت تجزیه و تحلیل‌های مهندسی هستند [۳]. به طور معمول، تکنیک‌های سنجش از دور برای برداشت داده‌ها از مناطق بزرگ استفاده می‌شود که جمع‌آوری آن‌ها بدون کمک سنجش از دور زمان بیشتری از مهندسی و متخصصان گرفته و باعث افزایش زمان پروژه می‌شود. تکنیک‌های هوابرد و به طور کلی تکنیک‌های سنجش از دور، به دلیل توانایی در ثبت سریع اطلاعات به ویژه اخذ اطلاعات از مناطقی که دسترسی و مطالعه آنها دشوار است، بسیار پرکاربرد و سودمند هستند [۴].

در معدن کاری‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی و همچنین دشواری تولید بانک داده‌ی قابل اعتماد از داده‌های زمین‌شناسی به ویژه در مناطق غیرقابل دسترس معادن، اغلب ریسک قابل توجهی برای مخاطرات جانی و مالی وجود دارد [۵]. از این رو امروزه علم معدنکاری به سمت استفاده از تکنیک‌های برداشت از راه دور که دسترسی بهتر و هزینه‌های کمتری دارند پیش می‌رود. فتوگرامتری ابزار سنجش از دور سودمندی است که برای نقشه‌برداری و مدل‌سازی در معدنکاری و سایر علوم و صنایع به طور گسترده به ویژه در مناطقی که انسان نمی‌تواند به‌طور ایمن به آنها دسترسی پیدا کند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. مشکلات و مسائل ایمنی، فقدان تجهیزات مناسب، نیاز به نقشه‌برداری دقیق‌تر، بودجه محدود و محدودیت‌های زمانی همگی برهانی برای اجرای تکنیک‌های فتوگرامتری در کنار نقشه‌برداری‌ها و برداشت‌های سنتی است [۷]. اساس

کار در استفاده از این فرآیند تصویربرداری از راه دور، ساخت مدل‌های سه‌بعدی برای انجام تحلیل‌های کمی، به‌ویژه برای تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی است [۳]. اگرچه در علم فتوگرامتری اصطلاحات "نقشه‌برداری" و "مدل‌سازی" اغلب به جای یکدیگر استفاده می‌شوند، ولی باید توجه داشت که "مدل‌سازی" به ارائه یک مدل سه‌بعدی از هندسه توده سنگ اشاره دارد و "نقشه‌برداری" به اندازه‌گیری جهت‌داری و پارامترهای ساختاری که از مدل گرفته شده است اشاره دارد (به عنوان مثال شیب و جهت شیب یک درزه). اگر از تکنیک‌های سنتی مانند برداشت میدانی برای جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی استفاده شود، داده‌های نهایی برداشت شده باید توسط کارشناس ابتدا ثبت و سپس به نرم‌افزارهای پایین دستی وارد شوند تا بتوان از آنها استفاده نمود. که می‌تواند در یک نرم‌افزار برای تجزیه و تحلیل و برای کاربرد در سایر فرآیندهای طراحی در محل استفاده یا وارد شود [۳]. فتوگرامتری دیجیتال اجازه می‌دهد که ویژگی‌های ژئوتکنیکی برداشت و تعیین شده در قالب‌های قابل اجرا برای تجزیه و تحلیل و کاربرد در نرم‌افزارهای دیگر استخراج شوند [۶].

یکی از روش‌های محبوب و آسان که امروزه به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد روش ساختار ناشی از حرکت (SfM^1) می‌باشد. این روش یک تکنیک عکسبرداری و مدل‌سازی سه‌بعدی می‌باشد که با استفاده از چندین عکس از یک شی یک مجموعه سه‌بعدی از نقاط را ایجاد می‌کند که به سطح شی مربوط می‌شود و به آن مجموعه ابرنقاط گویند. این روش در علوم زمین برای نقشه‌برداری توپوگرافی، بررسی‌های زمانی و فضایی، زمین‌شناسی و تکتونیک و سایر مقاصد مهندسی به کار می‌رود. به طور کلی ساخت یک مدل سه‌بعدی هندسی از یک شی توسط تصاویر دو بعدی اخذ شده بر عهده این روش می‌باشد که به طور خلاصه و کلی مراحل (مانند ۱) تصویربرداری (۲) شناسایی ویژگی‌های موجود در تصویر (۳) تولید مجموعه ابرنقاط و (۴) پردازش ابرنقاط و تولید مدلسه بعدی را طی می‌کند تا با استفاده از

¹ Structure from Motion

یکسری عکس دو بعدی، یک مدل یکپارچه سه بعدی تولید کند. [۶].

سایر تکنیک‌های سنجش از دور قادر به برداشت داده‌های ساختاری در محیط‌های زیرزمینی نیز هستند، اما اغلب داده‌های تصویری رنگ‌های قرمز، سبز و آبی (Red Green Blue) را برای شناسایی مرزهای زمین‌شناسی ارائه نمی‌کنند. به عنوان مثال، سیستم‌های اسکنر لیزری می‌توانند داده‌های ابر نقطه‌ای سه بعدی را برای شناسایی هندسه‌های توده سنگ فراهم کنند، اما این سیستم‌ها نیاز به گرفتن عکس‌های تکمیلی جداگانه برای مدل‌سازی داده‌های رنگی بر روی ابر نقاط را دارند [۳، ۸]. روش دیگر، فتوگرامتری با ثبت داده‌های ساختاری و تولید تصاویر در یک فرآیند تصویر برداری می‌باشد، در این تکنیک ابر نقطه‌ای که با استفاده از فتوگرامتری ایجاد می‌شود ذاتاً دارای مقادیر RGB است که بر روی هر نقطه نمایش داده می‌شود و رنگ واقعی هدف مورد نظر را نشان می‌دهد [۸]. با پیشرفت‌های تکنولوژیکی کنونی در دوربین‌های دیجیتال، فتوگرامتری به تدریج کیفیت بالاتر و خروجی‌های مطلوب‌تری را برای شناسایی ساختارها در مدل‌های سه بعدی توده‌های سنگ به دست می‌دهد. امروزه وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین (پهپادها) با دوربین‌های دیجیتال برای تکنیک‌های ثبت داده‌های سنجش از راه دور برای بازرسی، تجزیه و تحلیل پوشش گیاهی، محاسبات حجمی، مطالعات تطبیقی بر اساس تغییرات در طول زمان، نظارت بر پیشرفت پروژه، ارزیابی پایداری شیب و سایر کاربردهای مهندسی استفاده می‌شود [۹-۱۱]. فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد با مقرون به صرفه تر شدن و کاربرپسندتر شدن پهپادها، دوربین‌های مخصوص پهپادها و توسعه نرم افزارهای فتوگرامتری روز به روز رایج تر می‌شود [۱۱]. استفاده از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد، جمع آوری سریع داده‌ها را امکان پذیر می‌کند، به ویژه در مناطقی که کاربر امکان دسترسی ایمن به آن مناطق را دارا نباشد [۹]. علاوه بر این، نرم‌افزارهای فتوگرامتری در مقایسه با عکس‌های زمینی با دقت بیشتر به سمت یکپارچه‌سازی تصاویر مبتنی بر پهپاد طراحی شده‌اند. در حوزه ژئوتکنیکی، پهپادها برای شناسایی مکان‌های پرتانسسیل از نظر زمین‌شناسی و ارزیابی پایداری شیب، اندازه‌گیری ابعاد ساختارها و نقشه‌برداری

ویژگی‌های زمین‌شناسی توده‌های سنگی در مناطق مورد مطالعه استفاده شده‌اند [۱۱، ۱۲].

با پیشرفت تکنولوژی، مدل‌های زمین‌شناسی سه بعدی و کاربردهای ذاتی آن‌ها در صنعت با داده‌های با وضوح بالاتر که با سرعت‌های بالاتری نیز گرفته می‌شوند، پیشرفت کرده‌اند [۱۳]. همچنین، با تحقیقات بیشتر در مورد حسگرهای تشخیص موانع، به ویژه در صنایع خودروسازی و ساخت دستگاه‌های خودکنترل (مانند اتومبیل‌های خودران)، حسگرها به گونه‌ای تکامل یافته‌اند که تنظیم دقیق تری داشته باشند و به طور مؤثر اجسامی را که در مسیر حسگر قرار دارند، شناسایی کرده و از آنها دوری کنند. پیشرفت در حسگرهای مانع‌گریز و دوربین‌های سوار بر پهپاد، پتانسیل استفاده از پهپادها برای نقشه برداری از مناطقی که برای انسان قابل دسترسی نیستند را فراهم می‌کند. امروزه مبحث برداشت درزه‌ها و طراحی الگوهای آتشفشانی به شکل دقیق و اصلاح پذیر یکی از موضوعات چالش برانگیزی است که در معادن مورد بحث می‌باشد که با توجه به ویژگی قابل ملاحظه‌ای که روش فتوگرامتری در بصری سازی واستخراج درزه‌ها دارد، امروزه روش‌های گسترده‌ای برای تلفیق مدل‌های سه بعدی فتوگرامتری و طراحی الگوهای آتشفشانی توسعه داده شده است.

هدف از این تحقیق، مروری بر ارزیابی قابلیت استفاده از تصاویر و فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد برای مدل‌سازی و نقشه‌برداری توده‌های سنگی قابل دسترس و غیرقابل دسترس در معادن روباز و زیرزمینی است. با پیشرفت روز به روز کد های کامپیوتری و بکارگیری الگوریتم‌های پیچیده و کاربردی پردازش‌های گرافیکی و توسعه تکنیک فتوگرامتری در علوم مختلف، پژوهشگران زیادی در سراسر دنیا در تلاش هستند تا از این تکنیک در جهت بهبود دهی و تسریع فرآیند های کاری خود کمک بگیرند. در این رابطه در حیطه معدنکاری نیز پژوهشگرانی با انتشار نتایج تحقیقات خود این زمینه علمی و اشتراک گذاری آنها راه را برای توسعه و تعمیق مدلسازی در معادن فراهم آورده‌اند که انگیزه این مطالعه مروری بوده است. یکی دیگر از اهداف مهم این گرد آوری بدست آوردن اطلاعات جامعی از روش‌های گوناگون حل مسائل مختلف در

به مهندسین معدن و مکانیک سنگ در صحت داده ها، طراحی کارآمدتر و افزایش ایمنی در طراحی نهایی بسیار موثر باشد. یکی از اهداف مدلسازی توده سنگ های درزه دار ساخت مدل های سه بعدی رقومی و تحلیل آنها برای امور مربوط به طراحی های مهندسی و انجام تحلیل های عددی در فاز های مختلف پروژه می باشد. این روش در عمل به متخصصین و مهندسان این آزادی عمل را میدهد که بتوانند با سهولت و ایمنی بالاتر تعداد زیادی از درزه های یک محیط سنگی را در زمان کمتر برداشت کنند. نتایج این برداشت ها هرچقدر با دقت بیشتری انجام شود در جنبه های مختلف و مدلسازی های آتی مانند مدل سازی جریان سیال، مدلسازی شبکه شکستگی مجزا و تحلیل پایداری تاثیر مستقیمی خواهند داشت.

همواره مدلسازی و تحلیل رفتاری توده سنگ های درزه دار دغدغه اصلی مهندسان و متخصصان مکانیک سنگ بوده است و در دهه های گذشته همواره تلاش برای شناخت توده سنگ های درزه دار ادامه داشته است. در طی دوره رشد و ظهور روش فتوگرامتری، مهندسان و متخصصان تلاش بر آن داشته اند که بتوانند با توسعه تکنولوژی و دستگاه های نوین مدلهای با کیفیت تری را از تصاویر دوبعدی استخراج کنند. در این میان فاکتور های زیادی برای تعیین کیفیت تصاویر و مدلها محاسبه و توسعه داده شده است که یکی از آنها GSD^1 میباشد. که به معنی فاصله نمونه برداری زمینی است این عبارت به فاصله ی بین دو مرکز پیکسل متوالی بر روی زمین اشاره دارد. به عبارت ساده، GSD به اندازه ی هر پیکسل تصویر ارتو بر روی زمین اشاره می کند. هر چه ابعاد GSD بزرگتر باشد، وضوح تصویر کمتر و جزئیات محدودتری قابل مشاهده است GSD ، رابطه مستقیمی با ارتفاع پرواز دارد، بطوری که برای یک دوربین هر چه ارتفاع پرواز بیشتر باشد، مقدار GSD نیز بزرگتر خواهد شد.

در مدلسازی توده سنگ ها و درزه سنگها همواره هدف بر آن بوده است که با بهبود کیفیت تصاویر و بهتر شدن کیفیت دوربین ها و نرم افزار های این حیطه، مدلهایی با کیفیت بالاتر و تحلیل هایی با دقت بیشتر ارائه شود تا بتواند

زمینه فتوگرامتری است. به این منظور با تغییر دادن فرضیات یک مسئله میتوان از روش های گوناگونی اعم از پیچیده و ساده برای حل آن بهره گرفت و داشتن این روندنماهای گوناگون مورد استفاده در پژوهش های مختلف میتواند اشراف کاملی بر انواع روش های کار در تحقیقات آینده به عمل آورد.

۲- هدف از مدلسازی توده سنگ درزه دار و اهمیت برداشت های دقیق در طراحی های مهندسی

درزه ها عبارتند از ناپیوستگی هایی که غالباً در سنگ ها مشاهده می شود. درزه نگاری یکی از مهمترین روشهای شناخت محیط (توده سنگ) در علم زمین شناسی ساختاری می باشد. مطالعه درزه ها در بسیاری از کارهای مهندسی ضرورت دارد، به عنوان مثال، هنگام استخراج سنگ های ساختمانی به خصوص سنگ هایی که بایستی در بلوک های بزرگ استخراج شوند، شناسایی درزه های محل، ضروری است [۱۴، ۱۵]. هنگام انتخاب محل تونل های راهسازی و معدنی بایستی قبلاً وضعیت درزه های محل مورد بررسی قرار گیرند، زیرا وجود آنها هم در امر حفاری و پیشروی و هم نگهداری تونل حفر شده می تواند باعث بروز مشکلات ناپایداری شود. لذا اطلاع از وجود درزه ها در همه ی کارهای مهندسی مرتبط با زمین از قبیل معدنکاری، تونلسازی، سد سازی و فعالیت های عمرانی در مقیاس بزرگ بسیار ضروری است.

چندین روش برای درک و تشخیص وضعیت درزه ها برای مهندسین و متخصصین وجود دارد. از جمله آنها می توان به روش خط برداشت، اسکن لیزری و روش فتوگرامتری اشاره کرد. روش فتوگرامتری نسبت به دو روش ذکر شده مزیت و برتری هایی نظیر سرعت بالاتر، دسترسی سریع تر، هزینه کمتر را دارا می باشد و همچنین تعداد داده های بیشتری را میتوان با استفاده از فتوگرامتری از وضعیت توده سنگ به دست آورد. روش فتوگرامتری که روشی مبتنی بر تصویر برداری و پردازش تصاویر است، امروزه در سایر علوم و صنایع مانند صنایع هوایی، صنایع خودرو سازی و جا به جایی سنجی نیز کاربرد های فراوانی پیدا کرده است. لذا فراگیری روش فتوگرامتری در صنعت معدنکاری و درزه نگاری میتواند

پهپادها نیز بعنوان ابزاری کارآمد در صنعت معدن، مراحل فرآیند معدنکاری در هر سه مرحله ی اکتشاف، بهره برداری و بازسازی پس از معدنکاری تقسیم کرد [۲۰]. در مرحله اکتشاف، کانسار مورد مطالعه توسط گروهی متخصص متشکل از کارشناسان زمین شناسی مانند زمین شناسان، کانی شناسان و ژئوفیزیکدانان شناسایی می شود. در مرحله بهره برداری، زیرساخت های تولید مواد معدنی ایجاد شده و مواد معدنی با استفاده از تجهیزات سنگین استخراج می شود. در نهایت، در مرحله بازسازی، کلیه مواد نامطلوب مانند ضایعات، باطله‌ها و خاک‌های سطحی آلوده از منطقه معدن حذف می‌شوند و سطح زیرزمینی به طور مناسب با مواد سنگی پر می‌شود [۲۱]. از آنجایی که پهپادها را می توان به دستگاه های نوری، دوربین هایی که محدوده های مختلف طیف الکترومغناطیسی را پوشش می دهند و ابزارهای ژئوفیزیکی مانند حسگرهای مغناطیسی و طبیعی اشعه گاما مجهز کرد، می توان از آنها برای اهداف مختلفی مانند نقشه برداری زمین شناسی و توپوگرافی، محاسبه احجام و بلوک ها و حجم ذخایر، و نظارت مربوط به ایمنی پله های معادن، حمل و نقل جاده ای، و سدهای باطله استفاده کرد. مطالعات زیادی در زمینه فناوری پهپاد در صنعت معدن انجام شده است.

کرس و همکاران [۲۲] یک روند نمای کاری و کاربردی برای استفاده از سیستم های هوایی بدون سرنشین در بررسی های زمین شناسی انجام شده در ایالات متحده را ارائه کردند. آنها همچنین کاربردهای عملی مانند نظارت بر معادن و باطله ها را ارائه کردند. لی و چوی [۲۳] روندها و کاربردهای فناوری پهپاد در صنعت معدن را بررسی کردند. به طور خاص، در این مطالعات استفاده از پهپاد برای بررسی های توپوگرافی به طور مفصل ارائه شده است. یون یونگ [۲۴] توضیح مختصری در مورد نحوه استفاده از پهپادها در هر مرحله از توسعه معدن ارائه کرد. رن و همکاران [۲۵] مطالعات موردی در مورد استفاده از پهپادها برای عملیات معدنکاری، مانند نقشه برداری زمین و مدل سازی سه بعدی، ارزیابی آسیب، پایش محیط زیستی و پایش آلودگی های ناشی از معدنکاری را بررسی کردند. بوچینسکا [۲۶] چند مورد را که در آن از پهپادها در مرحله احیا استفاده شده بود، مرور کرد و درینگ

علاوه بر بهبود ایمنی در محیط های کاری و کاهش هزینه های پروژه های صنعتی گامی در پیشبرد مرزهای دانش نیز برداشت [۱۴، ۱۶، ۱۷].

برداشت های دقیق با جزئیات هرچه بیشتر و با کیفیت بالا باعث میشود داده های با کیفیت تری از مدل سه بعدی نهایی استخراج گردد و در نتیجه داده هایی که در مراحل بعدی طراحی های مهندسی وارد میشود از صحت بالاتری برخوردار باشند. لذا یک مورد از مهمترین مواردی که بر صحت و دقت مدل نهایی تاثیر گذار است کالیبره بودن دوربین و انجام فرایند کالیبراسیون میباشد که با توجه به اهمیت این عملیات، امروزه در نرم افزار های مدلسازی مانند AGIsoft این عملیات به صورت خودکار بر روی تصاویر تجزا و خطا های اپتیکال حذف میگردند. برای اسکیل و جهتدار کردن مدل سه بعدی در نرم افزار های سه بعدی سازی مانند AGIsoft، می توان از روش های مختلفی استفاده نمود، از جمله این روش ها میتوان به مقیاس دهی با استفاده از فاصله بین دو نقطه، نقطه کنترل، مقیاس بار، تدقیق با استفاده از نقطه کنترل، سیستم مختصاتی و فرمت های خروجی اشاره کرد. این روش ها اجازه می دهند مدل سه بعدی را با دقت و صحت بالا مقیاس دهی کرد.

۳- کاربردهای روش تصویر برداری توسط پهپاد در معدنکاری

در سال های اخیر، پهپاد ها برای اهداف مختلفی مانند بازرسی های ایمنی، نظارت و کنترل و کمک به تصمیمات مدیریتی، نظارت بر عناصر سیستم های زیرساختی، پایش محصولات نهایی، نقشه برداری های هوایی، پایش وضعیت آب، طبقه بندی کاربری اراضی، کمک های بشردوستانه و امداد رسانی در بلایا، حفاظت، مراقبت های بهداشتی، پایش بینی آب و هوا و مخابرات مورد استفاده قرار گرفته اند [۱۸]. استفاده از پهپادها و تحقیقات مرتبط با آن به دلیل کاهش قابل توجه هزینه در وسایل نقلیه و حسگرها و همچنین پیشرفت های قابل توجه در نرم افزار پردازش داده ها در صنایع مختلف در حال گسترش است [۱۹].

معادن روباز که به سرعت در حال پیشرفت هستند، پایش و نقشه برداری از جمله مهمترین نگرانی‌های مدیریتی در این معادن میباشند زیرا نقشه برداری توپوگرافی به تجهیزات نقشه برداری گران قیمت (دستگاه توتال و اسکنر لیزری زمینی) و تکنسین‌های حرفه‌ای نیاز دارد. با این حال، در صورت استفاده از پهپاد، می‌توان با بودجه‌ای معقول، به سرعت منطقه وسیعی از معدن روباز را تحت بررسی قرار داد. اکثر مطالعاتی که در اینجا بررسی شدند، عکس‌های هوایی را با استفاده از پهپاد به دست آوردند و از این عکس‌ها برای تولید مدل‌های سطحی و حجمی و مدل‌های سه بعدی معدن روباز استفاده کردند.

وانگ و همکاران [۲۸] کارایی پهپادهای کم ارتفاع را برای به دست آوردن تصاویر با وضوح بالا برای بازسازی هندسه یک معدن روباز بررسی کردند. علاوه بر این، خطای نسبی از طریق مقایسه مدل‌های رقومی سطحی تولید شده از ابر نقطه پهپاد و آنهایی که از داده‌های اسکنر لیزری زمینی تولید می‌شوند، ارزیابی شد. آن‌ها ابرهای نقطه‌ای پهپاد را از طریق تکنیک‌های مدل‌سازی تصویر، مانند الگوریتم استریوی چند نمایشی توسعه دادند و سپس یک مدل رقومی سطحی را از منطقه مورد مطالعه توسعه دادند. با مقایسه این نتایج با مدل رقومی سطحی تولید شده بر اساس داده‌های اسکنر لیزری، نقشه اختلافات سه بعدی بر اساس مدل رقومی سطحی نشان داد که بیشترین انحراف کمتر از ± 4 متر و خطای نسبی حجم ۱.۵۵٪ بوده است.

چو و همکاران [۲۹] کاربرد مثلث بندی هوایی را با استفاده از یک پهپاد کوچک محیط یک معدن استفاده و کارایی آن را تایید کردند. برای رسیدن به این هدف، یک معدن اسمکتیت واقع در کره مورد بررسی قرار گرفت. آنها از شش موقعیت کنترل زمینی برای انجام مثلث بندی هوایی برای منطقه مورد مطالعه استفاده کردند. علاوه بر این، ۴۴۸ عکس هوایی در منطقه اندازه گیری به ابعاد 600×380 متر برداشت شد و مدل زمین به صورت سه بعدی با استفاده از این اطلاعات ساخته شد. مشاهده شد که استفاده از موقعیت های کنترل زمینی یک مثلث هوایی با دقت کمتر از ۱ سانتی متر را امکان پذیر می کند.

و همکاران [۲۷] بررسی ساختار مدلسازی مبتنی بر پهپاد را انجام دادند که می‌تواند برای نقشه‌برداری و تجزیه و تحلیل دایک‌ها و سنگ‌های میزبان از آن‌ها استفاده شود. هدف از این بخش بررسی مقالات در مورد کاربردهای پهپاد در معدن و به دنبال آن مدلسازی توده سنگ‌های درزه دار است. کیفیت مدل‌های سه‌بعدی ایجاد شده در فوتوگرامتری هوایی به شدت توسط روش‌های تصویربرداری استفاده شده تحت تأثیر قرار می‌گیرد. کیفیت این تصاویر مستقیماً بر دقت و جزئیات مدل سه‌بعدی نهایی تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، وضوح و همپوشانی تصاویر می‌توانند بر میزان جزئیات ثبت شده تأثیر بگذارند، با وضوح بالاتر و همپوشانی بیشتر، مدل‌های سه‌بعدی با دقت و جزئیات بیشتر ایجاد می‌شوند. علاوه بر این، نوع دوربین استفاده شده و الگوهای پرواز نیز می‌توانند بر کیفیت مدل سه‌بعدی تأثیر بگذارند. برای مثال، استفاده از دوربین‌های با وضوح بالا و الگوهای پرواز منظم می‌توانند دقت مدل را بهبود بخشند. علاوه بر این، نرم‌افزار پردازش استفاده شده برای همپوشانی و ترکیب تصاویر نیز می‌تواند بر کیفیت نهایی مدل سه‌بعدی تأثیر بگذارند. بنابراین، توجه دقیق به این عوامل ضروری است تا مدل‌های سه‌بعدی با کیفیت بالا در فوتوگرامتری هوایی ایجاد شود.

لذا سوالات پژوهشی زیر برای رسیدن به این هدف طبقه بندی شده است و پاسخ به این سوالات در جهت پیشبرد این تحقیق ضروری است:

- کاربردهای فعلی پهپادها در استخراج معادن در فاز بهره برداری روباز و زیرزمینی و پایش شیب های سنگی چیست؟
- عمدتاً از چه نوع پهپادهایی در معدن استفاده شده است؟
- چه نوع داده هایی توسط تصاویر پهپاد ها برای کاربردهای مدلسازی در معدن به دست آمده است؟
- چه مقیاس هایی از منطقه هدف برای کاربردهای پهپاد در معدن انتخاب شده است؟

۳-۱ کاربرد های پهپاد در نقشه برداری توپوگرافی در معادن روباز

معدن است، می‌تواند به دقت چند سانتی‌متری دست یابد. مقایسه بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از تصویر عمود بر سطح و مایل با بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از ایستگاه گذاری، مزیت توصیف بهتر هندسه معدن، ناپیوستگی‌های سطحی و دیواره‌های شیب دار را نشان داد.

چریکو و دوايت [۳۴] اثربخشی استفاده از ارتوموزاییک با وضوح بالا و مدل رقومی سطح‌های به دست آمده را در نقشه برداری و نظارت بر سایت‌های معدن در غرب آفریقا ارزیابی کردند. هدف اصلی این مطالعه توسعه داده‌های جغرافیایی دو بعدی و سه بعدی است که می‌تواند برای مشاهده عمق معدن و تشخیص ویژگی‌های سایت‌های معدن مورد استفاده قرار گیرد. آنها رتوموزاییک‌ها و مدل رقومی سطحی با وضوح بالا را با استفاده از ویژگی‌های زاویه دید دوربین و میدان باریک سیستم دید دوربین جمع‌آوری نموده و آنها را مقایسه کردند. مشاهده شد که با استفاده از تصاویر هوایی و فناوری فتوگرامتری می‌توان مدل رقومی سطح‌هایی با دقت و صحت بالا تهیه کرد.

گیل و همکاران [۳۵] تجزیه و تحلیل فضایی را برای بهینه‌سازی مکان نقاط شبکه مورد مطالعه در یک معدن روباز انجام دادند. آنها از پهپادها برای عکاسی هوایی و از نرم افزار Quantum GIS برای تحلیل فضایی استفاده کردند. ابتدا یک عکس هوایی با استفاده از پهپاد گرفته شد و بر این اساس، یک مدل زمینی دیجیتال تولید شد. این مدل شامل ارتفاعات، پستی و بلندی‌ها، سایر عناصر جغرافیایی و ویژگی‌های طبیعی مانند رودخانه‌ها و خط‌الراس‌ها می‌باشد. با این حال، ارتفاع سطوح انعکاسی درختان، ساختمان‌ها، و سایر ویژگی‌های زمین که توسط مدل رقومی سطحی ارائه شده است را نشان نمی‌دهد. پس از آن، یک تجزیه و تحلیل برای یک معدن روباز با استفاده از برنامه Quantum GIS و DEMs انجام شد. تجزیه و تحلیل فضایی نشان داد که استفاده از برنامه به طور قابل ملاحظه‌ای انتخاب اولیه مکان برای نقاط را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، مطالعات مختلفی برای اندازه‌گیری پارامترهای گوناگون در معادن روباز با استفاده از پهپاد با تجزیه و تحلیل نتایج انجام شده است.

تچارف و همکاران [۳۶] یک الگوریتم برای بازسازی خودکار مبتنی بر تصویر پیشنهاد کردند که می‌تواند

لی و چوی [۳۰، ۳۱] بررسی‌های توپوگرافی معادن روباز مختلف را با استفاده از پهپادهای بال چرخشی و بال ثابت انجام دادند. عکس‌های هوایی از منطقه مورد مطالعه به دست آمد، و تصاویر ارتوموزائیک و مدل‌های سطحی دیجیتال با استفاده از آنها تولید شد. علاوه بر این، مختصات موقعیت اندازه‌گیری شده با استفاده از یک سیستم موقعیت‌یابی جهانی تفاضلی با توجه به نقطه مرجع زمین با موارد استخراج‌شده از طریق فتوگرامتری پهپاد مقایسه شد. ریشه میانگین مربعات خطا، مختصات X ، Y و Z برابر ۱۰ سانتیمتر برای پهپاد بال چرخشی و برابر ۱۵ سانتی‌متر برای پهپاد بال ثابت بود. پهپادهای بال ثابت و بال چرخشی در ویژگی‌هایی مانند ارتفاع پرواز، سرعت، زمان و عملکرد دوربین‌های متصل متفاوت هستند. لی و چوی [۳۲] نتایج حاصل از فتوگرامتری هوایی را که برای هر نوع پرده متفاوت بود را در همان منطقه مورد مطالعه قرار دادند. برای دستیابی به این هدف، یک سایت ساخت و ساز به عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین شد. تصاویر ارتوموزائیک و مدل رقومی سطحی با وضوح ۴ سانتی‌متر بر پیکسل با استفاده از عکس‌های هوایی به دست آمده تولید شد. علاوه بر این، مختصات بر روی زمین با استفاده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی تفاضلی برای هفت نقطه کنترل زمینی اندازه‌گیری شد. از مقایسه بین بررسی هوایی و بررسی زمینی، ریشه میانگین مربعات خطا تقریباً ۱۰ سانتی‌متر بدست آمد. پهپاد بال ثابت خطای نسبتاً ناچیزی را هنگام مقایسه نتایج دو نوع نقشه برداری هوایی نشان داد.

روسی و همکاران [۳۳] روشی را برای بازسازی زمین معدن با استفاده از عکس‌های هوایی عمود بر سطح و مورب که با استفاده از پهپاد برداشت شده بود، پیشنهاد کردند و پس از آن یک تحلیل امکان‌سنجی انجام دادند. آنها معدنی در منطقه‌ای باری واقع در جنوب ایتالیا را به عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین کردند. ابتدا از تصاویر عمودی استفاده شده است و سپس تصاویری را که از زوایای متفاوت به دست آمده بودند اضافه کردند. آنها همچنین مجموعه دقیق نقاط کنترل زمینی را برای ارجاع جغرافیایی و اعتبارسنجی فرآیند بررسی کردند. مشاهده شد که موقعیت‌نهایی ابرهای نقطه‌ای که نمایانگر هندسه‌ی اصلی محیط معدن در بازسازی توپوگرافی

Pigada در ساردینیا، ایتالیا و برای ارزیابی تغییرات در سطح معدن استفاده کردند. در جدول ۱، تحقیقات گذشته بررسی شده در مورد کاربرد پهپادها در نقشه برداری توپوگرافی در مرحله بهره برداری معدنی خلاصه شده است.

۲-۳ استفاده از پهپادها در تجزیه و تحلیل شیب های سنگی

پهپادها را می توان برای تجزیه و تحلیل شیب سنگی از جمله تجزیه و تحلیل پایداری و ناپیوستگی شیب های سنگی که دسترسی مستقیم به آنها چالش برانگیز است و طبقه بندی سنگ شناسی توده سنگ ها استفاده کرد. تمام کارهای تحقیقاتی موجود بررسی شده در این بخش از عکس های هوایی مبتنی بر هواپیماهای بدون سرنشین برای نقشه برداری از دیواره ها برای سهولت در کار درزه نگاری، تجزیه و تحلیل ویژگی های شیب های سنگی و بررسی زمین لغزش ها استفاده می کند. پهپادها در حوزه معدنکاری به منظور ایمنی و مدیریت ریسک به کار گرفته می شوند. آنها در پایش جابجایی سطح معدن، پایش پایداری، محیط کار، عملیات حفاری و انفجار و عملیات دپوی ضایعات معدن کاربرد دارند. پهپادها در شناسایی خطرات و منابع خطر در معدن و پایش فرونشست زمین برای جلوگیری از تخریب ساختارها و آسیب زیست محیطی ناشی از استخراج زغال سنگ نقش دارند. آنها همچنین در شناسایی تغییر شکل ها در معادن روباز و زیرزمینی برای ایمنی و نگهداری تولید و نقشه برداری فرونشست چاله های فرو ناشی از فعالیت های معدنی برای ارزیابی ریسک به کار می روند

مدل های سه بعدی دقیق را از تصاویر هوایی گرفته شده توسط پهپادها و مجموعه داده های چند نمای نامرتب تولید کند. آنها جریان کار پیشنهادی را در یک معدن روباز اعمال و نشان دادند.

ژيانگ و همکاران [۳۷] یک معدن روباز را در پکن، چین، به عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین کردند و دو بار با استفاده از پهپاد برای ارزیابی تغییرات ژئومورفیک، عکس های هوایی با وضوح بالا گرفتند سپس مدل های رقومی را از طریق فتوگرامتری تولید کردند. سطح معدن روباز با محاسبه تفاوت بین دو مدل رقومی بر اساس الگوریتم سلول به سلول مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

برتا و همکاران [۳۸] عدم قطعیتی را که ممکن است در مدل های رقومی سطحی بدست آمده از طریق فتوگرامتری پهپاد ظاهر شود، ارزیابی کردند. برای دستیابی به این هدف، فتوگرامتری هوایی پهپاد در یک معدن روباز کوچک واقع در جنوب برزیل انجام شد. سپس، آن را با یک روش پیمایشی با استفاده از حسگر های تدقیق کننده ی مختصات و اسکن لیزری مقایسه شد.

کراشاک و همکاران [۳۹] فتوگرامتری را با استفاده از یک پهپاد تجاری ارزان قیمت در معادن روباز انجام دادند و دقت مدل های رقومی ارتفاعی ساخته شده از این طریق را ارزیابی کردند. گی و همکاران [۴۰] نتایج مطالعه انجام شده با استفاده از پهپادها در معدن روباز اولان و معدن زیرزمینی Tahmoor در نیو ساوت ولز (NSW)، استرالیا را ارائه کردند. آنها از یک پهپاد برای ارزیابی حجم ذخایر، نظارت بر ایمنی و پایداری دیواره های شیبدار مرتفع و فرونشست معادن زیرزمینی در این معادن استفاده کردند.

اسپوزیتو و همکاران [۴۱] از فتوگرامتری پهپاد برای تعیین کمیت حجم استخراج شده در معدن روباز Sa

جدول ۱: خلاصه ای از کاربردهای پهپاد برای نقشه برداری توپوگرافی در معادن روباز

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهپاد	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه ای هدف	سبک کنترل پرواز
وانگ و همکاران [۲۹]	۲۰۱۴	تجزیه و تحلیل دقت هندسه ۳ بعدی تولید شده از تصاویر پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	توسط اپراتور

چو و همکاران [۲۸]	۲۰۱۵	بررسی قابلیت کاربرد مثلث هوایی در محل با استفاده از تصاویر پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده
لی و چوی [۳۰]	۲۰۱۵	بررسی توپوگرافی معدن روباز	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
لی و چوی [۳۱]	۲۰۱۵	بررسی توپوگرافی معدن روباز	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز نیمه خودکنترل
چو و همکاران [۲۸]	۲۰۱۵	بررسی ویژگی‌های معادن روباز با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و متریک منظر	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
تجارف و همکاران [۳۶]	۲۰۱۵	پیشنهاد گردش کار برای بازسازی مبتنی بر تصویر که می‌تواند مدل‌های سه بعدی دقیق ایجاد کند	هر دو	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
لی و چوی [۳۲]	۲۰۱۶	مقایسه فتوگرامتری هوایی با استفاده از دو نوع پهپاد موجود	هر دو	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز نیمه خودکنترل
کرشاک و همکاران [۳۹]	۲۰۱۶	ارزیابی دقت مدل ارتفاعی دیجیتال مبتنی بر پهپاد (DEM)	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده
گی و همکاران [40]	۲۰۱۶	ارزیابی حجم، نظارت بر ایمنی دیواره‌ها و نقشه برداری از معدن زیرزمینی با استفاده از پهپاد	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
روسی و همکاران [۳۳]	۲۰۱۷	روش پیشنهادی برای بازسازی توپوگرافی با استفاده از تصاویر نادیر و مایل	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
چیریکو و دوایت [۳۴]	۲۰۱۷	ارزیابی ارتو تصویر با وضوح بالا و مدل رقومی سطحی به دست آمده از فتوگرامتری	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده
اسپوزیتو و همکاران	۲۰۱۷	کمی سازی حجم استخراج شده، ارزیابی تغییرات سطح با استفاده از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد	هر دو	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
ژیانگ و همکاران [۳۷]	۲۰۱۸	تولید مدل رقومی و آنالیز سطح معدن از طریق فتوگرامتری پهپاد	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
برتا و همکاران [۳۸]	۲۰۱۸	ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های سطح دیجیتال قابل دستیابی از طریق فتوگرامتری پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده
گیل و همکاران [۳۵]	۲۰۱۹	بهینه سازی مکان نقاط شبکه رصدی در یک معدن روباز با استفاده از عکس هوایی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان نشده

وزن با یک دوربین فیلمبرداری مینیاتوری که به پرواز و نشست آن به صورت عمودی است، استفاده کردند. ابتدا عملکرد سیستم با گرفتن عکس‌های هوایی از شهر مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس کاربرد واقعی در معدن Wollastonite در انتاریو، کانادا ارزیابی شد. در این کار،

مک لئود [۴۲] و مک لئود و همکاران [۴۳] امکان به دست آوردن یک ابر نقطه سه بعدی از تصاویر ویدئویی به دست آمده با یک پهپاد را با استفاده از یک نرم افزار فتوگرامتری مورد مطالعه قرار دادند. آنها از یک پهپاد سبک

برتا و همکاران [۴۶] سنگهای موجود در معادن روباز را با استفاده از فتوگرامتری پهپاد و الگوریتم‌های هوشمند طبقه بندی کردند. آنها ابتدا زمین را از طریق فتوگرامتری هوایی با استفاده از پهپاد مدل‌سازی کردند. سپس، یک ابر نقطه‌ای ایجاد کردند که نشان دهنده و نماینده منطقه معدن است. منطقه به چهار گروه دیوریت، گرانیت، خاک و پوشش گیاهی طبقه بندی شدند. الگوریتم‌های عمومی برای دسته بندی ابر نقطه به چهار کلاس استفاده شد. تجزیه و تحلیل نتایج هر الگوریتم یادگیری ماشین نشان داد که الگوریتم بردار پشتیبان با تابع پایه‌ی شعاعی بالاترین دقت را دارا می‌باشد. این نتیجه تأثیر تغییرپذیری را بر هر نوع شناسایی بصری بر روی مواد سنگی نشان می‌دهد. مسئله نمونه‌برداری منظم در سه بعد که در آن نمونه‌ها را نمی‌توان مستقیماً در نماهای مختلف برداشت کرد، با نمونه‌های شبه منظم، با فاصله بین نقاط شناور که تقریباً برابر با میانگین فاصله ابر متراکم اولیه است، حل شده است [۷۶].

کاتوروژاو بیرچ [۴۷] از فناوری پهپاد برای نقشه برداری جبهه کار معادن روباز استفاده کردند و اثربخشی آن را نشان دادند. این مطالعه در استان Mpumalanga، آفریقای جنوبی انجام شد. این دیواره‌ی بزرگ با استفاده از تکنیک فتوگرامتری دیجیتال مبتنی بر پهپاد، مدل‌سازی و برداشت شد. داده‌های خام به دست آمده توسط سیستم تصویر برداری هوایی در یک دوره نسبتاً کوتاه ۴۸ ساعته پردازش شده است و یک مدل سه بعدی از منطقه تحقیقاتی تولید شده است. مقایسه بین مدل سه بعدی مبتنی بر این سیستم و مدل منبع، همبستگی خوبی را نشان داد.

استید و همکاران [۴۸] کاربرد روش‌های میدانی و سنجش از دور برای ویژگی‌های دیواره‌های شیبدار در مقیاس‌ها و فواصل مختلف را طی ۱۵ سال بررسی کردند که توسط گروه تحقیقاتی زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک بررسی شد. آنها کاربردهای بالقوه، مزایا و محدودیت‌های تکنیک‌های مختلف سنجش از دور را برای توصیف جامع دامنه‌های سنگ شناسی به طور خلاصه ارائه کردند. این مطالعه اهمیت روش‌های سنجش از دور، پهپادها و غیره را در بررسی شیب‌های سنگی نشان داد. با این حال، روش‌های

غلظت کلی ابر نقطه پایین نشان داده شده است زیرا روش پردازش مورد استفاده در وضوح پیکسل نسبتاً پایین (640×480) اعمال می‌شود. علاوه بر این، نشان داده شد که نقطه روی سطح مسطح به خوبی نشان داده شده می‌تواند دقت را برای محدوده تقریباً ۰.۵ متر در فاصله ۲۵ تا ۳۰ متر تعیین کند. اگرچه ابر نقطه‌ای توسعه یافته توسط این فناوری پراکنده بود، آنها پیش بینی کردند که نتیجه کلی می‌تواند با افزایش وضوح تصویر اصلی و پردازش تصویر بهبود یابد.

ورولوا و همکاران [۴۴] رانش زمین در مناطق صعب‌العبور را با استفاده از سیستم‌های پهپاد و فتوگرامتری زمینی دیجیتال ثبت کرد. در این تحقیق معدن Nástup Tušimice در جمهوری چک به عنوان منطقه مورد مطالعه تعیین شد و عکس‌های هوایی به طور خودکار با استفاده از یک پهپاد برداشت شد. سپس، آنها یک عکس ارتوفتو ساختند و یک مدل سه بعدی از منطقه لغزش تهیه کردند. علاوه بر این، آنها از فتوگرامتری زمینی دیجیتال برای مستندسازی دقیق‌تر منطقه مورد نظر استفاده کردند.

بلیستن و همکاران [۴۵] همچنین قابلیت استفاده از پهپادها را برای بصری سازی سه بعدی رخنمون‌های سنگی، از جمله در بخش‌های غیرقابل دسترس معادن نشان دادند. آنها ذخیره پرلیت اسلواکی Lehôtka pod Brehmi را به عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین کردند و از پهپادها برای تصویربرداری از رخنمون‌هایی با ارتفاع تقریبی ۷۵ متر استفاده نموده و مستندات فتوگرامتری را تهیه کردند. این پرواز در ارتفاع ۳۵ متری از بلندی متوسط منطقه تنظیم شد و در مجموع ۵۸ تصویر برداشت شد. هجده نقطه به عنوان نقطه کنترل روی زمین با مختصات به دست آمده استفاده شد. نرم افزار تجاری "AGISOFT PhotoScan" برای پردازش تصویر استفاده شد و یک مدل دیجیتالی از رخنمون هدف ایجاد شد. مقایسه همبستگی بین مدل به دست آمده با استفاده از روش مرسوم و مدل به دست آمده از طریق فتوگرامتری هوایی نشان داد که مرزهای زمین‌شناسی شناسایی شده در دو مدل با یکدیگر منطبق نبوده و تفاوت به اندازه ۱ متر است. این تفاوت‌ها عمدتاً به دلیل دقت نقشه‌ها و مقاطع زمین شناسی آنالوگ و اشتباهات در مقیاس است.

تخریب، سطوح ریسک مختلف دسته‌بندی شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند با دقت بالا ریسک فروریزش سطحی را برآورد کند. همچنین، مشخص شد که این روش در معدن مولیبدن چائویانگ شینهوا با موفقیت به کار گرفته شده است. مزایای این روش شامل دقت بالا، کاربرد آسان و قابل استفاده بودن برای انواع مختلف معادن است. با این حال این روش برای انجام آنالیزهای تخصصی و روش‌های عددی به داده‌های کافی نیاز دارد. در این تحقیق برای جمع‌آوری اطلاعات و مدل‌سازی‌های سه بعدی اولیه از تکنولوژی پهپاد استفاده شد.

در جدول ۲ دسته‌بندی مطالعات قبلی بررسی شده در مورد کاربردهای پهپاد برای تجزیه و تحلیل دیواره‌های شیب دار سنگی آورده شده است.

۳-۳ استفاده از فتوگرامتری هواپرد در نقشه برداری معادن زیرزمینی

تعداد کمی از پهپادها و ابزارهای برداشت وجود دارند که مختص محیط‌های زیرزمینی باشند. این گونه محیط‌ها معمولاً دارای شرایط دید محدود، دهانه‌های کوچک، تداخل مغناطیسی و عدم پوشش GPS^۱ هستند [۵۲]. با این حال، اگر سیستم‌های پهپاد مجهز به دوربین‌های با وضوح بالا، چراغ‌های LED و حسگرهای حرارتی باشند، اطلاعات مفیدی مانند تصویر (حرارتی و طیفی)، فاصله و پایش سیستم ناوبری را می‌توان در مناطقی به دست آورد که دسترسی کارگران معدن به این مناطق دشوار است.

کانالکس و همکاران [۵۳] از پهپادها برای فعال کردن بازرسی معادن مبتنی بر تکنیک‌های بصری استفاده کردند. بدین ترتیب، آنها یک ارزیابی از فناوری فعلی سیستم‌های بومی سازی بصری برای استخراج زیرزمینی ارائه کردند. به علاوه این پژوهشگران تأیید کردند که فناوری بومی‌سازی مبتنی بر پهپاد می‌تواند در محیط‌های سخت و چالش برانگیز به کار رود در حالی که از روش‌ها و فناوری‌های قابل اعتماد و کم‌هزینه تر استفاده می‌کند.

سنتی و میدانی کماکان برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر حائز اهمیت هستند.

هاو و همکاران [۴۹] با استفاده از تصاویر پهپاد DJI Matrice 300 RTK برای بررسی پایداری دیواره‌های یک معدن در چین اقدام نمودند و طی این مطالعه با تغییرات چگالی ابرنقاط حاصل شده از مدل‌سازی بیان داشتند که میتوان فرایند تحلیل پایداری با استفاده از این تصاویر را با تغییر در الگوریتم‌های مدل‌سازی بهبود بخشید.

کالیو و همکاران [۵۰] با هدف جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی درباره جهت‌گیری فضایی درزه‌های یک دیواره بلند و تشخیص بلوک‌هایی با احتمال وجود ناپایداری اقدام به مدل‌سازی سه بعدی به وسیله فتوگرامتری هوایی نمودند و در طی این عملیات پروازی جهت بهبود دقت مدل‌سازی و استخراج خواص درزه‌ها از نقاط کنترل زمینی استفاده شد. همچنین این مطالعه توانسته است که تلفیق صحیحی از مدل‌سازی فتوگرامتری و تصاویر حرارتی را جهت توصیف و شناسایی نقاط با پتانسیل ریزش ارائه کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بهره‌گیری از رویکردهای متدولوژیک در توصیف دیواره و شناسایی مناطق ناپایدار با موفقیت انجام شده است. ترکیب تصویربرداری حرارتی با فتوگرامتری، امکان مکان‌یابی سریع و قابل اعتماد بلوک‌های شناسایی شده را فراهم میکند. و درک از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی دیواره را افزایش داده است. داده‌های به دست آمده از این تحقیق توسط بررسی‌های میدانی تأیید یافته‌اند، که تصدیق می‌کنند دقت و انطباق روش برای استفاده عملی و مدیریت ریسک در محیط‌های مشابه مناسب است.

تحقیقی توسط جین و همکاران [۵۱] انجام شد که به بررسی ریسک فروریزش سطحی ناشی از معدنکاری زیرزمینی با استفاده از روش سطح پاسخ پرداخت. این روش ارائه شد تا با استفاده از شاخص قابلیت اطمینان، به برآورد دقیق ریسک فروریزش سطحی کمک کند. در این تحقیق، ابتدا حساسیت پارامترهای مکانیکی توده سنگ آنالیز شد و سپس تابع سطح پاسخ برازش شد. در نهایت، با محاسبه شاخص قابلیت اطمینان توده سنگ تحت سطوح مختلف

¹ Global Positioning System

جدول ۲: خلاصه ای از کاربردهای پهباد برای تجزیه و تحلیل دیواره های شیب دار

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهباد	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه ای هدف	سبک کنترل پرواز
مک لنود [۴۲]	۲۰۱۲	ارائه امکان ایجاد یک ابر نقطه سه بعدی از تصاویر ویدئویی به دست آمده با پهباد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
مک لنود و همکاران [۴۳]	۲۰۱۳	ارائه امکان ایجاد یک ابر نقطه سه بعدی از تصاویر ویدئویی به دست آمده با پهباد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
ورولوا و همکاران [۴۴]	۲۰۱۵	کاربرد فتوگرامتری دیجیتال زمینی مبتنی بر پهباد در زمین لغزش ها	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	پرواز خودکنترل
بلیستن و همکاران [۴۵]	۲۰۱۶	پیشنهاد سودمندی پهباد در بررسی رخنمون های سنگ های زمین شناسی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	پرواز خودکنترل
برتا و همکاران [۴۶]	۲۰۱۹	طبقه بندی سنگ در شیب با استفاده از فتوگرامتری هوایی و یادگیری ماشین	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
کاتوروزا و برج [۴۷]	۲۰۱۹	نقشه برداری جبهه کار معادن با استفاده از فناوری پهباد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
استد و همکاران [۴۸]	۲۰۱۹	بررسی کاربرد روش های میدانی و سنجش از دور برای اخذ ویژگی های شیب های سنگی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
هاو و همکاران [۴۹]	۲۰۲۳	بررسی پایداری یک دیواره سنگی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	پرواز خودکنترل
کالیو و همکاران [۵۰]	۲۰۲۳	جمع آوری داده های کمی و کیفی درباره جهت گیری فضایی درزه های یک دیواره بلند و تشخیص بلوک هایی با احتمال وجود ناپایداری	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
جین و همکاران [۵۱]	۲۰۲۳	بررسی ریسک فروریزش سطحی ناشی از معدنکاری زیرزمینی با استفاده از روش سطح پاسخ پرداخت.	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده

برای کاربرد در فضاهای باریک و محیط‌های زیرزمینی، (۲) توسعه راه حلی به منظور استفاده از پهپادها حتی در محیط‌های تاریک، با به کارگیری نورهای طراحی شده ویژه متصل به هواپیماهای بدون سرنشین، (۳) ضبط تصویر با کیفیت و کمیت قابل توجه برای ایجاد ابر نقاط سه بعدی و (۴) شواهدی از ویژگی‌های توده سنگ و حرکت توده سنگ با پردازش داده‌های ابر نقطه‌ای تولید شده؛ اشاره کرد. این مطالعه نشان داد که ابرهای نقطه‌ای ایجاد شده با استفاده از پهپاد بسیار شبیه به ابر نقاط ایجاد شده با استفاده از اسکنر تشخیص نور و محدوده (LiDAR^۲) هستند. با وجود وضوح نقطه نسبتاً پایین تر، اطلاعات ژئوتکنیکی مهمی از جمله جهت‌داری شکستگی‌ها و تشخیص تغییرات آنها تحت اثر عوامل مختلف به دست آمد.

ترنر و همکاران [۵۶] با استفاده از یک پهپاد در یک معدن زیرزمینی، یک مدل سه بعدی با تصاویر حرارتی ایجاد کرد. آنها همچنین مطالعه‌ای در مورد شناسایی داده‌های زمین‌شناسی در مدل فتوگرامتری انجام دادند. این مطالعه نشان داد که می‌توان از فناوری‌ها و تکنیک‌های هواپرد برای به دست آوردن داده‌های با کیفیت بالا برای تجزیه و تحلیل ژئوتکنیکی استفاده کرد. سیستم پهپاد شامل حسگر تشخیص موانع، سیستم نورپردازی، تصاویر حرارتی و نرم افزار است. در نتیجه، می‌توان از یک دوربین حرارتی برای بررسی تضادهای دمایی و ارزیابی پایداری دهانه سازه‌های زیرزمینی استفاده کرد. استفاده از پهپاد در معدن گلدن لایت در ایالت مونتانا کشور آمریکا آزمایش شد. این مطالعه نشان داد که تصویر حرارتی فاقد پالایش و چگالی نقطه‌ای مدل است. با این حال، تشخیص زمین‌سست و ساختارهای دقیق راحت‌تر بوده است. این مطالعه نشان داد که ترکیب خوبی از فن‌آوری‌های هوایی با پهپادها می‌تواند به طور موثر فتوگرامتری را انجام دهد و داده‌های زمین‌شناسی را در محیط‌های معدنکاری زیرزمینی شناسایی کند.

برای دستیابی به این هدف، آزمایشی بر روی یک سیستم محلی در معدن سنگ آهنی در سوئد، یکی از بزرگترین معادن در اروپا، انجام شد. نتایج تجربی نشان داد که دوربین‌های استریو را می‌توان برای پهپادهای خودران استفاده کرد. با این حال، وجود خطا در نتایج مشاهده شد. در همین حال نشان داده شده است که رویکرد وجود دوربین می‌تواند با موفقیت تحت محدودیت‌های خاصی استفاده شود. فریر و کوتا [۵۴] یک پهپاد خاص طراحی کردند تا تصاویر مناطقی از معدن زیرزمینی را که به دلیل استخراج و انفجار غیرقابل دسترسی هستند ثبت کند. این پهپاد دارای یک بالون پر از گاز هلیوم، یک ملخ پهپاد با نورپردازی قدرتمند LED^۱ با کنترل از راه دور، باتری قابل شارژ، یک دوربین کنترل از راه دور، ثبت‌کننده تصویر و فرستنده فرکانس رادیویی برای کنترل تصویر می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به ویژگی معدن زیرزمینی، تجهیزات می‌توانند بدون استفاده از GPS و با سرعت‌های پایین و متغیر پرواز کنند تا از برخورد با دیواره‌های سنگی و سیستم نگهداری جلوگیری کنند. آزمایش در یک ایستگاه فرعی با عرض ۶ متر، شیب ۴۵ درجه و با ۲۰ متر فاصله بین سطوح فرعی انجام شد. نور LED متصل به پهپاد برای آشکار کردن جزئیات دیواره‌های سنگی، ساختارهای توده سنگی، شواهد انفجار و سیستم نگهداری کافی بود. علاوه بر این، هیچ سیگنالی به عنوان سیگنال مزاحم در طول پرواز حتی زمانی که بالون از دید مستقیم ناپدید شد، رخ نداد.

راج [۵۵] یک سیستم نظارتی با استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین برای بهبود ایمنی تجهیزات نظارت، ارائه نتایج نظارت سریع و آنی و به حداقل رساندن حضور انسان در شرایط ناامن زیرزمینی پیشنهاد کرد. علاوه بر این، این مطالعه نشان داد که امکان بررسی و نظارت با استفاده از پهپادها در معدن زیرزمینی که امکان استفاده از GPS نیست، که شدت نور کم بوده و فضاهای کاری و قابل دسترسی محدود است، وجود دارد. از نتایج قابل اشاره در تحقیق می‌توان به: (۱) توسعه فناوری ضبط و کنترل تصویر

^۱ Light Emitted Diode

^۲ Light Detection and Ranging

جدول ۳: خلاصه‌ای از کاربردهای پهپاد برای نقشه برداری در معادن زیرزمینی

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهپاد	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه-ی هدف	سبک کنترل پرواز
کانلاکیس و همکاران [۵۰]	۲۰۱۶	ارزیابی فناوری برای سیستم های بومی سازی بصری برای استخراج زیرزمینی	بال چرخشی	داده های فاصله	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
فریر و کوتا [۵۱]	۲۰۱۷	طراحی پهپاد برای تصویربرداری در مناطق غیرقابل دسترسی در معادن زیرزمینی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
میچل و مارشال [۵۴]	۲۰۱۷	ساخت نمونه اولیه پهپاد برای اسکن معادن زیرزمینی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
ازهارى و همکاران [۵]	۲۰۱۷	تولید مدل های سه بعدی محیط های عملیاتی به وسیله ی پهپاد زیرزمینی	بال چرخشی	داده عکس	مقیاس معدن	بیان نشده
ترنر و همکاران [۵۳]	۲۰۱۸	ایجاد مدل سه بعدی معدن زیرزمینی با استفاده از تصویر پهپادی	بال چرخشی	تصویر حرارتی	مقیاس منطقه ای	بیان نشده
راج [۵۲]	۲۰۱۹	پیشنهاد سیستم پایش مبتنی بر پهپاد قابل استفاده در معادن زیرزمینی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه ای	پرواز نیمه خودکنترل
ترنر و همکاران [۴۹]	۲۰۲۰	پیشنهاد روشی برای تشخیص و تعیین کمیت ناپیوستگی های زمین شناسی با استفاده از تصاویر حرارتی و چندطیفی	بال چرخشی	تصویر حرارتی تصویر چندطیفی	مقیاس منطقه ای	پرواز نیمه خودکنترل

ازهارى و همکاران [۵۸] ساخت مجموعه حسگر پهپاد را تجزیه و تحلیل کردند که می‌تواند مدل‌های سه بعدی را در زمان کمتری ایجاد کند و آگاهی زمینه‌ای بالایی را برای اپراتورها فراهم کند. جدول ۳ خلاصه‌ای از مطالعات پیشین در مورد کاربردهای پهپادهای نقشه برداری در معادن زیرزمینی را نشان می‌دهد.

۴- چالش‌های موجود در استفاده از پهپادها در معادن و چشم اندازهای آینده

در معادن روباز، شرایط آب و هوایی با ایجاد انحراف در مسیرهای از پیش تعیین شده‌ی پهپاد در مقایسه با معادن زیرزمینی، چالش‌هایی را ایجاد می‌کند. در برخی موارد، شرایط آب و هوایی می‌تواند منجر به آسیب رساندن به پهپاد

آنها [۵۶] همچنین با استفاده از تصاویر حرارتی و چندطیفی به دست‌آمده با استفاده از پهپاد، تشخیص و تعیین کمیت ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی در توده‌های سنگ سخت را بررسی کردند. طیف‌های حرارتی چندگانه، تصاویر حاوی داده‌های رنگ ابرنقاط و مجموعه داده‌های LiDAR در همان منطقه مورد مطالعه به دست آمد. از داده‌ها برای تولید ابر نقاط و مش‌های سه‌بعدی، ارجاع جغرافیایی و ترسیم ناپیوستگی‌های محل معدن استفاده شد. علاوه بر این مطالعات، میچل و مارشال [۵۷] کاربردهای بالقوه پهپادها را در معادن زیرزمینی ارائه کردند. همچنین یک نمونه اولیه از پهپادها را با قابلیت چرخش خودکار برای اسکن معدن زیرزمینی توسعه دادند.

در این گردآوری، مقالات تحقیقاتی و پایان نامه های کارشناسی ارشد و دکترا که طیف وسیعی از کاربردهای پهپادها در حوزه معدن را در بر می گرفتند، بررسی شدند. در این بررسی، مطالعات در سه دسته به شرح زیر طبقه‌بندی شده است:

(۱) نقشه برداری توپوگرافی در معادن روباز در مرحله

بهره برداری

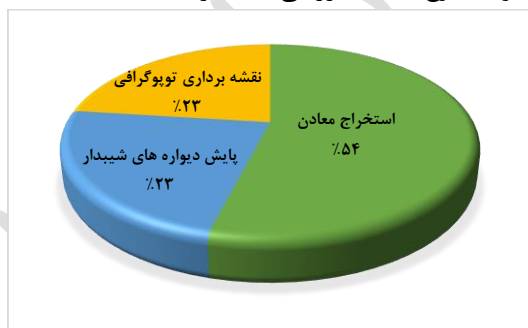
(۲) تجزیه و تحلیل شیب سنگ در مرحله بهره

برداری

(۳) نقشه برداری در معادن زیرزمینی در مرحله بهره

برداری

شکل ۱ توزیع درصد هر کاربرد پهپاد در معدن و مطالعات طبقه بندی شده تحت آن کاربرد را نشان می دهد. کاربردهای پهپاد در مرحله بهره برداری ۵۴ درصد از کل مطالعات بررسی شده را تشکیل می دهند. نقشه برداری توپوگرافی در معادن روباز کاربرد رایج در مرحله بهره برداری بود که ۲۳ درصد از کل مطالعات را شامل میشود و همچنین ۲۳ درصد از مطالعات به بررسی و پایش دیواره های شیب دار اختصاص داده شده است. این نمودار حوزه های مختلف مرور منابع را توسط نویسندگان نشان میدهد و از بین مطالعاتی که برای این تحقیق انتخاب شده اند دسته بندی گردیده است. لذا تفسیر این نمودار صرفاً براساس مطالعات تشکیل دهنده آن بوده و به تنوع مقالات بررسی شده مرتبط میباشد.



شکل ۱: توزیع درصد مطالعات بررسی شده ی کاربردهای پهپاد در معادن

این بررسی تجزیه و تحلیلی از مطالعات انجام شده در ۱۰ سال گذشته توسط محققین برای استفاده از فناوری پهپاد در فرآیند معدنکاری که تمرکز بیشتر آنها بر مدلسازی ها واستخراج داده های مفید جهت مدلسازی است، ارائه می کند.

های درحال پرواز و مختل کردن ماموریت های آنها شود [۵۹، ۶۰].

در صنعت معدن و همچنین سایر صنایع، مصرف انرژی در طول یک ماموریت پروازی می تواند چالش های زیادی را تحمیل کند. به طور معمول، پهپادها با باتری کار می کنند و انرژی را برای شناور شدن، پرواز، اتصال بی سیم، داده ها و پردازش تصویر مصرف می کنند. با توجه به محدودیت های انرژی، باید تصمیم گیری شود که آیا تجزیه و تحلیل داده ها و تصویر باید در لحظه یا غیر برخط و پس از اتمام پرواز برای کاهش مصرف انرژی انجام شود [۵۹، ۶۱، ۶۲]. در معادن زیرزمینی، فضای محدود، گرما و رطوبت، هوای غبارآلود و شرایط نوری نامناسب عمده ترین مسائلی است که کارگران معدن با آن مواجه هستند. برخی از مفاهیم برای استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین در معادن زیرزمینی پیشنهاد شده است، اما معمولاً از تکنیک های دستی برای کنترل و ناوبری استفاده می شود. پهپاد طراحی شده حداقل باید قابلیت ناوبری کاملاً مستقل در محیط فاقد GPS را دارا باشد و در محیطی پرواز کند که نوری به جز نوری که پهپاد ارائه می دهد، نباشد.

ماهیت محیط های معدن زیرزمینی و سایر محدودیت ها (به عنوان مثال، دیوارهای اطراف، کابل ها و تجهیزات) مستلزم آن است که پهپاد در برابر برخورد با موانع احتمالی مقاوم باشد. در حالت ایده آل، پهپاد باید بتواند موانع را در طول پرواز خود در محیط داخلی شناسایی کرده و از آنها اجتناب کند. پهپاد همچنین باید بتواند محیط های خشن معادن زیرزمینی را تحمل کند و در گرد و غبار و دود سنگین نیز پرواز کند. بنابراین، پهپاد باید ضد آب، ضد گرد و غبار و ضد ضربه باشد و در برابر تغییرات فشار، دما و رطوبت در سراسر محیط معدن مقاوم باشد. برای کاربردهای معدن زغال سنگ زیرزمینی، به دلیل وجود متان و خطرات احتمالی انفجارو یا آتش سوزی، باتری و حسگرهای الکترونیکی باید عایق بندی شوند. علاوه بر الزامات ذکر شده، پهپاد باید ویژگی های دیگری از جمله مصرف انرژی کم و تشخیص بدن انسان را دارا باشد [۶۱].

العبور برای افراد و تسریع به دست آوردن داده‌های مورد نیاز میباشند.

- بررسی و مطالعات مبتنی بر پهپاد می تواند داده‌هایی با وضوح و چگالی نقاط بالا به دست آورد زیرا پهپادها می توانند در ارتفاعات پایین پرواز کنند. علاوه بر این، کنترل و مانور آسان پهپادها تنها با حداقل آموزش یک مزیت است. بنابراین، این ابزارها به طور فعال برای وظایف توسعه معادن مانند نقشه برداری هوایی، اکتشاف ژئوفیزیک هوابرد و نظارت بر محیط زیست مورد استفاده قرار می گیرند.

- پهپادها همچنین دارای معایبی هستند، مانند ظرفیت بار کم، زمان کوتاه پرواز و وابستگی به شرایط آب و هوایی. همچنین به دلیل ظرفیت حمل بار پایین پهپادها، محدودیتی برای تعداد سنسورهایی که می توان روی پهپادها نصب کرد وجود دارد.

- تغییرات ناگهانی آب و هوا در فضای کاری می‌تواند هزینه‌های بیشتری هم از نظر مالی و هم از نظر زمانی به مطالعات تحمیل کند.

- با توجه به اینکه امروزه تکنیک فتوگرامتری برای سه بعدی سازی و بصری سازی پروژه های مهندسی رو به افزایش است لذا در دست داشتن سخت افزار و نرم افزار مناسب و توسعه روش هایی با سرعت پردازش بالا میتواند به آینده حضور این پرنده های بدو سرنشین در معادن به طور فزاینده ای کمک کند...

- این بررسی ها نشان داد که کاربردهای فعلی پهپادها در معدن را می توان به (۱) تجزیه و تحلیل زمین شناسی و ساختاری از طریق روش سنجش از دور، (۲) نقشه برداری توپوگرافی در معادن روباز، (۳) تجزیه و تحلیل شیب های سنگی، (۴) **اتخاذ تصمیمات مدیریتی بر پایه اطلاعات نظارتی مبتنی بر پهپاد ها**، (۵) بررسی در معادن زیرزمینی در مرحله بهره برداری و (۶) مدلسازی سه بعدی با دقت بالا طبقه بندی کرد.

- در بین مطالعات گزارش شده تاکنون، نقشه برداری توپوگرافی در معادن روباز بیشترین کاربرد را داشته است.

- متداول ترین نوع پهپادها و داده‌هایی که توسط حسگرها مانند حسگر های نويزگير نوري و حسگر های مانع گريز برای کاربردهای پهپاد در معدن به دست می‌آیند، به ترتیب بال چرخشی و تصاویر یا ویدئوهای ضبط‌شده توسط دوربین‌های دیجیتال بودند و پهپاد های بال ثابت برای نقشه برداری های وسیع بعد از پهپاد های بال چرخشی بیشترین کاربرد را داشته اند.

- با توجه به مقیاس های منطقه مورد نظر برای کاربردهای پهپاد، مطالعات معدن و مقیاس منطقه ای در مرحله بهره برداری شایع تر بود و یک سبک مستقل از کنترل پرواز معمولاً برای کاربردهای پهپاد در تمام مراحل فرآیند استخراج مورد استفاده قرار گرفته است.

- با توجه به مطالعات انجام شده از پهپادها در حوزه معدن، مشاهده شده است که پهپادها دارای مزایای قابل استفاده و مدیریت با هزینه کم، توانایی کار در مناطق صعب

۶- جدول واژگان و اصطلاحات

جدول ۴: خلاصه ای از اصطلاحات پرکاربرد استفاده شده

اختصار / اصطلاح	اختصار / ترجمه انگلیسی	ترجمه فارسی	توضیحات
فتوگرامتری هوایی	Aerial Photogrammetry	-	روشی جهت ساخت مدل های سه بعدی با استفاده از عکس.
پهپاد	Drone	-	پرنده بدون سر نشین که جهت اخذ تصاویر هوایی استفاده میشود
پهپاد بال ثابت	Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle (FWUAV)	-	نوعی پهپاد که طراحی بال های آن برگرفته از بال هواپیما است
پهپاد بال چرخشی	Rotary-Wing Unmanned Aerial Vehicle (RUAV)	-	نوعی پهپاد که طراحی بال های آن برگرفته از بال هلیکوپتر است
ابر نقاط سه بعدی	Three-Dimensional Point Cloud	-	مجموعه نقاطی که علاوه بر داده های مختصاتی داده های رنگی را نیز در خود ذخیره میکند.
گردش کار	workflow	-	روند و نحوه ی توسعه انجام کار را نشان میدهد.
کالیبراسیون	Calibration	-	به عملیات حذف یکسری خطای مرتبط با تجهیزات گفته میشود.
روندنما	flowchart	-	روند انجام مرحله به مرحله یک عملیات را با استفاده از روندنما میتوان ترسیم نمود.
مدل رقومی	Digital elevation Model	-	نمایشی از سطح توپوگرافی زمین را با این نوع مدل میتوان بدست آورد
ماموریت پروازی	Flight Mission	-	مسیر و نحوه ی عکسبرداری که به صورت از پیش تعیین شده یا دستی میتوان آنرا به برنامه پروازی پهپاد وارد کرد.
LiDAR	Light Detection and Ranging	اسکنر تشخیص نور و محدوده	اسکنر شناسایی و تعیین مسافت با استفاده از نور

یک روش تبدیل تصاویر دو بعدی به مدل یکپارچه سه بعدی.	ساختار ناشی از حرکت	Structure from Motion	SfM
داده های رنگی که در ابرنقاط ذخیره میشوند را گویند.	قرمز، سبز آبی	Red, Green, Blue	RGB
اندازه هر پیکسل روی تصویر است که نشان می دهد چه ابعادی روی زمین، برای مشخص شدن ارتفاع پرواز در نقشه برداری با پهپاد مورد استفاده قرار می گیرد.	فاصله نمونه برداری زمینی	Ground sample distance	GSD
نقاطی که با وارد کردن مختصات آنها به مدل نهایی میتوان مدل را از نظر مختصات تدقیق نمود.	نقاط کنترل زمینی	Ground Control point	GCP

- [^۸] Q. Liu, "Remote sensing technologies in rock mass characterization," in *ISRM SINOROCK 2013*, 2013: OnePetro .
- [^۹] F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, and D. Sarazzi, "UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives," *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, vol. 38, no. 1, p. C22, 2011.
- [^{۱۰}] J. Birch, "Using 3DM analyst mine mapping suite for slope stability-case studies," *Proceedings of ACG geotechnical engineering for open pit mines, section*, vol. 17, pp. 1-15, 2009.
- [^{۱۱}] W. Greenwood, D. Zekkos, J. Lynch, J. Bateman, M. Clark, and D. Chamlagain, "UAV-Based 3-D characterization of rock masses and rock slides in Nepal," in *50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2016: OnePetro .
- [^{۱۲}] A. Tamburini, D. Martelli, W. Alberto, and F. Villa, "Geomechanical rock mass characterization with Terrestrial Laser Scanning and UAV," in *49th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2015 :OnePetro .
- [^{۱۳}] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review," *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 92, pp. 79-97, 2014.
- [^{۱۴}] S. D. Priest, *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media, 1993.
- [^{۱۵}] G. P. Giani, *Rock slope stability analysis*. CRC Press, 1992.
- [^{۱۶}] C. Cryderman, S. B. Mah, and A. Shufletoski, "Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for
- [^۱] L. G. De Vallejo and M. Ferrer, *Geological engineering*. CRC press, 2011.
- [^۲] M. Lato and M. Vöge, "Automated discontinuity orientation mapping from lidar data," in *ISRM International Symposium-EUROCK 2012*, 2012: OnePetro .
- [^۳] M. Levy and P. Visca, "Statistical characterization of rock structure using LiDAR," in *43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium*, 2009: OnePetro .
- [^۴] J. Coggan, A. Wetherelt, X. Gwynn, and Z. Flynn, "Comparison of hand-mapping with remote data capture systems for effective rock mass characterisation," in *11th ISRM Congress*, 2007: OnePetro .
- [^۵] F. Azhari, S. Kiely, C. Sennersten, C. Lindley, M. Matuszak, and S. Hogwood, "A comparison of sensors for underground void mapping by unmanned aerial vehicles," in *UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, 2017: Australian Centre for Geomechanics, pp. 419-430 .
- [^۶] J. Kottenstette, "Measurement of geologic features using close range terrestrial photogrammetry," in *Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 2005: OnePetro .
- [^۷] T. Dang, "The use of photogrammetry in measuring geologic structures and creating a 3D model on exposed rock faces," in *ISRM VietRock International Workshop :۲۰۱۵*, OnePetro .

- in the mining industry," *Geosystem Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 197-204, 2016.
- [۲۴] M. Paisiriyuenyong and M. C. Smith, "Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology in Thailand, and Applying Marketing in the Mining Industry," Thammasat University Bangkok, Thailand, 2016.
- [۲۵] H. Ren, Y. Zhao, W. Xiao, and Z. Hu, "A review of UAV monitoring in mining areas: Current status and future perspectives," *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 320-333, 2019.
- [۲۶] A. Buczyńska, "Remote sensing and GIS technologies in land reclamation and landscape planning processes on post-mining areas in the Polish and world literature," in *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2209, no. 1: AIP Publishing LLC, p. 040002.
- [۲۷] G. M. Dering, S. Micklethwaite, S. T. Thiele, S. A. Vollgger, and A. R. Cruden, "Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 373, pp. 148-166, 2019.
- [۲۸] Q. Wang *et al.*, "Accuracy evaluation of 3d geometry from low-attitude uav collections a case at zijin mine," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, no. 4, p. 297, 2014.
- [۲۹] S.-J. Cho, E.-S. Bang, and I.-M. Kang, "Construction of precise digital terrain model for nonmetal open-pit mine by using unmanned aerial photograph," *Economic and Environmental Geology*, vol. 48, no. 3, pp. 205-212, 2015.
- mapping and earthworks computations," *Geomatica*, vol. 68, no. 4, pp. 309-317, 2014.
- [۱۷] D. H. Kim, I. Gratchev, and A. Balasubramaniam, "A photogrammetric approach for stability analysis of weathered rock slopes," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 443-454, 2015.
- [۱۸] J. C. Rosser Jr, V. Vignesh, B. A. Terwilliger, and B. C. Parker, "Surgical and medical applications of drones: A comprehensive review," *JSLs: Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons*, vol. 22, no. 3, 2018.
- [۱۹] S. Manfreda *et al.*, "On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 4, p. 641, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/4/641>.
- [۲۰] W. A. Hustrulid, M. Kuchta, and R. K. Martin, *Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack*. CRC Press, 2013.
- [۲۱] Y. Choi, J. Baek, and S. Park, "Review of GIS-Based Applications for Mining: Planning, Operation, and Environmental Management," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 7, p. 2266, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/7/2266>.
- [۲۲] J. J. Cress, M. Hutt, J. Sloan, M. Bauer, M. Feller, and S. Goplen, *Us geological survey unmanned aircraft systems (uas) roadmap 2014*. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, USA, 2015.
- [۲۳] S. Lee and Y. Choi, "Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications

- and Spatial Information Sciences*, vol. 2, no. W1, pp. 15-22, 2015.
- [۳۷] J. Xiang, J. Chen, G. Sofia, Y. Tian, and P. Tarolli, "Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey," *Environmental earth sciences*, vol. 77, no. ۶, pp. 1-18, 2018.
- [۳۸] F. Beretta, H. Shibata, R. Cordova, R. d. L. Peroni, J. Azambuja, and J. F. C. L. Costa, "Topographic modelling using UAVs compared with traditional survey methods in mining," *REM-International Engineering Journal*, vol. 71, pp. 4.۲۰۱۸, ۴۷۰-۶۳
- [۳۹] B. Kršák *et al.*, "Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study," *Measurement*, vol. 91, pp. 276-287, 2016.
- [۴۰] L. Ge, X. Li, and A. H.-M. Ng, "UAV for mining applications: A case study at an open-cut mine and a longwall mine in New South Wales, Australia," in *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016: IEEE, pp. 5422-5425 .
- [۴۱] G. Esposito, G. Mastroiocco, R. Salvini, M. Oliveti, and P. Starita, "Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy," *Environmental Earth Sciences*, vol. 76, no. 3, pp. 1-16, 2017.
- [۴۲] T. K. McLeod, "3D imaging applications in Earth Sciences using video data acquired from an unmanned aerial vehicle," Carleton University, 2013 .
- [۴۳] T. McLeod *et al.*, "Using video acquired from an unmanned aerial
- [۳۰] S. Lee and Y. Choi, "Topographic survey at small-scale open-pit mines using a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and underground space*, vol. 25, no. 5, pp. 4.۲۰۱۵, ۴۶۹-۶۲
- [۳۱] S. Lee and Y. Choi, "On-site demonstration of topographic surveying techniques at open-pit mines using a fixed-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and Underground Space*, vol. 25, no. 6, pp. 527-533, 2015.
- [۳۲] S. Lee and Y. Choi, "Comparison of topographic surveying results using a fixed-wing and a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone)," *Tunnel and Underground Space*, vol. 26, no. 1, pp. 24-31, 2016.
- [۳۳] P. Rossi, F. Mancini, M. Dubbini, F. Mazzone, and A. Capra, "Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: Methodology and feasibility analysis," *European Journal of Remote Sensing*, vol. 50, no. 1, pp. 211-221, 2017.
- [۳۴] P. G. Chirico and J. D. DeWitt, "Mapping informal small-scale mining features in a data-sparse tropical environment with a small UAS," *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 69-91, 2017.
- [۳۵] M. Gil and P. Frąckiewicz, "Optimization of the location of observation network points in open-pit mining's :۲۰۱۹", GIS Forum .
- [۳۶] A. Tscharf, M. Rumpler, F. Fraundorfer, G. Mayer, and H. Bischof, "On the use of UAVs in mining and archaeology-geo-accurate 3d reconstructions using various platforms and terrestrial views," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing*

- [۵۰] D. Calìo, S. Mineo, and G. Pappalardo, "Digital Rock Mass Analysis for the Evaluation of Rockfall Magnitude at Poorly Accessible Cliffs," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 6, p. 1515, 2023.
- [۵۱] C.-y. JIN, J.-y. ZHANG, Z.-j. YU, and Q. WANG, "Reliability Analysis of Surface Subsidence Based on Response Surface Methodology," *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, vol. 44, no. 12, p. 1734.
- [۵۲] R. Turner, N. Bhagwat, L. Galayda, C. Knoll, E. Russell, and M. MacLaughlin, "Geotechnical Characterization of Underground Mine Excavations from UAV-Captured Photogrammetric & Thermal Imagery," in *52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, 2018: OnePetro .
- [۵۳] C. Kanellakis and G. Nikolakopoulos, "Evaluation of visual localization systems in underground mining," in *2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2016: IEEE, pp. 539-544 .
- [۵۴] G. Freire and R. Cota, "Capture of images in inaccessible areas in an underground mine using an unmanned aerial vehicle," in *UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, 2017: Australian Centre for Geomechanics .
- [۵۵] P .Raj, "Use of Drones in an Underground Mine for Geotechnical Monitoring," The University of Arizona, 2019 .
- [۵۶] R. M. Turner, M. M. MacLaughlin, and S. R. Iverson, "Identifying and mapping potentially adverse discontinuities in underground excavations using thermal and vehicle (UAV) to measure fracture orientation in an open-pit mine," *Geomatica*, vol. 67, no. 3, pp. 173-180, 2013.
- [۴۴] D. Vrublová, R. Kapica, E. Jiráňková, and A. Strus, "Documentation of landslides and inaccessible parts of a mine using an unmanned UAV system and methods of digital terrestrial photogrammetry," *GeoScience Engineering*, vol. 61, no. 3, p. 8, 2015.
- [۴۵] P. Blistan, L. Kovanič, V. Zelizňáková, and J. Palková, "Using UAV photogrammetry to document rock outcrops," *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 21, no. 2, 2016.
- [۴۶] F. Beretta, Á. L. Rodrigues, R. d. L. Peroni, and J. F. C. L. Costa, "Using UAV for automatic lithological classification of open pit mining front," *REM-International Engineering Journal*, vol. 72, pp. 17-23, 2019.
- [۴۷] M. Katuruza and C. Birch, "The use of unmanned aircraft system technology for highwall mapping at Isibonelo Colliery, South Africa," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 119, no. 3, pp. 291-295, 2019.
- [۴۸] D. Stead, D. Donati, A. Wolter, and M. Sturzenegger, "Application of remote sensing to the investigation of rock slopes: Experience gained and lessons learned," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 8, no. 7, p. 296, 2019.
- [۴۹] J. Hao, X. Zhang, C. Wang, H. Wang, and H. Wang, "Application of UAV Digital Photogrammetry in Geological Investigation and Stability Evaluation of High-Steep Mine Rock Slope," *Drones*, vol. 7, no. 3, p. 198, 2023.

- multispectral UAV imagery," *Engineering Geology*, vol. 266, p. 105470, 2020.
- [^{۵۷}] J. Mitchell and J. A. Marshall, "Design of a novel auto-rotating uav platform for underground mine cavity surveying," 2017.
- [^{۵۸}] F. Azhari, S. Kiely, C. Sennersten, C. Lindley, M. Matuszak, and S. Hogwood, "A comparison of sensors for underground void mapping by unmanned aerial vehicles," presented at the UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, Sudbury, 11-13-October, 2017. [Online]. Available: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/171033_Sennersten/
- [^{۵۹}] H. Shakhatreh *et al.*, "Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 48572-48634, 2019.
- [^{۶۰}] B. R. Jordan, "A bird's-eye view of geology: The use of micro drones/UAVs in geologic fieldwork and education," *GSA today*, vol. 25, no. 7, pp. 50-52, 2015.
- [^{۶۱}] B. Vergouw, H. Nagel, G. Bondt, and B. Custers, "Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments," in *The future of drone use*: Springer, 2016, pp. 21-45.
- [^{۶۲}] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2015.