



مروری بر استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد

هاشم شاهسونی^{*۱}

۱- استادیار؛ دانشگاه کردستان، کردستان، سنندج

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۰۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۴

* نویسنده مسئول مکاتبات: h.shahsavani@uok.ac.ir

چکیده

همزمان با توسعه فن‌آوری پرنده هدایت‌پذیر از دور (پهپاد) حسگرهایی با اندازه کوچکتر نیز ابداع شده‌اند. اکنون با مجهز شدن پهپادها به این حسگرها، می‌توان در حوزه‌های وسیعی از علوم مختلف از آنها استفاده نمود. مزایای بسیار زیاد پهپادها نظیر کاهش خطرات جانی، قیمت مناسب، هزینه تعمیر و نگهداری اندک، هزینه عملیاتی پایین، مکان‌یابی بسیار دقیق و انعطاف‌پذیری مناسب آنها باعث شده است تا پهپادها به ابزار قدرتمند در برداشته‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد تبدیل شوند. هرچند استفاده از پهپادها در زمینه مغناطیس‌سنجی هوابرد که شاخه‌ای از علم ژئوفیزیک است، در مراحل ابتدایی خود قرار دارد؛ اما به سرعت در حال پیشرفت و توسعه می‌باشد. در این مطالعه، اهمیت و مزایای استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد، تاریخچه استفاده از پهپادها در این زمینه و کشورهای پیشرو در استفاده از این فن‌آوری، روش‌های نصب حسگرهای مغناطیس‌سنج روی پهپادها به منظور جلوگیری از تداخل نوفه پهپاد روی مغناطیس‌سنج، انواع حسگرهای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی نصب‌شده روی پهپادها و انواع پلتفرم‌هایی که در مغناطیس‌سنجی با استفاده از پهپاد به کار گرفته شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مثال‌هایی از مقایسه نتایج حاصل از مغناطیس‌سنجی هوابرد با استفاده از پهپاد با داده‌های زمینی آورده شده است. در پایان چالش‌ها و چشم‌اندازهای پیشروی استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد مورد بحث قرار گرفته است.

واژگان کلیدی

پهپاد
مغناطیس‌سنجی هوابرد
حسگر
مغناطیس‌سنج

۱- مقدمه

نیازهای نظامی، ریشه اصلی ساخت و توسعه پهپادها بوده‌اند. تاریخچه پهپادها به حدود یک قرن پیش باز می‌گردد. اولین پهپاد حدود ۹۵ سال پیش در ۱۵ سپتامبر ۱۹۲۴ یعنی شش سال بعد از پایان جنگ جهانی اول ساخته شد و به پرواز درآمد، (شکل ۱). در سال‌های بعد در دهه ۱۹۵۰ میلادی نیروی دریایی و هوایی ارتش آمریکا بر روی ساخت و توسعه پهپادها تمرکز کردند (Anderson, K., Gaston, K.J., 2013). از نظر کاربرد می‌توان پهپادها را به دو دسته تقسیم بندی کرد (Singhal et al., 2018).

الف) کاربری غیر نظامی

ج) کاربری نظامی

در جدول ۱ مثال‌هایی از کاربرد پهپادها در هریک از این دو شاخه آورده شده است.



شکل ۱: اولین هواپیمای بدون سرنشین تاریخ بشر که در ۱۵ سپتامبر ۱۹۲۴ به پرواز درآمد (Anderson, K., Gaston, K.J., 2013).

امروزه پهپادها در علوم مختلف نظیر زمین‌شناسی، اکولوژی، کشاورزی، جنگلداری و غیره کاربردهای بسیار زیادی یافته‌اند (Bemis et al., 2014; Candiago et al., 2015; Anderson and Gaston, 2013; Wallace et al., 2012).

جدول ۱: مثال‌هایی از کاربردهای پهپادها در حوزه‌های مختلف (Singhal et al., 2018)

کاربردهای نظامی	کاربردهای غیر نظامی
حمل مهمات و سلاح	پایش کیفیت هوا
حمل دارو به مناطق جنگی	پایش خاک
جاسوسی	پایش محصولات معدن کاری
عملیات شناسایی در مرزها	پایش آب‌ها
بمباران	پایش کوه‌ها
شلیک موشک	مدیریت بحران شناسایی و اطلاعات

افزایش استفاده از پهپادها به دلیل مزایای بسیار زیاد آنها می‌باشد. از جمله این مزایا می‌توان به ایمنی بالا، سرعت برداشت زیاد، قیمت پایین، هزینه نگهداری اندک، کارآمدی مناسب و سهولت بکارگیری آنها اشاره کرد (Wallace et al., 2012; Bendig et al., 2014; Dash et al., 2017; Tian et al., 2017).

مغناطیس‌سنجی شاخه‌ای از علم ژئوفیزیک است، که به بررسی تغییرات خواص مغناطیسی مواد زیر سطحی می‌پردازد. مغناطیس‌سنجی کاربردهای بسیار زیادی در زمین‌شناسی، اکتشاف مواد معدنی و نفت دارد (Dentith and Mudge, 2014). یکی از ویژگی‌های روش مغناطیس‌سنجی این است که می‌توان این روش را به صورت هوابرد با استفاده از بالگرد و یا هواپیما انجام داد. به این ترتیب می‌توان با سرعت زیاد منطقه وسیعی را پوشش داد. در این مطالعه روش مغناطیس‌سنجی هوابرد با استفاده از هواپیما یا بالگرد، روش سنتی نامیده شده است. با معرفی پهپادها دانشمندان حوزه ژئوفیزیک نیز علاقه‌مند به استفاده از این فن‌آوری شده‌اند. استفاده از پهپاد به منظور مغناطیس‌سنجی هوابرد در ابتدای راه خود می‌باشد و تحقیقات بسیاری برای توسعه این فن‌آوری در سراسر دنیا در حال انجام است. این مطالعه بر روی تحقیقاتی که از پهپاد به منظور مغناطیس‌سنجی هوابرد استفاده نموده‌اند، تمرکز داشته و به قسمت‌های زیر تقسیم بندی می‌شود:

۱) اهمیت مغناطیس‌سنجی هوابرد با استفاده از پهپاد و مقایسه آن با روش سنتی

۲) تاریخچه استفاده از پهپاد به منظور مغناطیس‌سنجی هوابرد

۳) چگونگی نصب حسگرهای مغناطیس سنج روی پهپاد

۴) انواع پلتفرم‌های مورد استفاده در مغناطیس‌سنجی هوابرد

۶) مثال‌هایی از مقایسه داده‌های برداشت شده با پهپاد و داده‌های زمینی

۵) چالش‌ها و چشم اندازهای پیشروی استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد

۲- اهمیت و مزایای استفاده از پهپاد در مغناطیس-سنجی هوابرد

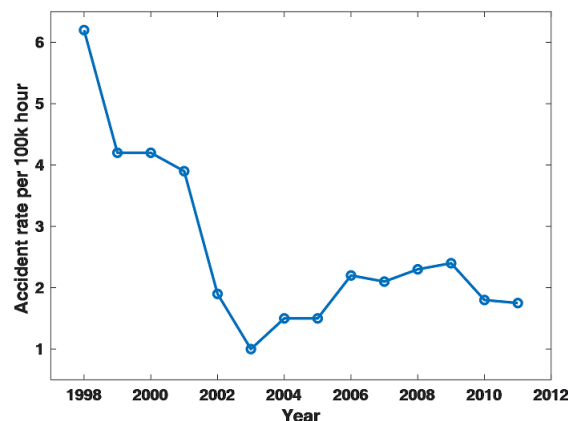
روش مغناطیس‌سنجی کاربردهای بسیار زیادی در اکتشاف مواد معدنی، اکتشاف نفت، زمین‌شناسی، باستان‌شناسی، اکتشاف مهمات منفجر نشده یا مین‌های مدفون، اکتشاف مصنوعات فلزی و غیره دارد. یکی از مهم‌ترین اهداف استفاده از پهپادها کاهش خطرات جانی برای خلبان و خدمه هواپیما یا بالگرد می‌باشد. گزارش اتحادیه انجمن ژئوفیزیک هوابرد بین المللی^۱ که در سال ۲۰۱۱ منتشر شده است نشان می‌دهد در این سال ۱/۷۵ مرگ و میر به ازای صد هزار ساعت پرواز در روش مغناطیس‌سنجی هوابرد به روش سنتی اتفاق افتاده است، (شکل ۲). این در حالی است که بیشترین خطر در برداشت با پهپاد، سقوط پرنده و از بین رفتن آن می‌باشد. به عبارت دیگر برداشت‌های مغناطیس‌سنجی با پهپاد هیچ‌گونه خطر جانی را در بر ندارد (Kroll, 2013).

1-International Airborne Geophysics Society Association (IAGSA)

جدول ۲: ارتفاع پرواز پهپادها در تحقیقات مختلف به منظور برداشت مغناطیس‌سنجی هوابرد.

ارتفاع پرواز پهپاد (متر)	کاربرد	مرجع
۱۰ تا ۱۰۰	تعیین تغییرات میدان مغناطیسی در امتداد ساحل	(Pei et al., 2017)
۲۰ و ۵۰ و ۱۰۰	تعیین تغییرات میدان مغناطیسی و مقایسه با داده‌های زمینی	(Cherkasov and Kapshtan, 2018)
۸۰	بررسی تغییرات میدان مغناطیسی اندازه گیری شده توسط پهپاد	(Cunningham et al., 2016)
۲۵ و ۵۰	بررسی تغییرات میدان مغناطیسی یک آتشفشان	(Kaneko et al., 2011)
۳۰	بررسی تغییرات میدان مغناطیسی اندازه گیری شده توسط پهپاد	(Jackisch et al., 2019)
۳ و ۵ و ۷ و ۲۰	بررسی توانایی استفاده از پهپاد در اکتشاف یک جسم مدفون فلزی	(Macharet et al., 2016)
۷ تا ۱۰	بررسی تغییرات میدان مغناطیسی اندازه گیری شده توسط پهپاد	(Malehmir et al., 2017)
۴۰	اکتشاف چاه‌های نفت متروکه	(Nikulin and de Smet, 2019)
کمتر از ۶۰	اکتشاف غیر مستقیم کرومیت با استفاده از پهپاد	(Parvar et al., 2018)

هرچند استفاده از پهپادها محدودیت‌هایی نیز دارد که در بخش ۸ به برخی از آنها اشاره شده است. اما روش مغناطیس‌سنجی با استفاده از پهپاد نسبت به روش سنتی بسیار ارزان می‌باشد. به عبارت دیگر قیمت تجهیزات و نیز هزینه انجام عملیات برداشت با استفاده از پهپاد نسب به روش سنتی بسیار کمتر می‌باشد. هزینه تجهیزات در روش سنتی می‌تواند از چند صد هزار دلار تا چند میلیون دلار باشد. در حالی که این هزینه با استفاده از پهپاد کمتر از صد هزار دلار خواهد بود (Pei et al., 2017). هزینه عملیات برداشت در روش سنتی شامل خلبان و تکنسین-های خبره می‌باشد. در این نوع عملیات ایمنی اشخاص باید مورد توجه قرار گیرد. در حالی که در عملیات برداشت با استفاده از پهپاد به جای خلبان، اپراتور زمینی وجود دارد و جان افراد مانند روش سنتی در معرض خطر نبوده و از ایمنی بالایی برخوردارند. عملیات برداشت با استفاده از پهپاد را علاوه بر روز می‌توان در شب نیز انجام داد. از این طریق می‌توان اثر نوبه تغییرات روزانه و یا طوفان‌های خورشیدی را به حداقل رساند. این در حالی است که روش سنتی را فقط در روز می‌توان پیاده‌سازی نمود (Barnard, 2008). همچنین هزینه تکرار عملیات برداشت با استفاده از پهپاد بسیار کمتر از هزینه تکرار عملیات در روش سنتی می‌باشد. با استفاده از پهپاد می‌توان اطلاعات دقیق‌تر و با قدرت تفکیک بیشتری نسبت به روش سنتی بدست آورد. زیرا در حالت کلی پهپادها در ارتفاع کمتری نسبت به بالگرد یا هواپیما پرواز می‌کنند. با این وجود نه



شکل ۲: نرخ وقوع حوادث در برداشت‌های ژئوفیزیکی هوابرد سنتی به ازای هر صد هزار ساعت پرواز (Kroll, 2013).

پهپادها می‌توانند شکاف بین مغناطیس‌سنجی زمینی (Everett, 2013; Hinze et al., 2013)، با ویژگی پوشش کم و قدرت تفکیک^۱ زیاد را با مغناطیس‌سنجی هوایی سنتی (Hood and Ward, 1969; Luyendyk, 1997)، با ویژگی پوشش زیاد و قدرت تفکیک کم پر کنند. در روش سنتی مغناطیس‌سنجی هوابرد، بالگرد در ارتفاعی بین صد تا صدوپنجاه متر از سطح زمین پرواز می‌کند (Cunningham Walter et al., 2019; et al., 2018). این در حالی است که در برداشت‌های زمینی، مغناطیس‌سنج بر روی سطح زمین قرار دارد. به این ترتیب بین داده‌های برداشت شده زمینی و داده‌های برداشت شده سنتی اختلاف ارتفاعی حدود صد متر وجود دارد. هر چند برداشت داده در ارتفاعی کمتر از صد متر با استفاده از بالگرد امکانپذیر می‌باشد؛ اما بسیار مخاطره آمیز است. پهپادهای مجهز به مغناطیس‌سنج می‌توانند در ارتفاع کم پرواز کرده و خلاء بین دوسری داده را پر کنند (Walter et al., 2019). به عبارت دیگر پیشرفت فناوری، پهپادها را قادر ساخته است تا در ارتفاع کمتر از صد متر پرواز کنند و داده‌هایی با قدرت تفکیک بسیار بالا نسبت به روش‌های سنتی ارائه دهند (Samson et al., 2010; Stoll and Moritz, 2013a; Cunningham et al., 2016; Parvar et al., 2018; Wood et al., 2016; Walter et al., 2019). برخی از محققین معتقداند برداشت‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از پهپاد می‌تواند جایگزین برداشت‌های زمینی مغناطیس‌سنجی شود (Parshin et al., 2018). در جدول ۲ ارتفاع پرواز پهپادها در تحقیقات مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. هر چند در برخی از تحقیقات ارتفاع پرواز پهپاد بیشتر از صد متر انتخاب شده است (Wood et al., 2016; Samson et al., 2010; Hashimoto et al., 2014). این ارتفاع پروازی، با توجه به نوع پهپاد و هدف برداشت انتخاب شده است.

روش هوابرد سنتی و نه استفاده از پهپاد را نمی‌توان در شرایط بد جوی مانند بارش باران و برف و یا باد شدید اجرا کرد. (Pei (Barnard, 2008) et al., 2017).

۳- تاریخچه استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی

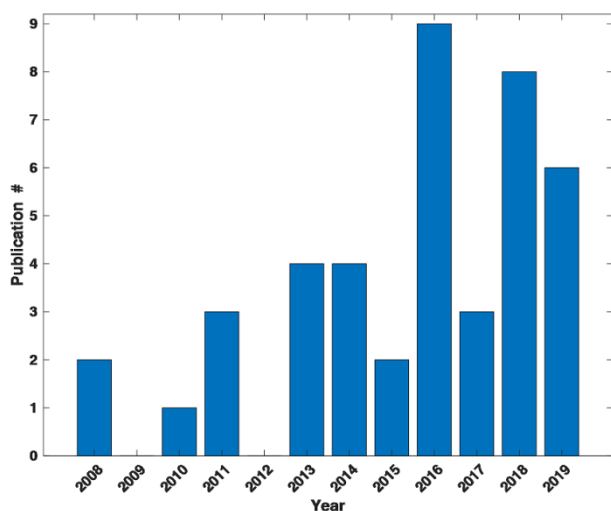
هوابرد

همان‌طور که اشاره شد، پهپادها به منظور استفاده نظامی در نیمه دهه ۱۹۲۰ ابداع شدند تا جایگزین هواپیماهای باسرنشین در مأموریت‌های پر خطر شوند. شاید اولین آزمایش‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد به وسیله پهپادهایی از سری آنت-پلین یک و دو^۱ باشد که در هفدهم-هجدهم نوامبر سال ۲۰۰۳ میلادی در منطقه‌ای نزدیک شهر کاگوشیما^۲ ژاپن به پرواز درآمدند (Funaki et al., 2008).

در آن زمان، معایبی نظیر هزینه زیاد، حسگرهای بزرگ، پایداری ضعیف و سیستم‌های کنترل پرواز ابتدایی باعث شده بود تا استفاده و توسعه پهپادها بسیار کند باشد. پیشرفت‌های اخیر در توسعه مغناطیس‌سنج-های سبک و دقیق و پهپادهایی که تحمل جابجایی بار سنگین را دارند، موجب شده است مغناطیس‌سنجی هوابرد با استفاده از پهپاد به واقعیت بپیوندد. تلاش‌های بسیار زیاد در خور توجه‌ای به منظور استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد در دهه گذشته انجام گرفته است. این امر علاقه و نیاز به این روش ژئوفیزیک هوایی را نشان می‌دهد (Hashimoto et al., 2014; Parvar et al., 2018; Barnard, 2008; Hammack et al., 2018; Schultz et al., 2016; Pei et al., 2017). با معرفی حسگرهایی که می‌توانند اینرسی را اندازه‌گیری کنند^۳ و فن آوری باتری-های لیتیوم-پلیمر، فن آوری پهپادهای کوچک به طور چشم‌گیری پیشرفت کرد و این در حالی است که هزینه‌ی تولید آنها کاهش یافته است. امروزه بیشتر پهپادهایی که در زمینه مغناطیس‌سنجی هوایی به کار گرفته شده‌اند، از مغناطیس‌سنج‌های فلاکس گیت^۴ (Stoll and Moritz, 2013b; Macharet et al., 2016; Eck and Imbach, 2011;) مغناطیس‌سنج‌های که بر اساس بخارگاز عناصر قلیایی (پتاسیم، سزیم، روبیدیم) بنا شده‌اند (Cherkasov and Kapshtan, 2018; Samson et al., 2010; Kaneko et al., 2011;) استفاده می‌کنند. با افزایش تقاضا برای استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد از سال ۲۰۱۴ به بعد، بسیاری از شرکت‌های کانادایی شروع به ساختن مغناطیس‌سنج‌های سبک و کوچک قابل حمل با پهپادهای کوچک کردند (Geometrics, Scintrex, n.d.; GEM, n.d.; n.d.). و تحقیقات در این زمینه روز به روز در حال افزایش است، (شکل ۳).

به منظور بررسی روند تحقیقات در سال‌های مختلف در زمینه

مغناطیس‌سنجی هوابرد با استفاده از پهپاد، در این تحقیق مقالاتی که دارای کلمات "مغناطیس‌سنجی هوایی"^۵، "بدون سرنشین"^۶، و مختصر "وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین"^۷ و "سیستم هوایی بدون سرنشین"^۸ در عنوان آنها ذکر شده‌اند، جستجو شدند. به این ترتیب تعداد ۴۳ مقاله در پایگاه‌های مقالات علمی یافت شد؛ که بر اساس استفاده از پهپاد در سال‌های مختلف در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۳: تعداد مقالات در سال‌های بعد از ۲۰۰۸ میلادی که در زمینه استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد ارائه شده است.

تمام این مقالات مربوط به سال‌های بعد از سال ۲۰۰۸ می‌باشند و تحقیقی در زمینه استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد قبل از این سال یافت نشد. این موضوع نشان می‌دهد استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هوابرد همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد در ابتدای راه خود می‌باشد. لازم به ذکر است که یک مقاله مربوط به سال ۲۰۲۰ می‌باشد (Walter et al., 2020) که در شکل ۳ نشان داده نشده است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود رشد مقالات و تحقیقات انجام شده در این زمینه از سال ۲۰۰۸ به بعد تقریباً به صورت تصاعدی بوده است. این روند نشان دهنده جدید و جذاب بودن استفاده از فناوری پهپادها در مغناطیس‌سنجی هوابرد می‌باشد. همچنین به منظور مطالعه جغرافیای تحقیقات در حوزه مغناطیس‌سنجی هوابرد با استفاده از پهپاد، تعداد مقالات منتشر شده در کشورهای مختلف جهان مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴).

نمودار شکل ۴ نشان می‌دهد که کشور کانادا پیش‌تاز تحقیقات در این زمینه می‌باشد. همچنین کشورهای چین، روسیه و ژاپن به ترتیب در رده‌های بعد قرار دارند.

5- Aerialmagnetic
6- Unmanned
7- Unmanned Aerial Vehicle (UAV)
8- Unmanned Aerial System (UAS)

1- Ant-plane 1 & 2
2- Kagoshima
3- Inertial Measurements Unit (IMU)
4- Flux Gate (FG)

دور نگه داشته شده، در تحقیقات مختلف متفاوت است. این فاصله برای تحقیقات مختلف در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳: فاصله مغناطیس‌سنج از پهپاد در مراجع مختلف

مرجع	دلیل انتخاب فاصله مورد نظر	فاصله مغناطیس‌سنج از پرنده (m)
(Cherkasov and Kapshtan, 2018)	میزان نوفه تولید شده به وسیله پرنده مورد استفاده	۲۰
(Cunningham et al., 2016)	ذکر نشده	۳,۶
(Hashimoto et al., 2014)	ذکر نشده	۴,۵
(Koyama et al., 2013)	ذکر نشده	۴,۵
(Malehmir et al., 2017)	انجام آزمایش فاصله مناسب نصب حسگر	۳
(Parvar et al., 2018)	ذکر نشده	۳
(Tezkan et al., 2011)	اثر کمتر از ۱۰ نانوتسلا روی پهپاد حسگر در این فاصله	۴

تفاوت فاصله حسگر تا پرنده در تحقیقات مختلف به دلیل تفاوت در حساسیت مغناطیس‌سنج بکار گرفته شده، میزان نوفه ایجاد شده به وسیله پهپادهای مختلف و میزان باری که هر پهپاد می‌تواند حمل کند، می‌باشد.

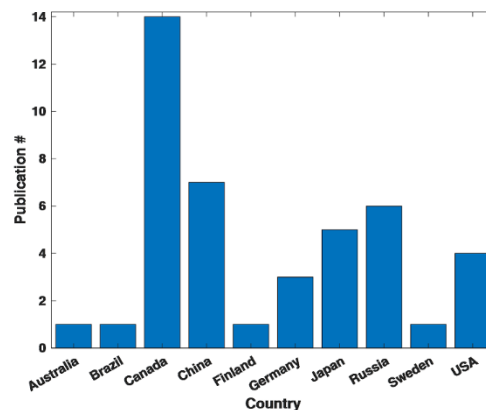
۵- انواع حسگرهای مغناطیس‌سنج نصب شده روی

پهپادها

مغناطیس‌سنج‌ها را می‌توان به طور کلی به دو دسته تقسیم بندی کرد. یک دسته از مغناطیس‌سنج‌ها میدان مغناطیسی را در سه جهت عمود بر هم اندازه‌گیری می‌کنند. این مغناطیس‌سنج‌ها اصطلاحاً مغناطیس‌سنج‌های برداری نامیده می‌شوند. این مغناطیس‌سنج‌ها علاوه بر بزرگای میدان مغناطیسی قادرند جهت بردار میدان مغناطیسی را نیز تعیین کنند. یکی از مشکلات عمده مغناطیس‌سنج‌های برداری وابستگی بزرگای میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده به جهت مغناطیس‌سنج می‌باشد. دسته دیگر مغناطیس‌سنج‌ها، مغناطیس‌سنج‌های اسکالر هستند که فقط بزرگای میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کنند. این نوع از مغناطیس‌سنج‌ها کمتر نسبت به جهت مغناطیس‌سنج حساس می‌باشند (Dentith and Mudge, 2013). در جدول ۴ مغناطیس‌سنج‌های مورد استفاده در تحقیقات مختلف خلاصه شده است. همان طور که در جدول ۴ نشان داده شده، دو نوع از مغناطیس‌سنج‌ها بیشتر در مغناطیس‌سنجی هواپرد با پهپاد استفاده شده‌اند. این مغناطیس‌سنج‌ها از نوع فلاکس گیت و بخارگازهای قلیایی از نوع سزیم می‌باشد.

یک مغناطیس‌سنج مناسب برای نصب روی پهپاد باید شرایط زیر را داشته باشد (Cherkasov and Kapshtan, 2018):

- سبک باشد، بهتر است وزنی کمتر از حدود ۳۰۰ گرم داشته باشد.



شکل ۴: تعداد مقالات منتشر شده در مورد استفاده از پهپاد در

مغناطیس‌سنجی هواپرد در کشورهای مختلف جهان

۴- چگونگی نصب حسگر مغناطیس‌سنج روی پهپادها

یکی از چالش‌های مهم پیشروی مغناطیس‌سنجی هواپرد با پهپاد حذف اثرات نوفه پهپاد بر روی حسگر مغناطیس‌سنج می‌باشد. منبع این نوفه بدنه فلزی، موتورهای براشلس^۱، سرو^۲ موتورها و غیره می‌باشد. به دو طریق می‌توان اثر این نوفه‌ها را کم و یا حذف نمود. یکی از این روش‌ها قرار دادن یک مغناطیس‌سنج روی پهپاد و نصب حسگر دیگر در فاصله-ای حدود یک متر از پهپاد است. به این ترتیب اثرات نوفه پهپاد به وسیله مغناطیس‌سنج نصب شده بر روی آن اندازه‌گیری می‌شود و این اثرات از حسگری که با فاصله اندکی از پهپاد قرار گرفته، حذف می‌شود. هر چند این شیوه در روش هواپرد سنتی روشی معمول است (Noriega, 2015)؛ اما استفاده از دو حسگر و نیاز به پردازش‌های پیچیده بعد از برداشت داده از مهم‌ترین معایب این شیوه از حذف نوفه پهپاد روی حسگر محسوب می‌شود (Sterligov and Cherkasov, 2014; Forrester et al., 2014; Parshin et al., 2019). روش دیگر دور نگه داشتن مغناطیس‌سنج از پهپاد حین پرواز است. در این شیوه، مغناطیس‌سنج با استفاده از یک طناب در زیر آن آویزان می‌شود (Tezkan et al., 2011; Funaki et al., 2014; Caron et al., 2014; Hashimoto et al., 2014; Malehmir et al., 2017). این روش نیز مشکلات خاص خود را دارد. به عنوان مثال حرکات غیر قابل کنترل حسگر که در زیر پهپاد آویزان است و خارج کردن پهپاد از حالت تعادل از معایب این نحوه از حذف نوفه پهپاد روی حسگر می‌باشد. در برخی از تحقیقات مرتفع کردن این معایب مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مثال پیشنهاد شده است تغییرات میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده به وسیله حسگر در جهت سه محور عمود بر هم مدل شوند. از این طریق نوفه ایجاد شده قابل اندازه‌گیری بوده و می‌توان اثرات ناخواسته نوسانات حسگر حین برداشت داده‌ها را حذف نمود (Walter et al., 2019). فاصله‌ای که مغناطیس‌سنج از پهپاد

1-Brushless
2-Servo

- نرخ نمونه برداری آن بالا باشد، بهتر است بیشتر از ۱۰ نمونه در ثانیه^۱ باشد.
- نسبت به جهتی که قرار گرفته است حساس نباشد.
- کم مصرف باشد.
- ارزان قیمت باشد.

جدول ۴. انواع مغناطیس سنج ها که به منظور مغناطیس سنجی بر روی پهپادها نصب شده اند.

تعداد مراجع	مراجع	نوع مغناطیس سنج
۶	(Eck and Imbach, 2011; Macharet et al., 2016; Jackisch et al., 2019; Stoll and Moritz, 2013b; Parshin et al., 2019; Tezkan et al., 2011)	فلکس گیت
۱	(Parshin et al., 2018)	پتاسیم
۸	(Caron et al., 2014; Cunningham et al., 2018; Hashimoto et al., 2014; Kaneko et al., 2011; Koyama et al., 2013; Samson et al., 2011; Pei et al., 2017; Wood et al., 2016)	بخار گازهای قلیایی
۱	(Cherkasov and Kapshtan, 2018)	رویدیم
۱	(Malehmir et al., 2017)	پروتون
۱	(Funaki et al., 2008)	مغناطیس سنج مقاومتی ^۲
۱	(Nikulin and de Smet, 2019)	مغناطیس سنج اتمی میکروساخت ^۳

مغناطیس سنج بخار سزیم و فلکس گیت بیشتر این شرایط را دارند. به همین دلیل از این دو نوع حسگر در تحقیقات بیشتر استفاده شده است (جدول ۴). برخی از محققین این دو نوع مغناطیس سنج را با یکدیگر مقایسه کرده اند و نتیجه گرفته اند که مغناطیس سنج سزیم دقت بسیار بیشتری نسبت به مغناطیس سنج فلکس گیت دارد (Kroll, 2013). مشخصات برخی از مگنتومترهای نصب شده بر روی پهپادها در جدول ۵ آمده و در شکل ۵ نیز برخی از این مگنتومترها نشان داده شده اند.

۶- انواع پلتفرم های مورد استفاده در مغناطیس سنجی هوابرد با پهپاد

پهپادها در عمل نوعی ربات هستند. آنها دارای یک پردازنده مرکزی هستند که کنترلگر پرواز^۴ نامیده می شود. کنترلگر پرواز با استفاده از امواج رادیویی دستورات مورد نیاز را از ایستگاه زمینی^۵ یا فرستنده امواج رادیویی دریافت کرده و با کنترل سرعت چرخش موتورهای پهپاد و با سروو موتورها موجبات اجرای آن ها را فراهم می آورد. تمامی قطعات نظیر کنترلگر پرواز، حسگرهای مورد نیاز موتورها بر روی یک اسکلت نصب می شوند که به آن پلتفرم می گویند (شکل ۶).

پهپادهای غیر نظامی به طور کلی دارای سه نوع پلتفرم می باشند: ۱- پهپادهای چند موتوره^۶ ۲- پهپادهای بال ثابت^۷ ۳- بالگرد
پهپادهای بال ثابت مانند هواپیماهای مسافربری هستند که بال ثابتی دارند. این نوع از پهپادها مدت زمان پروازی زیادی دارند و می توانند با سرعت بالایی پرواز کنند. پهپادهای بال ثابت نمی توانند به صورت عمودی بنشینند و یا برخیزند. بنابراین نیاز به فضایی مناسب برای نشستن و برخاستن از زمین دارند. یکی دیگر از مشکلات پهپادهای بال ثابت میزان بار کمی است، که می توانند حمل کنند. همچنین اثر سرعت باد بر روی پهپادهای بال ثابت مخصوصاً حین برخاستن از زمین و نشستن بسیار زیاد است. نمونه ای از پهپاد بال ثابت که در مغناطیس سنجی هوابرد استفاده شده، در شکل ۷ نشان داده شده است.

پهپادهای چند موتوره مانند نوعی از بالگرد هستند. این نوع از پهپادها دارای سه یا بیشتر موتور هستند که نیروی بالا برندگی و حرکت پرنده را تامین می کنند. پهپادهای چند موتوره می توانند به صورت عمودی از زمین بلند شوند و یا بنشینند و همچنین می توانند خود را در یک نقطه ثابت در هوا نگه دارند. در نتیجه برای پرواز در نزدیکی سطح زمین بسیار مناسب می باشند. هر چند باید توجه داشت این نوع از پهپادها مناسب ماموریت های طولانی مدت نیستند. در شکل ۸ نمونه ای از پهپاد چند موتوره که در مغناطیس سنجی هوابرد استفاده شده است را نشان می دهد. پهپادهای بالگرد، نمونه کوچک شده بالگردهای بزرگ می باشند. این نوع از پهپادها دارای قدرت مانور و سرعت مناسبی نیز می باشند. در شکل ۹ نمونه ای از پهپاد بالگرد که در مغناطیس سنجی هوابرد استفاده شده را نشان می دهد.

نوع دیگری از پهپادها که اخیراً معرفی شده اند هواپیماهای بال ثابت عمود پرواز^۸ می باشند. در واقع این نوع از پهپادها را به منظور برطرف کردن ایراد پهپادهای بال ثابت در عدم توانایی نشستن و برخاستن به صورت عمودی توسعه داده اند. در این نوع از پهپادها ابتدا هواپیما با استفاده از موتورهایی که رو به پایین نیرو وارد می کنند، از زمین بلند شده تا ارتفاع مورد نظر بالا می روند. سپس موتور یا موتورهایی که هواپیما را به جلو می رانند، شروع به حرکت می کنند و موتورهایی که رو به پایین نیرو وارد می کردند، خاموش می شوند. هنگام فرود آمدن نیز این فرآیند به صورت عکس باعث نشستن پرنده به صورت عمودی می شود. شکل ۱۰ نمونه ای از پهپاد بال ثابت عمود پرواز را که در مغناطیس سنجی هوابرد مورد استفاده قرار گرفته، نشان می دهد.

- 1-Sample Per Second (SPS)
- 2-Magneto-resistant
- 3-Micro-fabricated atomic magnetometer (MFAM)
- 4-Flight Controller
- 5-Ground Station (GS)

- 6-Multi rotor
- 7-Fix wing
- 8-Vertical Take-off and Landing (VTOL)

جدول ۵. مشخصات فنی برخی از مگنتومترها که بر روی پهپاد نصب شده اند.

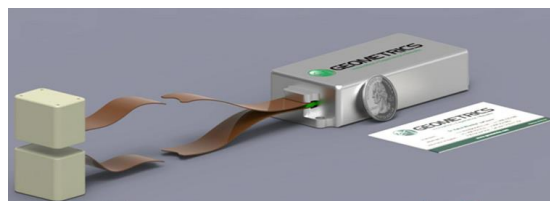
مرجع	وزن	قدرت تفکیک	نرخ نمونه برداری	بازه اندازه گیری	حساسیت	نوع مگنتومتر
(Stoll and Moritz, 2013b)	۹۲۰ gr	۱ nT	۱-۱۲۵ Hz	$\pm 10000 nT$	۰,۰۷ nT/۱۰ Hz	فلاکس گیت
(GEM, n.d.)	-	۰,۰۰۰۱ nT	تا ۲۰ Hz	-	۰,۰۰۰۳ pT/۱ Hz	پتاسیم
(Geometrics, n.d.)	۴۵۰ gr	-	تا ۲۰ Hz	۲۰۰۰۰ nT تا ۱۰۰۰۰۰ nT	$> 0,0004 nT/\sqrt{Hz}$	سزیم
(Cherkasov and Kapshtan, 2018)	۳۰۰ gr	-	۱۰۰۰ Hz	۲۰۰۰۰ nT تا ۱۰۰۰۰۰ nT	۱۰ pT/√Hz	روبییدیم
(GEM, n.d.)	-	-	۰,۵ Hz تا ۶۰ Hz	۲۰۰۰۰ nT تا ۱۲۰۰۰۰ nT	۰,۱۵ nT/۱ Hz	پروتون
(Brown et al., 2012)	۱۲۰ gr	-	-	$\pm 5000 nT$	۴۰ pT/√Hz @ ۱ Hz	مقاومتی
(Geometrics, n.d.)	۴۵۰۰ gr	۰,۰۵ nT	۱۰۰۰ Hz	۲۰۰۰۰ nT تا ۱۰۰۰۰۰ nT	۲۵ pT/√Hz	اتمی میکرو ساخت



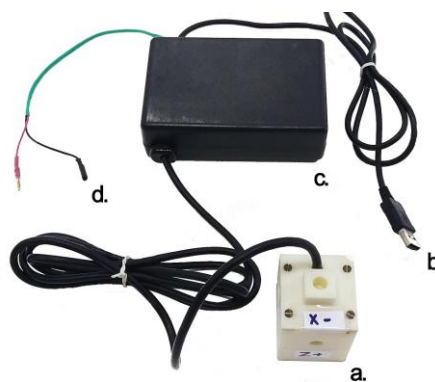
ج



الف



د



ب

شکل ۵. برخی مگنتومترها که بر روی پهپادها نصب شده اند (الف) مگنتومتر از نوع بخار سزیم (Geometrics, n.d.) (ب) مگنتومتر از نوع فلاکس گیت (Macharet et al., 2016) (ج) مگنتومتر از نوع بخار روبییدیم (Cherkasov and Kapshtan, 2018) (د) مگنتومتر اتمی میکروساخت (Nikulin and de Smet, 2019)



شکل ۱۰. پهپاد بال ثابت از نوع عمود پرواز (Parshin et al., 2019)

مشخصات فنی پهپادهای نشان داده شده در شکل های ۷ تا ۱۰ در جدول ۶ آمده است.

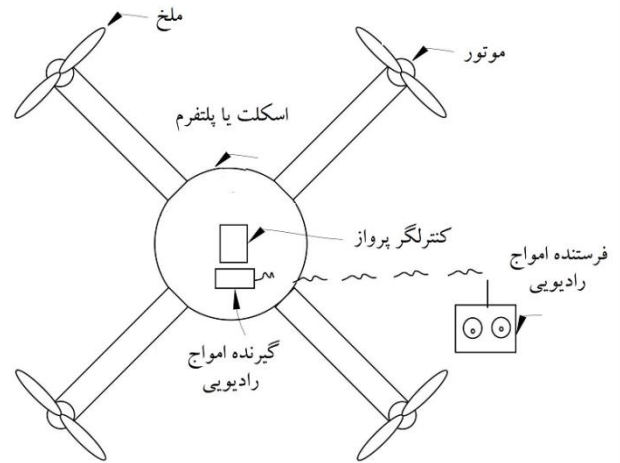
جدول ۶. مشخصات فنی پهپادهای بال ثابت، چند موتوره، بالگرد و عمود پرواز

عمود پرواز	بالگرد	چند موتوره	بال ثابت	
۲۵۰۰	-	-	۲۳۷۰	فاصله دو سر بال (mm)
۱۵۰۰	۳۶۳۰	-	۲۰۳۰	طول پهپاد (mm)
-	۱۰-۲۰	۰-۱۵	۳۸	سرعت پرواز (m/s)
۸۰۰	۸۴۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰	وزن (gr)
-	-	۱۱۰۹/۵	-	فاصله بین موتور تا موتور (mm)
-	۳۱۳۰	-	-	قطر ملخ (mm)

در جدول ۷ انواع پهپادها با پلتفرم های مختلف که در تحقیقات گذشته به منظور مغناطیس سنجی هوابرد استفاده شده اند، آمده است. همان طور که از داده های جدول ۷ بر می آید پلتفرم های چند موتوره بیشتر از بقیه پلتفرم ها استفاده شده است. این موضوع به دلیل انعطاف پذیری بیشتر پهپادهای چند موتوره نسبت به دیگر پلتفرم ها می باشد.

۷- مقایسه برداشت های مغناطیس سنجی هوایی تهیه شده با پهپاد و برداشت های زمینی

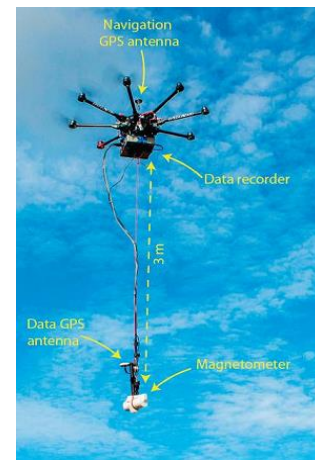
هدف اصلی استفاده از پهپاد در مغناطیس سنجی، رقابت آن با روش های زمینی است. به صورتی که در زمان اندکی بتوان با استفاده از پهپاد داده برداشت کرد و نتایج آن قابل مقایسه با داده های زمینی باشد. از این رو در بسیاری از تحقیقات داده های برداشت شده با پهپاد با داده های زمینی برداشت شده اعتبار سنجی شده اند. به عنوان مثال در مجاورت شهر



شکل ۶: شماتیکی از مهم ترین اجزای یک پهپاد چهار موتوره



شکل ۷: پهپاد از نوع بال ثابت آنت-پلین یک و دو (Funaki et al., 2008)



شکل ۸: پهپاد از نوع چند موتوره (Malehmir et al., 2017)



شکل ۹: پهپاد از نوع بالگرد (Kaneko et al., 2011)

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۷، شماره ۳، ۱۴۰۰.
(Cherkasov and Kapshtan, 2018).

حسگر نصب شده روی پهپاد از نوع مگنتومتر بخار روبیدیم بوده و فاصله حسگر تا زمین حدود ۳۰ متر انتخاب شده است. تفاوت مقادیر اندازه-گیری شده با پهپاد و برداشت‌های زمینی در امتداد یک پروفیل در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل همبستگی مناسبی بین دو سری داده وجود دارد.

به همین ترتیب نقشه مغناطیس کل به‌دست آمده با استفاده از پهپاد با نقشه مغناطیس کل به‌دست آمده به روش هواپرد سنتی با یکدیگر در شکل ۱۳ مقایسه شده‌اند. انحراف استاندارد نقاط کنترلی بین دو سری اندازه‌گیری تنها ۰,۲۴ نانو تسلا می‌باشد که نشان دهنده‌ی نتایج رضایت بخش داده‌های بدست آمده با پهپاد می‌باشد.

همچنین در تحقیقات دیگر ارائه شده، به منظور اعتبار سنجی استفاده از پهپاد در مغناطیس‌سنجی هواپرد، داده‌های برداشت شده با داده‌های زمین‌شناسی، رخ نمون‌های ماده معدنی و یا نتایج روش‌های ژئوفیزیکی سطحی مقایسه شده‌اند (Caron et al., 2014; Malehmir et al., 2017). همچنین در برخی از تحقیقات از شباهت فلزی مدفون برای ارزیابی توانایی پهپاد در مغناطیس‌سنجی استفاده شده است (Stoll and Moritz, 2013b; Nikulin and de Smet, 2019). پر واضح است ذکر نتایج حاصل از همه این تحقیقات از حوصله این مطالعه خارج می‌باشد.

۸- چشم اندازه‌ها و چالش‌های پیشروی مغناطیس-

سنجی هواپرد با پهپاد

تحقیقات نشان می‌دهند که چشم اندازه خوبی از کاربرد پهپادها در زمینه مغناطیس‌سنجی هواپرد وجود دارد. مغناطیس‌سنجی هواپرد با پهپاد می‌تواند شکاف بین مغناطیس‌سنجی هواپرد سنتی و مغناطیس‌سنجی به صورت زمینی را پر کنند (Caron et al., 2014) و یا حتی جایگزین برداشت‌های مغناطیس‌سنجی زمینی شوند (Parshin et al., 2018). در این صورت می‌توان برداشت‌های زمان بر و هزینه بر مغناطیس‌سنجی زمینی به‌خصوص در مناطق با توپوگرافی شدید را به مقدار زیادی تسهیل نمود. با پیشرفت فناوری حسگرهایی با وزن و مصرف انرژی کمتر و اندازه کوچک‌تر تولید می‌شوند. این امر، روز به روز استفاده از پهپادها را در برداشت‌های مغناطیس‌سنجی هواپرد جذاب‌تر می‌کند و از آنجایی که خطر جانی استفاده از پهپادها در حد صفر می‌باشد تقاضا نیز برای چنین فن‌آوری رو به افزایش است (Kroll, 2013).

اوتانماکی^۱ در کشور فنلاند در محدوده‌ای که ناهنجاری غنی از آهن مشاهده شده، برداشت‌های زمینی و برداشت‌ها هوایی با یکدیگر مقایسه شده‌اند (Jackisch et al., 2019).

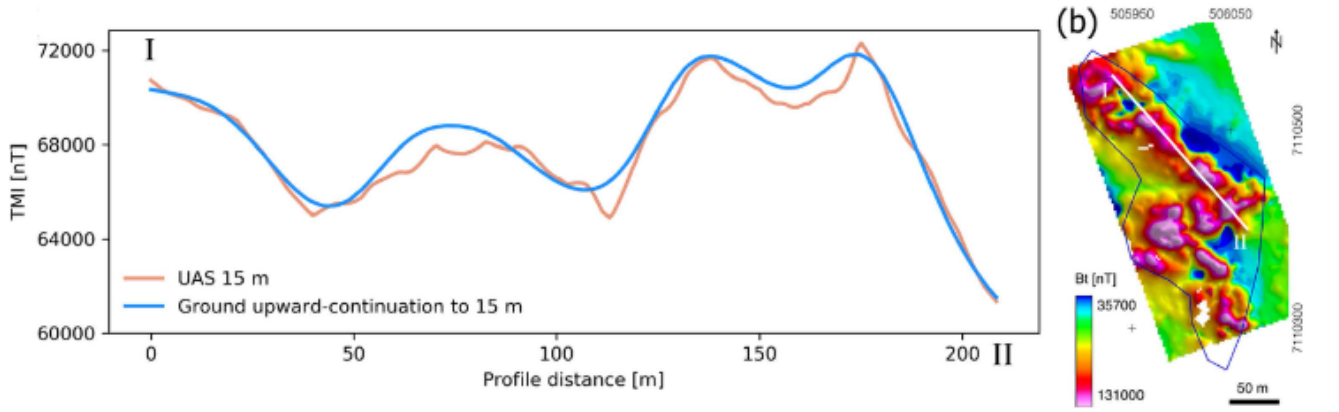
جدول ۷: انواع پلتفرم‌هایی که تاکنون به منظور مغناطیس‌سنجی هواپرد استفاده شده است.

تعداد مراجع	مرجع	نوع پلتفرم	نام پلتفرم
۴	(Funaki et al., 2014)	بال ثابت	Ant-Plane 6-3 Ant-Plane 3-5
	(Jackisch et al., 2019)		Radai Albatros VI
	(Cherkasov and Kapshtan, 2018)		Geoscan 201
	(Funaki et al., 2008)		Ant-plane 1,2
۵	(Hashimoto et al., Koyama 2014 et al., Kaneko 2013 et al., 2011)	بالگرد	Yamaha, Rmax G1
	(Pei et al., 2017)		V750 UAV
	(Eck and Imbach, 2011)		Scout B1-100 UAV
	(Jackisch et al., 2019)		Tholeg tho-R-PX-12
۷	(Macharet et al., 2016)	چند موتوره	X8+
	(Malehmir et al., 2017)		DJI S1000
	(Nikulin and de Smet, 2019)		DJI Metrics 600
	(Parvar et al., 2018)		UAV-Mag TM
	(Cherkasov and Kapshtan, 2018)		Geoscan 401
	(Cunningham et al., 2016)		SkyLance
۱	(Parshin et al., 2018)	بال ثابت عمود پرواز	Skywalker X8

در سمت راست شکل ۱۱ نتایج زمینی برداشت شده بر روی ناهنجاری مربوطه نشان داده شده است. شدت میدان مغناطیسی داده‌های زمینی و هوایی، که توسط پهپاد در ارتفاع ۱۵ متری سطح زمین برداشت شده است، در امتداد پروفیلی که با خط سفید رنگ روی نقشه سمت راست نشان داده شده است با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به منظور فراهم ساختن چنین مقایسه‌ای داده‌های زمین با استفاده از فیلتر فراسو به ارتفاع ۱۵ متری برده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، دو سری داده شباهت زیادی به هم دارند و همبستگی^۲ بسیار بالایی را نشان می‌دهند.

همچنین در تحقیق دیگری که در قسمت مرکزی قزاقستان انجام شده، داده‌های پهپاد با داده‌های زمینی و داده‌های هواپرد سنتی مقایسه شده‌اند

1-Otanmäki
2-Correlation



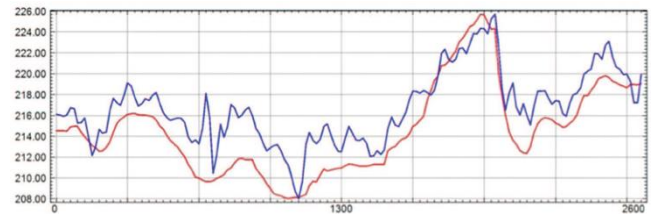
شکل ۱۱. مقایسه برداشت‌های مغناطیس‌سنجی زمینی (رنگ آبی) و برداشت هوایی با پهپاد (قهوه ای روشن) (Jackisch et al., 2019)

بنابراین مغناطیس‌سنج‌های سنگین را نمی‌توان بر روی آنها نصب کرد. از دیگر چالش‌های پیشروی استفاده از پهپادها در مغناطیس‌سنجی، ثابت نگه داشتن فاصله آنها از سطح زمین حین برداشت می‌باشد. این موضوع برای پهپادهای بال ثابت و برای مناطقی با توپوگرافی شدید، حادث‌تر است. تحقیقات برای برطرف کردن چالش‌های ذکر شده در حال انجام می‌باشد. به طور کلی تحقیقات پیشروی استفاده از پهپادها در زمینه مغناطیس‌سنجی هوابرد در آینده بر روی موارد زیر متمرکز خواهند بود (Pei et al., 2017):

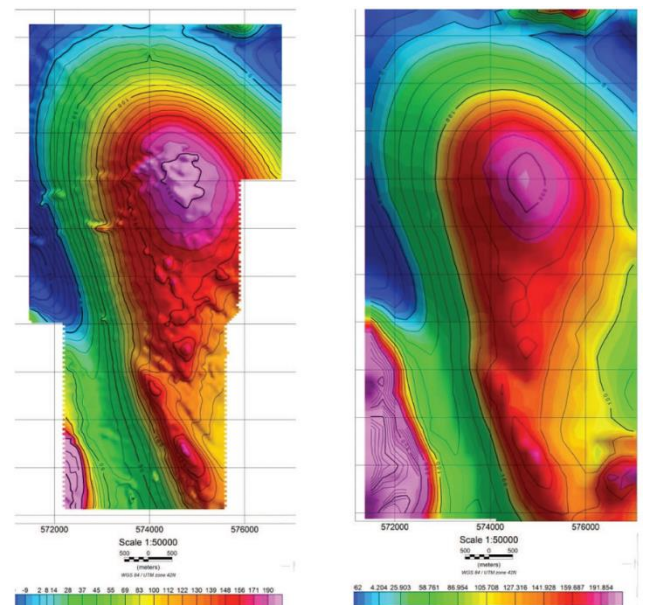
- ۱- ساخت حسگرهای دقیق‌تر، سبک‌تر، کوچک‌تر و کم مصرف‌تر
- ۲- تلاش برای افزایش زمان پرواز
- ۳- تلاش برای کاهش هزینه‌ها
- ۴- تحقیق بر روی امکان ارسال داده‌ها به صورت برخط
- ۵- تحقیق بر روی کاهش اثرات نوفه پهپاد بر روی مغناطیس‌سنج

۹- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

با پیشرفت فن‌آوری، استفاده از پهپادها در زمینه مغناطیس‌سنجی هوابرد با سرعت بسیار زیادی در حال رشد می‌باشد. این مطالعه نگاهی به تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از پهپادها در حوزه مغناطیس‌سنجی هوابرد داشته است. تعداد ۴۳ مقاله تولید شده با موضوع مغناطیس‌سنجی هوابرد با استفاده از پهپاد در سال‌های مختلف بررسی شده و نشان می‌دهد این فن‌آوری از دهه ۲۰۰۰ میلادی شروع شده و با سرعت تصاعدی در حال رشد می‌باشد به گونه‌ای که تعداد مقالات تولید شده در سال ۲۰۰۸ به ۹ مقاله در سال ۲۰۱۶ و ۶ مقاله در سال ۲۰۱۹ رسیده است. همچنین توزیع جغرافیایی این تحقیقات مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که کشور کانادا پیش‌تاز تحقیق و به‌کارگیری این فن‌آوری جدید می‌باشد و کشورهای چین، روسیه و ژاپن به ترتیب در رده‌های بعد قرار دارند. در ادامه، انواع حسگرهای مغناطیس‌سنج مورد استفاده در زمینه مغناطیس‌سنجی هوابرد با استفاده از پهپاد معرفی شدند و مشخص شد دو نوع مغناطیس‌سنج بخار سزیم و مغناطیس‌سنج فلاکس‌گیت بیشترین استفاده را در این حوزه دارند. به همین ترتیب، انواع پلتفرم‌های پهپاد مورد استفاده در زمینه مغناطیس‌سنجی هوابرد



شکل ۱۲. مقایسه برداشت زمینی (رنگ آبی) با برداشت با استفاده از پهپاد (رنگ قرمز) در امتداد یک پروفیل (محور افقی فاصله بر حسب متر و محور قائم شدت کل میدان مغناطیسی بر حسب نانو تسلا می‌باشد) (Cherkasov and Kapshtan, 2018)



شکل ۱۳. نقشه شدت کل میدان مغناطیسی، سمت راست نقشه به‌دست آمده با استفاده از پهپاد، سمت چپ نقشه به‌دست آمده به روش هوابرد سنتی (Cherkasov and Kapshtan, 2018)

یکی از مشکلات پهپادها در مقایسه با بالگرد و یا هواپیماها کم بودن زمان پرواز آنها می‌باشد. به‌خصوص در پلتفرم‌های چند موتوره این مشکل بیشتر است. همچنین توانایی پهپادها در حمل بار بسیار محدود است.

- Systems for Magnetic Survey. Drones - Applications. InTech, 135-148. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73003>
- Cunningham, M., Samson, C., Wood, A., Cook, I., 2018. Aeromagnetic Surveying with a Rotary-Wing Unmanned Aircraft System: A Case Study from a Zinc Deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada. *Pure and Applied Geophysics* 175, 3145-3158. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1736-2>
- Cunningham, M., Samson, C., Wood, A., Cook, I., Doyle, B., 2016. An experimental aeromagnetic survey with a rotary-wing unmanned aircraft system. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016*. Society of Exploration Geophysicists, 2129-2133. <https://doi.org/10.1190/segam2016-13607329.1>
- Dash, J.P., Watt, M.S., Pearse, G.D., Heaphy, M., Dungey, H.S., 2017. Assessing very high resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007>
- Dentith, M., Mudge, S., 2013. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press.
- Dentith, M., Mudge, S.T., 2014. *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge (UK): University Press.
- Eck, C., Imbach, B., 2011. Aerial Magnetic Sensing With an Uav Helicopter. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/*, 81-85. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-1-c22-81-2011>
- Everett, M., 2013. *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- Forrester, R., Huq, M.S., Ahmadi, M., Straznicki, P., 2014. Magnetic signature attenuation of an unmanned aircraft system for aeromagnetic survey. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 19, 1436-1446. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2285224>
- Funaki, M., Higashino, S.I., Sakanaka, S., Iwata, N., Nakamura, N., Hirasawa, N., Obara, N., Kuwabara, M., 2014. Small unmanned aerial vehicles for aeromagnetic surveys and their flights in the South Shetland Islands, Antarctica. *Polar Science* 8, 342-356. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2014.07.001>
- Funaki, M., Hirasawa, N., Group, A.-P., 2008. Outline of a small unmanned aerial vehicle (Ant-Plane) designed for Antarctic research. *Polar Science* 2, 129-142. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2008.05.002>
- GEM [WWW Document], n.d. URL <https://www.gemsys.ca/> (accessed 6.3.20).
- مورد مطالعه قرارگرفت و جدیدترین نوع پلتفرم، یعنی پهپاد بال ثابت عمود پرواز که به منظور برطرف کردن مشکل پهپادهای بال ثابت حین نشستن و برخاستن ابداع شده اند، معرفی شد.
- متأسفانه در کشور ما تا زمان نگارش این مقاله سابقه‌ای از برداشت‌های مغناطیس‌سنجی هواپرد با استفاده از پهپاد گزارش نشده است. با توجه به نیاز به اکتشافات ژئوفیزیکی و هزینه اندک استفاده از پهپاد، پیشنهاد می‌شود سرمایه‌گذاری بر روی تحقیقات در این زمینه بیشتر شود.
- ## ۹- تقدیر و تشکر
- بدین وسیله از دارو ناشناس محترم که با پیشنهادهای و یادداشت‌های خود موجبات بهبود کیفیت مقاله را فراهم نمودند؛ تقدیر و تشکر می‌گردد.
- ## ۱۰- مراجع:
- Anderson, K., Gaston, K.J., 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology., *Frontiers in Ecology and the Environment*. <https://doi.org/10.1890/120150>
- Barnard, J.A., 2008. The use of unmanned aircraft in oil, gas and mineral e+P activities. 78th Society of Exploration Geophysicists International Exposition and Annual Meeting, SEG 2008 1132-1136.
- Bemis, S.P., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M.R., Akciz, S., T. Thiele, S., Bangash, H.A., 2014. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology., *Journal of Structural Geology*. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., Bareth, G., 2014. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs61110395>
- Brown, P., Beek, T., Carr, C., O'Brien, H., Cupido, E., Oddy, T., Horbury, T.S., 2012. Magnetoresistive magnetometer for space science applications (*Measurement Science and Technology* (2012) 23 (025902)). *Measurement Science and Technology* 23. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/5/059501>
- Candiago, S., Remondino, F., De Giglio, M., Dubbini, M., Gattelli, M., 2015. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs70404026>
- Caron, R.M., Samson, C., Straznicki, P., Ferguson, S., Sander, L., 2014. Aeromagnetic surveying using a simulated unmanned aircraft system. *Geophysical Prospecting* 62, 352-363. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12075>
- Cherkasov, S., Kapshtan, D., 2018. Unmanned Aerial

- Malehmir, A., Dynesius, L., Paulusson, K., Paulusson, A., Johansson, H., Bastani, M., Wedmark, M., Marsden, P., 2017. The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: A case study from central Sweden. *The Leading Edge* 36, 552–557. <https://doi.org/10.1190/tle36070552.1>
- Nikulin, A., de Smet, T.S., 2019. A UAV-based magnetic survey method to detect and identify orphaned oil and gas wells. *Leading Edge* 38, 447–452. <https://doi.org/10.1190/tle38060447.1>
- Noriega, G., 2015. Aeromagnetic Compensation in Model Stability, and Robustness. 12, 117–121. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2328436>
- Parshin, A. V., Morozov, V.A., Blinov, A. V., Kosterev, A.N., Budyak, A.E., 2018. Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multirotor UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-Spatial Information Science* 21, 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>
- Parshin, A. V., Morozov, V.A., Savin, A., Badmayev, M.-J., 2019. Development of low-cost unmanned aerogeophysical system based on light VTOL aircraft. 271–276.
- Parvar, K., Braun, A., Layton-Matthews, D., Burns, M., 2018. UAV magnetometry for chromite exploration in the Samail ophiolite sequence, Oman. *Journal of Unmanned Vehicle Systems* 6, 57–69.
- Pei, Y., Liu, B., Hua, Q., Liu, C., Ji, Y., 2017. An aeromagnetic survey system based on an unmanned autonomous helicopter: Development, experiment, and analysis. *International Journal of Remote Sensing* 38, 3068–3083. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1274448>
- Samson, C., Straznicky, P., Laliberté, J., Caron, R., Ferguson, S., Archer, R., Limited, S.G., 2010. Designing and building an unmanned aircraft system for aeromagnetic surveying. *SEG Extended Abstract* 29, 1167–1171.
- Schultz, G., Mhaskar, R., Prouty, M., Miller, J., 2016. Integration of micro-fabricated atomic magnetometers on military systems. *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXI* 9823, 982318. <https://doi.org/10.1117/12.2224192>
- Scintrex [WWW Document], n.d. URL <https://scintrexltd.com/> (accessed 3.6.20).
- Singhal, G., Bansod, B., Mathew, L., 2018. Unmanned Aerial Vehicle classification, Applications and challenges :A Review. Preprint.
- Sterligov, B., Cherkasov, S., 2016. Reducing magnetic noise of an unmanned aerial vehicle for high-quality magnetic surveys. *International Journal of Geophysics* 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijge.2016.05.001>
- Geometrics [WWW Document], n.d. URL <https://www.geometrics.com/> (accessed 6.3.20).
- Hammack, R., Veloski, G., Sams, J., 2018. Using drone magnetic and LidAR surveys to locate unmarked, abandoned wells prior to unconventional oil and gas development. *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference 2018, URTC 2018*. <https://doi.org/10.15530/urtec-2018-2891559>
- Hashimoto, T., Koyama, T., Kaneko, T., Ohminato, T., Yanagisawa, T., Yoshimoto, M., Suzuki, E., 2014. Aeromagnetic survey using an unmanned autonomous helicopter over Tarumae volcano, northern Japan. *Exploration Geophysics* 45, 37–42. <https://doi.org/10.1071/EG12087>
- Hinze, P.W.J., von Frese, R.R.B., Saad, A.H., 2013. Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications. Cambridge University Press.
- Hood, P., Ward, S.H., 1969. Airborne Geophysical Methods. *Advances in Geophysics* 13, 1–112. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60508-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60508-7)
- Jackisch, R., Madriz, Y., Zimmermann, R., Pirttijärvi, M., Saartenoja, A., Heincke, B.H., Salmirinne, H., Kujasalo, J., Andreani, L., Gloaguen, R., 2019. Drone-Borne Hyperspectral and Magnetic Data Integration: Otonmäki Fe-Ti-V Deposit in Finland. 11, 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs11182084>
- Kaneko, T., Koyama, T., Yasuda, A., Takeo, M., Yanagisawa, T., Kajiwar, K., Honda, Y., 2011. Low-altitude remote sensing of volcanoes using an unmanned autonomous helicopter: An example of aeromagnetic observation at Izu-Oshima volcano, Japan. *International Journal of Remote Sensing* 32, 1491–1504. <https://doi.org/10.1080/01431160903559770>
- Koyama, T., Kaneko, T., Ohminato, T., Yanagisawa, T., Watanabe, A., Takeo, M., 2013. An aeromagnetic survey of Shinmoe-dake volcano, Kirishima, Japan, after the 2011 eruption using an unmanned autonomous helicopter. *Earth, Planets and Space* 65, 657–666. <https://doi.org/10.5047/eps.2013.03.005>
- Kroll, A., 2013. Evaluation of an Unmanned Aircraft for Geophysical Survey. *ASEG Extended Abstracts 2013*, 1–4. <https://doi.org/10.1071/aseg2013ab328>
- Luyendyk, A.P.J., 1997. Processing of airborne magnetic data. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics* 17, 31–38.
- Macharet, D.G., Perez-Imaz, H.I.A., Rezeck, P.A.F., Potje, G.A., Benyosef, L.C.C., Wiermann, A., Freitas, G.M., Garcia, L.G.U., Campos, M.F.M., 2016. Autonomous aeromagnetic surveys using a fluxgate magnetometer. *Sensors (Switzerland)* 16, 1–19. <https://doi.org/10.3390/s16122169>

- <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.05.002>
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., Turner, D., 2012. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs4061519>
- Walter, C., Braun, A., Fotopoulos, G., 2020. High-Resolution Unmanned Aerial Vehicle Aeromagnetic Surveys for Mineral Exploration Targets. 68, 334–339. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12914>.This
- Walter, C.A., Braun, A., Fotopoulos, G., 2019. Impact of three-dimensional attitude variations of an unmanned aerial vehicle magnetometry system on magnetic data quality. *Geophysical Prospecting* 67, 465–479. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12727>
- Wood, A., Cook, I., Doyle, B., Cunningham, M., Samson, C., 2016. Experimental aeromagnetic survey using an unmanned air system. *Leading Edge* 35, 270–273. <https://doi.org/10.1190/tle35030270.1>
- 1–7. <https://doi.org/10.1155/2016/4098275>
- Stoll, J., Moritz, D., 2013a. Unmanned aircraft systems for rapid near surface geophysical measurements. 75th EAGE Conference and Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2013 XL, 4–6. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-1-w2-391-2013>
- Stoll, J., Moritz, D., 2013b. Unmanned aircraft systems for rapid near surface geophysical measurements. 75th EAGE Conference and Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2013. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xl-1-w2-391-2013>
- Tezkan, B., Stoll, J.B., Bergers, R., Großbach, H., 2011. Unmanned aircraft system proves itself as a geophysical measuring platform for aeromagnetic surveys. *First Break* 29, 103–105.
- Tian, J., Wang, L., Li, X., Gong, H., Shi, C., Zhong, R., Liu, X., 2017. Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.



A review on the aeromagnetic surveys using unmanned aerial vehicle (UAV)

Hashem Shahsavani ^{1*}

1- Assistant Professor; University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, Iran

Received: 27 March 2020; Accepted: 25 September 2020

Corresponding author: h.shahsavani@uok.ac.ir

Keywords

Unmanned aerial vehicle (UAV)
Aeromagnetic
Sensor
Magnetometer

Summary

As the technology for unmanned aerial vehicle (UAV) has evolved, miniature sensors have also been developed. By equipping the unmanned aerial vehicles (UAVs) with such sensors, they can be used in various scientific researches. Thanks to the advantages of UAVs like zero risk of fatality, cost-effectiveness, low maintenance and operation costs, high precision positioning system and high versatility, they are used as powerful tools for aeromagnetic surveys. The UAVs can fill the gap between the land data, which are obtained on the surface with high resolution and low coverage, and the data, which are

obtained by aircrafts or helicopters with low resolution and high coverage.

Introduction

The history of UAV or unmanned aerial system (UAS) or drone is backed to 1924 in which the first airplane has been flown successfully while it has been fully controlled by the ground station. At that time, the motivation toward applying an UAV was to reduce the peril of fatalities in risky military missions. By date, the UAVs are of interest to a wide variety of applications. The geology, ecology, agriculture, forestry are some examples of Unmanned Aerial Vehicle applications. Magnetometry is one of geophysical method that investigates the variation of the Earth's magnetic field. Magnetometry is a robust tool in oil and mineral exploration. One of the privileges of magnetometry, compared to the other geophysical methods, is that it is possible to perform it in form of airborne. Hence, aeromagnetic method has high coverage and is very cost-effective. In this study, the advantages and the importance of UAV in the field of geophysics are investigated. In this study, the methods of installation of magnetometers on UAVs to mitigate the noise effect of the UAV on the sensor are examined. Then, different UAV platforms are investigated. Finally, the challenges and the prospects of the UAV application on the aeromagnetic field are discussed.

Methodology and Approaches

The aerial magnetometry is performed by helicopters or aircrafts, which are traditional tools for aeromagnetic surveys. As the advanced technology for UAVs has evolved, miniature sensors have also been developed. By equipping the UAVs with such sensors, they are ready to be applied in various scientific researches. Considering the advantages of UAVs, for instance low cost, zero risk of fatality, low repeating operation costs, high precision positioning system and high versatility, they have become powerful tools for aeromagnetic surveys. The UAVs can fill the gap between high resolution and low coverage land data and low resolution and high coverage airborne data obtained by aircrafts or helicopters. At the time of writing this paper, no scientific report of aeromagnetic surveys using UAVs has been found in Iran. Hence, the author wishes that this investigation serves as a reference for future studies and applications in the field of aeromagnetic surveys using UAVs in Iran.

Results and Conclusions

In this study, 43 papers in the context of aeromagnetic surveys using UAVs have been considered in which two, nine and six papers have been published in 2008, 2016 and 2019 respectively. These results show that although aeromagnetic surveys using UAVs are in their infancy period, they are developing rapidly. Moreover, the geography of the application of the research on the field of aeromagnetic surveys using UAVs has been investigated. The results show that this technology has been performed in 10 countries. Canada is the pioneer of applying this state of the art technology as 14 publications out of the total 43 papers are related to this country. China, Russia, and Japan have lower number of publications with 7, 6, and 5 publications, respectively.