

تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد و تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی پهنه‌های مستعد کانی‌سازی آهن به کمک نمودارهای پیش‌بینی-مساحت در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی

فردین احمدی^۱، حمید آقاجانی^{۲*} و میثم عابدی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲. دانشیار، گروه مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده معدن، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

چکیده

در بررسی‌های اکتشافی و تعیین مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی، استفاده همزمان از لایه‌های مختلف اطلاعاتی نتایج قابل اعتمادتری ارائه خواهد داد. در این تحقیق برای بررسی پتانسیل کانی‌زایی آهن در برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی، از داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی و سه نوع تصویر ماهواره‌ای استر، لندست-۸ و سنتینل-۲ استفاده شد. فیلتر بازگشت به قطب، ادامه فراسو ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر، سیگنال تحلیلی، زاویه تیلت افقی و مشتق قائم اول بر روی داده‌های مغناطیسی اعمال شد. لایه‌های دگرسانی (آرژلیک، فلیک، پروپیلیتیک)، نواحی حاوی اکسید آهن و گوسان و خطواره‌ها به وسیله تصاویر ماهواره‌ای استخراج شدند. لایه‌های سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت افقی به ترتیب برای شناسایی توده مغناطیسی و ساختارهای مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفت. سه لایه استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای به همراه دو لایه ژئوفیزیکی در تحلیل‌ها استفاده شدند. با استفاده از روش فرکتالی مقدار-مساحت و نمودار پیش‌بینی-مساحت ۲۲ نقطه اندیس و معدن فعال در منطقه مورد مطالعه، وزن این لایه‌ها محاسبه شد. لایه سیگنال تحلیلی با نرخ پیش‌بینی ۷۶ درصد، دارای بیشترین وزن در بین همه لایه‌ها است بدین معنی که با ۲۴ درصد از مساحت اشغال شده، ۷۶ درصد از نهشته‌های آهن بدرستی پیش‌بینی شده است. لایه نهایی پتانسیل‌یابی آهن منطقه مطالعاتی با تلفیق همه لایه‌ها با استفاده از روش همپوشانی شاخص چندکلاسه تهیه شد. این نقشه نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۷۸ درصد دارد بدین معنی که وزن آن از تک تک لایه‌ها بیشتر است. بر اساس این نقشه، پتانسیل‌های جدید کانی‌زایی آهن در شرق و جنوب شرق برگه اسفوردی مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: اسفوردی، سنتینل-۲، کانی‌زایی آهن، مغناطیس‌سنجی هوایی، نمودار پیش‌بینی-مساحت.

مقدمه

است. داده‌های ژئوفیزیک هوابرد در مقیاس ناحیه‌ای برداشت می‌شود و اغلب به عنوان ابزاری برای شناسایی تغییرات جانبی لیتولوژی و مناطق با پتانسیل بالای کانی‌سازی استفاده می‌شود. از آنجایی که شدت میدان مغناطیسی کل در هر نقطه متأثر از مواد و ساختارهای مغناطیسی موجود در آن نقطه است، بر پایه تفسیر این نقشه و اعمال فیلترهای مختلف می‌توان به وجود ناهنجاری‌های ساختاری زیرسطحی پی برد (Grauch and Johnston, 2002). در تفسیر داده‌های ژئوفیزیک‌هوایی که به منظور اکتشاف ذخایر معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، ساختارهای زمین‌شناسی از جمله گسل‌ها یا خطواره‌های پنهان و هم‌چنین نواحی دگرسانی مختلف مورد نظر می‌باشد. بنابراین در تفسیر این داده‌ها که شامل داده‌های مغناطیسی، الکترومغناطیسی و رادیومتری می‌باشد، تشخیص و تعیین محل ساختارهای ذکر شده به عنوان محل‌هایی برای بالا آمدن سیالات کانه ساز و تشکیل کانی‌سازی دارای اهمیت بوده و تفسیر کیفی داده‌ها بیشتر بر روی آنها متمرکز می‌شود. البته ممکن است با توجه به اهداف مختلف موارد دیگری نیز در تفسیر داده‌های ژئوفیزیک‌هوایی مد نظر قرار گیرد که در این موارد نیز باید به پدیده‌ها و عوارض و نیز روش‌هایی که می‌تواند در شناسایی ناهنجاری‌های مورد نظر کمک کند توجه کرد. از آنجایی که استفاده از یک پارامتر ژئوفیزیکی برای رسیدن به هدف مشخص می‌تواند دارای عدم قطعیت بالایی باشد، می‌توان با استفاده از چند پارامتر، این عدم قطعیت را تا حدود زیادی کاهش داد. برای تعیین پهنه‌های با پتانسیل بالای کانی‌سازی، اغلب از تلفیق اطلاعات مختلف و روش‌های وزن‌دهی مانند وزن‌های نشانگر، منطق فازی و رگرسیون منطقی استفاده می‌شود (Bonham-Carter, et al; 1989).

استفاده از روش دورسنجی و تصاویر ماهواره‌ای برای نقشه برداری از مناطق دگرسانی گرمایی، واحدهای سنگی و ویژگی‌های ساختاری مرتبط با انواع کانی‌سازی طی چند دهه گذشته در سراسر جهان بسیار چشمگیر بوده است (Testa et al; 2018 Javed and Wani, 2009).

استفاده بهینه از داده‌های ماهواره‌ای برای اکتشاف مواد

بازارهای بین‌المللی سنگ آهن به دلیل تقاضای زیاد صنایع فولاد، به‌تازگی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. ظرفیت‌های استخراج معادن در سراسر جهان گسترش یافته و ناحیه بافق در ایران مرکزی، جز پهنه‌های با پتانسیل بالای سنگ آهن به شمار می‌آید. ناحیه معدنی بافق، میزبان کانسارهای مهم «نوع کایرونا» مگنتیت-آپاتیت در کمربند آتشفشانی کاشمر-کرمان در قلمرو ایران مرکزی است (Daliran and Stosch, 2009; Mohammad Torab, 2008).

در ناحیه ساختاری ایران مرکزی به خصوص در ناحیه بافق، تعداد بسیار زیادی از معادن سنگ آهن وجود دارد. گستره برکه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی به عنوان بخشی از این ناحیه، شامل چندین معدن سنگ آهن مهم است. به عنوان مثال می‌توان معادن: چادرملو، چغارت، سه‌چاهون و میشدوان را نام برد (Sadeghi et al; 2013; Daliran, 1990). پیدایش ذخایر مگنتیت-آپاتیت در ناحیه بافق، همچنان به عنوان یک بحث چالش‌برانگیز در بین زمین‌شناسان وجود دارد. البته در این بین مدل‌های مختلفی در این خصوص ارائه شده است (Daliran and Stosch, 2009; Förster et al; 1994).

عملیات مغناطیس‌سنجی از قدیمی‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که برای فعالیت‌های اکتشافی در زمینه‌های مختلف و به ویژه اکتشاف ذخایر آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد. برداشت اصولی و تفسیر صحیح داده‌های مغناطیس‌سنجی در کنار دیگر داده‌های اکتشافی می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌ها، اطلاعات ارزشمندی در مورد موقعیت، عمق و ابعاد بخش‌های پنهان ذخایر آهن در اختیار پژوهشگران قرار دهد. در بیشتر یافته‌های جدید اکتشافی، ژئوفیزیک نقش مؤثری در اکتشاف و نمایش ذخایر پنهان در عمق دارد. مطالعات مغناطیس‌سنجی به طور گسترده‌ای برای اکتشاف مواد معدنی در سراسر جهان استفاده می‌شود (Elkhateeb and Abdellatif, 2018; Gaffar, 2015; Murphy, 2007). بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تولید شده توسط مناطق غنی از مگنتیت یا تپی‌شدگی مغناطیسی حاصل می‌شود که از سنگ‌های میزبان زمینه قابل تشخیص

در گستره برکه اسفوردی و تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، لندست ۸ و استرو به کمک نمودارهای پیش‌بینی-مساحت، نقشه پتانسیل معدنی از مناطق مستعد کانی‌زایی آهن در این برکه تهیه شده است.^۱

زمین‌شناسی گستره مطالعه

ناحیه معدنی بافق-ساغند در مرکز پهنه ایران مرکزی و کمان آتشفشان-پلوتونیک کاشمر-کرمان، بین گسل‌های کوهبنان در شرق و بافق-پشت‌بادام در غرب، قرار دارد. بر اساس نقشه‌برداری زمین‌شناسی و تحقیقات انجام شده، مجموعه سنگ‌های پرکامبرین، کامبرین و کواترن در این ناحیه وجود دارد (مجیدی و همکاران، ۱۳۹۴). تشکیلات پرکامبرین بیشتر در جنوب سه‌چاهون در شمال شرقی بافق ایجاد شده است. از لحاظ ساختاری، این گستره جزء پهنه ایران مرکزی، زیر پهنه بافق-پشت‌بادام است. کهن‌ترین سنگ‌های این گستره مربوط به پرکامبرین است و شامل مجموعه‌هایی از سنگ‌های دگرگونی شیست، گنایس، مرمر و آمفیبولیت می‌باشد. رسوبات ترشیری و کواترنی بیشتر شامل مجموعه‌هایی از کنگلومرا، ماسه سنگ و آبرفت‌های جوان هستند. توده‌های نفوذی موجود در گستره شامل گرانیتهای زیریگان، ناریگان، بهاباد و سینیت اسفوردی و مجموعه‌ای از دایک‌های دیوریتی و گابرویی هستند (Stosch et al; 2011; Torab and Lehman, 2006).

برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی در گستره بافق-پشت‌بادام قرار دارد. قدیمی‌ترین واحدهای موجود در این گستره سری ماسه سنگ‌های کوارتزی است. رسوبات این منطقه متعلق به کامبرین بالایی و پرکامبرین پایینی همراه با مقادیر کم ماسه سنگ در رسوبات قدیمی قرار دارند و از دو بخش زیرین و فوقانی تشکیل شده‌اند. بخش زیرین شامل دولومیت، سنگ آهک، شیل و ماسه سنگ، گدازه‌های اسیدی و شیل آهکی است و بخش فوقانی بیشتر کربنات‌ها را شامل می‌شود. کانی‌سازی گرمایی مگنتیت-آپاتیت عمدتاً به عنوان ماده معدنی غالب در این گستره و جایگزینی متاسوماتیک از عناصر خاکی کمیاب و کانی‌سازی اورانیوم اتفاق افتاده

معدنی، به ویژه در اکتشاف کانسارها، شناخت و نقشه‌برداری نواحی دگرسانی مرتبط، کمک شایانی به اکتشاف منابع معدنی زیرزمینی و به ویژه آهن می‌کند. در این روش برای شناسایی هدف، پس از انجام پیش‌پردازش‌ها و تصحیح‌ها از روش‌های مختلفی برای بارزسازی و شناسایی هدف اکتشافی مورد نظر استفاده می‌شود.

استفاده همزمان از فناوری سنجش از دور و ژئوفیزیک‌هایی در نقشه‌برداری زمین‌شناسی و اکتشاف مواد معدنی بسیار کارآمد خواهد بود (Ranjbar et al; 2004). کلارک (Clark, 2014) در مطالعه خود نشان داده است که دگرسانی‌های هیدروترمال تأثیر زیادی بر روی خواص مغناطیسی سنگ‌ها و الگوی آنومالی‌های مرتبط با آنها دارند. بنابراین برداشت‌های مغناطیس‌سنجی در شناسایی این نوع دگرسانی‌ها و در برخی موارد کانی‌سازی درون آنها مفید خواهد بود. بنابراین استفاده از داده‌های مغناطیس‌سنجی در کنار داده‌های ماهواره‌ای در یک منطقه می‌تواند نقش مهمی در مطالعه ساختارهای سطحی و زیرسطحی در منطقه و ارتباط آنها با عارضه‌های ساختاری اصلی و ناحیه‌ای داشته باشد.

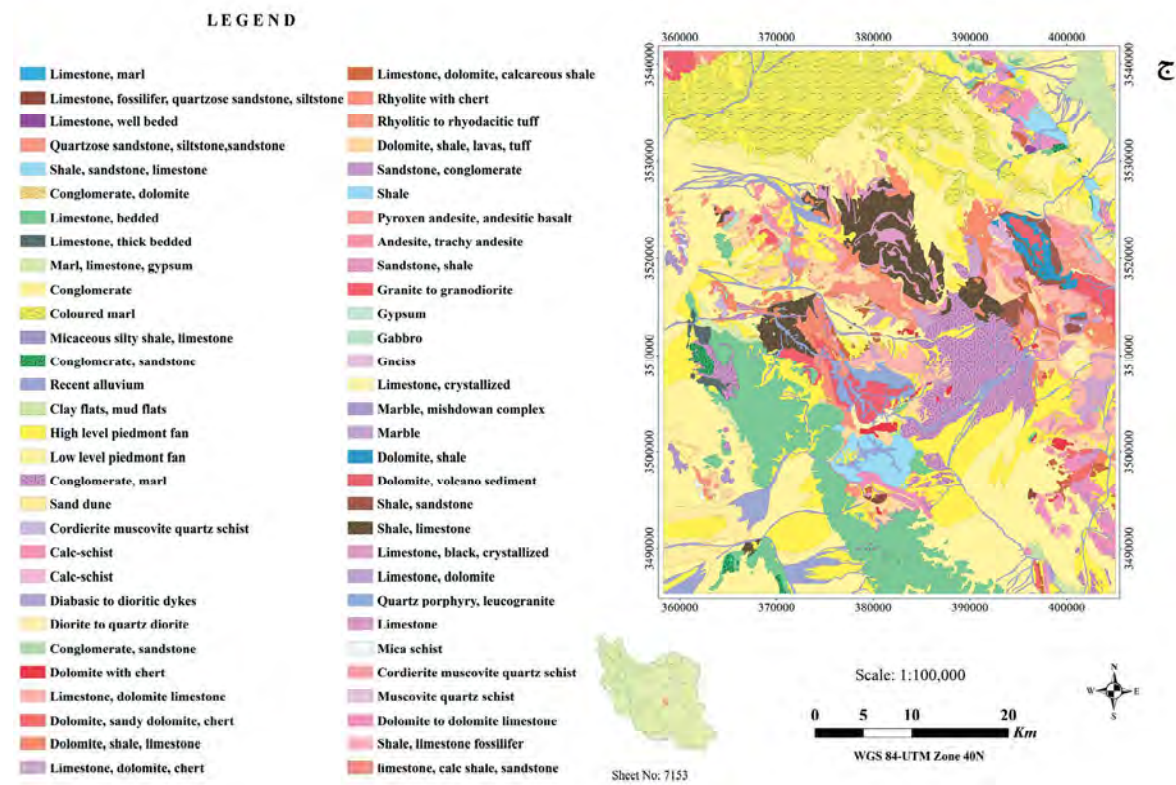
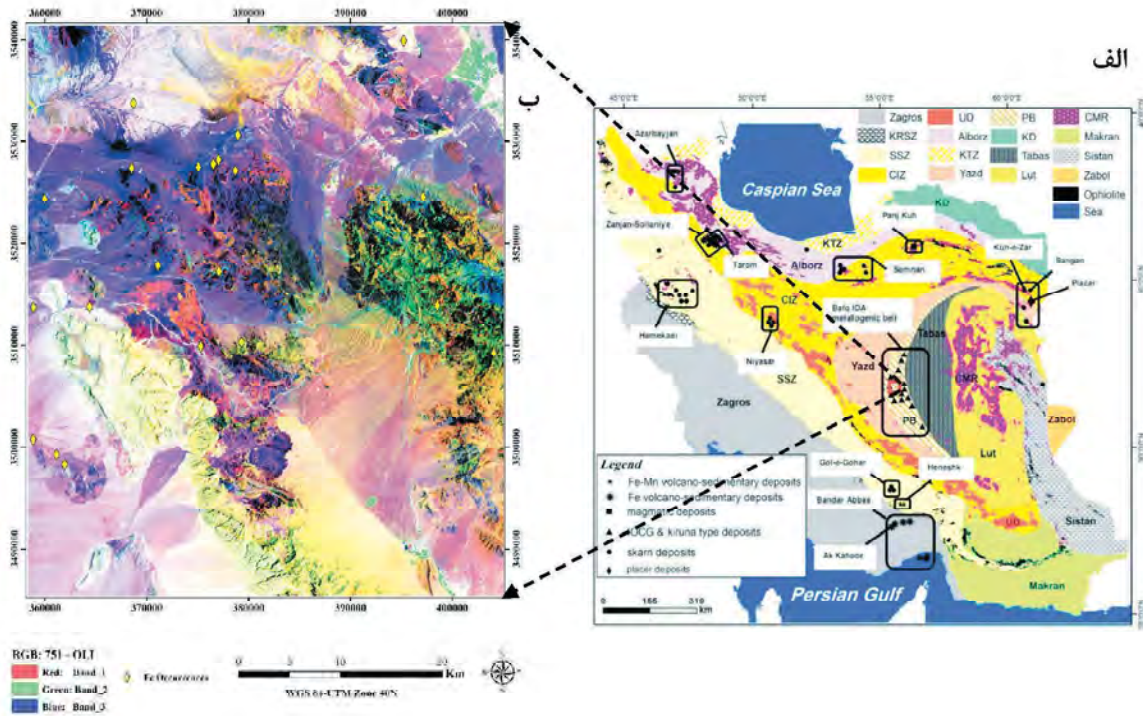
یوسفی و کارانزا (Yousefi and Carranza, 2015) نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت را برای وزن دهی به لایه‌های شاهد توسعه داده‌اند. در این روش از تابع لجستیک به منظور تخصیص امتیاز عضویت فازی به مقادیر پیوسته شواهد مکانی استفاده می‌شود. تابع لجستیک، کل داده‌ها را به یک دامنه محدود [۰-۱] انتقال می‌دهد. مقادیر حاصل شده، محور افقی نمودار را شامل می‌شود. دو محور قائم در نمودار، درصد آنومالی‌های پیش‌بینی شده از اندیس‌ها و نهشته‌های معدنی در منطقه و مساحت متناظر می‌باشد. بر اساس این نمودار میزان درصد آنومالی موجود در منطقه با مساحت متناظر سنجیده می‌شود. محل تلاقی دو منحنی به عنوان نقطه عطف نمودار، بیانگر وزن لایه خواهد بود بدین صورت که هرچه نقطه عطف، مقادیر بالاتری را شامل شود وزن نهایی لایه بیشتر خواهد بود. به عبارتی با مساحت کمتر، مناطق آنومال بیشتری قابل پیش‌بینی است. در همین راستا، در این پژوهش با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک هوابرد

1. Prediction-area

است. ذخایر سنگ آهن این گستره با سنگ‌های آتشفشانی رسوبی و نفوذی‌های درجه بالا همراه است و دارای یک مجموعه معدنی فقیر سولفید از مگنتیت کم تیتانیم (\pm هماتیت) است. در گستره مورد مطالعه، تعداد ۲۲ نهشته و اندیس مرتبط با ذخایر سنگ آهن گزارش شده است (Ghorbani, 2013). اسامی این اندیس‌ها در جدول ۱ آورده شده است. نقشه پراکندگی ذخایر آهن ایران، ترکیب رنگی RGB 751 از تصویر لندست-۸ و نقشه زمین‌شناسی باز تولید شده ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی به همراه محل اندیس‌ها و نهشته‌های موجود در این برگه در شکل ۱ نمایش داده شده است. طبق نقشه پراکندگی ذخایر مختلف آهن در ایران، منطقه مطالعاتی جز ذخایر آهن از نوع IOCG و کایرونا به شمار می‌رود که این ذخایر به صورت مثلث شکل در این نقشه قابل مشاهده هستند. محدوده برگه اسفوردی نیز به وسیله چهارضلعی قرمز رنگ مشخص شده است (شکل ۱-الف). برای تفکیک لیتولوژی‌های محدوده از ترکیب رنگی کاذب RGB 751 تصویر لندست-۸ استفاده شد. پوشش گیاهی در این تصویر به رنگ سبز نمایان است (شکل ۱-ب). نقشه زمین‌شناسی باز تولید شده در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ محدوده نیز در شکل ۱-ج آورده شده است. با مشاهده و مقایسه همزمان این نقشه با ترکیب رنگی، می‌توان یک دید بسیار خوب و جامع از شرایط زمین‌شناسی منطقه داشت.

جدول ۱. اسامی اندیس‌های معدنی آهن در منطقه مطالعه

ردیف	نام معدن/آنومالی	زمین‌شناسی منطقه
۱	آنومالی X	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۲	آنومالی II B	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده/پرکامبرین
۳	آنومالی II C	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده/پرکامبرین
۴	آنومالی IV	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده/پرکامبرین
۵	آنومالی V B	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۶	آنومالی V C	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۷	آنومالی V III	گرانیت، ولکانیک و ماسه سنگ/پرکامبرین بالایی-کامبرین پایین
۸	آنومالی XI	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۹	آنومالی X IIA	سنگ‌های رسوبی ولکانیکی/پرکامبرین-کامبرین
۱۰	آنومالی X IIIA	گرانیت پرفیری/پرکامبرین بالایی
۱۱	چشمه فیروز	دولومیت و اسیدی تا ولکانیکی حد واسط/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۲	چغارت	آکالی گرانیت، ولکانیک، ماسه سنگ و شیست/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۳	شرق بافق	آکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۴	اسفوردی	آکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۵	لکه سیاه	آکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۶	مشیدوان	آکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۷	مبارکه	سنگ‌های دگرگون شده/پرکامبرین
۱۸	نارگون	آکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۹	ناریگان	ولکانیک و ماسه سنگ/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۲۰	شمال سه چانگی ۱	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۲۱	شمال سه چانگی ۲	ماسه سنگ و شیل/پالئوزوئیک
۲۲	سه چاهون	دیوریت، رسوبی ولکانیکی/پرکامبرین بالا-کامبرین پایین



شکل ۱. موقعیت و زمین‌شناسی برکه اسفوردی، الف) موقعیت ذخایر مختلف سنگ آهن در ایران (Nabatian, et a; 2015)، ب) ترکیب رنگی کاذب RGB 751 از تصویر لندست-۸، ج) نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ باز تولید شده برکه اسفوردی

روش مطالعه

مغناطیسی یعنی جایی که میدان القایی قائم است، منتقل می‌شود زیرا اگر میدان زمین مایل باشد شکل ناهنجاری‌های مغناطیسی که به صورت القایی به وجود آمده‌اند نسبت به منابع به وجود آورنده نامتقارن خواهد بود اما در صورتی که میدان القایی قائم باشد، ناهنجاری‌های به وجود آمده در اثر القای مغناطیسی بر روی منبع خودشان قرار می‌گیرند پس تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی هواپی به طور معمول بر روی تصاویر مختلف برگردان به قطب صورت می‌گیرد (Elkhateeb et al; 2018, Murphy, 2007).

در ادامه روند کار، فیلترهای ادامه فراسو ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری بر روی نقشه برگردان به قطب اعمال شد (شکل‌های ۲-ج تا ۲-پ). هدف از اعمال این فیلترها، از بین بردن یا تضعیف ناهنجاری‌های مغناطیسی با فرکانس بالای سطحی است. سپس برای تشخیص توده نفوذی عمیق و ساختارهای مغناطیسی به ترتیب نقشه سیگنال تحلیلی^۲ (AS) و زاویه تیلت افقی^۴ (TDX) استفاده شد (شکل ۲-ت و ۲-ث). زاویه تیلت افقی بر روی نقشه حاصل از ادامه فراسوی ۱۰۰۰ متر اعمال شد. معادلات مربوط به سیگنال تحلیلی و زاویه تیلت به ترتیب در ادامه آورده شده است. برای یک بی‌هنجاری مغناطیسی، سیگنال تحلیلی در فضای سه‌بعدی به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (Hsu et al; 1996):

$$A_n(x,y) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] \quad (3)$$

که در آن $A_n(x,y)$ دامنه سیگنال تحلیلی و G ، بی‌هنجاری مغناطیسی است که اندازه آن نیز به راحتی قابل محاسبه است. زاویه تیلت نیز مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود (Miller and Singh, 1994):

$$T = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}} \right] \quad (4)$$

که در آن، T مقدار زاویه تیلت و f میدان پتانسیل برداشت شده (مغناطیسی یا گرانی) است. مقدار زاویه تیلت و تغییرات زاویه تیلت در بالای توده‌های معدنی و همچنین

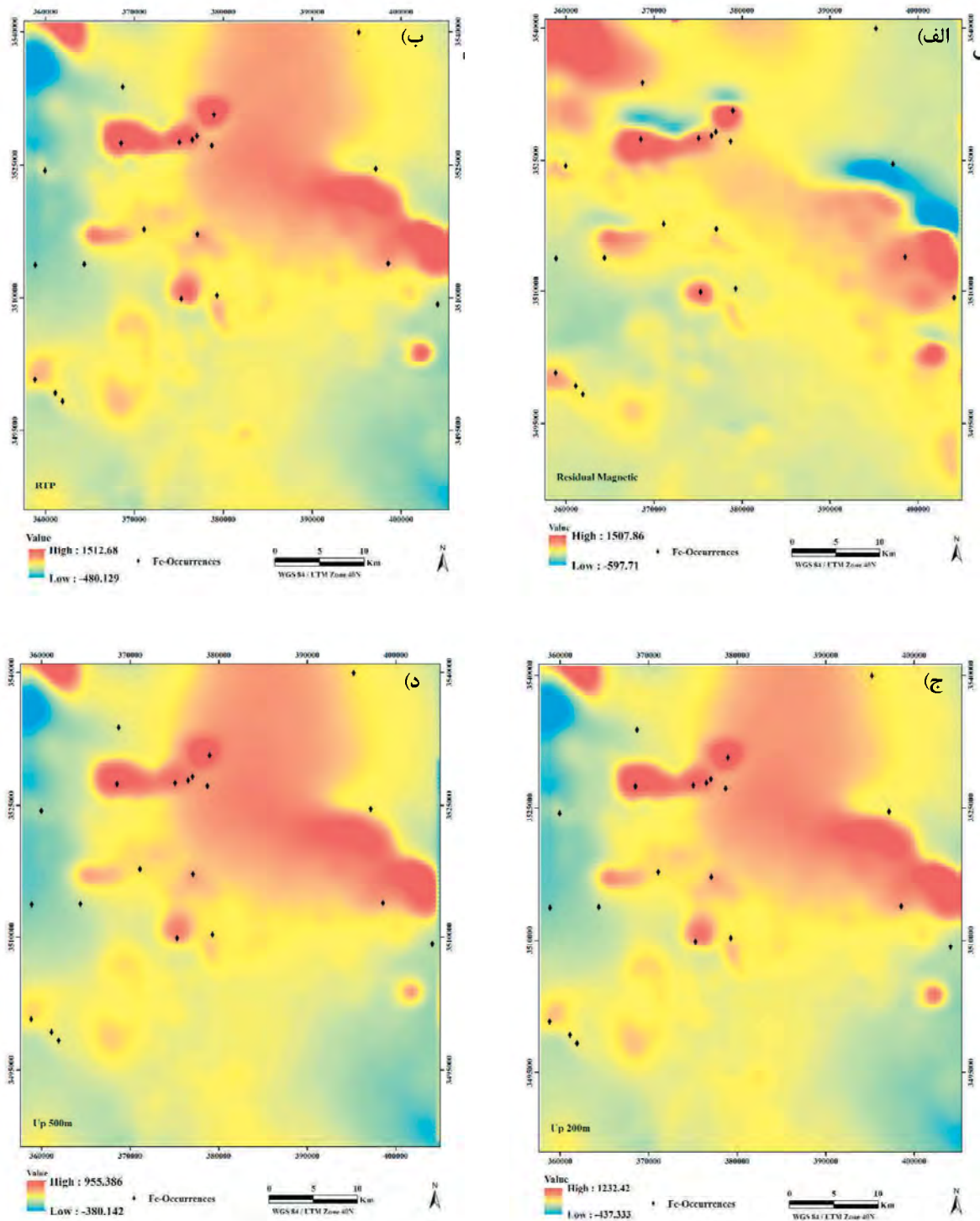
در این پژوهش، از یک روش ترکیبی از تجزیه و تحلیل فرکتالی عیار-مساحت (C-A) و نمودار پیش‌بینی-مساحت (P-A) برای وزن‌دهی و ارزیابی لایه‌های شاخص استفاده شده است. تمامی لایه‌های شاخص با اندازه پیکسلی ۱۰۰ متر در ۱۰۰ متر تهیه شده و مقادیر مکانی در هر نقشه با استفاده از تابع لجستیک پیشنهاد شده توسط یوسفی و کارانزا (Yousefi and Carranza, 2015)، به یک بازه [۰-۱] انتقال یافت. با استفاده از روش فرکتال، حدود آستانه‌ای برای هر لایه به کمک روش مقدار-مساحت مشخص شد. بر اساس نمودارهای فرکتالی حاصل شده، لایه‌های مختلف مجدداً کلاس‌بندی شدند. در ادامه با جانمایی محل آنومالی‌های موجود و تعیین مساحت دربرگیرنده، نمودارهای پیش‌بینی-مساحت برای هر لایه تهیه شد که بر اساس نقطه عطف حاصل شده، وزن هر لایه تعیین شد. از آنجا که هدف، اختصاص وزن به هر شاخص است، نسبت نرخ پیش‌بینی به مساحت اشغال شده مربوطه از طریق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$Nd = P_r / O_a \quad (1)$$

$$W_i = Ln N_d \quad (2)$$

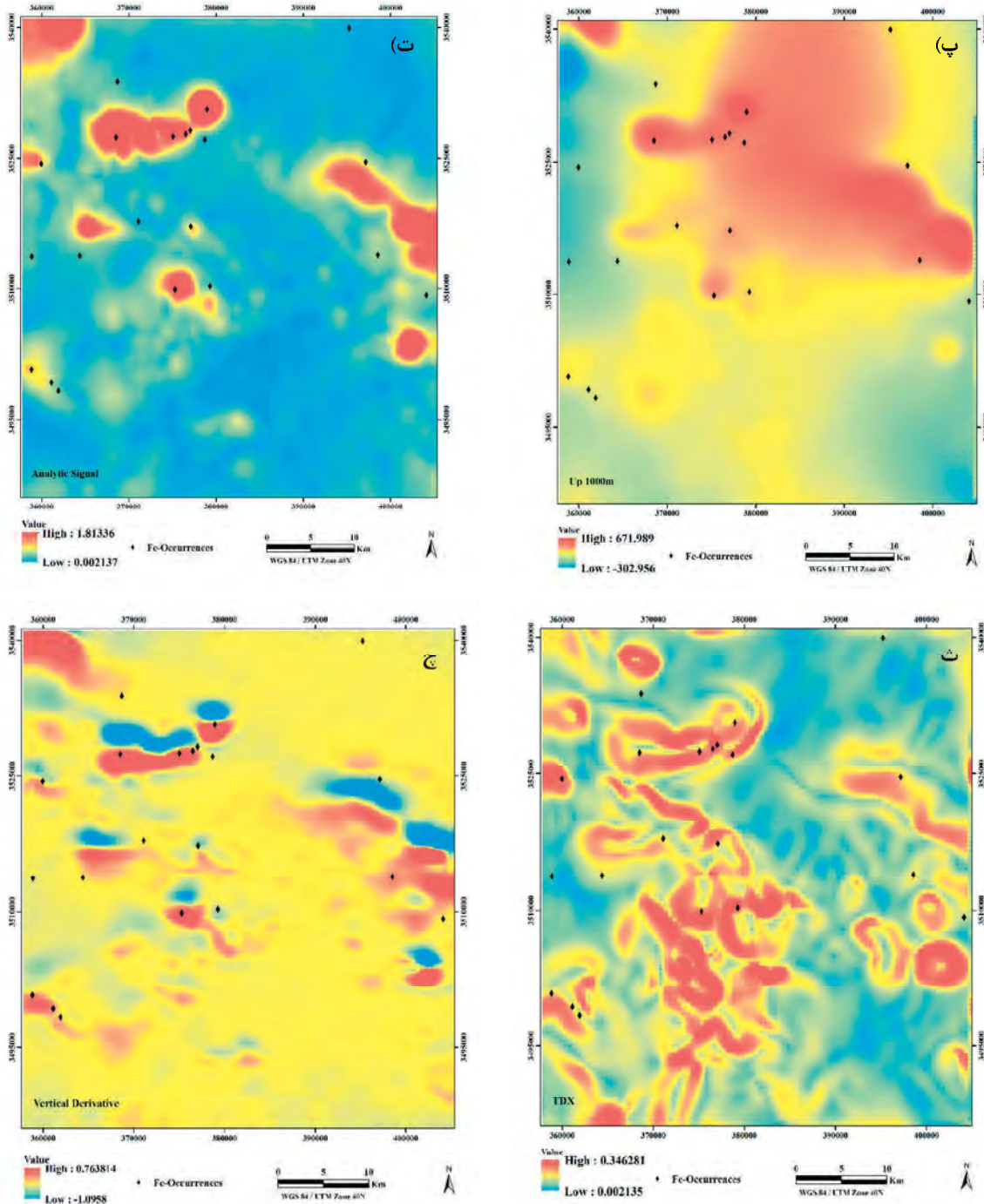
در این روابط، N_d چگالی نرمال شده، P_r نرخ پیش‌بینی و O_a مساحت اشغال شده است که بر اساس نقطه عطف در نمودار P-A استخراج می‌گردد و W_i وزن نهایی است که به هر یک از لایه‌ها اختصاص داده می‌شود. لایه‌های ژئوفیزیکی و تصاویر ماهواره‌ای به صورت جداگانه تهیه و وزن هر کدام به وسیله نمودارهای P-A محاسبه شد. برای بدست آوردن شاخص‌های ژئوفیزیکی، ابتدا داده‌های مغناطیسی‌سنجی هوابرد مورد آنالیز قرار گرفتند. با توجه به نوع داده‌های در اختیار قرار داده شده، داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد در فرآیندهای بعدی مورد استفاده قرار گرفت. بدین معنی که از داده‌های خام مقدار مغناطیس زمین (IGRF) کم شده است (شکل ۲-الف). فیلتر کاهش یافته به قطب مغناطیسی^۲ (RTP) بر روی داده‌های باقیمانده مغناطیسی اعمال شد (شکل ۲-ب). با استفاده از این فیلتر، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیب‌دار است به قطب

1. International Geomagnetic Reference Field
2. Reduction to the Pole
3. Analytic Signal
4. Horizontal Tilt Derivative



شکل ۲. نتایج پردازش داده‌های مغناطیس‌سنجی هواپرد، الف) نقشه مغناطیس باقیمانده (R-M)، ب) نقشه برگردان به قطب (RTP)، ج) نقشه ادامه فراسو-۲۰۰ متر (۲۰۰m Up)، د) نقشه ادامه فراسو-۵۰۰ متر (۵۰۰m Up)، پ) نقشه ادامه فراسو-۱۰۰۰ متر (۱۰۰۰m Up)، ت) فیلتر سیگنال تحلیلی (A-S)، ث) زاویه تیلت افقی اعمال شده بر روی ادامه فراسو-۱۰۰۰ متر (TDX)، ج) فیلتر مشتق قائم (V-D)

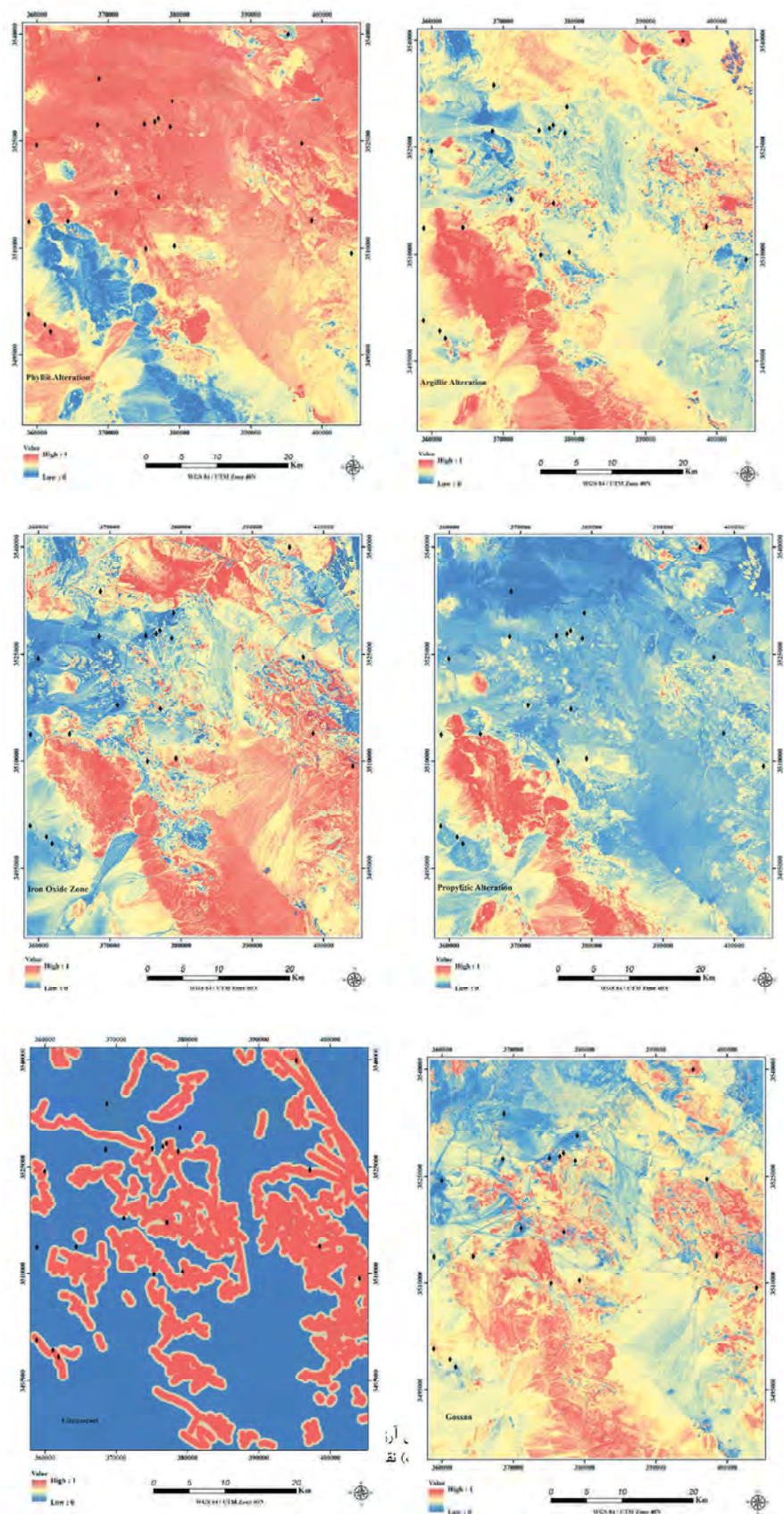
تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد و تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی پهنه‌های...



ادامه شکل ۲.

به سطوح پردازشی این تصاویر، ابتدا پیش‌پردازش‌های لازم بر روی هر کدام از تصاویر انجام پذیرفت تا آماده انجام پردازش‌های لازم گردند. لایه‌های دگرسانی آرژلیک، فیلیک و پروپیلیتیک با استفاده از تصویر استر و روش نسب‌بندی تهیه شد (شکل ۳-الف تا ۳-ج). برای این سه دگرسانی، نسبت‌های باندی $4/5$ ، $7+5/6$ و $9+7/8$ به ترتیب مورد استفاده قرار گرفت.

بدون بعد بودن آن مهم‌ترین دلیل کاربرد این فیلتر است. در نهایت نقشه مشتق قائم اول تهیه شد تا جزئیات برجسته‌تر شده و تفکیک بهتری از بی‌هنجاری‌های موجود انجام شود (شکل ۲-چ). لایه‌های دورسنجی نیز با استفاده از سه نوع تصویر ماهواره‌ای استر، سنتینل-۲ و لندست-۸ تهیه شد. با توجه

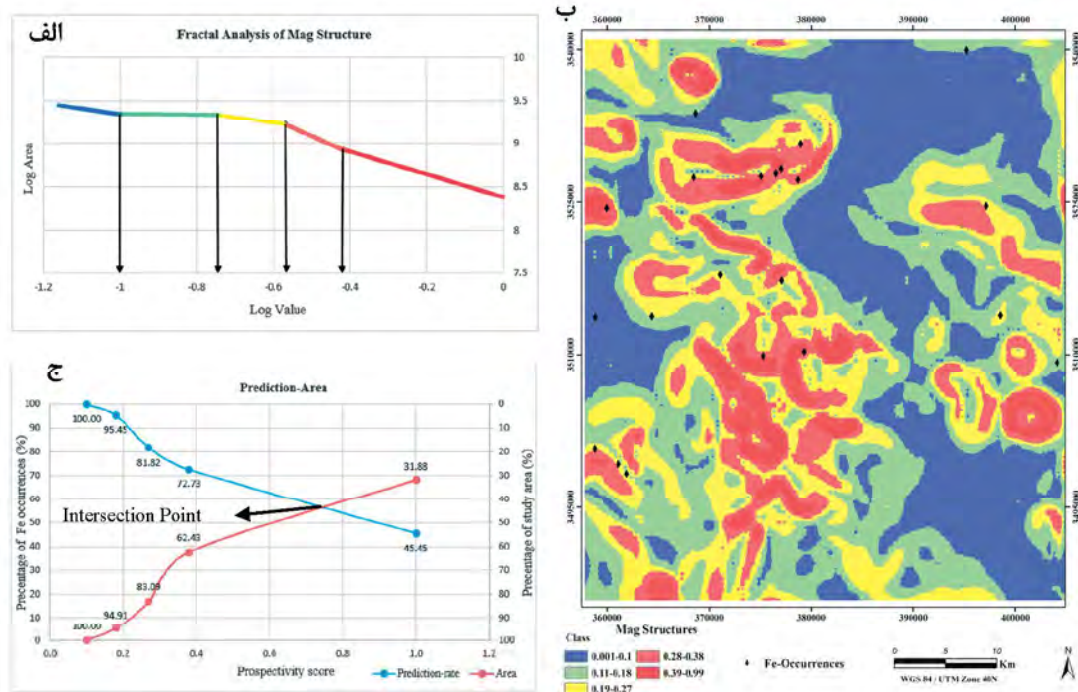


شکل ۳. نتایج پردازش داده‌های ماهواره‌ای، الف) نقشه دگرسانی آرژیلیک، ب) نقشه دگرسانی فیلیک، ج) نقشه دگرسانی پروپیلیتیک، د) نقشه اکسیدهای آهن، پ) نقشه گوسان، ت) نقشه خطواره‌ها

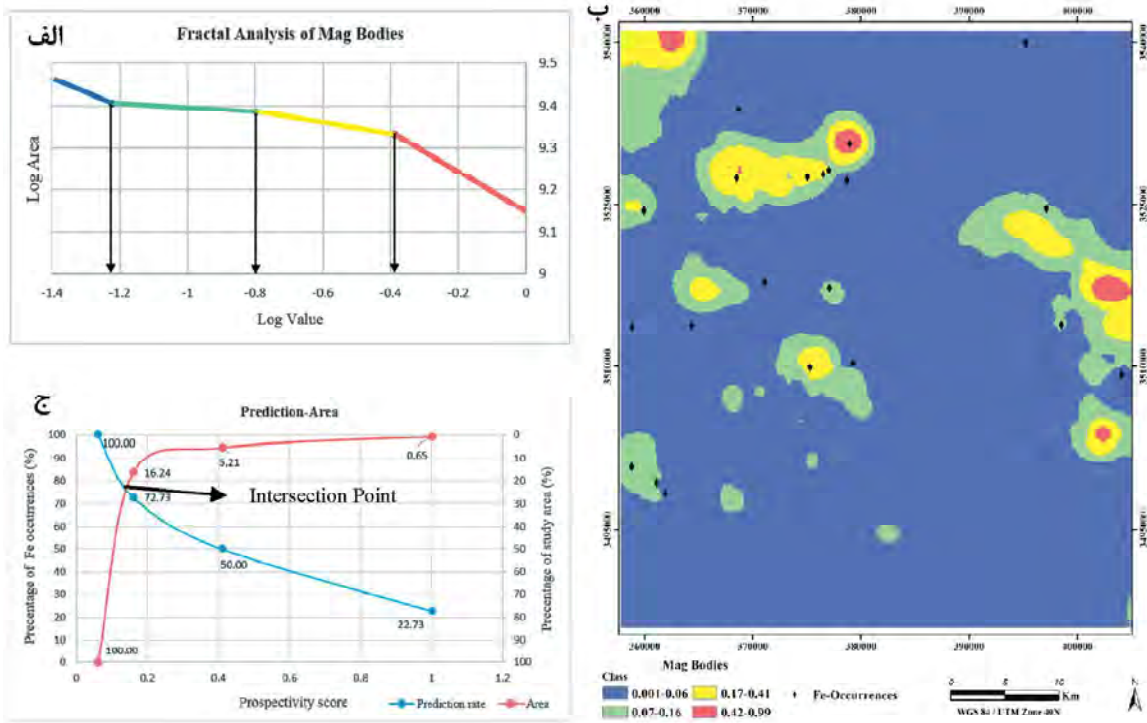
این لایه در شکل ۵-الف، نقشه کلاس‌بندی مجدد در شکل ۵-ب و نمودار پیش‌بینی-مساحت نیز در شکل ۵-ج نمایش داده شده است. با توجه به نمودار پیش‌بینی-مساحت آن، با ۲۴ درصد از مساحت اشغال شده، ۷۶ درصد از آنومالی‌ها توجیه می‌شوند. همین روند برای سه لایه شاهد دورسنجی شامل دگرسانی‌ها (آرژلیک، فلیک و پروپیلیتیک)، اکسیدهای آهن و زون گوسان و خطواره‌ها مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مرتبط با این سه لایه به ترتیب در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. لایه دگرسانی‌ها شامل پنج کلاس و نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۷۰ درصد دارد. لایه اکسیدهای آهن و زون گوسان شامل شش کلاس و نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۵۹ درصد دارد. لایه خطواره‌ها شامل پنج کلاس و نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۶۰ درصد قرار دارد. طبق این نتایج لایه ساختارهای مغناطیسی با نرخ پیش‌بینی ۵۸ درصد، کمترین وزن و لایه شاهد سیگنال تحلیلی و دگرسانی فلیک به ترتیب با نرخ‌های پیش‌بینی ۷۶ و ۷۰ درصد، دارای بیشترین نرخ‌های پیش‌بینی (کمترین مساحت) هستند. نتایج محاسبه وزن هر لایه و روش‌های مورد استفاده در تهیه هر لایه، در جدول ۲ آورده شده است.

لایه مناطق حاوی اکسید آهن با نسبت باندی ۴/۲ در تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸ تهیه شد (شکل ۳-د). با استفاده از تصویر سنتینل-۲، تهیه لایه‌های زون گوسان و خطواره‌های محدوده مطالعه انجام گرفت. برای تهیه لایه گوسان از نسبت باندی ۱۱/۴ و لایه خطواره‌ها از فیلترگذاری باندی ۴ تصویر سنتینل-۲ استفاده شد. نقشه گوسان در (شکل ۳-پ) و نقشه خطواره‌ها در (شکل ۳-ت) آورده شده است.

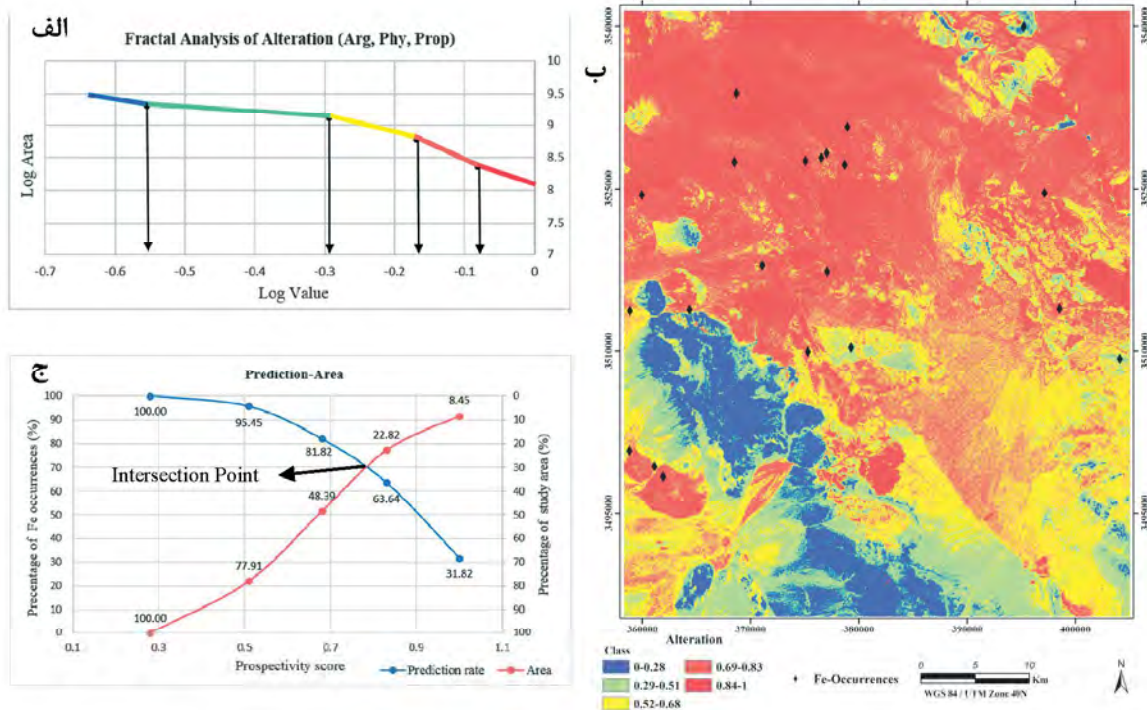
به وسیله روش فرکتالی مقدار-مساحت، لایه‌های مرتبط با کانی‌زایی آهن دوباره کلاس‌بندی شد و به وسیله نمودار پیش‌بینی-مساحت، وزن آنها محاسبه شد. از میان لایه‌های ژئوفیزیکی، نقشه سیگنال تحلیلی برای برآورد حضور توده مغناطیسی در عمق و لایه زاویه تیلت افقی برای برآورد ساختارهای مغناطیسی در نظر گرفته شد. لایه شاهد زاویه تیلت افقی به پنج کلاس تقسیم و نمودار فرکتالی آن در شکل ۴-الف، نقشه کلاس‌بندی در شکل ۴-ب و نمودار پیش‌بینی-مساحت آن در شکل ۴-ج نمایش داده شده است. طبق نقطه عطف این نمودار، با ۴۳ درصد از مساحت اشغال شده، ۵۷ درصد از آنومالی‌ها توجیه می‌شوند. لایه شاهد سیگنال تحلیلی شامل چهار کلاس می‌باشد. نمودار فرکتالی



شکل ۴. نقشه شاهد ساختارهای مغناطیسی، (الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، (ب) نقشه کلاس‌بندی شده ساختارهای مغناطیسی بر اساس نمودار فرکتالی، (ج) نمودار پیش‌بینی-مساحت

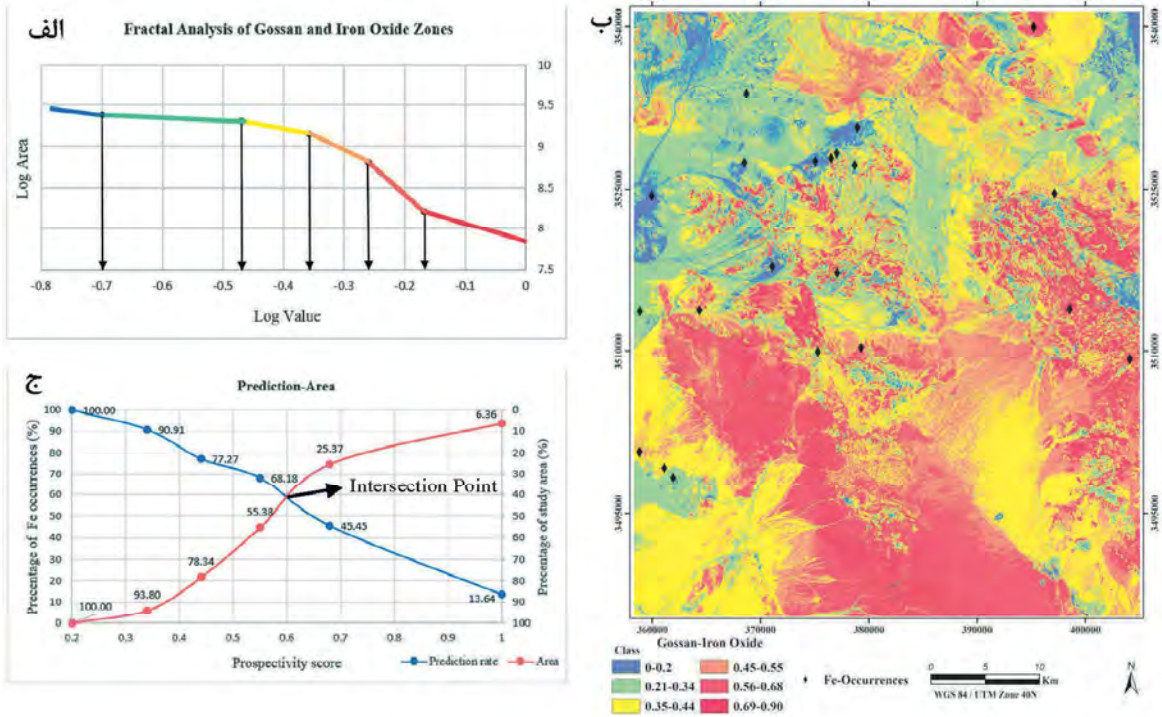


شکل ۵. نقشه شاهد سیگنال تحلیلی، الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، ب) نقشه کلاس بندی شده سیگنال تحلیلی بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش بینی-مساحت

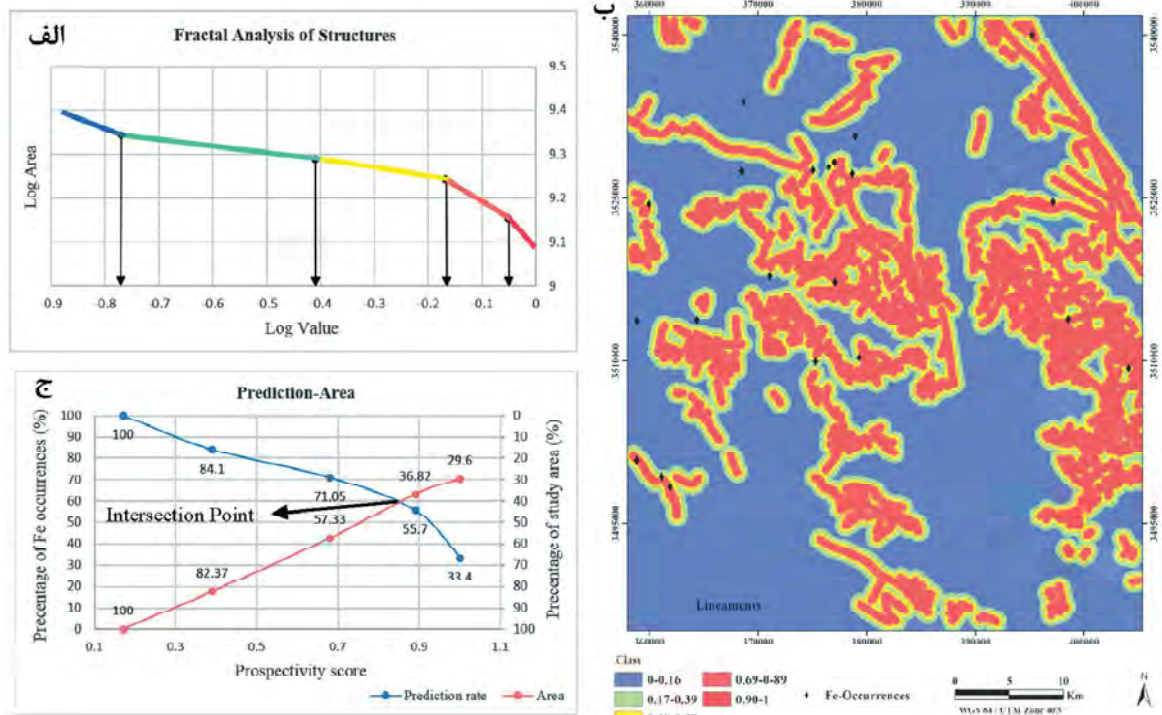


شکل ۶. نقشه شاهد دگرسانی ها، الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، ب) نقشه کلاس بندی شده دگرسانی ها بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش بینی-مساحت

تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هواپرد و تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی پهنه‌های ...



شکل ۷. نقشه شاهد زون اکسید آهن و گوسان، الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، ب) نقشه کلاس‌بندی شده اکسیدهای آهن و گوسان بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش‌بینی-مساحت



شکل ۸. نقشه شاهد خطواره‌ها، الف) نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت، ب) نقشه کلاس‌بندی شده خطواره‌ها بر اساس نمودار فرکتالی، ج) نمودار پیش‌بینی-مساحت

جدول ۲. لایه‌های شاهد استفاده شده و وزن محاسبه شده هرکدام به وسیله نمودار پیش‌بینی-مساحت

نوع داده	لایه	روش	نرخ پیش‌بینی	مساحت	چگالی نرمالایز شده	وزن
مغناطیس هوابرد	توده مغناطیسی	سیگنال تحلیلی	۷۶	۲۴	۳/۱۷	۱/۱۵۳
	ساختارهای مغناطیسی	زاویه تیلت افقی	۵۸	۴۲	۱/۳۸	۰/۳۲۳
استر	دگرسانی‌ها	نسبت‌بندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی	۷۰	۳۰	۲/۳۳	۰/۸۴۶
سنتینل ۲، لندست ۸	اکسید آهن و گوسان	نسبت‌بندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی	۵۹	۴۱	۱/۴۴	۰/۳۶۴
سنتینل ۲	خطواره‌ها	فیلتربرایی	۶۰	۴۰	۱/۵	۰/۴

روش، مقدار فازی شده هر نقشه در وزن به دست آمده آن لایه ضرب می‌شود و سپس مجموع این مقادیر بر مجموع وزن‌های به دست آمده تقسیم می‌شود.

پس از فازی سازی نقشه نهایی، لایه نهایی به کمک روش فرکتال، به پنج زیر گروه تفکیک شد. بر اساس این نمودار نقشه کلاس‌بندی ترسیم شد و در نهایت نمودار پیش‌بینی-مساحت برای این لایه رسم شد. طبق این نمودار با ۲۲ درصد از مساحت اشغال شده، می‌توان ۷۸ درصد از انومالی‌ها را توجیه کرد با توجه به اعداد به دست آمده از مساحت اشغال شده و نرخ پیش‌بینی، چگالی نرمالایز شده برای لایه تلفیقی، برابر با ۳/۵۴۵ بدست می‌آید و وزن این لایه، ۱/۲۶۵ خواهد بود. بنابراین لایه نهایی دارای وزن بیشتری از تک تک لایه‌ها می‌باشد. نتایج مربوط به نقشه تلفیق شده نهایی در شکل ۹ آورده شده است. نمودار فرکتالی در شکل ۹-الف، نقشه تلفیقی فازی شده در شکل ۹-ب، نمودار پیش‌بینی-مساحت در شکل ۹-ج و نقشه کلاس‌بندی مجدد در شکل ۹-د نمایش داده شده است.

بازدید صحرایی

برای ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج، بررسی میدانی از نواحی با پتانسیل بالا صورت پذیرفت. در این راستا تمرکز بر جنوب شرق گستره مطالعه می‌باشد که به عنوان مناطق با پتانسیل بالایی معرفی می‌شود که اندیس معدنی در آن گستره مشاهده نمی‌شود. در طی این عملیات بخش‌های مختلفی مورد بازدید قرار گرفت که آثار و شواهد زمین‌شناسی گوناگون ثبت و در شکل ۱۰ آورده شده است. در شکل ۱۰-الف ساختارهای خطی و گسل خوردگی شدید مشاهده

همان‌طور که از وزن‌های بدست آمده مشخص است، لایه توده مغناطیسی با ضریب ۱/۱۵۳، بالاترین وزن را به خود اختصاص داده است و پس از آن وزن بدست آمده از دگرسانی (فیلیک) جلب توجه می‌کند. دلیل آن می‌تواند در ارتباط با آبکافت پلاژیوکلاز و تبدیل به سرسیت باشد (Sepehrirad, et al; 2018 Heidarian, et al; 2017). به همین دلیل این دگرسانی ارتباط تنگاتی با کانی‌زایی تیپ کایرونا دارد. البته دگرسانی‌هایی همچون کلریتی و پتاسیک نیز در ارتباط با این نوع کانی‌زایی می‌باشند.

نقشه زاویه تیلت نیز که برای نمایش ساختارهای مغناطیسی استفاده شد وزنی معادل ۰/۳۲۳ دارد. برای لایه‌های اکسید آهن و گوسان مقدار ۰/۳۶۴ بدست آمده است و خطواره‌ها وزن ۰/۴ را به خود اختصاص داده‌اند. این لایه‌ها بر حسب وزنی که برای هر لایه بدست آمده است وارد فرآیند تلفیق برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی شدند.

تهیه نقشه پتانسیل معدنی

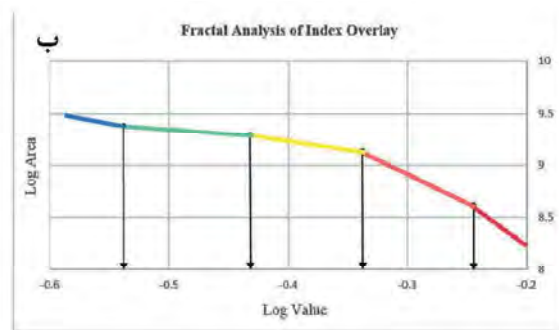
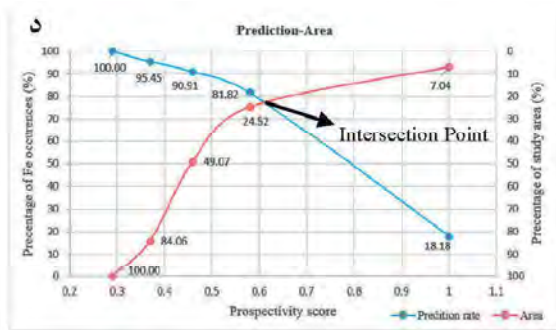
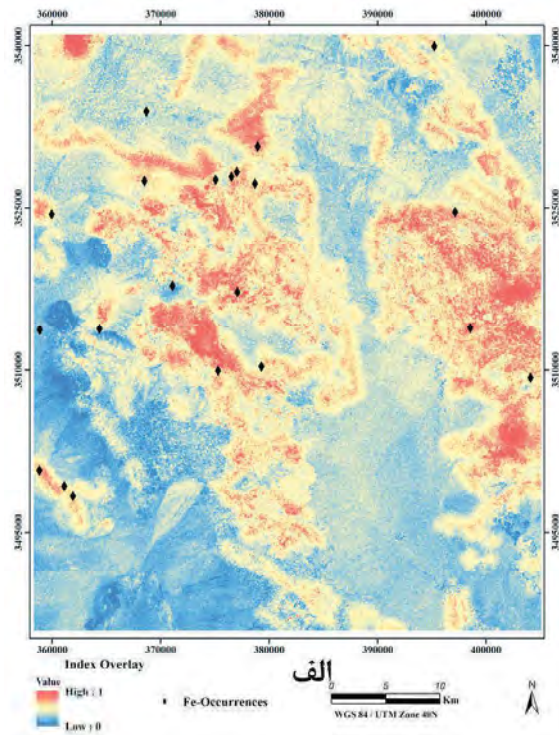
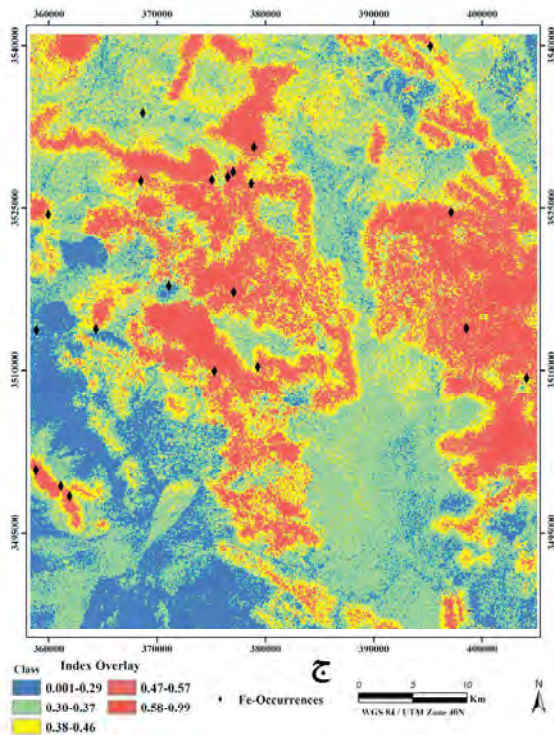
برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی، روش‌های مختلفی وجود دارد که بر حسب روش‌های وزن‌دهی و روش‌های مدلسازی مختلف می‌توان از آنها استفاده کرد (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2016). در اینجا از روش همپوشانی شاخص برای انجام تلفیق لایه‌های شاهد استفاده شد.

پس از تهیه همه لایه‌های شاهد (ژئوفیزیکی و دورسنجی)، برای تهیه نقشه پتانسیل مطلوب، لایه‌های توده مغناطیسی، ساختارهای مغناطیسی، دگرسانی‌ها، اکسیدهای آهن-زون گوسان و خطواره‌ها باهم تلفیق شدند. برای تلفیق این لایه‌ها از روش همپوشانی شاخص استفاده شد. در این

تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابردو تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی پهنه‌های ...

می‌دهد. در شکل ۱۰-ت حضور اولوژیت در سنگ میزبان کربناتی مشاهده می‌شود که در بخش‌های مختلف این قضیه اتفاق افتاده است. در شکل ۱۰-ث واریزه نسبتاً بزرگ سنگ آهن در رسوبات نمایش داده شده است که البته علی‌رغم صرف زمان زیاد، رخنمونی یافت نشد و با توجه به وسعت محدوده نیاز به بررسی‌های بیشتر خواهد داشت. نمونه‌های ماکروسکوپی برداشت‌شده در شکل ۱۰-ج نشان داده شده است.

می‌شود. شکل ۱۰-ب حضور توده‌های نفوذی را نشان می‌دهد. کربنات‌ها یکی از فراوان‌ترین واحدهای سنگی در گستره مطالعاتی می‌باشد که طبق تحقیقات مختلف در برخی نواحی نیز در ارتباط با کانی‌سازی هستند. کربنات‌های جنوب‌غرب محدوده با روند شمال‌غرب به جنوب‌شرق در شکل ۱۰-ج نمایش داده شده است. در شکل ۱۰-د محل حفر گمانه یکی از آنومالی‌های محدوده آورده شده است. شکل ۱۰-پ اکسیدهای آهن و هماتیته شدن را نشان



شکل ۹. نقشه تلفیق شده همه لایه‌های شاهد، الف) نقشه نهایی تلفیقی فازی شده، ب) نمودار لگاریتمی فرکتال مقدار-مساحت لایه نهایی تلفیق شده، ج) نقشه کلاس‌بندی لایه نهایی تلفیق شده، د) نمودار پیش‌بینی-مساحت لایه نهایی تلفیق شده



شکل ۱۰. بررسی‌های میدانی. الف) گسل خوردگی شدید در منطقه، ب) واحدهای نفوذی، ج) واحدهای کربناتی جنوب‌غرب برکه اسفوردی، د) نمایی از آنومالی‌ها و حفر گمانه اکتشافی، پ) اکسیدهای آهن، ت) حضور اولوژیست در سنگ میزبان کربناتی، ث) واریزه سنگ آهن در رسوبات جنوب‌شرق گستره مطالعاتی، ج) نمونه‌های سنگ آهن برداشت شده در بخش جنوب‌شرق برکه اسفوردی

نتیجه‌گیری

اسفوردی، این نواحی مشاهده می‌شوند که به رنگ قهوه‌ای تیره قابل شناسایی هستند. این نواحی به عنوان اولویت‌های اکتشافی و بررسی‌های میدانی مدنظر قرار گرفتند. در نقشه نهایی تلفیق شده، با ۲۲ درصد از مساحت دربرگیرنده می‌توان ۷۸ درصد از آنومالی‌ها را توجیه کرد. به عبارتی وزن لایه نهایی حاصل از تلفیق همه لایه‌ها، از تک تک لایه‌ها بیشتر است.

در بررسی‌های میدانی نیز شواهد حاکی از احتمال بالای کانی‌زایی در این ناحیه به چشم می‌خورد. با انجام بررسی‌های زمین‌شناسی و مقایسه آن با اندیس‌ها و نهشته‌های قبلی، می‌توان واحدهای ریولیتی، ریوداسیتی، دولومیت‌های آهکی و مناطق حضور مارن را با پتانسیل‌ترین نواحی برای کانی‌زایی احتمالی دانست که این موضوع از مهمترین کلیدهای اکتشافی در محدوده می‌باشد. به کمک نقشه نهایی تلفیقی و در نظر گرفتن واحدهای مستعد کانی‌زایی در محدوده، شناسایی نواحی با پتانسیل و امیدبخش جدید بسیار محتمل خواهد بود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مجموعه معدنی روی خان خاتون و به ویژه جناب آقای دکتر ناصر رحمانی و مهندس حمید رستمی‌پور به دلیل همکاری و همراهی در انجام عملیات صحرایی سپاسگزاری می‌شود. همچنین از سازمان زمین‌شناسی کشور به دلیل در اختیار قرار دادن بخشی از داده‌های این پژوهش تشکر به عمل می‌آید.

منابع

- مجیدی، س.ا.، لطفی، م. و امامی، م.ه.، ۱۳۹۴. ژنز کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت: بر پایه مطالعه آپاتیت‌های پهنه بافق-ساغند، ایران مرکزی. فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، ۲۷(۱۰۵)، ۲۳۳-۲۴۴.

- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P and Wright, D. F., 1989. Weights of evidence modeling: A new approach to mapping mineral potential. In Statistica Application in the Earth Sciences, Geology Survey of Canada, 171-183.

- Bonham-Carter, G.F. 1994. Geographic

یکی از مزیت‌های سنجش از دور در مطالعات زمین‌شناسی، پوشش وسیع گستره مورد مطالعه است که اطلاعات بسیار سودمندی از الگوهای ساختاری را ارائه می‌دهد. گسل‌ها و شکستگی‌ها، ساختارهایی هستند که به خوبی بر روی تصاویر ماهواره‌ای شناسایی می‌شوند. از طرفی پردازش داده‌های مغناطیس‌هوایی اطلاعات با ارزشی برای تحلیل عوارض زیر سطحی به دست می‌دهد. از جمله رخساره‌های قابل شناسایی با استفاده از داده‌های مغناطیسی هوایی می‌توان به تعیین محل و گسترش عمقی توده‌های نفوذی پنهان، مناطق دگرسانی، مناطق برشی، شکستگی‌های پی‌سنگی و در کل بررسی وضعیت زمین‌ساختی و مطالعه ارتباط آن با کانه‌زایی اشاره کرد. لذا در این پژوهش با تلفیق و تحلیل داده‌های مغناطیس‌هوایی و تصاویر ماهواره‌ای از سه سنجنده مختلف، به بررسی وضعیت ساختاری و ارتباط آن با کانه‌زایی پرداخته شد. با استفاده از اندیس‌ها و نهشته‌های معدنی موجود، وزن‌دهی به لایه‌های شاهد صورت پذیرفت که با این کار به نوعی اعتبارسنجی نیز صورت پذیرفته است. نتایج این پژوهش در مقایسه با کارهای مشابه قبلی، این مزیت را داراست که علاوه بر استفاده از سه سنجنده در تهیه لایه‌های مختلف، از محل اندیس‌های معدنی بهره برده شده است و این امر اعتبار نتایج را افزایش خواهد داد. در این بین تصاویر سنتینل ۲ در به نقشه آوردن مناطق اکسید آهن و زون‌های گوسان قابلیت بالایی داشته و به طور کلی در بررسی‌های مرتبط با کانی‌زایی آهن بسیار مؤثر واقع می‌شود. استفاده از نمودارهای پیش‌بینی-مساحت در مقایسه با روش‌های وزن‌دهی مرسوم، ریسک ناشی از خطای کارشناسی را در بر نداشته و وزن‌های بدست آمده قابل اعتمادتر خواهند بود. در این راستا با استفاده از توجیه مساحت اشغال شده به وسیله آنومالی‌ها، اقدام به تهیه وزن لایه‌ها شده است.

نتایج نهایی نیز بسیار منطبق بر حضور این نقاط در گستره است. به علاوه بخش‌های جدیدی به عنوان نواحی جدید با پتانسیل بالای کانی‌سازی آهن شناسایی شد. طبق این نقشه، در شرق، جنوب شرق و شمال غربی برگه

Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS, New York Pergamon/Elsevier, 398.

- Carranza, E. J. M. and Laborde, A. G. 2016. Data-driven predictive modeling of mineral prospectivity using random forests. A case study in Catanduanes Island (Philippines). *Natural Resources Research*, 25, 35-50.

- Clark, D. A., 2014. Magnetic Effects of Hydrothermal Alteration in Porphyry Copper and Iron-Oxide Copper-gold Systems: A Review. *Tectonophysics*, 624-625, 1, 46-65. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.011>.

- Daliran, F., Stosch, HG., and Williams PJ., 2009. A review of the Early Cambrian magmatic and metasomatic events and their bearing on the genesis of the Fe oxide-REE-apatite deposits (IOA) of the Bafq district, Iran. In Williams P (Ed.): *Smart Science for Exploration and Mining*. 10th SGA Biennial, Townsville, 623-625.

- Daliran, F., 1990. The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, East Central Iran. An alkali rhyolite hosted, "Kiruna type" occurrence in the Infracambrian Bafq metallogenic (mineralogic, petrographic and geochemical study of the ores and the host rocks. Ph.D. thesis, Heidelberg, Heidelberg Geowissenschaftliche Abhandlungen 37, 248.

- Elkhateeb, S. O. and Abdellatif, M. A. G., 2018. Delineation potential gold mineralization zones in a part of Central Eastern Desert, Egypt using Airborne Magnetic and Radiometric data. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(2), 361-376.

- Elkhateeb, S. O., Eldosouky, A. M. and Aboelabas, S., 2018. Interpretation of Aeromagnetic Data to Delineate Structural Complexity Zones and Porphyry Intrusions at Samr El Qaa Area, North Eastern Desert, Egypt. *International Journal of Novel Research in Civil Structural and Earth Sciences*. 5, Issue 1, 1-9.

- Förster, H. and Jafarzadeh, A., 1994. The

Bafq mining district in Central Iran—a highly mineralized Infracambrian volcanic field. *Economic Geology*, 89, 1697-1721.

- Gaafar, I. M., 2015. Integration of geophysical and geological data for delimitation of mineralized zones in Um Naggat area, Central Eastern Desert, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy*.

- Ghorbani, M., 2013. *Economic geology of Iran*. 581. Berlin: Springer.

- Grauch, V. J. S. and Johnston, C. S., 2002. Gradient window method: A simple way to isolate regional from local horizontal gradients in potential-field gridded data: 72nd Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists.

- Heidarian, H., Alirezaei, S., and Lentz, D. R., 2017. Chadormalu Kiruna-type magnetite-apatite deposit, Bafq district, Iran: Insights into hydrothermal alteration and petrogenesis from geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope data. *Ore Geology Reviews*, 83, 43-62.

- Hsu, S. K., Sibuet, J. C., and Shyu, C. T., 1996. High-resolution detection of geologic boundaries from potential anomalies, An enhanced analytic signal technique, *Geophysics*, 61, 373-386.

- Javed A., and Wani MH., 2009. Delineation of groundwater in Kakund watershed, Eastern Rajasthan using remote sensing and GIS techniques. *Journal of Geol Soc India* 73,2, 229-236.

- Miller, H.G. and Singh, V., 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*. 32, 213- 217.

- Mohammad Torab, F., 2008. Geochemistry and metallogeny of magnetite-apatite deposits of the Bafq Mining District, Central Iran. Doctoral Thesis, Faculty of Energy and Economic Sciences Clausthal University of Technology.

- Murphy, B. S., 2007. Airborne geophysics and the Indian scenario. *J. Ind. Geophysics Un-*

ion, 11, 1, 1-28.

- Nabatian, G., Rastad, E., Neubauer, F., Honarmand, M., and Ghaderi, M., 2015. Iron and Fe-Mn mineralisation in Iran: implications for Tethyan metallogeny. *Australian Journal of Earth Sciences*, 62, 2, 211-241.

- Ranjbar, H., Shahriari, H., and Honarmand, M., 2004. Integration of ASTER and airborne geophysical data for exploration of copper mineralization. A case study of Sar Cheshmeh area. In *Proceedings of 20th congress, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul*. 12-13.

- Sadeghi, B., Khalajmasoumi, M., Afzal, P., Moarefvand, P., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., and Ziazarifi, A., 2013. Using ETM+ and ASTER sensors to identify iron occurrences in the Esfordi 1: 100,000 mapping sheet of Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 85, 103-114.

- Sepehrirad, R., Alirezaei, S. and Azimzadeh, A. M., 2018. Hydrothermal alteration in the Gazestan magnetite-apatite deposit and comparison with other Kiruna-type iron deposits in the

Bafq district, Central Iran. *Journal of Geoscience*, 27, 108, 257-268.

- Stosch, H.G, Romer R.L, Daliran, F. and Rhede D., 2011. Uranium-lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran. *Miner Deposita*, 46, 9-21.

- Testa, F.J., Villanueva, C., Cooke, D.R. and Zhang, L. 2018. Lithological and hydrothermal alteration mapping of epithermal, porphyry and tourmaline breccia districts in the Argentine Andes using ASTER imagery. *Remote sensing*, 10, 2, 203; doi:103390/rs10020203.

- Torab, F. M. and Lehmann B., 2006. Iron oxide-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran. An overview from geology to mining. *World of Mining-Surface and Underground*, 58, 355-362.

- Yousefi, M. and Carranza, E. J. M., 2015. Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling. *Computers and Geosciences*, 79, 69-81.