دوره ۱۶، شماره ۴۶، بهار ۱۴۰۵، صفحه ۸۹-۱۰۶

نشریه روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: http://anm.yazd.ac.ir/

مقاله مروری

استفاده از تکنولوژی پهپادها در طراحی استخراج معادن روباز و زیرزمینی، وضعیت کنونی، چالش‌های پیش‌رو و چشم‌اندازهای آینده

امیرحسین واحدی[۱]، علیرضا باغبانان[۱*]، امین ازهری[۱]، احمد رحمانی شهرکی[۱]

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

(دریافت: ۲۱ فروردین ۱۴۰۳، بازنگری: ۲۴ خرداد ۱۴۰۳، پذیرش: ۱۴ مهر ۱۴۰۳)

چکیده

فتوگرامتری دیجیتال در حال تبدیل‌شدن به یک روش رایج، پرکاربرد و پرطرفدار برای نقشه‌برداری و مدل‌سازی‌های زمین‌شناسی و برداشت ویژگی‌های توده‌های سنگی است که در معادن به‌طور گسترده استفاده می‌شود. چالش ثبت داده‌های زمین‌شناسی و ساختاری در مناطق غیرقابل‌دسترس معادن، حتی در صورت استفاده از روش‌های فتوگرامتری زمینی، کماکان پابرجاست؛ بنابراین مدل‌های ژئوتکنیکی معادن و بانک داده‌های ژئومکانیکی معادن به‌صورت مجموعه داده‌های ناقص باقی می‌مانند. حفریات عظیم زیرزمینی نگهداری نشده مانند کارگاه‌های استخراج، پتانسیل ایجاد ریزش‌های بزرگ را دارند، اما با رفع خلأهای برداشت داده‌های ژئوتکنیکی در مناطق غیرقابل‌دسترس، می‌توان خرابی‌های احتمالی را از طریق تحلیل سینماتیکی ناپیوستگی‌های برداشت‌شده‌ی منطقه پیش‌بینی کرد. پیاده‌سازی عملیات و سهولت کار با این پهپادها در معادن زیرزمینی و پیشرفت‌های اخیر در سیستم‌های تشخیص موانع، امکان بررسی‌های دقیق‌تر و انجام فتوگرامتری در معادن را فراهم کرده است. همواره مسئله مدل‌سازی توده سنگ درزه‌دار موردتوجه 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 مؤثر بر مکانیزم تشکیل آن‌ها بیان شده و سپس مطالعات موردی از مدل‌سازی توده سنگ درزه‌دار با استفاده از داده‌های هوابرد از طریق پهپادها ارائه شده است. همچنین چالش های استفاده از انواع پهپادها در صنعت معدنکاری برای مطالعات پیش رو ذکر شده است.

کلمات کلیدی

فتوگرامتری، مدل‌سازی توده سنگ، مدل‌سازی سه‌بعدی، برداشت درزه‌ها

*عهده‌دار مکاتبات: bagh110@iut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2024.21440.1632

۱- مقدمه

تکنیک‌های سنجش‌ازدور که معمولاً برای جمع‌آوری داده‌ها برای آنالیزهای ژئوتکنیکی استفاده می‌شوند و به منبعی قابل‌اعتماد 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 سنجش‌ازدور، مهندسان قادر به تعریف جهت‌ها و ساختارهای ناپیوستگی‌ها در توده سنگ و همچنین ایجاد بانک داده‌های قابل‌اعتماد برای ورودی‌های نرم‌افزار جهت تجزیه‌وتحلیل‌های مهندسی هستند [۳]. به‌طورمعمول، تکنیک‌های سنجش‌ازدور برای برداشت داده‌ها از مناطق بزرگ استفاده می‌شود که جمع‌آوری آن‌ها بدون کمک سنجش‌ازدور زمان بیشتری از مهندسین و متخصصان گرفته و باعث افزایش زمان پروژه می‌شود. تکنیک‌های هوابرد و به‌طورکلی تکنیک‌های سنجش‌ازدور، به دلیل توانایی در ثبت سریع اطلاعات به‌ویژه اخذ اطلاعات از مناطقی که دسترسی و مطالعه آن‌ها دشوار است، بسیار پرکاربرد و سودمند هستند [۴].

در معدنکاری‌های زیرزمینی به دلیل عدم وجود اطلاعات کافی و همچنین دشواری تولید بانک داده‌ی قابل‌اعتماد از داده‌های زمین‌شناسی به‌ویژه در مناطق غیرقابل‌دسترس معادن، اغلب ریسک قابل‌توجهی برای مخاطرات جانی و مالی وجود دارد [۵]. ازاین‌رو امروزه علم معدنکاری به سمت استفاده از تکنیک‌های برداشت از راه دور که دسترسی بهتر و هزینه‌های کمتری دارند پیش می‌رود. فتوگرامتری ابزار سنجش‌ازدور سودمندی است که برای نقشه‌برداری و مدل‌سازی در معدنکاری و سایر علوم و صنایع به‌طور گسترده به‌ویژه در مناطقی که انسان نمی‌تواند به‌طور ایمن به آن‌ها دسترسی پیدا کند مورداستفاده 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 به‌جای 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 گرفته‌شده است اشاره دارد (به‌عنوان‌مثال شیب و جهت شیب یک درزه). اگر از تکنیک‌های سنتی مانند برداشت میدانی برای جمع‌آوری اطلاعات ژئوتکنیکی استفاده شود، داده‌های نهایی برداشت‌شده باید توسط کارشناس ابتدا ثبت و سپس به نرم‌افزارهای پایین‌دستی وارد شوند تا بتوان از آن‌ها استفاده نمود؛ که می‌تواند در یک نرم‌افزار برای تجزیه‌وتحلیل و برای کاربرد در سایر فرآیندهای طراحی در محل استفاده یا وارد شود [۳]. فتوگرامتری دیجیتال اجازه می‌دهد که ویژگی‌های ژئوتکنیکی برداشت و تعیین‌شده در قالب‌های قابل‌اجرا برای تجزیه‌وتحلیل و کاربرد در نرم‌افزارهای دیگر استخراج شوند [۶].

یکی از روش‌های محبوب و آسان که امروزه به‌طور گسترده‌ای مورداستفاده قرار می‌گیرد روش ساختار ناشی از حرکت (SfM[1]) است. این روش یک تکنیک عکس‌برداری و مدل‌سازی سه‌بعدی است 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. به‌طورکلی ساخت یک مدل سه‌بعدی هندسی از یک شی توسط تصاویر دوبعدی اخذشده بر عهده این روش است که به‌طور خلاصه و کلی مراحلی مانند ۱) تصویربرداری ۲) شناسایی ویژگی‌های موجود در تصویر ۳) تولید مجموعه ابر نقاط و ۴) پردازش ابرنقاط و تولید مدل سه‌بعدی را طی می‌کند تا با استفاده از یکسری عکس دوبعدی، یک مدل یکپارچه سه‌بعدی تولید کند [۶].

سایر تکنیک‌های سنجش‌ازدور 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. به‌عنوان‌مثال، سیستم‌های اسکنر لیزری می‌توانند داده‌های ابر نقطه‌ای سه‌بعدی 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 تصویربرداری است، 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 موردنظر را نشان می‌دهد [۸]. با پیشرفت‌های تکنولوژیکی کنونی در دوربین‌های دیجیتال، فتوگرامتری به‌تدریج کیفیت بالاتر و خروجی‌های مطلوب‌تری را برای شناسایی ساختارها در مدل‌های سه‌بعدی 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، تجزیه‌وتحلیل 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 [۴, ۹-۱۱]. فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد با مقرون‌به‌صرفه‌تر شدن و کاربرپسندتر شدن پهپادها، دوربین‌های مخصوص پهپادها و توسعه نرم‌افزارهای فتوگرامتری روزبه‌روز رایج‌تر می‌شود [۱۱]. استفاده از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد، جمع‌آوری سریع داده‌ها را امکان‌پذیر می‌کند، به‌ویژه 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 پرپتانسیل ازنظر زمین‌شناسی و ارزیابی پایداری شیب، اندازه‌گیری ابعاد ساختارها و نقشه‌برداری ویژگی‌های زمین‌شناسی توده‌های سنگی در مناطق موردمطالعه استفاده شده‌اند [۱۱, ۱۲].

با پیشرفت تکنولوژی، مدل‌های زمین‌شناسی سه‌بعدی 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، به‌ویژه در صنایع خودروسازی و ساخت دستگاه‌های خودکنترل (مانند اتومبیل‌های خودران)، حسگرها به‌گونه‌ای تکامل یافته‌اند که تنظیم دقیق‌تری داشته باشند و به‌طور مؤثر اجسامی را که در مسیر حسگر قرار دارند، شناسایی کرده و از آن‌ها دوری کنند. پیشرفت در حسگرهای مانع گریز و دوربین‌های سوار بر پهپاد، پتانسیل استفاده از پهپادها برای نقشه‌برداری از مناطقی که برای انسان قابل‌دسترسی نیستند را فراهم می‌کند.

امروزه مبحث برداشت درزه‌ها و طراحی الگوهای آتشباری به شکل دقیق و اصلاح‌پذیر یکی از موضوعات چالش‌برانگیزی است که در معادن موردبحث است که با توجه به ویژگی قابل‌ملاحظه‌ای که روش فتوگرامتری در بصری سازی و استخراج درزه‌ها دارد، امروزه روش‌های گسترده‌ای برای تلفیق مدل‌های سه‌بعدی فتوگرامتری و طراحی الگوهای آتشباری 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 قابل‌دسترس و غیرقابل‌دسترس در معادن روباز و زیرزمینی است. با پیشرفت روزبه‌روز کدهای کامپیوتری و به‌کارگیری 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 فرآیندهای کاری خود کمک بگیرند. در این رابطه در حیطه معدنکاری نیز پژوهشگرانی با انتشار نتایج تحقیقات خود این زمینه علمی و اشتراک‌گذاری 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 گردآوری به دست آوردن اطلاعات جامعی از روش‌های گوناگون حل مسائل مختلف در زمینه فتوگرامتری است. به این منظور با تغییر دادن فرضیات یک مسئله می‌توان از روش‌های گوناگونی اعم از پیچیده و ساده برای حل آن بهره گرفت و داشتن این روندنماهای گوناگون مورداستفاده در پژوهش‌های مختلف می‌تواند اشراف کاملی بر انواع روش‌های کار در تحقیقات آینده به عمل آورد.

۲- هدف از مدل‌سازی توده سنگ درزه‌دار و اهمیت برداشت‌های دقیق در طراحی‌های مهندسی

درزه‌ها عبارت‌اند از ناپیوستگی‌هایی که غالباً در سنگ‌ها مشاهده می‌شود. درزه نگـاری یکـی از مهم‌ترین روش‌های شناخت محیط (توده سنگ) در علم زمین‌شناسی ساختاری است. مطالعه درزه‌ها در بسیاری از کارهای مهندسی ضرورت دارد، به‌عنوان‌مثال، هنگام استخراج سنگ‌های ساختمانی

به‌خصوص سنگ‌هایی که بایستی در بلوک‌های بزرگ استخراج شوند، شناسایی درزه‌های محل، ضروری است [۱۴, ۱۵]. هنگام انتخاب محل تونل‌های راه‌سازی و معدنی بایستی قبلاً وضعیت درزه‌های محل موردبررسی قرار گیرند، زیرا وجود آن‌ها هم در امر حفاری و پیشروی و هم نگهداری تونل حفرشده می‌تواند باعث بروز مشکلات ناپایداری شود. لذا اطلاع از وجود درزه‌ها در همه‌ی کارهای مهندسی مرتبط با زمین از قبیل معدنکاری، تونلسازی، سدسازی و فعالیت‌های عمرانی در مقیاس بزرگ بسیار ضروری است.

چندین روش برای درک و تشخیص وضعیت درزه‌ها برای مهندسین و متخصصین وجود دارد. ازجمله آن‌ها می‌توان به روش خط برداشت، اسکن لیزری و روش فتوگرامتری اشاره کرد. روش فتوگرامتری نسبت به دو روش ذکرشده مزیت و برتری‌هایی نظیر سرعت بالاتر، دسترسی سریع‌تر، هزینه کمتر را دارا است و همچنین تعداد داده‌های بیشتری را می‌توان با استفاده از فتوگرامتری از وضعیت توده سنگ به دست آورد. روش فتوگرامتری که روشی مبتنی بر تصویربرداری و پردازش تصاویر است، امروزه در سایر علوم و صنایع مانند صنایع هوایی، صنایع خودروسازی و جابه‌جایی سنجی نیز کاربردهای فراوانی پیداکرده است. لذا فراگیری روش فتوگرامتری در صنعت معدنکاری و درزه نگاری می‌تواند به مهندسین معدن و مکانیک سنگ در صحت داده‌ها، طراحی کارآمدتر و افزایش ایمنی در طراحی نهایی بسیار مؤثر باشد. یکی از اهداف مدل‌سازی توده سنگ‌های درزه‌دار ساخت مدل‌های سه‌بعدی رقومی و تحلیل آن‌ها برای امور مربوط به طراحی‌های مهندسی و انجام تحلیل‌های عددی در فازهای مختلف پروژه است. این روش در عمل به متخصصین و مهندسان این آزادی عمل را می‌دهد که بتوانند با سهولت و ایمنی بالاتر تعداد زیادی از درزه‌های یک محیط سنگی را در زمان کمتر برداشت کنند. نتایج این برداشت‌ها هرچقدر با دقت بیشتری انجام شود در جنبه‌های مختلف و مدل‌سازی‌های آتی مانند مدل‌سازی جریان سیال، مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا و تحلیل پایداری تأثیر مستقیمی خواهند داشت.

همواره مدل‌سازی و تحلیل رفتاری توده سنگ‌های درزه‌دار دغدغه اصلی مهندسان و متخصصان مکانیک سنگ بوده است و در دهه‌های گذشته همواره تلاش برای شناخت توده سنگ‌های درزه‌دار ادامه داشته است. در طی دوره رشد و ظهور روش فتوگرامتری، مهندسان و متخصصان تلاش بر آن داشته‌اند که بتوانند با توسعه تکنولوژی و دستگاه‌های نوین مدل‌های باکیفیت‌تری را از تصاویر دوبعدی استخراج کنند. در این میان فاکتورهای زیادی برای تعیین کیفیت تصاویر و مدل‌ها محاسبه و توسعه داده‌شده است که یکی از آن‌ها $GSD^{۲}$ است؛ که به معنی فاصله نمونه‌برداری زمینی است این عبارت به فاصله‌ی بین دو مرکز پیکسل متوالی بر روی زمین اشاره دارد. به عبارت ساده، GSD به‌اندازه‌ی هر پیکسل تصویر ارتو بر روی زمین اشاره می‌کند. هر چه ابعاد GSD بزرگ‌تر باشد، وضوح تصویر کمتر و جزییات محدودتری قابل‌مشاهده است GSD .رابطه مستقیمی با ارتفاع پرواز دارد، به‌طوری‌که برای یک دوربین هر چه ارتفاع پرواز بیشتر باشد، مقدار GSD نیز بزرگ‌تر خواهد شد.

در مدل‌سازی توده سنگ‌ها و درزه سنگ‌ها همواره هدف بر آن بوده است که با بهبود کیفیت تصاویر و بهتر شدن کیفیت دوربین‌ها و نرم‌افزارهای این حیطه، مدل‌هایی باکیفیت بالاتر و تحلیل‌هایی با دقت بیشتر ارائه شود تا بتوان علاوه بر بهبود ایمنی در محیط‌های کاری و کاهش هزینه‌های پروژه‌های صنعتی گامی در پیشبرد مرزهای دانش نیز برداشت [۱۴, ۱۶, ۱۷].

برداشت‌های دقیق با جزییات هرچه بیشتر و با کیفیت بالا باعث می‌شود داده‌های باکیفیت‌تری از مدل سه‌بعدی نهایی استخراج گردد و درنتیجه داده‌هایی که در مراحل بعدی طراحی‌های مهندسی وارد می‌شود از صحت بالاتری برخوردار باشند. لذا یک مورد از مهم‌ترین مواردی که بر صحت و دقت مدل نهایی تأثیرگذار است کالیبره بودن دوربین و انجام فرایند کالیبراسیون است که با توجه به اهمیت این عملیات، امروزه در نرم‌افزارهای مدل‌سازی مانند AGIsoft این عملیات به‌صورت خودکار بر روی تصاویر اجرا و خطاهای اپتیکال حذف می‌گردند. برای اسکیل و جهت‌دار کردن مدل سه‌بعدی در نرم‌افزارهای سه‌بعدی سازی مانند AGIsoft، می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود، ازجمله این روش‌ها می‌توان به مقیاس دهی با استفاده از فاصله بین دونقطه، نقطه کنترل، مقیاس بار، تدقیق با استفاده از نقطه کنترل، سیستم مختصاتی و فرمت‌های خروجی اشاره کرد. این روش‌ها اجازه می‌دهند مدل سه‌بعدی را با دقت و صحت بالا مقیاس دهی کرد.

۳- کاربردهای روش تصویربرداری توسط پهپاد در معدنکاری

در سال‌های اخیر، پهپادها برای اهداف مختلفی مانند بازرسی‌های ایمنی، نظارت و کنترل و کمک به تصمیمات مدیریتی، نظارت بر عناصر سیستم‌های زیرساختی، پایش محصولات نهایی، نقشه‌برداری‌های هوایی، پایش وضعیت آب، طبقه‌بندی کاربری اراضی، کمک‌های بشردوستانه و امدادرسانی در بلایا، حفاظت، مراقبت‌های بهداشتی، پیش‌بینی آب‌وهوا و مخابرات مورداستفاده قرار گرفته‌اند [۱۸]. استفاده از پهپادها و تحقیقات مرتبط با آن به دلیل کاهش قابل‌توجه هزینه در وسایل نقلیه و حسگرها و همچنین پیشرفت‌های قابل‌توجه در نرم‌افزار پردازش داده‌ها در صنایع مختلف در حال گسترش است [۱۹].

پهپادها نیز به‌عنوان ابزاری کارآمد در صنعت معدن، مراحل فرآیند معدنکاری در هر سه مرحله‌ی اکتشاف، بهره‌برداری و بازسازی پس از معدنکاری تقسیم کرد [۲۰]. در مرحله اکتشاف، کانسار موردمطالعه توسط گروهی متخصص متشکل از کارشناسان زمین‌شناسی مانند زمین شناسان، کانی شناسان و ژئوفیزیکدانان شناسایی می‌شود. در مرحله بهره‌برداری، زیرساخت‌های تولید مواد معدنی ایجادشده و مواد معدنی با استفاده از تجهیزات سنگین استخراج می‌شود. درنهایت، در مرحله بازسازی، کلیه مواد نامطلوب مانند ضایعات، باطله‌ها و خاک‌های سطحی آلوده از منطقه معدن حذف می‌شوند و سطح زیرزمینی به‌طور مناسب با مواد سنگی پر می‌شود [۲۱]. ازآنجایی‌که پهپادها را می‌توان به دستگاه‌های نوری، دوربین‌هایی که محدوده‌های مختلف طیف الکترومغناطیسی را پوشش می‌دهند و ابزارهای ژئوفیزیکی مانند حسگرهای مغناطیسی و طبیعی اشعه گاما مجهز کرد، می‌توان از آن‌ها برای اهداف مختلفی مانند نقشه‌برداری زمین‌شناسی و توپوگرافی، محاسبه احجام و بلوک‌ها و حجم ذخایر، و نظارت مربوط به ایمنی پله‌های معادن، حمل‌ونقل جاده‌ای، و سدهای باطله استفاده کرد. مطالعات زیادی در زمینه فناوری پهپاد در صنعت معدن انجام‌شده است.

کرس و همکاران [۲۲] یک روند نمای کاری و کاربردی برای استفاده از سیستم‌های هوایی بدون سرنشین در بررسی‌های زمین‌شناسی انجام‌شده در ایالات‌متحده را ارائه کردند. آن‌ها همچنین کاربردهای عملی مانند نظارت بر معادن و باطله‌ها را ارائه کردند. لی و چوی [۲۳] روندها و کاربردهای فناوری پهپاد در صنعت معدن را بررسی کردند. به‌طور خاص، در این مطالعات استفاده از پهپاد برای بررسی‌های توپوگرافی به‌طور مفصل ارائه‌شده 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 مورداستفاده از پهپادها برای عملیات معدنکاری، مانند نقشه‌برداری زمین و مدل‌سازی سه‌بعدی، ارزیابی آسیب، پایش محیط زیستی و پایش آلودگی‌های ناشی از معدنکاری را بررسی کردند. بوچینسکا [۲۶] چند مورد را که در آن از پهپادها در مرحله احیا استفاده‌شده بود، مرور کرد و درینگ و همکاران [۲۷] بررسی ساختار مدل‌سازی مبتنی بر پهپاد را انجام دادند که می‌تواند برای نقشه‌برداری و تجزیه‌وتحلیل دایک‌ها و سنگ‌های میزبان از آن‌ها استفاده شود. هدف از این بخش بررسی مقالات در مورد کاربردهای پهپاد در معادن و به دنبال آن مدل‌سازی توده سنگ‌های درزه‌دار است. کیفیت مدل‌های سه‌بعدی ایجادشده در فوتوگرامتری هوایی به‌شدت توسط روش‌های تصویربرداری استفاده‌شده تحت تأثیر قرار می‌گیرد.کیفیت این تصاویر مستقیماً بر دقت و جزئیات مدل سه‌بعدی نهایی تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان‌مثال، وضوح و همپوشانی تصاویر می‌توانند بر میزان جزئیات ثبت‌شده تأثیر بگذارند، با وضوح بالاتر و همپوشانی بیشتر، مدل‌های سه‌بعدی با دقت و جزئیات بیشتر ایجاد می‌شوند.علاوه بر این، نوع دوربین استفاده‌شده 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 استفاده‌شده 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 سؤالات پژوهشی زیر برای رسیدن به این هدف طبقه‌بندی‌شده است و پاسخ به این سؤالات در جهت پیشبرد این تحقیق ضروری است:

- کاربردهای فعلی پهپادها در استخراج معادن در فاز بهره‌برداری روباز و زیرزمینی و پایش شیب‌های سنگی چیست؟

- عمدتاً از چه نوع پهپادهایی در معدن استفاده‌شده است؟
- چه نوع داده‌هایی توسط تصاویر پهپادها برای کاربردهای مدل‌سازی در معدن به‌دست‌آمده است؟
- چه مقیاس‌هایی از منطقه هدف برای کاربردهای پهپاد در معدن انتخاب شده است؟

۳-۱- کاربردهای پهپاد در نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز

معادن روباز که به‌سرعت در حال پیشرفت هستند، پایش و نقشه‌برداری ازجمله مهم‌ترین نگرانی‌های مدیریتی در این معادن می‌باشند زیرا نقشه‌برداری توپوگرافی به تجهیزات نقشه‌برداری گران‌قیمت (دستگاه توتال و اسکنر لیزری زمینی) و تکنسین‌های حرفه‌ای نیاز دارد. بااین‌حال، در صورت استفاده از پهپاد، می‌توان با بودجه‌ای معقول، به‌سرعت 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 سه‌بعدی معادن روباز استفاده کردند.

وانگ و همکاران [۲۸] کارایی پهپادهای کم ارتفاع را برای به دست آوردن تصاویر با وضوح‌بالا برای بازسازی هندسه یک معدن روباز بررسی کردند. علاوه بر این، خطای نسبی از طریق مقایسه مدل‌های رقومی سطحی تولیدشده 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 موردمطالعه توسعه دادند. با مقایسه این نتایج با مدل رقومی سطحی تولیدشده بر اساس داده‌های اسکنر لیزری، نقشه اختلافات سه‌بعدی بر اساس مدل رقومی سطحی نشان داد که بیشترین انحراف کمتر از ۴± متر و خطای نسبی حجم ۱٫۵۵ درصد بوده است.

چو و همکاران [۲۹] کاربرد مثلث‌بندی هوایی را با استفاده از یک پهپاد کوچک محیط یک معدن استفاده و کارایی آن را تأیید کردند. برای رسیدن به این هدف، یک معدن اسمکتیت واقع در کره موردبررسی قرار گرفت. آن‌ها از شش موقعیت کنترل زمینی برای انجام مثلث‌بندی هوایی برای منطقه موردمطالعه استفاده کردند. علاوه بر این، ۴۴۸ عکس هوایی در منطقه اندازه‌گیری به ابعاد ۶۰۰ × ۳۸۰ متر برداشت شد و مدل زمین به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از این اطلاعات ساخته شد. مشاهده شد که استفاده از موقعیت‌های کنترل زمینی یک مثلث هوایی با دقت کمتر از ۱ سانتی‌متر را امکان‌پذیر می‌کند.

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 موردمطالعه 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 پرنده متفاوت بود را در همان منطقه موردمطالعه قرار دادند. برای دستیابی به این هدف، یک سایت ساخت‌وساز به‌عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین شد. تصاویر ارتوموزائیک و مدل رقومی سطحی با وضوح ۴ سانتی‌متر بر پیکسل با استفاده از عکس‌های هوایی به‌دست‌آمده 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 به دست آمد. پهپاد بال ثابت خطای نسبتاً ناچیزی را هنگام مقایسه نتایج دو نوع نقشه‌برداری 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 برداشت‌شده بود، پیشنهاد کردند و پس‌ازآن یک تحلیل امکان‌سنجی انجام دادند. آن‌ها معدنی در منطقه‌ای باری واقع در جنوب ایتالیا را به‌عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین کردند. ابتدا از تصاویر عمودی استفاده‌شده است و سپس تصاویری را که از زوایای متفاوت به‌دست‌آمده بودند اضافه کردند. آن‌ها همچنین مجموعه دقیق نقاط

کنترل زمینی را برای ارجاع جغرافیایی و اعتبار سنجی فرآیند بررسی کردند. مشاهده شد که موقعیت نهایی ابرهای نقطه‌ای که نمایانگر هندسه‌ی اصلی محیط معدن در بازسازی توپوگرافی معدن است، می‌تواند به‌دقت 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 معادن، ناپیوستگی‌های سطحی و دیواره‌های شیب‌دار را نشان داد.

چریکو و دوایت [۳۴] اثربخشی استفاده از ارتوموزاییک با وضوح‌بالا و مدل رقومی سطح‌های به‌دست‌آمده را در نقشه‌برداری و نظارت بر سایت‌های معدن در غرب آفریقا ارزیابی کردند. هدف اصلی این مطالعه توسعه داده‌های جغرافیایی دوبعدی و سه‌بعدی است که می‌تواند برای مشاهده عمق معادن و تشخیص ویژگی‌های سایت‌های معدن مورداستفاده قرار گیرد. آن‌ها رتوموزاییک‌ها و مدل رقومی سطحی با وضوح‌بالا 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] تجزیه‌وتحلیل فضایی را برای بهینه‌سازی مکان نقاط شبکه موردمطالعه در یک معدن روباز انجام دادند. آن‌ها از پهپادها برای عکاسی هوایی و از نرم‌افزار 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، پستی‌وبلندی‌ها، سایر عناصر جغرافیایی و ویژگی‌های طبیعی مانند رودخانه‌ها و خط‌الرأس‌ها است. بااین‌حال، ارتفاع سطوح انعکاسی درختان، ساختمان‌ها و سایر ویژگی‌های زمین که توسط مدل رقومی سطحی ارائه شده است را نشان نمی‌دهد. پس‌ازآن، یک تجزیه‌وتحلیل برای یک معدن روباز با استفاده از برنامه Quantum GIS و DEMs انجام شد. تجزیه‌وتحلیل فضایی نشان داد که استفاده از برنامه به‌طور فراوان ای 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 تجزیه‌وتحلیل نتایج انجام شده است. تچارف و همکاران [۳۶] یک الگوریتم برای بازسازی خودکار مبتنی بر تصویر پیشنهاد کردند که می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی دقیق را از تصاویر هوایی گرفته‌شده توسط پهپادها و مجموعه داده‌های چند نمای نامرتب تولید کند. آن‌ها جریان کار پیشنهادی را در یک معدن روباز اعمال و نشان دادند. ژیانگ و همکاران [۳۷] یک معدن روباز را در پکن، چین، به‌عنوان منطقه تحقیقاتی تعیین کردند و دو بار با استفاده از پهپاد برای ارزیابی تغییرات ژئومورفیک، عکس‌های هوایی با وضوح‌بالا گرفتند سپس مدل‌های رقومی را از طریق فتوگرامتری تولید کردند. سطح معدن روباز با محاسبه تفاوت بین دو مدل رقومی بر اساس الگوریتم سلول به سلول مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

برتا و همکاران [۳۸] عدم قطعیتی را که ممکن است در مدل‌های رقومی سطحی به‌دست‌آمده 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 حسگرهای تدقیق کننده‌ی مختصات و اسکن لیزری مقایسه شد.

کراشاک و همکاران [۳۹] فتوگرامتری را با استفاده از یک پهپاد تجاری ارزان‌قیمت در معادن روباز انجام دادند و دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی ساخته‌شده از این طریق را ارزیابی کردند. گی و همکاران [۴۰] نتایج مطالعه انجام‌شده با استفاده از پهپادها در معدن روباز اولان و معادن زیرزمینی Tahmoor در نیو ساوت ولز (NSW)، استرالیا را ارائه کردند. آن‌ها از یک پهپاد برای ارزیابی حجم ذخایر، نظارت بر ایمنی و پایداری دیواره‌های شیب‌دار مرتفع و فرونشست معادن زیرزمینی در این معادن استفاده کردند. اسپوزیتو و همکاران [۴۱] از فتوگرامتری پهپاد برای تعیین کمیت حجم استخراج‌شده در معدن روباز Sa Pigada در ساردینیا، ایتالیا و برای ارزیابی تغییرات در سطح معدن استفاده کردند. در جدول ۱، تحقیقات گذشته بررسی‌شده در مورد کاربرد پهپادها در نقشه‌برداری توپوگرافی در مرحله بهره‌برداری معدنی خلاصه شده است.

۳-۲- استفاده از پهپادها در تجزیه‌وتحلیل شیب‌های سنگی

پهپادها را می‌توان برای تجزیه‌وتحلیل شیب سنگی ازجمله تجزیه‌وتحلیل پایداری و ناپیوستگی شیب‌های سنگی که دسترسی مستقیم به آن‌ها چالش‌برانگیز است و

طبقه‌بندی سنگ‌شناسی توده سنگ‌ها استفاده کرد. تمام کارهای تحقیقاتی موجود بررسی‌شده در این بخش از عکس‌های هوایی مبتنی بر هواپیماهای بدون سرنشین برای نقشه‌برداری از دیواره‌ها برای سهولت در کار درزه نگاری، تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌های شیب‌های سنگی و بررسی زمین لغزش‌ها استفاده می‌کند. پهپادها در حوزه معدنکاری به‌منظور ایمنی و مدیریت ریسک به کار گرفته می‌شوند. 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 زیست‌محیطی ناشی از استخراج زغال‌سنگ نقش دارند. آن‌ها همچنین در شناسایی تغییر شکل‌ها در معادن روباز و زیرزمینی برای ایمنی و نگهداری تولید و نقشه‌برداری فرونشست چاله‌های فرو ناشی از فعالیت‌های معدنی برای ارزیابی ریسک به کار می‌روند.

جدول ۱: خلاصه‌ای از کاربردهای پهپاد برای نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهپاد	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه‌ای هدف	سبک کنترل پرواز
وانگ و همکاران [۲۹]	۲۰۱۴	تجزیه‌وتحلیل دقت هندسه ۳ بعدی تولیدشده از تصاویر پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	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	بیان‌نشده
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
تچارف و همکاران [۳۶]	۲۰۱۵	پیشنهاد گردش کار برای بازسازی مبتنی بر تصویر که می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی دقیق ایجاد کند	هردو	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
لی و چوی [۳۲]	۲۰۱۶	مقایسه فتوگرامتری هوایی با استفاده از دو نوع پهپاد موجود	هردو	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	بیان‌نشده
گی و همکاران [40]	۲۰۱۶	ارزیابی حجم، نظارت بر ایمنی دیواره‌ها و نقشه‌برداری از معدن زیرزمینی با استفاده از پهپاد	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
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 به‌دست‌آمده از فتوگرامتری	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان‌نشده
اسپوزیتو و همکاران	۲۰۱۷	کمی‌سازی حجم استخراج‌شده، ارزیابی تغییرات سطح با استفاده از فتوگرامتری مبتنی بر پهپاد	هردو	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 قابل‌دستیابی از طریق فتوگرامتری پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان‌نشده
گیل و همکاران [۳۵]	۲۰۱۹	بهینه‌سازی مکان نقاط شبکه رصدی در یک معدن روباز با استفاده از عکس هوایی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	بیان‌نشده

مک لئود [۴۲] و مک لئود و همکاران [۴۳] امکان به دست آوردن یک ابر نقطه سه‌بعدی از تصاویر ویدئویی به‌دست‌آمده با یک پهپاد را با استفاده از یک نرم‌افزار فتوگرامتری موردمطالعه قرار دادند. آن‌ها از یک پهپاد سبک‌وزن با یک دوربین فیلم‌برداری مینیاتوری که به پرواز و نشست آن به‌صورت 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، غلظت کلی ابر نقطه پایین نشان داده شده است زیرا روش پردازش مورداستفاده در وضوح پیکسل نسبتاً پایین (۶۴۰ × ۴۸۰) اعمال می‌شود. علاوه بر این، نشان داده شد که نقطه روی سطح مسطح به‌خوبی نشان داده‌شده می‌تواند دقت را برای محدوده تقریباً ۰٫۵ متر در فاصله ۲۵ تا ۳۰ متر تعیین کند. اگرچه ابر نقطه‌ای توسعه‌یافته توسط این فناوری پراکنده بود، آن‌ها پیش‌بینی کردند که نتیجه کلی می‌تواند با افزایش وضوح تصویر اصلی و پردازش تصویر بهبود یابد.

وروبلوا 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 به‌عنوان منطقه موردمطالعه تعیین شد و عکس‌های هوایی به‌طور خودکار با استفاده از یک پهپاد برداشت شد. سپس، آن‌ها یک عکس ارتوفتو ساختند و یک مدل سه‌بعدی از منطقه لغزش تهیه کردند. علاوه بر این، آن‌ها از فتوگرامتری زمینی دیجیتال برای مستندسازی دقیق‌تر منطقه موردنظر استفاده کردند.

بلیستن و همکاران [۴۵] همچنین قابلیت استفاده از پهپادها را برای بصری سازی سه‌بعدی رخنمون‌های سنگی، ازجمله در بخش‌های غیرقابل‌دسترس معادن نشان دادند. آن‌ها ذخیره پرلیت اسلواکی Lehôtka pod Brehmi را به‌عنوان 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 درمجموع ۵۸ تصویر برداشت شد. هجده نقطه به‌عنوان نقطه کنترل روی زمین با مختصات به‌دست‌آمده استفاده شد. نرم‌افزار تجاری "AGISOFT PhotoScan" برای پردازش تصویر استفاده شد و یک مدل دیجیتالی از رخنمون هدف ایجاد شد. مقایسه همبستگی بین مدل به‌دست‌آمده با استفاده از روش مرسوم و مدل به‌دست‌آمده از طریق فتوگرامتری هوایی نشان داد که مرزهای زمین‌شناسی شناسایی‌شده در دو مدل با یکدیگر منطبق نبوده و تفاوت به‌اندازه ۱ متر است. این تفاوت‌ها عمدتاً به دلیل دقت نقشه‌ها و مقاطع زمین‌شناسی آنالوگ و اشتباهات در مقیاس است.

برتا و همکاران [۴۶] سنگ‌های موجود در معادن روباز را با استفاده از فتوگرامتری پهپاد و الگوریتم‌های هوشمند طبقه‌بندی کردند. آن‌ها ابتدا زمین را از طریق فتوگرامتری هوایی با استفاده از پهپاد مدل‌سازی کردند. سپس، یک ابر نقطه‌ای ایجاد کردند که نشان‌دهنده و نماینده منطقه معدن است. منطقه به چهار گروه دیوریت، گرانیت، خاک و پوشش گیاهی طبقه‌بندی شدند. الگوریتم‌های عمومی برای دسته‌بندی ابر نقطه به چهار کلاس استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل نتایج هر الگوریتم یادگیری ماشین نشان داد که الگوریتم بردار پشتیبان با تابع پایه‌ی شعاعی بالاترین دقت را دارا است. 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].

کاتوروزاو بیرچ [۴۷] از فناوری پهپاد برای نقشه‌برداری 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 به‌دست‌آمده توسط سیستم تصویربرداری هوایی در یک دوره نسبتاً کوتاه ۴۸ ساعته پردازش شده است و یک مدل سه‌بعدی از منطقه تحقیقاتی تولید شده است. مقایسه بین مدل سه‌بعدی مبتنی بر این سیستم و مدل منبع، همبستگی خوبی را نشان داد.

استید و همکاران [۴۸] کاربرد روش‌های میدانی و سنجش‌ازدور 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 سنجش‌ازدور را برای توصیف جامع دامنه‌های سنگ‌شناسی به‌طور خلاصه ارائه کردند. این مطالعه اهمیت روش‌های سنجش‌ازدور، پهپادها و غیره را در

بررسی شیب‌های سنگی نشان داد. بااین‌حال، روش‌های 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 حاصل‌شده 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] باهدف جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی درباره جهت‌گیری فضایی درزه‌های یک دیواره بلند و تشخیص بلوک‌هایی با احتمال وجود ناپایداری اقدام به مدل‌سازی سه‌بعدی به‌وسیله‌ی 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 قابل‌اعتماد بلوک‌های شناسایی‌شده را فراهم می‌کند؛ و درک از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی دیواره را افزایش داده است. داده‌های به‌دست‌آمده 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. درنهایت، با محاسبه شاخص قابلیت اطمینان توده سنگ تحت سطوح مختلف 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 قابل‌استفاده بودن برای انواع مختلف معادن است. بااین‌حال این روش برای انجام آنالیزهای تخصصی و روش‌های عددی به داده‌های کافی نیاز دارد. در این تحقیق برای جمع‌آوری اطلاعات و مدل‌سازی‌های سه‌بعدی اولیه از تکنولوژی پهپاد استفاده شد.

در جدول ۲ دسته‌بندی مطالعات قبلی بررسی‌شده در مورد کاربردهای پهپاد برای تجزیه‌وتحلیل دیواره‌های شیب‌دار سنگی آورده شده است.

۳-۳- استفاده از فتوگرامتری هوابرد در نقشه‌برداری معادن زیرزمینی

تعداد کمی از پهپادها و ابزارهای برداشت وجود دارند که مختص محیط‌های زیرزمینی باشند. این‌گونه محیط‌ها معمولاً دارای شرایط دید محدود، دهانه‌های کوچک، تداخل مغناطیسی و عدم پوشش GPS[۳] هستند [۵۲]. بااین‌حال، 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.

کانلاکیس 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 بومی‌سازی بصری برای استخراج زیرزمینی ارائه کردند. به‌علاوه این پژوهشگران تأیید کردند که فناوری بومی‌سازی مبتنی بر پهپاد می‌تواند در محیط‌های سخت و چالش‌برانگیز به کار رود درحالی‌که از روش‌ها و فناوری‌های قابل‌اعتماد و کم‌هزینه‌تر استفاده می‌کند.

جدول ۲: خلاصه‌ای از کاربردهای پهپاد برای تجزیه‌وتحلیل دیواره‌های شیب‌دار

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهپاد	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه‌ی هدف	سبک کنترل پرواز
مک لئود [۴۲]	۲۰۱۲	ارائه امکان ایجاد یک ابر نقطه سه‌بعدی از تصاویر ویدئویی به‌دست‌آمده با پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
مک لئود و همکاران [۴۳]	۲۰۱۳	ارائه امکان ایجاد یک ابر نقطه سه‌بعدی از تصاویر ویدئویی به‌دست‌آمده با پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
وروبلوا و همکاران [۴۴]	۲۰۱۵	کاربرد فتوگرامتری دیجیتال زمینی مبتنی بر پهپاد در زمین لغزش‌ها	بال ثابت	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	پرواز خودکنترل
بلیستن و همکاران [۴۵]	۲۰۱۶	پیشنهاد سودمندی پهپاد در بررسی رخنمون‌های سنگ‌های زمین‌شناسی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	پرواز خودکنترل
برتا و همکاران [۴۶]	۲۰۱۹	طبقه‌بندی سنگ در شیب با استفاده از فتوگرامتری هوایی و یادگیری ماشین	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
کاتوروزا و برچ [۴۷]	۲۰۱۹	نقشه‌برداری جبهه کار معادن با استفاده از فناوری پهپاد	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
استد و همکاران [۴۸]	۲۰۱۹	بررسی کاربرد روش‌های میدانی و سنجش‌ازدور برای اخذ ویژگی‌های شیب‌های سنگی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
هاو و همکاران[۴۹]	۲۰۲۳	بررسی پایداری یک دیواره سنگی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	پرواز خودکنترل
کالیو و همکاران[۵۰]	۲۰۲۳	جمع‌آوری داده‌های کمی و کیفی درباره جهت‌گیری فضایی درزه‌های یک دیواره بلند و تشخیص بلوک‌هایی با احتمال وجود ناپایداری	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
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 منطقه‌ای	بیان‌نشده

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. بااین‌حال، 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 معادن زیرزمینی را که به دلیل استخراج و انفجار غیرقابل‌دسترس هستند ثبت کند. این پهپاد دارای یک بالون پر از گاز هلیوم، یک ملخ پهپاد با نورپردازی قدرتمند LED[۴] با کنترل از راه دور، باتری قابل شارژ، یک دوربین کنترل از راه دور، ثبت‌کننده تصویر و فرستنده فرکانس رادیویی برای کنترل تصویر است. 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 به‌عنوان سیگنال مزاحم در طول پرواز حتی زمانی که بالون از دیدمستقیم 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 معادن زیرزمینی که امکان استفاده از GPS نیست

که شدت نورکم بوده و فضاهای کاری و قابل‌دسترس محدود است، وجود دارد. از نتایج قابل اشاره در تحقیق می‌توان به: (۱) توسعه فناوری ضبط و کنترل تصویر برای کاربرد در فضاهای باریک و محیط‌های زیرزمینی، (۲) توسعه راه‌حلی به‌منظور استفاده از پهپادها حتی در محیط‌های تاریک، با به‌کارگیری نورهای طراحی‌شده ویژه متصل به هواپیماهای بدون سرنشین، (۳) ضبط تصویر با کیفیت و کمیت قابل‌توجه برای ایجاد ابر نقطات سه‌بعدی و (۴) شواهدی از ویژگی‌های توده سنگ و حرکت توده سنگ با پردازش داده‌های ابر نقطه‌ای تولیدشده؛ اشاره کرد. این مطالعه نشان داد که ابرهای نقطه‌ای ایجادشده با استفاده از پهپاد بسیار شبیه به ابر نقاط ایجادشده با استفاده از اسکنر تشخیص نور و محدوده (LiDAR[۵]) هستند. باوجود وضوح نقطه نسبتاً پایین‌تر، اطلاعات ژئوتکنیکی مهمی ازجمله 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 سه‌بعدی 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 هوابرد برای به دست آوردن داده‌های با کیفیت بالا برای تجزیه‌وتحلیل ژئوتکنیکی استفاده کرد. سیستم پهپاد شامل حسگر تشخیص موانع، سیستم نورپردازی، تصاویر حرارتی و نرم‌افزار است. درنتیجه، 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. بااین‌حال، تشخیص زمین سست و ساختارهای دقیق راحت‌تر بوده است. این مطالعه نشان داد که ترکیب خوبی از فن‌آوری‌های هوایی با پهپادها می‌تواند به‌طور مؤثر فتوگرامتری را انجام دهد و داده‌های زمین‌شناسی را در محیط‌های معدنکاری زیرزمینی شناسایی کند.

جدول ۳: خلاصه‌ای از کاربردهای پهپاد برای نقشه‌برداری در معادن زیرزمینی

منبع	سال	هدف مطالعه	نوع پهپاد	نوع اکتساب داده	مقیاس منطقه‌ی هدف	سبک کنترل پرواز
کانلاکیس و همکاران [۵۰]	۲۰۱۶	ارزیابی فناوری برای سیستم‌های بومی‌سازی بصری برای استخراج زیرزمینی	بال چرخشی	داده‌های 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 منطقه‌ای	بیان‌نشده
میچل و مارشال [۵۴]	۲۰۱۷	ساخت نمونه اولیه پهپاد برای اسکن معادن زیرزمینی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس معدن	پرواز خودکنترل
ازهاری و همکاران [۵]	۲۰۱۷	تولید مدل‌های سه‌بعدی محیط‌های عملیاتی به‌وسیله‌ی پهپاد زیرزمینی	بال چرخشی	داده عکس	مقیاس معدن	بیان‌نشده
ترنر و همکاران [۵۳]	۲۰۱۸	ایجاد مدل سه‌بعدی معدن زیرزمینی با استفاده از تصویر پهپادی	بال چرخشی	تصویر حرارتی	مقیاس منطقه‌ای	بیان‌نشده
راج [۵۲]	۲۰۱۹	پیشنهاد سیستم پایش مبتنی بر پهپاد قابل‌استفاده در معادن زیرزمینی	بال چرخشی	تصویر دوربین دیجیتال	مقیاس منطقه‌ای	پرواز نیمه خودکنترل
ترنر و همکاران [۴۹]	۲۰۲۰	پیشنهاد روشی برای تشخیص و تعیین کمیت ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی با استفاده از تصاویر حرارتی و چند طیفی	بال چرخشی	تصویر حرارتی تصویر چند طیفی	مقیاس منطقه‌ای	پرواز نیمه خودکنترل

آن‌ها [۵۶] همچنین با استفاده از تصاویر حرارتی و چندطیفی به‌دست‌آمده 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 موردمطالعه 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.

ازهاری و همکاران [۵۸] ساخت مجموعه حسگر پهپاد را تجزیه‌وتحلیل کردند که می‌تواند مدل‌های سه‌بعدی 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 نقشه‌برداری در معادن زیرزمینی را نشان می‌دهد.

۴- چالش‌های موجود در استفاده از پهپادها در معادن و چشم‌اندازهای آینده

در معادن روباز، شرایط آب و هوایی با ایجاد انحراف در مسیرهای از پیش تعیین‌شده‌ی پهپاد در مقایسه با معادن زیرزمینی، چالش‌هایی را ایجاد می‌کند. در برخی موارد، شرایط آب و هوایی می‌تواند منجر به آسیب رساندن به پهپادهای در حال پرواز و مختل کردن مأموریت‌های آن‌ها شود [۵۹, ۶۰].

در صنعت معدن و همچنین سایر صنایع، مصرف انرژی در طول یک مأموریت پروازی می‌تواند چالش‌های زیادی را تحمیل کند. به‌طورمعمول، پهپادها با باتری کار می‌کنند و انرژی را برای شناور شدن، پرواز، اتصال بی‌سیم، داده‌ها و پردازش تصویر مصرف می‌کنند. با توجه به محدودیت‌های انرژی، باید تصمیم‌گیری شود که آیا تجزیه‌وتحلیل داده‌ها 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 عمده‌ترین مسائلی است که کارگران معدن با آن مواجه هستند. برخی از مفاهیم برای استفاده از هواپیماهای بدون سرنشین در معادن زیرزمینی پیشنهادشده است، اما معمولاً از تکنیک‌های دستی برای کنترل و ناوبری استفاده می‌شود. پهپاد طراحی‌شده حداقل باید قابلیت ناوبری کاملاً مستقل در محیط فاقد GPS را دارا باشد و در محیطی پرواز کند که نوری به‌جز نوری که پهپاد ارائه می‌دهد، نباشد.

ماهیت محیط‌های معادن زیرزمینی و سایر محدودیت‌ها (به‌عنوان‌مثال، دیوارهای اطراف، کابل‌ها و تجهیزات) مستلزم آن است که پهپاد در برابر برخورد با موانع احتمالی مقاوم باشد. در حالت ایدئال، پهپاد باید بتواند موانع را در طول پرواز خود در محیط داخلی شناسایی کرده و از آن‌ها اجتناب کند. پهپاد همچنین باید بتواند محیط‌های خشن معادن زیرزمینی را تحمل کند و در گردوغبار و دود سنگین نیز پرواز کند؛ بنابراین، پهپاد باید ضد آب، ضد گردوغبار و ضدضربه باشد و در برابر تغییرات فشار، دما و رطوبت در سراسر محیط معدن مقاوم باشد. برای کاربردهای معدن زغال‌سنگ زیرزمینی، به دلیل وجود متان و خطرات احتمالی انفجار و یا آتش‌سوزی، باتری و حسگرهای الکترونیکی باید عایق‌بندی شوند. علاوه بر الزامات ذکرشده، پهپاد باید ویژگی‌های دیگری ازجمله مصرف انرژی کم و تشخیص بدن انسان را دارا باشد [۶۱].

۵- بحث و نتیجه‌گیری

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

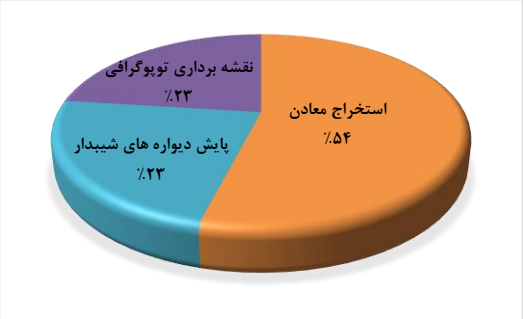
(۱) نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز در مرحله بهره‌برداری

(۲) تجزیه‌وتحلیل شیب سنگ در مرحله بهره‌برداری

(۳) نقشه‌برداری در معادن زیرزمینی در مرحله بهره‌برداری

شکل ۱ توزیع درصد هر کاربرد پهپاد در معدن و مطالعات طبقه‌بندی‌شده تحت آن کاربرد را نشان می‌دهد. کاربردهای پهپاد در مرحله بهره‌برداری ۵۴ درصد از کل مطالعات بررسی‌شده را تشکیل می‌دهند. نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز کاربرد رایج در مرحله بهره‌برداری بود که ۲۳ درصد از کل مطالعات را شامل می‌شود و همچنین

۲۳ درصد از مطالعات به بررسی و پایش دیواره‌های شیب‌دار اختصاص داده‌شده است. این نمودار حوزه‌های مختلف مرور منابع را توسط نویسندگان نشان می‌دهد و از بین مطالعاتی که برای این تحقیق انتخاب شده‌اند دسته‌بندی گردیده است. لذا تفسیر این نمودار صرفاً بر اساس مطالعات تشکیل‌دهنده آن بوده و به تنوع مقالات بررسی‌شده مرتبط است.



شکل ۱: توزیع درصد مطالعات بررسی‌شده‌ی کاربردهای پهپاد در معادن

این بررسی تجزیه‌وتحلیلی از مطالعات انجام‌شده در ۱۰ سال گذشته توسط محققین برای استفاده از فناوری پهپاد در فرآیند معدنکاری که تمرکز بیشتر آن‌ها بر مدل‌سازی‌ها و استخراج داده‌های مفید جهت مدل‌سازی است، ارائه می‌کند.

- این بررسی‌ها نشان داد که کاربردهای فعلی پهپادها در معدن را می‌توان به (۱) تجزیه‌وتحلیل زمین‌شناسی و ساختاری از طریق روش سنجش‌ازدور، (۲) نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز، (۳) تجزیه‌وتحلیل شیب‌های سنگی، (۴) اتخاذ تصمیمات مدیریتی بر پایه اطلاعات نظارتی مبتنی بر پهپادها، (۵) بررسی در معادن زیرزمینی در مرحله بهره‌برداری و (۶) مدل‌سازی سه‌بعدی با دقت بالا طبقه‌بندی کرد.
- در بین مطالعات گزارش‌شده تاکنون، نقشه‌برداری توپوگرافی در معادن روباز بیشترین کاربرد را داشته است.
- متداول‌ترین نوع پهپادها و داده‌هایی که توسط حسگرها مانند حسگرهای نویزگیر نوری و حسگرهای مانع گریز برای کاربردهای پهپاد در معدن به دست می‌آیند، به ترتیب بال چرخشی و تصاویر یا ویدئوهای ضبط‌شده توسط دوربین‌های دیجیتال بودند و پهپادهای بال ثابت برای نقشه‌برداری‌های وسیع بعد از پهپادهای بال چرخشی بیشترین کاربرد را داشته‌اند.
- با توجه به مقیاس‌های منطقه موردنظر برای کاربردهای پهپاد، مطالعات معدن و مقیاس منطقه‌ای در مرحله بهره‌برداری شایع‌تر بود و یک سبک مستقل از کنترل پرواز معمولاً برای کاربردهای پهپاد در تمام مراحل فرآیند استخراج مورداستفاده قرار گرفته است.
- با توجه به مطالعات انجام‌شده از پهپادها در حوزه معدن، مشاهده شده است که پهپادها دارای مزایای قابل‌استفاده و مدیریت با هزینه کم، توانایی کار در مناطق صعب‌العبور برای افراد و تسریع به دست آوردن داده‌های موردنیاز می‌باشند.
- بررسی و مطالعات مبتنی بر پهپاد می‌تواند داده‌هایی با وضوح و چگالی نقاط بالا به دست آورد زیرا پهپادها می‌توانند در ارتفاعات پایین پرواز کنند. علاوه بر این، کنترل و مانور آسان پهپادها تنها با حداقل آموزش یک مزیت است؛ بنابراین، این ابزارها به‌طور فعال برای وظایف توسعه معادن مانند نقشه‌برداری هوایی، اکتشاف ژئوفیزیک هوابرد و نظارت بر محیط‌زیست مورداستفاده قرار می‌گیرند.
- 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 می‌توان روی پهپادها نصب کرد وجود دارد.
- تغییرات ناگهانی آب‌وهوا در فضای کاری می‌تواند هزینه‌های بیشتری هم ازنظر مالی و هم ازنظر زمانی به مطالعات تحمیل کند.

با توجه به اینکه امروزه تکنیک فتوگرامتری برای سه‌بعدی سازی و بصری سازی پروژه‌های مهندسی رو به افزایش است لذا در دست داشتن سخت‌افزار و نرم‌افزار مناسب و توسعه روش‌هایی با سرعت پردازش بالا می‌تواند به آینده حضور این پرنده‌های بدو سرنشین در معادن به‌طور فزاینده‌ای کمک کند.

۶- جدول واژگان و اصطلاحات

اصطلاحات پرکاربرد استفاده شده در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: خلاصه ای از اصطلاحات پرکاربرد استفاده شده

اختصار/ اصطلاح	اختصار/ ترجمه انگلیسی	ترجمه فارسی	توضیحات
فتوگرامتری هوایی	Aerial Photogrammetry	-	روشی جهت ساخت مدل‌های سه‌بعدی با استفاده از عکس.
پهپاد	Drone	-	پرنده بدون سرنشین که جهت اخذ تصاویر هوایی استفاده می‌شود
پهپاد بال ثابت	Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle (FWUAV)	-	نوعی پهپاد که طراحی باله‌ای آن برگرفته از بال هواپیما است
پهپاد بال چرخشی	Rotary-Wing Unmanned Aerial Vehicle (RUAV)	-	نوعی پهپاد که طراحی باله‌ای آن برگرفته از بال هلیکوپتر است
ابر نقاط سه‌بعدی	Three-Dimensional Point Cloud	-	مجموعه نقاطی که علاوه بر داده‌های مختصاتی داده‌های رنگی را نیز در خود ذخیره می‌کند.
گردش کار	workflow	-	روند و نحوه‌ی توسعه انجام کار را نشان می‌دهد.
کالیبراسیون	Calibration	-	به عملیات حذف یکسری خطای مرتبط با تجهیزات گفته می‌شود.
روندنما	flowchart	-	روند انجام مرحله‌به‌مرحله 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 به دست آورد
مأموریت پروازی	Flight Mission	-	مسیر و نحوه‌ی عکس‌برداری که به‌صورت از پیش تعیین‌شده یا دستی می‌توان آن را 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
SfM	Structure from Motion	ساختار ناشی از حرکت	یک روش تبدیل تصاویر دوبعدی به مدل یکپارچه سه‌بعدی.
RGB	Red, Green, Blue	قرمز. سبز آبی	داده‌های رنگی که در ابرنقاط ذخیره می‌شوند را گویند.
GSD	Ground sample distance	فاصله نمونه‌برداری زمینی	اندازه هر پیکسل روی تصویر است که نشان می‌دهد چه ابعادی روی زمین، برای مشخص شدن ارتفاع پرواز در نقشه‌برداری با پهپاد مورداستفاده قرار می‌گیرد.
GCP	Ground Control point	نقاط کنترل زمینی	نقاطی که با وارد کردن مختصات آن‌ها به مدل نهایی می‌توان مدل را ازنظر مختصات تدقیق نمود.

مراجع

[1] L. G. De Vallejo and M. Ferrer, *Geological engineering*. CRC press, 2011.

[2] M. Lato and M. Vöge, "Automated discontinuity orientation mapping from lidar data," in *ISRM International Symposium-EUROCK 2012*, 2012: OnePetro.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] T. Dang, "The use of photogrammetry in measuring geologic structures and creating a 3D model on exposed rock faces," in *ISRM VietRock International Workshop*,2015 :OnePetro.

[8] Q. Liu, "Remote sensing technologies in rock mass characterization," in *ISRM SINOROCK 2013*, 2013: OnePetro.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 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.

[14] S. D. Priest, *Discontinuity analysis for rock engineering*. Springer Science & Business Media, 1993.

[15] G. P. Giani, *Rock slope stability analysis*. CRC Press, 1992.

[16] C. Cryderman, S. B. Mah, and A. Shufletoski, "Evaluation of UAV photogrammetric accuracy for mapping and earthworks computations," *Geomatica*, vol. 68, no. 4, pp. 309-317, 2014.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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.

[20] W. A. Hustrulid, M. Kuchta, and R. K. Martin, *Open pit mine planning and design, two volume set & CD-ROM pack*. CRC Press, 2013.

[21] 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.

[22] 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.

[23] S .Lee and Y. Choi, "Reviews of unmanned aerial vehicle (drone) technology trends and its applications in the mining industry," *Geosystem Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 197-204, 2016.

[24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] Q. Wang *et al.*, "Accuracy evaluation of 3d geometry from low-attitude uav collections a case at

[39] 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.

[40] 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.

[41] G. Esposito, G. Mastrorocco, 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.

[42] T. K. McLeod" ,3D imaging applications in Earth Sciences using video data acquired from an unmanned aerial vehicle," Carleton University, 2013 .

[43] T. McLeod *et al.*, "Using video acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) to measure fracture orientation in an open-pit mine," *Geomatica*, vol. 67, no. 3, pp. 173-180, 2013.

[44] D. Vrublová, R. Kapica, E. Jiránková, 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.

[45] P. Blistan, Ľ. Kovanič, V. Zelizňaková, and J. Palková, "Using UAV photogrammetry to document rock outcrops," *Acta Montanistica Slovaca*, vol. 21, no. 2, 2016.

[46] 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.

[47] 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.

[48] 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.

[49] 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.

zijin mine," *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, no. 4, p. 297, 2014.

[29] 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.

[30] 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. 462-469,2015.

[31] 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.

[32] 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.

[33] 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.

[34] 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.

[35] M. Gil and P. Frąckiewicz, "Optimization of the location of observation network points in open-pit mining's ",2019 :GIS Forum.

[36] 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 and Spatial Information Sciences*, vol. 2, no. W1, pp. 15-22, 2015.

[37] 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.6 ,pp. 1-18, 2018.

[38] 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. 463-470 ,2018.

[50] D. Caliò, 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.

[51] 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.

[52] 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.

[53] 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.

[54] 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.

[55] P .Raj, "Use of Drones in an Underground Mine for Geotechnical Monitoring," The University of Arizona, 2019.

[56] R. M. Turner, M. M. MacLaughlin, and S. R. Iverson, "Identifying and mapping potentially adverse discontinuities in underground excavations using thermal and multispectral UAV imagery," *Engineering Geology*, vol. 266, p. 105470, 2020.

[57] J. Mitchell and J. A. Marshall, "Design of a novel auto-rotating uav platform for underground mine cavity surveying," 2017.

[58] 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/1710_33_Sennersten./

[59] H. Shakhatreh *et al.*, "Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges," *Ieee Access*, vol. 7, pp. 48572-48634, 201.

[60] 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.

[61] 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.

[62] 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.

[1] Structure from Motion
[2] Ground Sample Distance
[3] Global Positioning System
[4] Light Emitted Diode
[5] Light Detection and Ranging