

سورة الاحقاف



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری اکتشاف مواد معدنی

مدل سازی پتانسیل معدنی با استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره فازی و روش دیمتل

نگارنده: فردین احمدی

اساتید راهنما

دکتر حمید آقاجانی

دکتر میثم عابدی

اسفند ۱۴۰۰

تقدیم بہ

ہمسر عزیزم با قلبی آکنده از عشق؛ کہ دلسوزانہ یاور و ہمراہ من است۔

پدر بزرگو ار م؛ اسوہ مردانگی و پشیمان ہمیشگی۔

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری خداوند و راهنمایی اساتید محترم موفق به سرانجام رساندن این رساله شده‌ام وظیفه خود دانسته که نهایت سپاسگزاری را از تمامی عزیزانی که در این راه به بنده کمک کرده‌اند به عمل آورم:

در ابتدا از اساتید بزرگوار جناب آقایان دکتر حمید آقاجانی و دکتر میثم عابدی که راهنمایی این پایان‌نامه را به عهده داشته‌اند کمال تشکر را دارم.

از جناب آقایان دکتر نائر رحمانی و مهندس حمید رستمی‌پور که در برداشتهای صحرایی به بنده کمک نمودند صمیمانه تشکر می‌کنم.

از کلیه دوستان و همراهان عزیزی که به نحوی در پیشبرد این تحقیق مرا یاری کرده‌اند، نهایت سپاس را دارم.

و در پایان نهایت قدردانی و سپاسگزاری را برای همسر مهربانم دارم که حقیقتاً با صبر و شکیبایی تا اتمام این تحقیق در کنار بنده حضور داشتند و به واسطه انجام این تحقیق، ساعت‌های بسیاری از ایشان دریغ شد.

تهدنامه

اینجانب فردین احمدی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی پتانسیل معدنی با استفاده از روش های چندمعیاره فازی و روش دیمتل تحت راهنمایی جناب آقایان دکتر حمید آقاجانی و دکتر میثم عابدی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در مراحل پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی، شناسایی مناطقی که باید در مطالعات تفصیلی‌تر مورد توجه قرار گیرند، از طریق مدل‌سازی پتانسیل معدنی انجام می‌شود. هدف نهایی این پژوهش، تهیه نقشه پتانسیل معدنی کانی‌زایی سنگ‌آهن محدوده برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی می‌باشد. برگه اسفوردی در زون ساختاری ایران مرکزی و ناحیه بافق-پشت بادام واقع است. کانی‌سازی‌های آهن-آپاتیت و سرب و روی از جمله مواردی است که در نواحی مختلف این منطقه مشاهده شده است. در این تحقیق، استفاده همزمان از روش‌های نمودار پیش‌بینی-مساحت (P-A)، دیمتل، فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP)، ویکور و تاپسیس در فضای فازی، منجر به دسترسی به نتایج قابل اعتمادی شده است. از روش‌های نمودار P-A و ANP فازی برای وزن‌دهی و تلفیق لایه‌های اکتشافی استفاده شد. در روش نمودار P-A، به کمک روش فرکتالی مقدار-مساحت و ۲۲ اندیس معدنی سنگ‌آهن در محدوده مورد مطالعه، وزن این لایه‌ها محاسبه شد. لایه سنگ میزبان با نقطه عطف ۷۸ درصد، بیشترین وزن را به خود اختصاص داد. با استفاده از روش دیمتل فازی روابط علت و معلولی معیارها مورد ارزیابی قرار گرفت. هشت لایه اکتشافی از چهار نوع مختلف داده استخراج و مورد استفاده گرفت. بدین صورت که از داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، لایه‌های Fe_2O_3 و TiO_2 ، از ژئوفیزیک هوابرد، لایه توده مغناطیسی، از زمین‌شناسی لایه سنگ میزبان و از تصاویر ماهواره‌ای لایه‌های دگرسانی فیلیک، زون گوسان، اکسیدهای آهن و خطواره‌ها تهیه شد. استفاده از سه نوع تصویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، لندست-۸ و استر باعث حاصل شدن نتایج قابل اعتماد و قدرتمندی شده است. در این بین سنگ میزبان به عنوان تأثیرگذارترین معیار شناسایی شد. نتایج حاصل از روش دیمتل به همراه روش تحلیل شبکه‌ای فازی ادغام و مدل پتانسیل معدنی تهیه شد. در نقشه حاصل شده چندین ناحیه به عنوان مناطق با پتانسیل بالای کانی‌زایی معرفی شدند. در بین این نواحی، ۵ ناحیه انتخاب و جهت اولویت-بندی آنها از روش‌های ویکور فازی و تاپسیس فازی استفاده شد. در بازدیدهای میدانی نواحی با پتانسیل بالای کانی‌زایی مورد پی‌جویی اکتشافی قرار گرفت. نتایج آنالیز نمونه‌های هر ناحیه تا حد

بسیار زیادی نتایج حاصل از روش‌های به‌کارگرفته‌شده را تأیید می‌کند. بخش‌هایی از جنوب شرق محدوده اسفوردی به‌عنوان نواحی جدید با پتانسیل بالای کانی‌زایی معرفی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که واحدهای مرتبط با کانی‌سازی در محدوده، عمدتاً ریولیت، ریوداسیت و دولومیت‌های آهکی هستند.

واژگان کلیدی: پتانسیل معدنی، دیمتل، ویکور، نمودار پیش‌بینی-مساحت، سنتینل-۲، اسفوردی

لیست مقالات مستخرج از رساله

مقالات ISI و علمی-پژوهشی:

1- Geochemical potential mapping of iron-oxide targets by Prediction-Area plot and Concentration-Number fractal model in Esfordi, Iran. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 55(2), 171-181.

۲- تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲، لندست-۸ و استر برای کانسار آهن در برگه 1:100000 اسفوردی. نشریه مهندسی منابع معدنی، نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۱-۲۳.

۳- تلفیق داده‌های مغناطیس‌سنجی هوابرد و تصاویر ماهواره‌ای جهت شناسایی زون‌های مستعد کانی-سازی آهن به کمک نمودارهای پیش‌بینی-مساحت در محدوده اسفوردی. فصلنامه زمین‌شناسی/ایران، سال ۱۶، شماره ۶۲، تابستان ۱۴۰۱، ص ۹۳-۱۱۰.

4- Mineral Potential Modeling of Iron Mineralization, a Combination of Fuzzy DEMATEL, Fuzzy ANP, and Fuzzy VIKOR Methods: Esfordi district, Iran. *International Journal of Mining Science and Technology*, Submitted Date: Sep 27, 2021.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- بیان مسئله.....	۲
۳-۱- ضرورت تحقیق.....	۳
۴-۱- سوالات تحقیق.....	۶
۵-۱- پیشینه تحقیق.....	۷
۶-۱- روند انجام تحقیق.....	۱۴
۷-۱- معرفی منطقه.....	۱۶
۱-۷-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه.....	۱۶
۲-۷-۱- راه‌های ارتباطی منطقه.....	۱۶

فصل دوم: مبانی نظری تحقیق

۱-۲- مقدمه.....	۲۰
۲-۲- تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM).....	۲۳
۳-۲- تئوری منطق فازی.....	۲۴
۱-۳-۲- سیر تکاملی نظریه فازی.....	۲۵
۲-۳-۲- اعداد فازی.....	۲۶
۳-۳-۲- اعداد فازی مثلثی.....	۲۶
۴-۳-۲- تجمیع دیدگاه و تفاوت آن با میانگین فازی.....	۲۸
۵-۳-۲- فازی زدایی.....	۲۹
۴-۲- کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه.....	۳۰
۵-۲- روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی (FTOPSIS).....	۳۰
۱-۵-۲- مراحل روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی.....	۳۱
۶-۲- روش دیمتل.....	۳۲
۷-۲- روش دیمتل فازی.....	۳۵
۱-۷-۲- الگوریتم روش دیمتل فازی.....	۳۶
۸-۲- روش ویکور.....	۳۸
۱-۸-۲- الگوریتم روش ویکور.....	۳۸
۹-۲- روش ویکور فازی.....	۴۱
۱-۹-۲- الگوریتم روش ویکور فازی.....	۴۲

۴۶	۱۰-۲- روش ANP فازی
۴۸	۱۱-۲- نمودار پیش‌بینی-مساحت

فصل سوم: زمین‌شناسی و داده‌های تحقیق

۵۲	۱-۳- زمین‌شناسی محدوده
۵۷	۲-۳- آماده‌سازی لایه‌ها
۵۷	۳-۳- واحدهای زمین‌شناسی
۶۰	۴-۳- دورسنجی
۶۱	۱-۴-۳- پیش‌پردازش تصاویر
۶۱	۲-۴-۳- ماسک پوشش گیاهی
۶۲	۳-۴-۳- پردازش تصاویر
۶۴	۴-۴-۳- تهیه لایه‌های دورسنجی
۶۹	۵-۳- تهیه لایه‌های ژئوشیمیایی
۷۵	۶-۳- تهیه لایه‌های ژئوفیزیکی
۸۰	۷-۳- جمع‌بندی

فصل چهارم: مدل‌سازی پتانسیل معدنی

۸۲	۱-۴- مقدمه
۸۲	۲-۴- تعیین اوزان با روش نمودار پیش‌بینی-مساحت
۹۳	۳-۴- پیاده‌سازی روش دیمتل فازی
۹۹	۴-۴- تعیین اوزان با روش ANP فازی
۱۰۱	۵-۴- اولویت‌بندی اکتشافی با روش ویکور فازی
۱۰۴	۶-۴- اولویت‌بندی اکتشافی با روش تاپسیس فازی
۱۰۷	۷-۴- جمع‌بندی

فصل پنجم: اعتبارسنجی

۱۱۰	۱-۵- مقدمه
۱۱۰	۲-۵- بازدید میدانی
۱۲۰	۳-۵- آنالیز نمونه‌ها

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۲۴	۱-۶- نتیجه‌گیری
۱۲۶	۲-۶- پیشنهادات

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) روند کلی انجام تحقیق	۱۵
شکل (۲-۱) الف- نقشه راه‌های ارتباطی محدوده. ب- تصویر گوگل ارث از محدوده. ج- مدل سه‌بعدی محدوده	۱۷
شکل (۱-۲) نمایش اعداد فازی مثلثی در فضای هندسی	۲۷
شکل (۲-۲) نمایش اعداد فازی متقارن و نامتقارن	۲۸
شکل (۱-۳) نقشه واحدهای زمین‌شناسی در محدوده مطالعه	۵۶
شکل (۲-۳) نقشه واحدهای زمین‌شناسی محدوده: الف- کلاس‌بندی شده. ب- فازی شده	۶۰
شکل (۳-۳) ترکیبات رنگی کاذب از محدوده	۶۵
شکل (۴-۳) بارزسازی مناطق اکسید آهن	۶۵
شکل (۵-۳) الف: بارزسازی زون گوسان در محدوده در تصویر سنتینل ۲. ب- ترسیم گسل‌های محدوده و نمایش محل اندیس‌های معدنی	۶۶
شکل (۶-۳) بارزسازی دگرسانی‌های مختلف همراه با اکسید آهن	۶۹
شکل (۷-۳) نمودار خوشه‌ای همبستگی عناصر	۷۲
شکل (۸-۳) نقاط نمونه‌برداری و رسوبات آبراهه‌ای محدوده مطالعه	۷۲
شکل (۹-۳) الف- نمودار جعبه‌ای مقادیر Fe_2O_3 . ب- توزیع فراوانی Fe_2O_3 . ج- نمودار جعبه‌ای مقادیر TiO_2 . د- توزیع فراوانی TiO_2 . و- نمودار جعبه‌ای مقادیر V . ه- توزیع فراوانی V	۷۳
شکل (۱۰-۳) لایه‌های ژئوفیزیکی	۷۹
شکل (۱-۴) نقشه شاهد سنگ میزبان کانی‌زایی	۸۶
شکل (۲-۴) نقشه شاهد دگرسانی آرژلیک	۸۶
شکل (۳-۴) نقشه شاهد دگرسانی فلیک	۸۷
شکل (۴-۴) نقشه شاهد دگرسانی پروپلیتیک	۸۷
شکل (۵-۴) نقشه شاهد اکسید آهن	۸۸
شکل (۶-۴) نقشه شاهد زون گوسان	۸۸
شکل (۷-۴) نقشه شاهد خطواره‌ها	۸۹
شکل (۸-۴) نقشه شاهد آنومالی Fe_2O_3	۸۹
شکل (۹-۴) نقشه شاهد آنومالی TiO_2	۹۰
شکل (۱۰-۴) نقشه شاهد آنومالی وانادیوم	۹۰
شکل (۱۱-۴) نقشه شاهد توده مغناطیسی	۹۱
شکل (۱۲-۴) نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از روش نمودار پیش‌بینی-مساحت	۹۲
شکل (۱۳-۴) الگوی روابط علت و معلولی بین معیارها	۹۸

- شکل (۴-۱۴) تصویر گرافیکی حاصل از خروجی روش Fuzzy ANP ۱۰۰
- شکل (۴-۱۵) نقشه پتانسیل کانی‌زایی آهن در محدوده اسفوردی با استفاده از روش دیمتل و ANP فازری ۱۰۰
- شکل (۵-۱) معادن در محدوده مطالعه ۱۱۱
- شکل (۵-۲) واحدهای آهکی در محدوده ۱۱۱
- شکل (۵-۳) واحدهای کربناتی در محدوده ۱۱۱
- شکل (۵-۴) گسل خوردگی شدید در بخش جنوبی محدوده مطالعه ۱۱۲
- شکل (۵-۵) حضور واحدهای نفوذی در سنگ میزبان آهکی ۱۱۲
- شکل (۵-۶) حضور واحدهای نفوذی مافیک در سنگ‌های آهکی محدوده ۱۱۳
- شکل (۵-۷) توده های نفوذی در توالی آهک و دولومیت ۱۱۳
- شکل (۵-۸) رخنمون گرانیتهی در جنوب شرق محدوده ۱۱۴
- شکل (۵-۹) دگرسانی سیلیسی در توالی مارن و آهک ۱۱۴
- شکل (۵-۱۰) اسکارنی شدن آهک در محدوده مطالعه ۱۱۵
- شکل (۵-۱۱) وجود واریزه‌های مگنتیتی در سنگ میزبان کربناتی ۱۱۵
- شکل (۵-۱۲) حفر ترانشه بر روی کوه حاوی مگنتیت در جنوب محدوده ۱۱۶
- شکل (۵-۱۳) الف- حفر ترانشه در بخش مرکزی محدوده. ب- شیل سیاه دارای پیریت هوازده و تبدیل آن به لیمونیت و گوگرد. ج- نمونه ماکروسکوپی برداشت شده از این ترانشه. ۱۱۷
- شکل (۵-۱۴) حفر تونل اکتشافی در زون حاوی گوسان آهکی ۱۱۸
- شکل (۵-۱۵) رخنمون هماتیتی در نواحی مرکزی محدوده مطالعه ۱۱۹
- شکل (۵-۱۶) واریزه سنگ آهن در رسوبات جنوب شرق محدوده ۱۱۹
- شکل (۵-۱۷) نمونه‌های ماکروسکوپی از نواحی پنج‌گانه ۱۲۰

فهرست جداول

جدول (۱-۲)	تاریخچه مدل سازی پتانسیل معدنی با روش های مختلف	۲۱
جدول (۲-۲)	سیر تکاملی نظریه فازی	۲۵
جدول (۳-۲)	طیف مورد استفاده در روش دیمتل	۳۳
جدول (۴-۲)	طیف معادل فازی در روش دیمتل	۳۶
جدول (۱-۳)	پتانسیل واحدهای زمین شناسی محدوده در میزبانی انواع کانی زایی	۵۸
جدول (۲-۳)	نتایج آنالیز مؤلفه های اصلی انتخابی ترکیبی در تصویر استر	۶۸
جدول (۳-۳)	پارامترهای آماری عناصر و اکسیدها	۷۱
جدول (۴-۳)	ضرایب همبستگی بین عناصر با اهمیت بر اساس روش پیرسون	۷۴
جدول (۵-۳)	نتایج آنالیز فاکتوری	۷۵
جدول (۱-۴)	مشخصات اندیس های معدنی در محدوده مطالعه	۸۵
جدول (۲-۴)	لایه های شاهد و وزن تخصیص یافته بر اساس نمودار پیش بینی-مساحت	۹۲
جدول (۳-۴)	جدول طراحی شده در پرسشنامه دیمتل	۹۳
جدول (۴-۴)	طیف فازی مورد استفاده در روش دیمتل فازی	۹۳
جدول (۵-۴)	ماتریس ارتباط مستقیم بر اساس نظرات کارشناسی	۹۴
جدول (۶-۴)	ماتریس ارتباط کامل فازی در روش دیمتل	۹۵
جدول (۷-۴)	مقادیر قطعی معیارها در روش دیمتل فازی	۹۶
جدول (۸-۴)	مقادیر قطعی معیارها با حذف مقادیر کمتر از حد آستانه	۹۶
جدول (۹-۴)	خروجی نهایی روش دیمتل فازی	۹۸
جدول (۱۰-۴)	اوزان بدست آمده از روش Fuzzy ANP	۱۰۰
جدول (۱۱-۴)	ماتریس تصمیم در روش ویکور فازی	۱۰۲
جدول (۱۲-۴)	مقادیر ایده آل مثبت و منفی فازی در روش ویکور فازی	۱۰۳
جدول (۱۳-۴)	مقادیر فازی R, S, Q	۱۰۳
جدول (۱۴-۴)	مقادیر قطعی R, S, Q و رتبه این پارامترها	۱۰۳
جدول (۱۵-۴)	طیف فازی مورد استفاده در روش تاپسیس فازی	۱۰۴
جدول (۱۶-۴)	ماتریس تصمیم به دست آمده در روش تاپسیس فازی	۱۰۴
جدول (۱۷-۴)	ماتریس بی مقیاس شده در روش تاپسیس فازی	۱۰۵
جدول (۱۸-۴)	مقادیر بی مقیاس شده وزن دار در روش تاپسیس فازی	۱۰۵
جدول (۱۹-۴)	راه حل ایده آل مثبت و منفی	۱۰۶
جدول (۲۰-۴)	مقادیر فاصله از ایده آل های مثبت و منفی	۱۰۶
جدول (۲۱-۴)	مقادیر شاخص شباهت و رتبه بندی گزینه ها در روش تاپسیس فازی	۱۰۶

جدول (۱-۵) نتایج آنالیز نمونه‌ها به روش XRF	۱۲۱
جدول (۲-۵) نتایج آنالیز نمونه‌ها به روش ICP-MS	۱۲۱

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

مدل‌سازی ذخایر معدنی یکی از مهمترین امور اکتشافی در اکتشاف مواد معدنی جهت ارزیابی چگونگی توسعه کانسار، محاسبه حجم، ذخیره و ... می‌باشد. علاوه بر این بر اساس مدل‌سازی می‌توان نواحی امیدبخش را معرفی نمود و با توجه به آن شبکه حفاری مناسبی را پیشنهاد داده و طراحی نمود. تعیین و شناسایی نواحی با پتانسیل یکی از گام‌های مهم در کاوش منابع معدنی است. این شناسایی با استفاده از مدل‌سازی پتانسیل معدنی (MPM)^۱ به دست می‌آید.

در مراحل پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی، شناسایی مناطقی که باید در مطالعات تفصیلی‌تر موردتوجه قرار گیرند، از طریق مدل‌سازی پتانسیل معدنی انجام می‌شود. هدف از مدل‌سازی پتانسیل معدنی شناسایی نواحی امیدبخش و مناطق پرتانسیل جهت کاهش سطح مطالعاتی در مراحل تفصیلی‌تر و کوچک‌تر نمودن محدوده جهت کاهش هزینه و زمان عملیات اکتشافی می‌باشد [۱].

اکتشافات معدن و مواد معدنی با ارزش چهار مرحله را شامل می‌شود: انتخاب ناحیه مطالعاتی، تعیین و شناسایی هدف، بررسی و ارزیابی منبع معدنی و تخمین ذخیره. در عمل انتخاب ناحیه اکتشاف، تعیین یک منطقه امیدبخش (عموماً بزرگ) و مناطقی است که در آن حضور ذخایر معدنی با احتمال زیاد مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این انتخاب مبتنی بر داشتن دانش بالا از ذخیره و وضعیت آن بوده که اغلب در مکان‌هایی صورت می‌پذیرد که فرآیندهای مختلف زمین‌شناسی و ساختمانی برای ایجاد کانی‌زایی مطلوب هستند [۲].

۲-۱- بیان مسئله

مدل‌سازی و پتانسیل‌یابی معدنی، یک پروسه جهت تفکیک نواحی مساعد با قابلیت کانی‌زایی از سایر مناطق دیگر در یک منطقه است. نواحی حاضر در نقشه پتانسیل معدنی بر حسب قابلیت کانی‌زایی و

¹ Mineral Potential Mapping

براساس معیارهای ارزیابی شده، به ترتیب اهمیت اولویت‌بندی خواهند شد. حجم عظیم داده‌های گردآوری شده از بررسی‌های اکتشافی تا زمانی که به‌درستی سازمان‌دهی نشوند، نتایج مفید و قابل اطمینانی را نشان نمی‌دهند.

دلیل نیاز به تئوری‌های جدید در مدل‌سازی پتانسیل معدنی آن است که محیط زمین، فضایی ناهمگن و ناشناخته است و هرچه در اندازه‌گیری پارامترهای مختلف آن سعی و تلاش گردد، باز هم متغیرهای مؤثر دیگری هستند که باید شناسایی و اندازه‌گیری شوند. در نتیجه نه تنها تعیین مدل مناسب جهت مدل‌سازی محدوده‌های اکتشافی مختلف بسیار مشکل است، بلکه شناسایی اصول تئوریک متناسب با خصوصیات مختلف پدیده‌های زمین‌شناسی و از جمله کانی‌زایی‌های مختلف بسیار دشوار می‌نماید. به همین دلیل است که تا کنون ایرادات تئوریک زیادی بر روش‌های موجود وارد شده و بحث‌های فراوانی بر روی استفاده یا عدم استفاده از تئوری‌های مختلف از جمله آمار، زمین آمار، تئوری احتمال، مدل‌های ریاضی و هوش مصنوعی بین متخصصان علوم اکتشافی در گرفته است.

۳-۱- ضرورت تحقیق

با توجه به وسعت مناطق بالقوه ذخایر معدنی، یک رویکرد جامع برای شناسایی و تبدیل شاخص‌های معدنی به معادن و کشف مناطق جدید به نظر ضروری می‌رسد. داشتن تنوع و وجود مدل‌های مختلف از ذخایر معدنی، وجود داده‌ها، منابع معدنی و نیز وجود نظرات و سلايق تخصصی مختلف، روند آماده‌سازی نقشه‌های پتانسیل معدنی را دشوار نموده است. در طی اکتشافات ذخایر معدنی، لازم است که به مدل‌سازی عدم قطعیت داده‌های اکتشافی، کاربرد تخصص و انعطاف‌پذیری روش‌ها برای انواع مختلف ذخایر معدنی در قالب سیستم‌های یکپارچه توجه شود. این امر نیاز به توجه به منابع بالقوه معدنی در کاوش‌های معدنی را می‌طلبد. نقشه‌برداری پتانسیل معدنی یک مساله تصمیم‌گیری فضایی چند معیاری است و متخصصان معدن بسته به مقیاس این مطالعه از معیارهای متفاوتی برای این منظور استفاده می‌کنند.

شناسایی و اکتشاف صحیح منابع معدنی، سبب پیشگیری از هدر رفتن منابع مالی و انسانی می‌شود. این مسئله ضرورت تهیه نقشه پتانسیل معدنی در اکتشاف ذخایر معدنی را آشکار می‌سازد. تهیه نقشه پتانسیل معدنی از مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی^۱ است و کارشناسان اکتشاف معدن بسته به مقیاس مطالعه از معیارهای مختلفی برای این منظور استفاده می‌کنند [۱].

از مدل‌سازی پتانسیل معدنی برای تلفیق و ترکیب نتایج روش‌های اکتشافی مختلف به‌منظور تولید نواحی اهداف اکتشاف و تعیین نواحی امیدبخش استفاده می‌شود. مدل‌سازی فرآیندی است که منجر به ساده‌سازی یک واقعیت شده به‌گونه‌ای که جزئیات مهم در آن در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که تمام آنومالی‌های به‌دست‌آمده حاصل از هر یک از روش‌های اکتشافی همراه و یا معرف کانی‌سازی نیستند، بنابراین اگر به جای بررسی جداگانه هر روش اکتشافی، روش‌های مختلف در ارتباط با یکدیگر مورد بررسی قرار گیرند و خصوصیات روش‌های مختلف در یک چارچوب وابسته به هم تجزیه و تحلیل شوند، انتخاب بهترین نواحی برای تمرکز عملیات اکتشافی بعدی با دقت بیشتر و ریسک کمتری همراه خواهد بود.

باتوجه به وسعت ناحیه اولیه اکتشافی، همیشه فعالیت‌های اکتشافی پرهزینه و زمان‌بر است تا عملیات اکتشافی با چگالی بالا در مناطق بزرگ انجام شود. لذا یک روش مناسب باید برای کاهش هزینه و زمان و افزایش دقت اکتشاف مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، اکتشاف در یک منطقه بزرگ و استفاده از روش‌های با سرعت بالا و با هزینه کم برای هر بخش در مقیاس کوچک در نظر گرفته می‌شود و پس از بدست آوردن نتایج در هر مرحله و تعیین مناطق امیدبخش، عملیات در گام‌های بعدی و با جزییات بیشتر، بر روی مناطق امیدوار کننده به‌دست‌آمده از مراحل قبلی صورت می‌پذیرد. نکته مهم این است که چگونه بهترین مناطق امیدبخش را انتخاب نموده و یک روش باید در نظر گرفته شود که می‌توان از آن برای کاهش مساحت مورد مطالعه استفاده کرد و نواحی

¹ Spatial Multi-Criteria Decision Making

امیدبخش را با یک روش منطقی معرفی کرد. در مرحله اکتشافات مقدماتی، هرکدام از روش‌های مختلف اکتشافی مانند مطالعات زمین‌شناسی، سنجش از دور، ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی و غیره می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد یا نتایج چندین روش می‌تواند با هم ترکیب شوند. با توجه به وجود عدم قطعیت در حین عملیات اکتشاف، یکی از مهم‌ترین تصمیمات آن است که چگونه مناطق هدف را انتخاب نمود.

کاربرد قابل توجه مواد معدنی در دنیای امروز، اهمیت استفاده از روش‌های مقرون به صرفه به جهت زمان و هزینه را جهت پیجویی و اکتشاف مواد معدنی دو چندان کرده است. روش سنجش از دور یکی از پرکاربردترین و جدیدترین روش‌هایی است که جهت پردازش تصاویر ماهواره‌ای در بخش اکتشاف مورد توجه قرار گرفته است. این روش به عنوان یک لایه اطلاعاتی همراه دیگر لایه‌های اطلاعاتی از جمله زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و غیره، اطلاعات با ارزشی را در اختیار قرار می‌دهد. استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS¹) متخصصان این حوزه را در زمینه طراحی شبکه‌های برداشت، مکان‌یابی بهتر جهت حفر چاه، گمانه، تونل و چاه اکتشافی، تهیه مقاطع نازک و غیره یاری کرده است [۳].

در صورت دسترسی به اطلاعات کامل زمین‌شناسی و معدنی یک محدوده در مراحل مختلف اکتشاف، امکان تحلیل بهتر و دستیابی به بهترین مناطق جهت اکتشاف عناصر مورد نظر و نیز جلوگیری از اتلاف زمان و هزینه فراهم خواهد شد. روند انجام این عملیات بدین صورت است که در ابتدا کلیه اطلاعات مؤثر شامل زمین‌شناسی، زمین ریخت‌شناسی، تکتونیکی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی، دورسنجی، زمین‌شناسی اقتصادی، شامل معادن فعال و غیرفعال و اندیس‌های معدنی، دگرسانی‌ها و وضعیت توده‌های نفوذی رقومی شده و نقشه شاهد هر کدام تهیه می‌گردد. پس از تحلیل و پردازش، نقشه‌های مربوط به نواحی امیدبخش برای عناصر فلزی و غیر فلزی تهیه می‌شود. بر روی مناطق

¹ Geographic Information System

انتخاب شده در مقیاس محلی بررسی مجدد صورت می‌گیرد که نتیجه آن معرفی امیدبخش‌ترین مناطق با مساحت‌های کمتر و بهینه‌تر از مراحل قبل می‌باشد [۴].

در صورتی که یک منطقه به اندازه کافی اندیس‌های شناخته شده داشته باشد، از مدل‌سازی داده محور پتانسیل معدنی برای تعیین مناطق هدف در اکتشافات بعدی استفاده می‌شود. به این صورت که ابتدا همه خصوصیات مرتبط با کانی‌سازی مورد نظر از اندیس‌ها جمع‌آوری شده و بعد از کمی کردن این خصوصیات با شواهد و الگوهای فضایی، نقاطی با خصوصیات مشابه جستجو و به عنوان نواحی امیدبخش و مناسب جهت پی‌جویی معرفی و بررسی می‌شود. در صورتی که در منطقه مورد مطالعه تعداد اندیس‌های شناخته شده کم بوده و یا هیچ اندیس شناخته شده‌ای وجود نداشته باشد، از روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده می‌شود. [۵، ۶].

عموماً در اکتشافات اولیه و شناسایی هدف، برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی می‌توان از مدل‌سازی داده پایه با استفاده از اندیس‌ها و ذخایر معدنی شناخته شده موجود در منطقه استفاده کرد. روش دانش پایه بر مبنای تجربه و ارتباط بین اندیس‌ها و ذخایر مورد هدف با داده‌های مختلف ژئوشیمی، ژئوفیزیک، زمین‌شناسی، دورسنجی و غیره می‌باشد. این روش در همه مناطق، به خصوص مناطقی که هیچ کار اکتشافی در آنها صورت نگرفته باشد؛ کارآیی دارد. از ترکیب این دو روش مدل‌سازی داده محور^۱ و دانش‌محور^۲ می‌توان برای تلفیق نتایج روش‌های مختلف اکتشافی و همچنین به منظور تخصیص وزن به شواهد و الگوهای پیشگوی مختلف از نقشه‌های شاهد مختلف، استفاده نمود [۷].

۱-۴- سوالات تحقیق

سوال اصلی تحقیق بدین صورت بیان می‌شود که نتایج مدل‌سازی پتانسیل معدنی به چه میزان دارای اعتبار و قابل اعتماد است؟ علاوه بر این، در این تحقیق بایستی به سوالات مهم دیگری نیز پاسخ داده

^۱ Data-Driven

^۲ Knowledge-Driven

شود:

- ۱- استفاده از روش دیمتل در تهیه نقشه پتانسیل معدنی به چه صورت خواهد بود؟ نقش آن چیست؟
- ۲- خروجی‌های این تحقیق چگونه و تا چه اندازه‌ای در اکتشاف نواحی مستعد کانی‌زایی آهن کمک کننده خواهند بود؟
- ۳- کدامیک از روش‌های مورد استفاده در تهیه نقشه پتانسیل معدنی برای محدوده‌های مشابه کارآمدتر است؟
- ۴- مزیت روش‌های مورد استفاده در این تحقیق نسبت به سایر روش‌ها در چیست؟

۱-۵- پیشینه تحقیق

نوری در سال ۱۳۹۰ پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود را با عنوان "ارزیابی قابلیت مدل Fuzzy Topsis برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی طلا با استفاده از GIS در زون آلتراسیون طارم" به انجام رسانده است. در این تحقیق توانایی مدل فازی تاپسیس در تعیین نواحی امیدبخش معدنی منطقه طارم در زنجان مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین و نواحی امیدبخش معرفی‌شده توسط مدل AHP^2 و OWA^1 و همچنین اندیس‌های موجود در منطقه استفاده شده است. شاخص‌های آلتراسیون، ژئوشیمی (فلزات سنگین)، ژئوفیزیک و زمین‌شناسی با تکیه بر منابع اطلاعاتی متفاوت برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی بر اساس نظر کارشناسی محاسبه شده و به‌عنوان ورودی به مدل معرفی‌شده‌اند. آلتراسیون‌های منطقه از تصویر سنجنده استر اخذ شده است. برای تعیین اهمیت شاخص‌ها از نظرات ۱۰ کارشناس استفاده شده است سپس مدل بر روی اطلاعات موجود اجرا شده و نتایج به‌دست‌آمده مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده در مورد مقایسه مدل‌های فازی تاپسیس و $OWA AHP$ علیرغم شباهت‌های موجود، حاکی از تفاوت

¹ Ordered Weighted Averaging

² Analytic Hierarchy Process

قابل توجه دو روش است. نواحی امیدبخش به دلیل مفهوم فازی به کار برده شده در مدل فازی تاپسیس گسترش بیشتری دارد و ارزیابی‌های صورت گرفته کارایی بالای تاپسیس فازی را نشان می‌دهد [۸].

علایی مقدم و همکاران در سال ۱۳۹۱، مدل‌سازی فرآیند تهیه پتانسیل معدنی را با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی در کانسار مس چاه فیروزه انجام داده‌اند. در این تحقیق ابتدا نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از عملگرهای فازی تهیه شده است. عملیاتی که بر روی لایه‌های اطلاعاتی صورت گرفته است شامل رده‌بندی دوباره، ایجاد بافر، تولید نقشه مجاورت و تبدیل قالب نقشه‌ها به قالب رستر نقشه‌های فاکتور می‌باشد. پس از تهیه نقشه‌های فاکتور و وزن‌دهی به آن‌ها، به تلفیق این نقشه‌ها در قالب شبکه استنتاجی پرداخته شده است. در شبکه استنتاجی مورد استفاده از مدل همپوشانی شاخص و عملگرهای جمع جبری و گامای فازی، برای تلفیق نقشه‌های فاکتور استفاده شده است. در بیشتر موارد در فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی، نقشه‌های فاکتور همدیگر را تقویت می‌کنند که این امر با ماهیت عملگرهای فازی جمع و گاما انطباق دارد. در ادامه سه نقشه فاکتور زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ژئوفیزیک به کمک عملگرهای فازی و شاخص‌های همپوشانی تهیه شده‌اند. بدین ترتیب که ابتدا نقشه‌ها فازی سازی شده و در ادامه برای استنتاج فازی یک پایگاه ((اگر-آنگاه)) فازی برای نقشه‌های فاکتور ایجاد شده است. سپس قطعی سازی داده‌ها صورت گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده و بر اساس نقشه پتانسیل معدنی در این نقشه، مناطق پتانسیل دار از دید وجود کانی سازی مس پورفیری در نواحی مرکزی منطقه و با گسترش شمالی - جنوبی تعیین شده است. به منظور ارزیابی نقشه پتانسیل معدنی، از انطباق مقادیر پیکسل‌های نقشه یادشده در موقعیت مکانی گمانه‌های اکتشافی با نتایج حفاری آن گمانه‌ها استفاده شده است [۹].

کیان پوریان و همکاران در سال ۱۳۹۱ در مقاله‌ای به تهیه نقشه پتانسیل معدنی برای کانسار مس در برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگنبد کرمان با استفاده از مدل ترکیبی نروفازی پرداخته‌اند. لایه‌های اطلاعاتی

شامل نقشه‌های فاکتور زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک، ساختارهای خطی، دگرسانی و ۲۲ اندیس معدنی بوده‌اند. پس از تهیه لایه‌ها در محیط GIS با اندازه سلول ۱۰۰ متر، اطلاعات حاصل از آن‌ها برای آموزش شبکه آماده‌سازی شده‌اند. ابتدا شبکه با استفاده از اندیس‌های معدنی آموزش داده شده، با این حال یکی از مشکلات استفاده از این روش تعداد کم داده‌های آموزشی بوده است که برای حل این مشکل به هر یک از اندیس‌ها بیش از یک سلول نسبت داده شده است، این کار با تعیین فواصل ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر برای اندیس‌های معدنی، انجام گرفته است. سپس شبکه با استفاده از سری‌های متفاوت داده‌ها آموزش داده شده و در نهایت به تهیه نقشه پتانسیل معدنی اقدام نموده‌اند. نتایج حاصل نشان داده است که بهترین جواب برای شعاع تأثیرهای ۵۰۰ متر برای اندیس‌های معدنی به دست می‌آید که در آن ۸۰٪ از اندیس‌ها در محدوده با پتانسیل بالا قرار می‌گیرند [۱۰].

پازند و همکاران در سال ۲۰۱۳ اقدام به تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس پورفیری در برکه ۱:۱۰۰،۰۰۰ سیاه رود آذربایجان شرقی نمودند. محققین در این مقاله با استفاده از فازی دانش مبنا (دانش کارشناسی) و داده مبنا، اقدام به تهیه نقشه پتانسیل معدنی مس پورفیری نموده‌اند. لایه‌های اطلاعاتی شاهد در این مطالعه شامل داده‌های ژئوشیمی رسوب آبراه‌ای مربوط به مس (۱۲۱۵ نمونه)، زمین‌شناسی (لیتولوژی)، داده‌های ساختاری (گسل‌ها)، زون‌های آلتراسیون (آرژیلیک، فیلیک و اکسید آهن) و موقعیت ذخایر معدنی مس پورفیری در محدوده مطالعاتی بوده است. لایه‌های شاهد با توجه به مدل مفهومی ذخایر مس پورفیری و نیز رخدادهای معدنی موجود و با استفاده از عملگرهای فازی و بر اساس شبکه استنتاجی ارائه‌شده با یکدیگر تلفیق شده‌اند. هر دو نقشه پتانسیل تهیه شده در این محدوده، رخدادهای پورفیری موجود را به‌عنوان مناطق آنومال شناسایی و مشخص نموده‌اند ولی کارایی روش داده مبنا بیشتر از روش دانش مبنا بوده است. در این مطالعه تعداد ذخایر پورفیری شناخته‌شده مورد استفاده، ۱۰ ذخیره بوده است که به نظر می‌رسد برای استفاده از روش‌های داده مبنا نیاز به تعداد داده‌های بیشتری باشد. با توجه به اینکه داده‌های مورد استفاده در این تحقیق، تنها

داده‌های سطحی بوده‌اند لذا هردو مدل در شناسایی اندیس بار ملک که توده نفوذی و آلتراسیون‌های مربوط به آن در عمق است و در سطح قابل مشاهده نیست، ناموفق بوده‌اند [۱۱].

قدیری صوفی و یوسفی در سال ۱۳۹۴ مقاله‌ای را تحت عنوان "ترکیب روش‌های فازی داده محور و دانش‌محور در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به‌منظور تولید نواحی اهداف اکتشاف" انجام داده‌اند. در این مطالعه از دو روش داده محور و دانش‌محور به‌طور همزمان در تولید مدل پتانسیل معدنی استفاده شده است. نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی و چگالی گسل‌ها با استفاده از روش داده محور، ولی بدون استفاده از اندیس‌های شناخته‌شده، فازی شده به‌طوری‌که برای تهیه نقشه شاهد فازی ژئوشیمیایی، ابتدا تحلیل فاکتوری مرحله‌ای روی نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای انجام شده به منظور وزن‌دهی به داده‌های ژئوشیمیایی، از رده‌بندی داده‌ها (رده‌بندی و تقسیم مقادیر ژئوشیمیایی به رده‌های مختلف) و سپس تخصیص وزن واحد به همه اعداد یک دامنه، استفاده نشده است؛ بلکه هر نمونه ژئوشیمیایی بر پایه مقادیر غلظت عنصر مورد نظر یا بر پایه مقادیر شاخص چندعنصری برای نمونه مقادیر امتیازات فاکتوری، به‌طور مستقیم وزن‌دار شده است. از این رو برای فازی‌سازی امتیازات فاکتوری به دست آمده حاصل از تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، از شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی (GMPI^۱) استفاده شده است [۱۲].

یوسفی و کارانزا^۲ در سال ۲۰۱۵، مقاله‌ای را تحت عنوان "نمودار پیش‌بینی-مساحت و آنالیز عیار-مساحت فرکتالی جهت دسته‌بندی و ارزیابی نقشه‌های شاهد در مدل‌سازی پتانسیل معدنی" ارائه داده‌اند. در این تحقیق، بجای استفاده از نظرات کارشناسی از اندیس‌های معدنی موجود در منطقه مطالعاتی و مساحت در برگیرنده جهت وزن‌دهی به لایه‌های شاهد استفاده شده است. در واقع هدف این تحقیق بیان خطاهای احتمالی در روش‌های مرسوم وزن‌دهی و مزیت‌های استفاده از نمودارهای

^۱ Geochemical Mineralization Probability Index

^۲ Carranza

پیش‌بینی-مساحت است. در نهایت با روش شاخص همپوشانی چندشاخصه لایه نهایی حاصل از تلفیق همه لایه‌های شاهد تهیه شده است که وزن این لایه بیشتر از تک تک لایه‌ها محاسبه شده است [۶].

قاسمی در سال ۱۳۹۷، از رساله خود با عنوان "تولید نقشه‌های پیشگوی اکتشافی بوسیله روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی فازی و ارائه مدل عدم قطعیت، مطالعه موردی: ذخایر ماسیوسولفاید بوانات" دفاع نموده است. هدف اصلی در این رساله ارائه یک رویکرد چند منظوره تصمیم‌گیری مبنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت انتخاب محیط‌های مناسب تشکیل ذخایر ماسیوسولفاید بوده است. در این تحقیق از روش ترکیب اطلاعات عملگر میانگین وزنی مرتبه یافته راهنمایی شده توسط دانش کارشناسی استفاده شده است و نتایج با دیگر روش‌ها مقایسه شده است. در نهایت با استفاده از روش دمپستر-شفر^۱ مساحت‌ها در دیگر روش‌ها کاهش یافته و مدل عدم قطعیت ارائه شده است. دقت طبقه‌بندی این روش ۸۹ درصد عنوان شده است. در ترسیم منحنی مشخصه عملکرد سیستم، مساحت زیر منحنی معادل ۰/۷۶۲۹ بدست آمده است. نتایج این تحقیق برتری روش تحلیل شبکه‌ای در مقایسه با روش تحلیل سلسله مراتبی در پیشنهاد محدوده‌های مناسب را نشان می‌دهد [۱۳].

عابدی و نوروزی در سال ۲۰۱۶، مقاله‌ای را جهت تلفیق لایه‌های اطلاعاتی زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی، دورسنجی و ژئوفیزیک هوابرد به وسیله روش تاپسیس ارائه داده‌اند. در این مقاله، از روش تاپسیس به عنوان یک روش دانش‌محور در فرآیندهای تصمیم‌گیری چند معیاره برای ترکیب مجموعه داده‌های اکتشافی گسترده در به نقشه درآوردن پتانسیل معدنی استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه پتانسیل بالایی از مس-مولیبدن پورفیری دارد و هدف از این تحقیق ترسیم نواحی امیدبخش اکتشافی برای آینده عنوان شده است. نقشه‌های پتانسیل معدنی تهیه شده انطباق خوبی با اندیس‌ها و معادن موجود در محدوده مطالعه نشان می‌دهد [۱۴].

پازند و هزارخانی در سال ۲۰۱۸ در مقاله‌ای به تهیه نقشه پتانسیل معدنی کانسار مس پرفیری زون

¹ Dempster-Shafer Theory

اهر- ارسباران با استفاده از مدل فازی پرداخته‌اند. در این تحقیق، پارامترهای لیتولوژی امید بخش، آنومالی‌های ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی، ویژگی ساختاری و دگرسانی به وسیله منطق فازی همانند موتور استنتاجگر فازی با هم ترکیب شده‌اند. نقشه‌های پیش‌بینی کننده فازی، ۸۴ درصد از مناطق دارای مس پرفیری شناخته شده را مشخص کرده است. نتایج، نشان دهنده توانایی مجموعه فازی جهت تهیه نقشه پتانسیل معدنی و بررسی مجدد شواهد اکتشافی سطحی است که جهت جستجو برای اهداف مس پرفیری که تاکنون شناسایی نشده‌اند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵].

گونزالز-آلوارز^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۰ روش مدل‌سازی فازی را به‌منظور شناسایی مناطق دارای پتانسیل برای ذخایر نیکل هیدروترمال در تاسمانیا^۲ مورد ارزیابی قرار داده‌اند. داده‌های این تحقیق شامل: نقشه لیتولوژی و ساختاری، نقشه سنگ‌های آذرین، داده‌های ژئوفیزیکی (مغناطیس سنجی)، موقعیت ذخایر و اندیس‌های معدنی و داده‌های ژئوشیمیایی بوده است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده نواحی امیدبخش برای کانی‌سازی نیکل هیدروترمال، نیمه غربی محدوده مورد مطالعه معرفی شده است. همچنین در این مطالعات یک محدوده بزرگ دربردارنده سنگ‌های آذرین واقع در مرکز و شرق تاسمانیا که پیش از این مطالعات غیر امیدبخشی تلقی می‌شد دارای پتانسیل شناخته شده است. نقشه پتانسیل معدنی به‌دست‌آمده از مدل‌سازی فازی، توزیع پتانسیل معدنی را به‌صورت دقیق به تصویر کشیده است. همچنین روش فازی برخی از مناطق موجود در محدوده مطالعاتی را به‌عنوان مناطق امیدبخش مثبت معرفی کرده است [۱۵].

لیو^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۴ اقدام به تهیه نقشه پتانسیل معدنی در کمربند نانلینگ با استفاده از روش وزن‌های نشانگر و مدل فازی نموده‌اند. کمربند نانلینگ دارای تعداد قابل‌توجهی از ذخایر تنگستن پلی متال بوده و یکی از مهمترین کمربندهای متالوژنی تنگستن در جهان است. مجموعه داده‌های مورد استفاده شامل همبرهای لیتواستراتیگرافیک، مغناطیس هوابرد، سیستم گسل‌ها و

¹ González-Álvarez

² Tasmania

³ Liu

داده‌های ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای (factor3: W-Sn-Mo-Bi-Be-Ag-Cd-Pb) و نقشه موقعیت قرارگیری ذخایر معدنی بوده و تعداد ۲۰۰ ذخیره معدنی نیز برای آموزش مورد استفاده قرار گرفته است. مراحل کار شامل (۱) تهیه مدل مفهومی ذخایر تنگستن پلی متال به منظور شناخت کنترل‌کننده‌های کانی سازی، (۲) انتخاب مجموعه داده‌های (معیارهای) مؤثر در کانی زایی و ساخت مدل‌های وزن‌های نشانگر و فازی در نهایت: (۳) ارزیابی نقشه‌های پتانسیل معدنی نهایی بوده است. هردو نقشه پتانسیل تهیه شده در این مطالعه به‌طور مؤثری موقعیت ذخایر معدنی را به‌درستی پیش‌بینی می‌کنند. نقشه وزن‌های نشانگر ۸۱ درصد از ذخایر معدنی را که در مساحتی در حدود ۱۳/۶ درصد از کل محدوده قرار دارند را پیش‌بینی نموده است. این امر در حالی است که مدل فازی، ۸۱/۵ درصد از ذخایر معدنی را که در مساحتی در حدود ۱۳ درصد از کل مساحت محدوده مطالعاتی قرار دارند را پیش‌بینی کرده است. به‌منظور ارزیابی صحت نقشه‌های پتانسیل تهیه‌شده، از منحنی ROC و مساحت زیر منحنی (AUCs) مربوط به دو نقشه پتانسیل نهایی استفاده شده است. مقادیر بالای AUC برای مدل فازی، دلالت بر این داشته که نقشه پتانسیل تهیه شده از این روش، تعداد بیشتری از این مناطق دارای پتانسیل را نسبت به مدل وزن‌های نشانگر مشخص نموده است. قابلیت هردو مدل برای تهیه نقشه پتانسیل را نسبت به مدل وزن‌های نشانگر مشخص نموده است. قابلیت هردو مدل برای تهیه نقشه پتانسیل از دیدگاه این محققین رضایت‌بخش و قابل قبول بوده است [۱۶].

اسکایرو^۱ و همکاران در مقاله‌ای در سال ۲۰۱۹ با عنوان "به نقشه درآوردن پتانسیل کانی‌زایی اکسید آهن مس-طلا (IOCG^۲) در استرالیا با استفاده از رویکرد سیستم‌های معدنی دانش‌محور" در ۵ ناحیه از استرالیا به بررسی پتانسیل کانی‌زایی تیپ IOCG پرداخته‌اند. وزن‌دهی به لایه‌های ورودی با استفاده از شبیه‌سازی‌های احتمالی مونت کارلو^۳ انجام گرفته است. نتایج این تحقیق برای تجزیه و تحلیل‌های دانش‌محور از پتانسیل IOCG در برابر ذخایر شناخته شده IOCG اعتبارسنجی و تایید

¹ Skirrow

² Iron-Oxide Copper Gold

³ Monte Carlo

شده است. در چندین بخش، اکتشافات جدیدی از پتانسیل کانی‌زایی مس-طلا صورت گرفته است که قبلاً به عنوان نواحی امیدبخش نیز معرفی شده‌اند [۱۷].

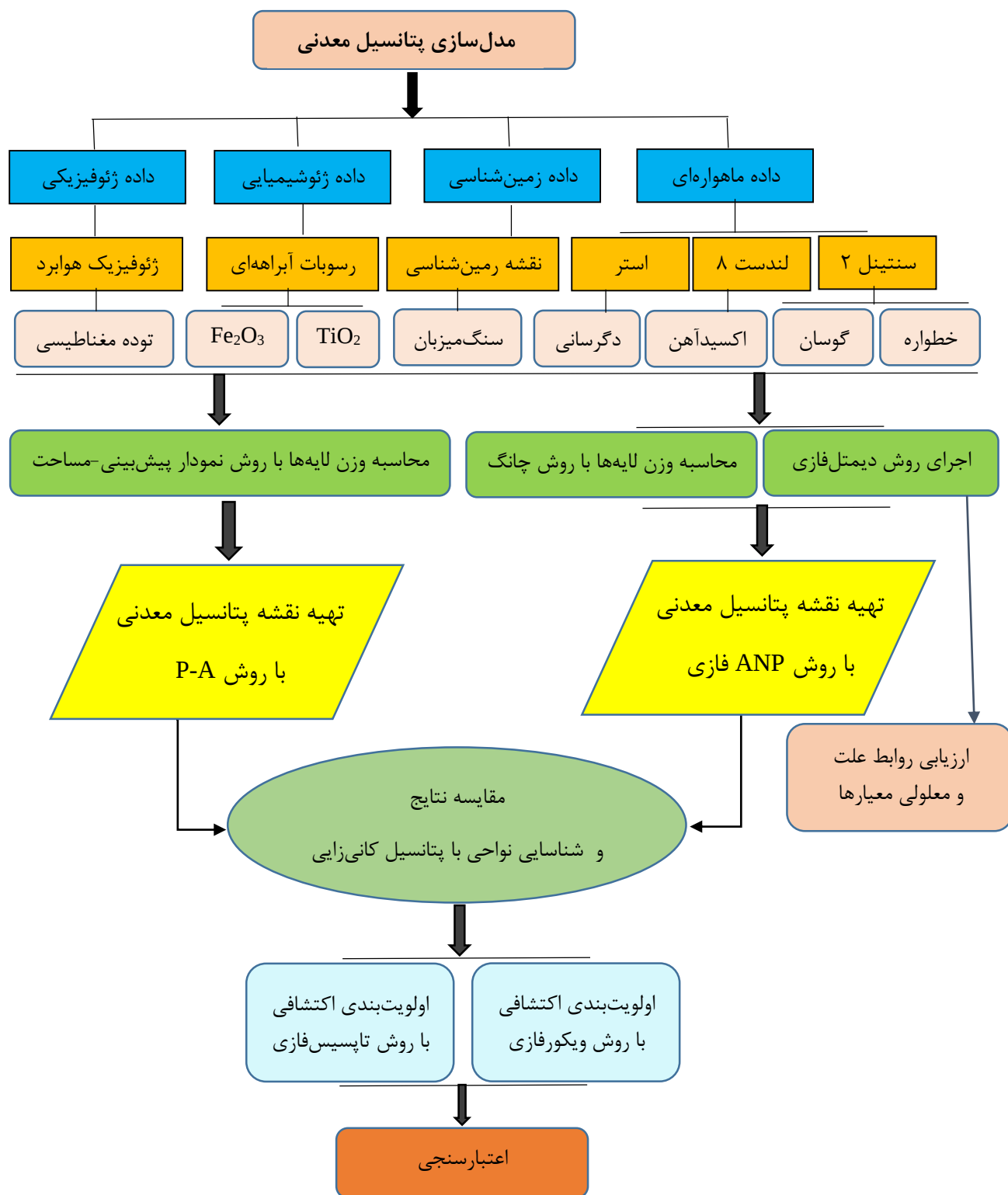
فورسان^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۰ تحقیقی را با عنوان "تهیه نقشه پتانسیل طلای مزوترمال در کمربند جنوبی کیبی وینبا^۲ به وسیله روش‌های تحلیل سلسله مراتبی فازی، روش فرکتال عیار-مساحت و نمودار پیش‌بینی-مساحت" را به انجام رسانده‌اند. در این تحقیق ۹ لایه اکتشافی از زمین-شناسی، ژئوفیزیک و دورسنجی به کمک روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و GIS تهیه شده است. با استفاده از عملگر گاما و گامای ۰/۹ اقدام به تهیه نقشه شده است. برای طبقه‌بندی کلاس‌های هر نقشه از مدل فراکتال بهره برده شده است. در ادامه با توجه به ۱۵ اندیس طلا در محدوده مطالعه، ارزیابی بیشتری بر روی نقشه پتانسیل معدنی صورت گرفته است. در این بین ۲۵ منطقه از ۷۵ منطقه موجود، مناطق با احتمال بالای کانی‌سازی طلا تشخیص داده شده است [۱۸].

۱-۶- روند انجام تحقیق

روند انجام کلی تحقیق طی فلوچارتی در شکل (۱-۱) آورده شده است.

¹ Forson

² Kibi-Winneba



شکل (۱-۱) روند کلی انجام تحقیق

۷-۱- معرفی منطقه

کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت (^۱IOA) معرف کانسارهای نوع کایرونای سوئد هستند که از پروتروزوئیک تا ترشیری در مناطق مختلف جهان در ارتباط با سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده‌اند. ناحیه معدنی بافق در ایران مرکزی یکی از بزرگترین نواحی دارای ذخایر آهن کشور با ذخیره‌ای حدود ۷۵۱ میلیون تن است. در اکثر کانسارهای آهن-آپاتیت منطقه بافق شدت دگرسانی به حدی است که ترکیب سنگ‌شناسی اولیه محو شده است. کانی‌های اصلی آهن در این ذخایر اغلب مگنتیت است و آپاتیت به عنوان کانی فرعی حضور دارد [۱۹].

۷-۱-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه

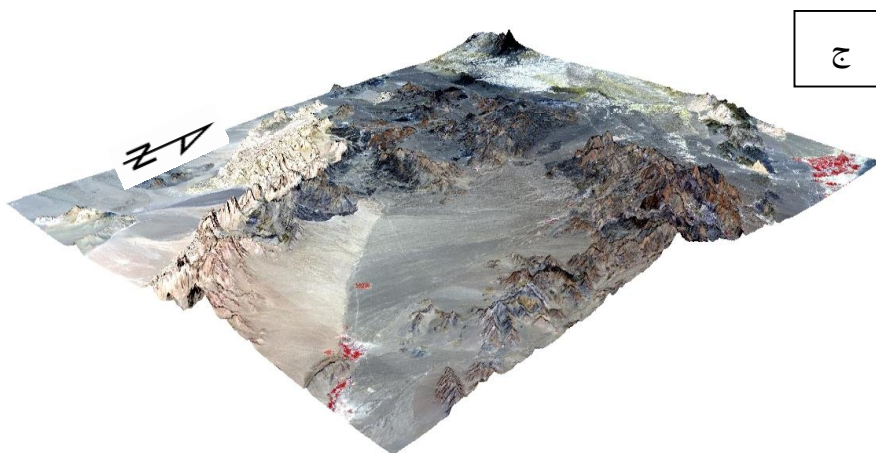
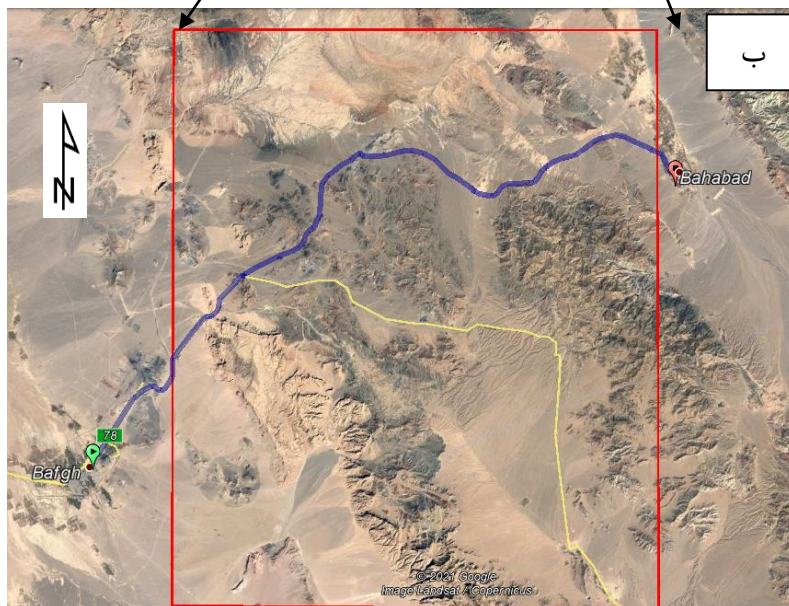
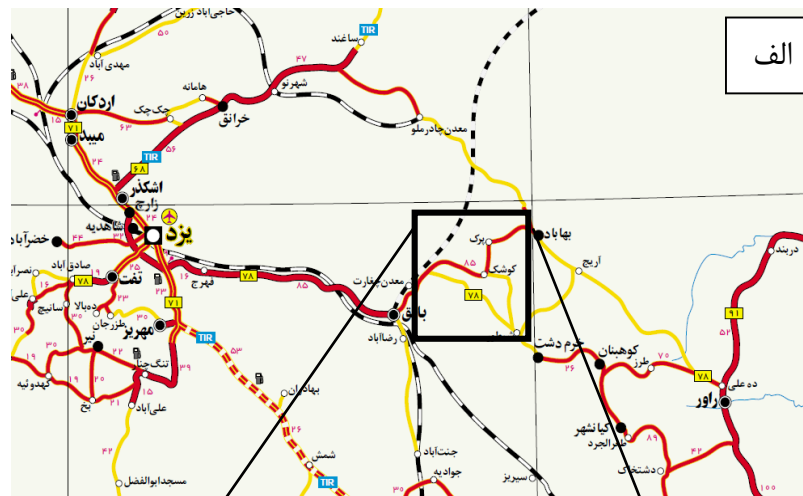
برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی در جنوب استان یزد و در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری شرق شهر بافق قرار دارد. این برگه با وسعتی بیش از ۲۵۰۰ کیلومتر مربع، محدوده جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۲ درجه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۶ درجه طول شرقی را شامل می‌شود که با طی ۲/۵ کیلومتر راه فرعی به جاده آسفالتی بافق - بهاباد متصل می‌شود. راه آهنی که معدن سنگ آهن چغارت را به اصفهان متصل می‌سازد جاده بافق به اسفوردی را در ۱۴ کیلومتری بافق قطع می‌کند [۲۰].

۷-۱-۲- راه‌های ارتباطی منطقه

شهرستان بافق به وسیله راه آهن و راه آسفالتی منشعب از یزد قابل دسترسی می‌باشد. از دیگر راه‌های ارتباطی می‌توان به محورهای بافق - بهاباد، بافق - شیطان و بافق - معدن چادرملو اشاره کرد. میزان بارندگی سالانه در منطقه بطور متوسط ۵۰ میلی‌متر و میزان تبخیر فوق‌العاده شدید می‌باشد. به همین دلیل دارای آب و هوای گرم و خشک و اختلاف درجه حرارت زیاد در شبانه‌روز می‌باشد. نقشه

¹ Iron-Oxide Apatite

راه‌های ارتباطی، تصویر گوگل ارث و مدل سه‌بعدی محدوده مطالعه در شکل (۲-۱) آورده شده است



شکل (۲-۱) الف- نقشه راه‌های ارتباطی محدوده. ب- تصویر گوگل ارث از محدوده. ج- مدل سه‌بعدی محدوده

فصل دوم

مبانی نظری تحقیق

۲-۱- مقدمه

با گذشت زمان و افزایش جمعیت، روزبه‌روز نیاز به منابع طبیعی و ذخایر معدنی بیشتر احساس می‌شود. در این راستا همزمان با بهره‌برداری از ذخایر کشف شده و اتمام آنها، لزوم اکتشاف ذخایر جدید و عمیقتر احساس شده و بنابراین روش‌های اکتشاف دقیقتر و جدیدتر به منظور شناسایی ذخایر جدید توسعه یافته‌اند. با توجه به گستردگی تنوع ذخایر معدنی و اختصاصات آنها و تنوع شرایط طبیعی حاکم بر محیط‌های پیچیده زمین‌شناسی، روش‌های مختلف اکتشافی با توجه به اختصاصات ذخایر مورد پیجویی ابداع شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به طور کلی مطالعات زمین‌شناسی، اکتشافات ژئوشیمیایی، اکتشافات ژئوفیزیکی و مطالعات سنجش از دور را نام برد.

با توجه به اینکه پروسه اکتشاف هزینه‌بر بوده و پارامتر هزینه در آن تاثیر زیادی دارد، همیشه سعی بر توسعه روش‌هایی بوده که خطای شناسایی نواحی امیدبخش را به حداقل برساند. به این منظور از اواخر قرن بیستم میلادی سعی شد تا با مقایسه و تلفیق نتایج روش‌های مختلف اکتشافی، تحت عنوان مدلسازی پتانسیل معدنی، شناسایی نواحی که باید مورد پیجویی بیشتر قرار گیرند، دقیقتر صورت گیرد.

مفهوم نقشه‌های پتانسیل معدنی ابتدا توسط کارگیل^۱ و کلارک^۲ در سال ۱۹۷۸ معرفی شد [۲۱] که زمینه‌ای برای انجام تحقیقات بعدی شد. تعداد زیادی از محققین گستره وسیعی از مدل‌ها را توسعه دادند که در جدول (۲-۱) تعدادی از پژوهش‌های برجسته در زمینه پتانسیل‌یابی مواد معدنی آورده شده است.

^۱ Cargill

^۲ Clark

جدول (۱-۲) تاریخچه مدل سازی پتانسیل معدنی با روش های مختلف

روش مدل سازی پتانسیل معدنی	پژوهشگر
منطق بولین	بونهام-کارتر ۱۹۹۴
همپوشانی شاخص	بیلا و همکاران ۲۰۰۴
منطق فازی	چانگ و موون ۱۹۹۰، تنگستانی و مور ۲۰۰۳، رنجبر و هنرمند ۲۰۰۴
وایدکت	کارانزاو هیل ۲۰۰۲
رگرسیون لجستیک	کارانزا و هیل ۲۰۰۱
وزن های نشانگر	آگتبرگ ۱۹۹۲
شبکه عصبی	پروال و همکاران ۲۰۰۳

از دیدگاه ریاضیات مدل سازی، می توان روش های مدل سازی پتانسیل معدنی را به چهار روش اصلی تقسیم بندی کرد: احتمالاتی، رگرسیون مینا، مبتنی بر هوش مصنوعی و روش های مبتنی بر تئوری باور دمپستر-شفر [۳].

روش های احتمالاتی بر مبنای احتمال تئوری بیز می باشد و شامل محاسبه احتمال رخداد کانسار معدنی در ناحیه مورد مطالعه است و احتمال حضور و عدم حضور خصوصیات زمین شناسی را به دست می آورد. روش وزن های نشانگر روشی احتمالاتی است که به طور قابل توجهی مورد استفاده قرار می گیرد، در این روش خصوصیات زمین شناسی با توجه به کانسار هدف، به صورت مشروط مستقل فرض می شود. فرض مستقل شرطی امکان تخمین احتمالات شرطی را فراهم می کند و تجمعات فضایی نقشه های پیشگو را با شناخت کانسارها به تصویر می کشد که می توانند به طور لگاریتم خطی برای تخمین احتمالات رخداد ترکیب شوند [۳].

روش‌های مبتنی بر رگرسیون روش‌هایی هستند که بر اساس تخمین بهترین برازش، بین کانسار هدف (متغیر وابسته) و نقشه‌های پیشگو ورودی (متغیر توصیفی) می‌باشند. ضرایب متغیر توصیفی در معادله، برازش بین تجمع فضایی کانسار شناخته‌شده با نقشه‌های پیشگو را نشان می‌دهد. روش رگرسیون لجستیک رایج‌ترین روش مبتنی بر رگرسیون است که در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش رگرسیون لجستیک، متغیر وابسته به‌صورت دوتایی است و مقادیر پیش‌بینی‌شده، بین ۰ و ۱ محدود شده‌اند، بنابراین خروجی مدل رگرسیون لجستیک برای یک منطقه می‌تواند احتمال رخداد کانسار در آن منطقه را تفسیر کند [۲۲].

روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی یا محاسبات نرم را در مدل‌سازی مناطق امیدبخش معدنی، می‌توان به‌طور کلی به دو گروه دسته‌بندی کرد: ۱- سیستم‌های مبتنی بر تئوری فازی که هدف از آن گرفتن دانش و اطلاعاتی است که صراحتاً از جملات محاوره‌ای بیان‌شده توسط زمین‌شناس اکتشافی، استدلال می‌شود. ۲- سیستم‌های یادگیری ماشین که مجموعه‌ای از الگوریتم‌های توسعه یافته خصوصاً به‌وسیله متخصصین کامپیوتر برای تشخیص الگو و دسته‌بندی رفتارها را شامل می‌شود. بعضی الگوریتم‌های یادگیری رایج که در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از: شبکه‌های عصبی [۲۳] ماشین برداری پشتیبان [۲۴] و جنگل‌های تصادفی [۲۵].

در این رساله هدف بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی برای انجام مدل‌سازی و تهیه نقشه پتانسیل معدنی می‌باشد. در این راستا برخی از روش‌ها همانند روش دیمتل فازی تاکنون در تهیه نقشه پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند و امید است این پژوهش رهیافتی جهت ارزیابی و برآورد کارآمدی این روش‌ها در تهیه نقشه پتانسیل معدنی باشند. بر همین اساس در این رساله سه روش فازی شامل تاپسیس فازی^۱، ویکور فازی^۲ و فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی^۳ مورد

¹ Fuzzy TOPSIS

² Fuzzy VIKOR

³ Fuzzy ANP

استفاده قرار خواهد گرفت. این روش‌ها زیر مجموعه روش‌های دانش مبنا می‌باشند. روش دیمتل^۱ نیز به عنوان روش کمکی استفاده خواهد شد که نتایج آن به همراه روش‌هایی همچون ANP مورد استفاده قرار گرفته است. به علاوه از روش نمودار پیش‌بینی-مساحت^۲ (P-A) نیز جهت محاسبه اورزان لایه‌ها نیز استفاده شده است تا بتوان مقایسه‌ای بین روش‌های فازی و این روش انجام داده و مزایا و معایب هر کدام شناسایی گردد.

۲-۲- تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۳)

هنگامی با انتخاب یک گزینه از بین گزینه‌های مختلف روبرو می‌شویم در واقع با واژه‌ای به نام تصمیم‌گیری مواجه خواهیم بود که اخیراً، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تحقق این امر بسیار کارآمد می‌باشند. مباحث تصمیم‌گیری اغلب در ارتباط با معیارهایی هستند که از اهمیت متفاوتی برخوردار می‌باشند لذا لازم است که در ارتباط با اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر اطلاعات جامعی در دسترس باشد. این موضوع با تعیین و تخصیص یک وزن برای هر معیار به انجام می‌رسد. تعیین و اختصاص وزن‌ها به عنوان یک امر مهم و ضروری در درک نوع سیستم کمک شایانی به تصمیم‌گیران خواهد نمود و جز اولویت‌های تصمیم‌گیری به حساب می‌آید. وزن هر معیار در واقع، ارزشی است که به یک معیار مورد ارزیابی اختصاص داده می‌شود و بیانگر اهمیت آن، نسبت به دیگر معیارهای مورد نظر است. هر مقدار این وزن بیشتر باشد، پس معیار با اهمیت‌تری خواهد بود [۲۶].

در بحث‌های تصمیم‌گیری، معمولاً سعی می‌شود که از مفاهیم ریاضی جهت انجام محاسبات استفاده گردد اما بیان بسیاری از این پارامترها با ریاضیات امکان‌پذیر نبوده و از طرف دیگر در دنیای واقعی عدم قطعیت و شرایط نامطمئن وجود دارد؛ لذا در بسیاری از موارد تمامی یا بخشی از داده‌های یک

¹ DEMATEL

² Prediction-Area Plot

³ Multi-Criteria Decision Making

مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره فازی هستند. بنابراین اگر مسئله با استفاده از داده‌های قطعی مدل‌سازی شود، پاسخ درست و قابل قبولی به دست نخواهد آمد و در نتیجه معیار و یا گزینه بهتر و برتر انتخاب نخواهد نمی‌شود. انجام مدل‌سازی همراه با لحاظ کردن عدم قطعیت در این مسائل به وسیله تئوری مجموعه‌های فازی انجام می‌پذیرد. نواقص و کمبودهای روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره کلاسیک موجب شده است که تصمیم‌گیری‌های چند معیاره فازی معرفی گردد [۲۶].

۲-۳- تئوری منطق فازی

در علوم همچون منطق بولین فرض بر این می‌باشد که برای موضوعات مرز و محدوده‌ای تعریف شده است که آن موضوع یا در آن مرز جای دارد یا ندارد؛ در تعاریفی مانند زنده یا مرده، سیاه یا سفید، صفر یا صد از این منطق استفاده شده است. در این مباحث حد میانه‌ای برای مسائل وجود ندارد در صورتی که آنچه انسان در زندگی با آن سر و کار دارد مرزهای روشن و مشخصی ندارد. منطق‌های چند ارزشی برای گریز از این منطق صفر و یک باینری ارائه شد است. منطق فازی یک روش چند ارزشی است. در این روش امور دارای درجات مختلفی می‌باشند. برای مثال در این منطق یک تصویر خاکستری دقیقاً سیاه و سفید نیست بلکه طیف وسیعی از خاکستری بین سیاه و سفید را در آن می‌توان مشاهده کرد. یک پیکسل می‌تواند درجه‌ای از روشنایی بین ۰ تا ۲۵۵ را شامل شود. این روش را منطق خاکستری نیز می‌نامند [۲۷].

این منطق در انجام آنالیزها با موارد مبهم زیادی سر و کار دارد و به علت انعطاف پذیری و قدرت بالایی که دارد کاربردهای زیادی را در علوم چون مخابرات دارد. روش فازی را می‌توان روشی تقریبی ولی مؤثر برای شرح رفتار سیستم‌های پیچیده و مبهم که با معادلات ریاضی قابل حل ناست، معرفی نمود. متغیرهای فازی نتیجه عملکرد یک سیستم به نام کنترل‌کننده منطق فازی شامل: فازی ساز، استنباط فازی و غیرفازی‌ساز است. فازی ساز یک مقدار موج دار را به یک مقدار فازی تبدیل می‌کند.

استنباط فازی بر اساس دانش بشری نتیجه گیری می کند و تبدیل حالت فازی به حالت موجدار به عهده سیستم غیر فازی می باشد [۲۸, ۲۹].

مقاله مرتبط با این موضوع که توسط پرفسور لطفی زاده نوشته شده است، سرآغاز جهشی نوین در علوم و مهندسی سیستم و کامپیوتر بود. ایشان در سال ۱۹۶۵ طی یک مقاله دیگر، مفهوم استفاده از متغیرهای زبانی را در سیستم های حافظه و کنترل مطرح نمودند [۳۰]. این مقاله اساس تکنولوژی کنترل بر مبنای منطق فازی است که در آینده اثرات عمیق در طراحی سیستم های کنترل هوشیار خواهد داشت. پرفسور لطفی زاده معتقد است منطق فازی یک فرا مجموعه از منطق بولی است که بر مفهوم درستی نسبی، دلالت می کند.

۲-۳-۱- سیر تکاملی نظریه فازی

جهت داشتن یک دید کلی از روند استفاده و سیر تکاملی نظریه های فازی، این روند در جدول (۲-۲) آورده شده است.

جدول (۲-۲) سیر تکاملی نظریه فازی [۳۱]

ردیف	ارائه دهنده	موضوع
۱	عسگرزاده (۱۹۶۵)	معرفی مجموعه فازی
۲	عسگرزاده (۱۹۶۸)	ارائه مفاهیم الگوریتم فازی
۳	عسگرزاده (۱۹۷۰)	ارائه تصمیم گیری فازی
۴	عسگرزاده (۱۹۷۱)	ارائه ترتیب فازی
۵	عسگرزاده (۱۹۷۱)	طرح یک راه حل جدید برای تجزیه و تحلیل سیستم های پیچیده و فرایندهای تصمیم گیری
۶	ممدانی آسیلیان (۱۹۷۵)	ارائه چهارچوب اولیه برای کنترل کننده فازی و اعمال کنترل کننده فازی برای یک موتور بخار

۷	هومبلادو اوسترگارد (۱۹۷۸)	به کارگیری کنترل کننده فازی برای کنترل یک فرایند صنعتی (کنترل فازی کوره سیمان)
۸	سوگنو (۱۹۸۰)	کنترل سیستم تصفیه آب فوجی
۹	سوگنو (۱۹۸۰)	کار بر روی روبات فازی (ماشینی که از راه دور کنترل می شد و خودش به تنهایی عمل پارک را انجام می داد)
۱۰	یاشونوبو و میاموتو (۱۹۸۷)	طراحی سیستم کنترل قطار زیرزمینی سندایی
۱۱	هیروتا (۱۹۸۷)	ساخت یک روبات فازی که پینگ پونگ بازی می کرد
۱۲	یاماگاکا (۱۹۸۷)	ارائه یک سیستم فازی که یک پاندول معکوس را در حالت تعادل نشان می داد

۲-۳-۲- اعداد فازی

انواع متنوعی از اعداد فازی با نام‌ها و ویژگی‌های متفاوت ارائه شده و بکار گرفته شده‌اند اما یک اصل مهم در به کارگیری تئوری فازی، کارایی محاسباتی آن است. کار کردن با اعداد فازی مختلف دشواری‌های زیادی دارد. دیدیه دوبوا و هنری پراد برای رفع این مشکل اعداد فازی «راست و چپ» مرسوم به اعداد LR^۱ را معرفی کردند [۳۲].

اما این روش نیز پیچیدگی‌های زیادی دارد و کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان بیشترین کاربرد را اعداد فازی مثلثی و ذوزنقه‌ای دارند. این اعداد در علوم اجتماعی و مدیریت بسیار مورد استفاده قرار می گیرند.

۲-۳-۳- اعداد فازی مثلثی

عدد فازی مثلثی (TFN^۲) یک عدد فازی است که با سه عدد حقیقی به صورت $F=(l,m,u)$ نمایش داده می شود. کران بالا که با u نمایش داده می شود بیشینه مقادیری است که عدد فازی F می تواند

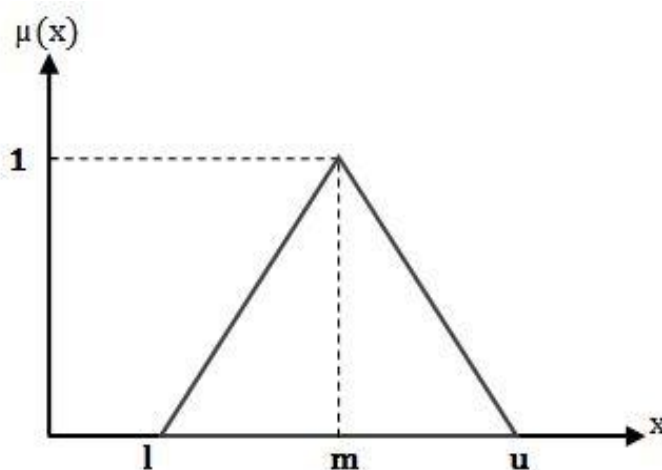
¹ Left-Right

² Triangular Fuzzy Number

اختیار کند. کران پایین که با l نشان داده می‌شود کمینه مقادیری است که عدد فازی F می‌تواند اختیار کند. مقدار m محتمل‌ترین مقدار یک عدد فازی است. تابع عضویت یک عدد فازی مثلثی به صورت رابطه ۱-۲ تعریف می‌شود [۳۳]:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l < x < m \\ \frac{u-x}{u-m} & m < x < u \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

عدد فازی مثلثی $F=(l,m,u)$ در فضای هندسی به صورت شکل (۱-۲) نمایش داده می‌شود.

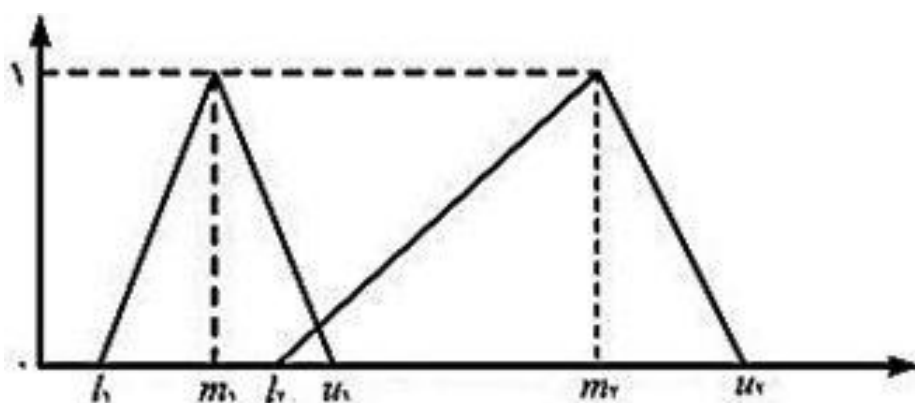


شکل (۱-۲) نمایش اعداد فازی مثلثی در فضای هندسی

با توجه به تابع عضویت اعداد مثلثی مشخص است که اگر x بین l و m باشد آنگاه هرچه بزرگتر باشد درجه عضویت آن نیز بزرگتر خواهد شد تا جایی که برای $x=m$ درجه عضویت برابر یک می‌شود. اگر x بین m و u باشد آنگاه هرچه بزرگتر باشد، درجه عضویت کوچکتر خواهد شد و در $x=u$ درجه عضویت صفر خواهد شد؛ بنابراین می‌توان گفت درجه عضویت x در بازه بسته l تا m به صورت یکنواختی افزایشی و در بازه بسته m تا u به صورت یکنواختی کاهشی خواهد بود. اگر $l=m=u$ باشد در این

صورت عدد فازی به یک عدد قطعی تبدیل خواهد شد [۳۳].

تابع عضویت فازی مثلثی شامل دو بخش خطی چپ و راست است که در رأس $(m, 1)$ به هم متصل می‌شوند. اعداد فازی مثلثی بر اساس اطلاعات اندک ساخته می‌شوند. نکته این نمودار آن است که اگر m وسط دو کران عدد فازی قرار گیرد، عدد فازی متقارن نامیده می‌شود و در غیر این صورت نامتقارن خواهد بود. اعداد فازی متقارن و نامتقارن به صورت شماتیک در شکل (۲-۲) نشان داده شده است [۳۳].



شکل (۲-۲) نمایش اعداد فازی متقارن و نامتقارن [۳۳].

کارایی محاسباتی اعداد فازی مثلثی به علت سادگی انجام عملیات ریاضی روی آن بسیار زیاد است. درواقع عملیات جبری به همان حالت معمول و به صورت نظیر به نظیر صورت می‌پذیرد.

۲-۳-۴-تجمیع دیدگاه و تفاوت آن با میانگین فازی

برای بهره بردن از نظرات همه کارشناسان و خبرگان روش‌های مختلفی وجود دارد. روش‌های تجمیع نظرات هیچ‌گونه ارتباطی با قوانین محاسبات میانگین اعداد فازی مثلثی ندارد. درواقع این روش‌ها، روش‌هایی هستند که به صورت تجربی حاصل شده و توسط محققین مختلف ارائه شده است. برای مثال یک روش مرسوم برای تجمیع مجموعه‌ای از اعداد فازی مثلثی را کمینه l و میانگین m و بیشینه u در نظر گرفته‌اند [۳۴].

$$F_{AGR} = \left(\min\{l\}, \left\{ \frac{\sum m}{k} \right\}, \max\{u\} \right) \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

۲-۳-۵- فازای زدایی

در تحقیقات مرتبط با فازای سازی، در نهایت محقق در پی آن است که مقادیر نهایی فازای شده را به یک عدد قطعی و قابل درک تبدیل کند. معمولاً می‌توان تجميع اعداد فازای مثلثی و ذوزنقه‌ای را توسط یک مقدار قطعی که بهترین میانگین مربوطه است، خلاصه کرد. این عملیات را فازای زدایی یا دفازی‌سازی می‌نامند. روش‌های متعددی برای فازای زدایی وجود دارد. یکی از روش‌های ساده برای این کار استفاده از روش‌های میانگین‌گیری به صورت زیر است [۳۴]:

$$F_{ave} = (L, M, U)$$

رابطه (۲-۳)

$$\left. \begin{aligned} X^1_m &= \frac{L+M+U}{3} \\ X^2_m &= \frac{L+2M+U}{4} \\ X^3_m &= \frac{L+4M+U}{6} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \text{Crisp number} = Z^* = \max(x^1_{\max}, x^2_{\max}, x^3_{\max})$$

مقادیر $X^i_{\max}$ تفاوت چندانی باهم ندارند و همواره عددی نزدیک به M هستند. منظور از M میانگین حاصل از تجميع مقادیر محتمل m از اعداد فازای مثلثی مختلف است. با این وجود مقدار قطعی بزرگترین $X^i_{\max}$ محاسبه شده در نظر گرفته می‌شود.

از روش‌های دیگر فازای زدایی می‌توان به روش مرکز ثقل، مرکز سطح و میانگین ماکزیمم اشاره کرد.

۲-۴- کاربرد منطق فازی در تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه

هدف این روش آشکار سازی ابهامات و عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در اهداف و محدودیت‌های موجود در مسائل تصمیم‌گیری می‌باشد و استفاده از آن سازگاری بهتری با توضیحات زبانی و بعضاً مبهم انسانی دارد و بنابراین بهتر است که با بکارگیری اعداد فازی به تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت.

با استفاده از مجموعه‌های فازی خطا کاهش پیدا می‌کند. در رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره، اگرچه از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خبرگان برای انجام مقایسات استفاده می‌شود اما کمی کردن دیدگاه خبرگان به روش سنتی، امکان انعکاس کامل سبک تفکر انسانی را ندارد. استفاده از مجموعه‌های فازی، سازگاری بیشتری با توضیحات زبانی و بعضاً مبهم انسانی دارد و بنابراین بهتر است که با بکار گیری اعداد فازی به تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخت [۳۳].

۲-۵- روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی (FTOPSIS)

در این روش برای اختصاص وزن و رتبه‌بندی گزینه‌ها، برای تعیین وزن معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها از کامل و قطعی استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که همواره تفکرات انسان با عدم قطعیت همراه است و این عدم قطعیت در تصمیم‌گیری اثرگذار است، به همین علت استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری فازی گزینه مناسبی می‌باشد. یکی از این روش‌ها روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی است. برتری این روش نسبت به روش‌های سنتی، به کارگیری متغیرهای زبانی است که به وسیله اعداد فازی ارائه شده‌اند که در نهایت برای تغییر وزن‌ها در رتبه‌بندی گزینه‌ها استفاده از مقادیر دقیق و کامل لازم نیست [۳۵].

۲-۵-۱- مراحل روش شباهت به گزینه ایده آل فازی

مراحل این روش به شرح ذیل ارائه شده است [۳۶]:

مرحله اول: تشکیل ماتریس تصمیم گیری

ماتریس تصمیم به ماتریس ارزیابی m گزینه بر اساس n معیار گفته می شود. در این ماتریس به هر گزینه بر اساس تک تک معیارها امتیازی داده می شود. در این مرحله می توان از اعداد فازی مثلثی و یا ذوزنقه ای استفاده کرد. زمانی که از رویکرد فازی با اعداد فازی مثلثی استفاده می شود ماتریس تصمیم X به صورت زیر نمایش داده خواهد شد:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & x_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۲-۴)}$$

مرحله دوم: تعیین ماتریس وزن معیارها

مرحله سوم: بی مقیاس کردن ماتریس تصمیم فازی

برای این کار از تغییر مقیاس خطی برای تبدیل مقیاس معیارهای مختلف به مقیاس قابل مقایسه استفاده می شود.

مرحله چهارم: تعیین ماتریس تصمیم فازی وزن دار

از ضرب کردن ضریب اهمیت هر معیار در ماتریس بی مقیاس شده فازی حاصل می شود.

مرحله پنجم: یافتن حل ایده آل فازی و حل ضد ایده آل فازی

مرحله ششم: محاسبه فاصله از حل ایده آل و ضد ایده آل فازی

مرحله هفتم: محاسبه شاخص شباهت

مرحله هشتم: با توجه به میزان شاخص شباهت، گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند.

۲-۶- روش دیمتل

روش دیمتل اولین بار توسط دو محقق به نام‌های فونتلا^۱ و گابوس^۲ در سال ۱۹۷۲ میلادی ارائه شد [۳۷]. مزیت این روش سادگی و شفافیت آن در انعکاس ارتباطات متقابل میان یک مجموعه متغیر می‌باشد. جهت انعکاس روابط درونی میان معیارها از روش دیمتل استفاده می‌شود به‌طوری که متخصصان قادرند با تسلط بیشتری به بیان نظرات خود در رابطه با اثرات (جهت و شدت اثرات) میان عوامل بپردازند. لازم به ذکر است که ماتریس حاصله از روش دیمتل (ماتریس ارتباطات داخلی)، هم رابطه علی و معمولی بین عوامل را نشان می‌دهد و هم اثرپذیری و اثرگذاری متغیرها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که ماتریس حاصل از روش دیمتل یعنی ماتریس ارتباطات داخلی، می‌تواند به‌عنوان بخشی از سوپر ماتریس روش ANP مورد استفاده قرار بگیرد [۳۳].

ساختاردهی به عوامل پیچیده در قالب گروه‌های علت و معمولی یکی دیگر از مهمترین کارکردها و یکی از مهمترین دلایل کاربرد فراوان آن در فرایندهای حل مسئله است. بدین‌صورت که با تقسیم‌بندی مجموعه وسیعی از عوامل پیچیده در قالب گروه‌های علت معمولی، تصمیم‌گیرنده را در شرایط مناسب‌تری از درک روابط قرار می‌دهد.

الگوریتم اجرای روش دیمتل [۳۷]:

گام نخست: تشکیل ماتریس ارتباط مستقیم

^۱ Fontela

^۲ Gabus

برای شناسایی الگوی روابط میان n معیار ابتدا یک ماتریس $n \times n$ تشکیل می‌شود. تأثیر عنصر مندرج در هر سطر بر عناصر مندرج در ستون در این ماتریس درج می‌شود. از یک طیف با امتیاز ۰ تا ۴ برای امتیازدهی استفاده می‌شود. به‌طوری‌که اگر هیچ تأثیری وجود نداشته باشد عدد صفر و اگر تأثیر بسیار زیاد باشد عدد ۴ استفاده می‌شود. همچنین برخلاف روش‌های ANP و AHP در اینجا شرط معکوسی برقرار نیست؛ یعنی اگر تأثیر عنصر A بر B برابر ۳ باشد تأثیر عنصر B بر A لزوماً ۱/۳ نخواهد بود و ممکن است هر عددی بین صفر تا ۴ باشد. درایه‌های قطر اصلی یعنی تأثیر هر عنصر بر خودش نیز صفر در نظر گرفته می‌شود. طیف مورد استفاده در روش دیمتل در جدول (۲-۳) آورده شده است.

جدول (۲-۳) طیف مورد استفاده در روش دیمتل [۳۸]

بدون تأثیر	تأثیر خیلی کم	تأثیر کم	تأثیر زیاد	تأثیر خیلی زیاد
۰	۱	۲	۳	۴

اگر از دیدگاه بیش از یک نفر استفاده شود، هر یک از خبرگان باید ماتریس موجود را تکمیل کنند، سپس از میانگین ساده نظرات استفاده می‌شود و ماتریس ارتباط مستقیم X به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & x_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۲-۵)}$$

گام دو: نرمال کردن ماتریس ارتباط مستقیم

برای نرمال‌سازی ابتدا جمع تمامی سطرها و ستون‌های ماتریس ارتباط مستقیم محاسبه می‌شود. بزرگترین عدد مجموع سطرها و ستون‌ها با k نمایش داده خواهد شد. برای نرمال‌سازی باید تک تک

درایه‌های ماتریس ارتباط مستقیم بر k تقسیم شوند.

$$K = \max \{ \max \sum_{j=1}^n x_{il}, \sum_{i=1}^n x_{ij} \} \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

$$N = \frac{1}{k} * X \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

گام سه: محاسبه ماتریس ارتباط کامل

برای محاسبه ماتریس ارتباط کامل ابتدا یک ماتریس همانی $n \times n$ تشکیل دهیم. سپس این ماتریس-همانی را منهای ماتریس نرمال کرده و ماتریس حاصل را معکوس می‌کنیم. ماتریس نرمال در ماتریس حاصل ضرب می‌شود تا ماتریس ارتباط کامل به دست آید.

$$T = N \times (I - N)^{-1} \quad \text{رابطه (۸-۲)}$$

ماتریس همانی با یک ماتریسی است که تمامی درایه‌های آن غیر از قطر اصلی صفر است.

گام چهارم: محاسبه ماتریس ارتباط داخلی

برای محاسبه ماتریس روابط داخلی باید ارزش آستانه محاسبه شود. با این روش می‌توان از روابط جزئی صرف‌نظر کرده و شبکه روابط قابل‌اعتنا یا همان نقشه شبکه روابط^۱ (NRM) را ترسیم کرد. تنها روابطی که مقادیر آنها در ماتریس T از مقدار آستانه بزرگتر باشد در NRM نمایش داده خواهد شد. برای محاسبه مقدار آستانه روابط کافی است تا میانگین مقادیر ماتریس T محاسبه شود. بعد از آنکه شدت آستانه تعیین‌شده، تمامی مقادیر ماتریس T کوچکتر از آستانه باشد صفر شده یعنی آن رابطه علی در نظر گرفته نمی‌شود:

$$TS = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m V_{ij}}{m \times n} \quad \text{رابطه (۹-۲)}$$

¹ Map Relation Network

از ماتریس روابط داخلی می‌توان برای نمایش ارتباطات داخلی در سوپر ماتریس ANP استفاده شود.

گام پنج: ایجاد نمودار علی

در نمودار علی چهار جنبه با اهمیت قابل مشاهده است:

-میزان تأثیرگذاری متغیرها: جمع عناصر هر سطر (D) برای هر عامل نشانگر میزان اثرگذاری آن عامل بر سایر عامل‌های سیستم است.

-میزان تأثیرپذیری متغیرها: جمع عناصر ستون (R) برای هر عامل نشانگر میزان تأثیرپذیری آن عامل از سایر عامل‌های سیستم است.

-بنابراین بردار افقی (D+R) میران تأثیر و اثر عامل مورد نظر در سیستم است. به عبارت دیگر هرچه مقدار D+R عاملی بیشتر باشد، آن عامل تعامل بیشتری با سایر عوامل سیستم دارد.

-بردار عمودی (D-R) قدرت تأثیرگذاری هر عامل را نشان می‌دهد. به طور کلی اگر D-R مثبت باشد، متغیر یک متغیر علی محسوب می‌شود و اگر منفی باشد، معلول محسوب می‌شود.

-در نهایت یک دستگاه مختصات دکارتی ترسیم می‌شود. در این دستگاه محور طولی مقادیر D+R و محور عرضی بر اساس D-R می‌باشد. موقعیت هر عامل با نقطه‌ای به مختصات (D+R, D-R) در دستگاه معین می‌شود. به این ترتیب یک نمودار گرافیکی نیز به دست خواهد آمد.

۲-۷- روش دیمتل فازی

اولین بار دو پژوهشگر به نام‌های وو^۱ و لی^۲ در سال ۲۰۰۷ از روش دیمتل با دید فازی استفاده نموده- اند [۳۹]. همچنین نوع اجرای این روش تحت تأثیر روش دفازی سازی در بسیاری از مقالات به انحراف کشیده شده است. در واقع رویکرد فازی برای مقابله با عدم قطعیت و ابهام موجود در عبارات

^۱Wu

^۲ Lee

کلامی پاسخ‌دهندگان مورد استفاده قرار می‌گیرد. انجام محاسبات روش دیمتل به‌صورت فازی نخست باید یک طیف زبانی مناسب برای گردآوری داده‌ها استفاده کرد. طیف‌های متنوعی بر اساس مقیاس امتیازگذاری مرسوم دیمتل پیشنهاد شده است. در این میان دو طیف فازی بیشتر مورد اقبال قرار گرفته است که در جدول (۴-۲) آورده شده است [۳۳]:

جدول (۴-۲) طیف معادل فازی در روش دیمتل [۳۹]

متغیر زبانی	معادل قطعی	معادل فازی (الف)	معادل فازی (ب)
بدون تأثیر	۰	(۰، ۰/۱، ۰/۳)	(۰، ۰، ۰/۲۵)
تأثیر کم	۱	(۰/۱، ۰/۳، ۰/۵)	(۰، ۰/۲۵، ۰/۵)
تأثیر متوسط	۲	(۰/۳، ۰/۵، ۰/۷)	(۰/۵، ۰/۷۵، ۰/۲۵)
تأثیر زیاد	۳	(۰/۵، ۰/۷، ۰/۹)	(۰/۵، ۰/۷۵، ۱)
تأثیر خیلی زیاد	۴	(۰/۷، ۰/۹، ۱)	(۰/۷۵، ۱، ۱)

۲-۷-۱- الگوریتم روش دیمتل فازی

برای انجام محاسبات دیمتل فازی الگوهای متعددی پیشنهاد شده است. یک الگوی رایج مورد استفاده به‌شدت تحت تأثیر روش فازی زدایی قرار گرفته است. الگوریتم اجرایی مناسب آن است که تا حد امکان به‌صورت فازی انجام می‌شود. این الگوریتم به‌صورت زیر است [۳۹]:

پس از گردآوری دیدگاه خبرگان ماتریس ارتباط مستقیم فازی X تشکیل می‌شود. از روش ساده میانگین فازی برای تجمیع دیدگاه خبرگان استفاده می‌شود. اگر n کارشناس وجود داشته باشد و درایه ماتریس مستقیم فازی با X_{ij} نمایش داده شود. آنگاه این درایه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$X_{ij} = \left(\frac{\sum l_{ij}}{n}, \frac{\sum m_{ij}}{n}, \frac{\sum u_{ij}}{n} \right) \quad \text{رابطه (۲-۱۰)}$$

- نرمال سازی ماتریس ارتباط مستقیم

برای نرمال سازی مقادیر باید $\sum u_{ij}$ هر سطر محاسبه شود. با تقسیم درایه های ماتریس X بر بیشینه مقادیر $\sum u_{ij}$ ماتریس نرمال فازی N به دست خواهد آمد:

$$K = \max (\sum_{j=1}^n u_{ij}) \quad N = \frac{1}{K} * X \quad \text{رابطه (۱۱-۲)}$$

- محاسبه ماتریس ارتباط کامل

برای محاسبه ماتریس ارتباط کامل از رابطه $N*(1-N)^{-1}$ استفاده می شود. درروش دیمتل فازی، ماتریس نرمال سازی به سه ماتریس قطعی زیر افزاز می شود:

$$N_u = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & u_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۲-۲)}$$

$$N_m = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & m_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۳-۲)}$$

$$N_l = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & l_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۴-۲)}$$

سپس ماتریس همانی I_{n*n} را تشکیل داده و عملیات زیر انجام می شود:

$$T_l = N_l * (I - N_l)^{-1} \quad \text{رابطه (۱۵-۲)}$$

$$T_m = N_m * (I - N_m)^{-1} \quad \text{رابطه (۱۶-۲)}$$

$$T_u = N_u * (I - N_u)^{-1} \quad \text{رابطه (۱۷-۲)}$$

$$\tilde{t} = (t_{ij}^l, t_{ij}^m, t_{ij}^u)$$

رابطه (۱۸-۲)

پس از محاسبه ماتریس ارتباط کامل می‌توان اقدام به فازی زدایی مقادیر کرد. ماتریس به دست آمده، همان ماتریس ارتباط کامل قطعی شده است و برای محاسبه الگوی روابط علی می‌توان از آن استفاده کرد.

۲-۸-روش ویکور

روش VIKOR به وسیله پژوهشگری صربستانی به نام اپریکوویچ به سال ۱۹۸۴ پیشنهاد شد [۴۰]. این مدل بر مبنای روش توافق جمعی و داشتن معیارهای متضاد کاربرد دارد. این روش نیز یکی دیگر از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای انتخاب بهترین گزینه است. کاربرد روش ویکور بسیار مشابه روش تاپسیس است. در روش تاپسیس گزینه انتخابی باید کمترین فاصله از جواب ایده‌آل و دورترین فاصله از جواب ضد ایده‌آل را داشته باشد. روش تاپسیس دو نقطه مرجع (ایده‌آل و ضد ایده‌آل) را معرفی می‌کند ولی اهمیت نسبی فواصل از این دو نقطه را در نظر نمی‌گیرد. روش‌های VIKOR و تاپسیس انواع متفاوتی از نرمال‌سازی را برای حذف واحدهای سنجش معیارها بکار می‌گیرند. در روش VIKOR از نرمال‌سازی خطی و در تاپسیس از نرمال‌سازی برداری استفاده می‌شود. مقدار نرمال‌سازی شده در روش VIKOR به واحد سنجش معیار وابسته نیست و این در حالی است که مقادیر نرمال‌سازی شده توسط روش تاپسیس ممکن است به واحد سنجش معیار وابسته باشند [۳۳].

۲-۸-۱- الگوریتم روش ویکور

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم

مانند سایر روش‌های انتخاب گزینه برتر مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نخست ماتریس تصمیم تشکیل شده است. ماتریس تصمیم یا همان ماتریس امتیازدهی گزینه‌ها بر اساس معیارها در

زیر ارائه شده است. ماتریس تصمیم با X و هر درایه آن با X_{ij} نشان داده شده است.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۹-۲)}$$

گام دوم: تهیه ماتریس بی‌مقیاس شده

در گام دوم بی‌مقیاس سازی ماتریس تصمیم‌گیری بروش نرمال سازی خطی صورت می‌گیرد. ماتریس بی‌مقیاس شده با N و درایه آن با n_{ij} نشان داده شده است. هر n_{ij} با تقسیم درایه متناظر در ماتریس اولیه بر مجموع عناصر ستون متناظر و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_1^m x_{ij}} \quad \text{رابطه (۲۰-۲)}$$

گام سوم: تعیین بهترین و بدترین مقدار هر معیار

برای هر معیار باید بهترین و بدترین مقدار آن معیار در میان همه گزینه‌ها شناسایی شود. بهترین مقدار یک معیار در تمامی گزینه‌ها f_j^* نامیده می‌شود و بدترین مقدار یک معیار در تمامی گزینه‌ها f_j^- نامیده می‌شود. بنابراین f_j^* و f_j^- بسته به اینکه معیار بارمنفی یا مثبت داشته باشد از روابط زیر محاسبه می‌شود:

اگر معیار مثبت باشد f_j^* حداکثر مقدار ستون و f_j^- حداقل مقدار ستون است.

$$f_j^* = \text{MAX } f_j \quad \text{رابطه (۲۱-۲)}$$

$$f_j^- = \text{MAX } f_j \quad \text{رابطه (۲۲-۲)}$$

اگر معیار منفی باشد f_j^* حداقل مقدار ستون و f_j^- حداکثر مقدار ستون است.

$$f_j^* = \text{Min } f_j \quad \text{رابطه (۲-۲۳)}$$

$$f_j^- = \text{Max } f_j \quad \text{رابطه (۲-۲۴)}$$

گام چهارم: تعیین مقدار سودمندی و تاسف هر گزینه

اپریکوویچ دو مفهومی اساسی سودمندی (S) و تاسف (R) را در محاسبات ویکور مطرح کرده است. مقدار سودمندی (S) بیانگر فاصله نسبی گزینه i ام از نقطه ایده آل و مقدار تاسف (R) بیانگر حداکثر ناراحتی گزینه i ام از دوری از نقطه ایده آل می باشد.

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j \cdot \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad \text{رابطه (۲-۲۵)}$$

$$R_i = \text{Max} \left[W_j \cdot \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad \text{رابطه (۲-۲۶)}$$

گام پنجم: محاسبه شاخص ویکور

بنابراین گام بعدی محاسبه شاخص ویکور (Q) برای هر گزینه است:

$$Q_i = V \left[\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right] + (1 - v) \left[\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right] \quad \text{رابطه (۲-۲۷)}$$

$$S^* = \text{Min}; \quad S^- = \text{Max } S_i \quad \text{رابطه (۲-۲۸)}$$

$$R^* = \text{Min}; \quad R^- = \text{Max } R_i \quad \text{رابطه (۲-۲۹)}$$

گام ششم: مرتب کردن گزینه‌ها براساس مقادیر Q,R,S

در این گام، گزینه‌ها براساس مقادیر Q, R, S در سه گروه از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند. بهترین گزینه آن است که کوچکترین Q را داشته باشد به شرط آنکه دو شرط زیر برقرار باشند:

شرط یک: اگر گزینه A1 و A2 در میان m گزینه رتبه اول و دوم را داشته باشند، باید رابطه زیر برقرار باشند:

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{m-1} \quad \text{رابطه (۲-۳۰)}$$

شرط دو: گزینه A1 باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S به‌عنوان رتبه برتر شناخته شود.

۲-۹-روش ویکور فازی

اپریکوویچ^۱ (۲۰۱۱) حل مسائل به روش ویکور را با رویکرد فازی ارائه کرده است [۴۱]. روش ویکور فازی برای حل مسئله چند معیاره فازی با معیارهای متعارض و غیرقابل اندازه‌گیری (واحد‌های مختلف) توسعه یافته است. این روش، مسئله را در یک محیط فازی حل می‌کند که در آن معیارها و وزن‌ها می‌توانند مجموعه‌های فازی باشند. اعداد فازی مثلی برای کار کردن با مقادیر عددی مبهم و غیردقیق مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویکور فازی مبتنی بر جمع شدن قابلیت فازی است که نشان‌دهنده فاصله یک گزینه تا راه‌حل ایده‌آل می‌باشد. در زمینه طراحی الگوریتم ویکور فازی، عملیات و رویه‌های فازی برای رتبه‌بندی اعداد فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۲].

در زمان ارزیابی گزینه‌ها وضعیت‌هایی وجود دارند که باید با عدم دقت معیارهای تثبیت‌شده برخورد-کرد و طراحی یک مدل تصمیم‌گیری چند معیاره فازی برای رویارویی با اطلاعات کیفی (غیرقابل اندازه‌گیری یا زبانی) یا اطلاعات ناقص ضروری به نظر می‌رسد و ابهام و عدم دقت در

¹ Opricovic

MCDM را می‌توان با استفاده از نظریه مجموعه فازی جهت تعریف معیارها و تعیین میزان اهمیت آن‌ها مدل‌سازی کرد. تصمیم‌گیری در دنیای واقعی عمدتاً در محیطی روی می‌دهد که اهداف، محدودیت‌ها و پیامدهای اقدامات احتمالی به‌طور دقیق شناخته شده نیستند.

روش ویکور به‌عنوان یک روش MCDM برای حل یک مسئله چند معیاره گسسته با معیارهای متعارض و غیرقابل‌اندازه‌گیری توسعه‌یافته است. این روش بر رتبه‌بندی و انتخاب مجموعه‌ای از گزینه‌ها تمرکز دارد و راه‌حل‌های توافقی را برای یک مسئله با معیارهای متعارض مشخص می‌کند که می‌تواند به افراد تصمیم‌گیرنده در دست یافتن به تصمیم نهایی کمک نماید. راه‌حل توافقی راهکار ممکن است که نزدیک‌ترین راه‌حل به ایده‌آل می‌باشد. ویکور مبتنی بر نظریه‌های قدیمی برنامه‌ریزی سازشی است. بسط ویکور جهت تعیین راه‌حل توافقی فازی برای تصمیم‌گیری چندمعیاره در پژوهش اپریکویچ (۲۰۰۷) ارائه شده است [۴۳].

۲-۹-۱- الگوریتم روش ویکور فازی [۴۱]

روش ویکور فازی برای تعیین راه‌حل توافقی مسئله چندمعیاره فازی توسعه‌یافته است.

$$mco_j\{\tilde{f}_{ij}(A_j).j = 1. j).i = 1. n\} \quad \text{رابطه (۳۱-۲)}$$

که در آن j تعداد گزینه‌های ممکن؛ $A_j = \{X_1, X_2, \dots\}$ ، j امین گزینه به دست آمده با مقادیر معین متغیرهای سیستم x ؛ ij ارزش i مین تابع معیار برای گزینه A_j ؛ n تعداد معیارها؛ mco نشان‌دهنده عملگر یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب بهترین گزینه (توافقی) می‌باشد. گزینه‌ها را می‌توان ایجاد نمود و با مدل‌های ریاضیاتی، مدل‌های فیزیکی و یا به‌وسیله آزمایشات بر روی سیستم موجود یا دیگر سیستم‌های مشابه، مورد آزمون قرارداد. محدودیت‌ها به‌عنوان اهداف با اولویت بالا تلقی می‌شوند که باید در فرایند ارزیابی گزینه‌ها لحاظ شوند. در این بحث، اعداد فازی مثلثی با نماد $\tilde{f}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ نمایش داده می‌شوند. مجموعه معیارهایی که بار مثبت دارند

(سودمندی) با IB و مجموعه معیارهایی که بار منفی دارند (هزینه) با IC نشان داده می‌شوند.

در اینجا $|I^b UI^c| = n$ که نشان‌دهنده یک عدد اصلی است.

الگوریتم رتبه‌بندی ویکور دارای گام‌های ذیل است:

- تعیین مقادیر ایده‌آل $\tilde{f}_i^* = (I_i^* . m_i^* . u_i^*)$ و ایده‌آل منفی $\tilde{f}_i^0 = (I_i^0 . m_i^0 . u_i^0)$ برای هر معیار

$$\tilde{f}_i^* = \text{MAX}_j \tilde{f}_{ij} \text{ for } i \in I^b; \quad \text{رابطه (۳۲-۲)}$$

$$\tilde{f}_i^* = \text{MAX}_j \tilde{f}_{ij} \text{ for } i \in I^c. \quad \text{رابطه (۳۳-۲)}$$

-سنجش تفاضل فازی نرمال شده $\tilde{d}_{ij}$: $j = 1, \dots, J, i = 1, \dots, n$

$$\tilde{d}_{ij} = \tilde{f}_i^* \ominus \tilde{f}_{ij} / r_i^* - I_1^0 \text{ for } i \in I^b \quad \text{رابطه (۳۴-۲)}$$

$$\tilde{d}_{ij} = \tilde{f}_{ij}^* \ominus \tilde{f}_i / r_i^0 - I_1^* \text{ for } i \in I^c \quad \text{رابطه (۳۵-۲)}$$

-سنجش $\tilde{S}_j = (S_j^I . S_j^m . S_j^u)$ و $\tilde{R}_j = (R_j^I . R_j^m . R_j^u)$ با استفاده از روابط زیر:

$$\tilde{S}_j = \sum_{i=1}^n \oplus (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad \text{رابطه (۳۶-۲)}$$

$$\tilde{R}_j = \text{Max}_j (\tilde{w}_j \otimes \tilde{d}_{ij}) \quad \text{رابطه (۳۷-۲)}$$

که $\tilde{S}$ حاصل جمع موزون فازی می‌باشد، $\tilde{R}$ یک عملگر فازی Max است، $\tilde{w}_j$ وزن معیارها می‌باشد که نشان‌دهنده اهمیت نسبی معیارهاست.

-سنجش مقادیر $\tilde{Q}_j = (Q_j^I, Q_j^m, Q_j^u)$, $j = 1, 2, \dots, J$ با استفاده از رابطه زیر:

$$\tilde{Q}_j = v (\tilde{S}_j \ominus \tilde{S}^*) / (\tilde{S}^{0u} \ominus \tilde{S}^{*I}) \oplus (1 - v)(\tilde{R}_j \ominus \tilde{R}^*) / (\tilde{R}^{0u} \ominus \tilde{R}^{*I}) \quad \text{رابطه (۳۸-۲)}$$

که $\tilde{R}^{0u} = \text{Max}_j R_j^u$, $\tilde{R}^* = \text{MIN}_j \tilde{R}_j$, $\tilde{S}^{0u} = \text{Max}_j S_j^u$, $\tilde{S}^* = \text{MIN}_j \tilde{S}_j$ و V به عنوان وزن

اهمیت معیارهای مثبت (سودمندی) تلقی می شود. به طور مرسوم و به عنوان یک راهکار میانه از مقدار

$v = 0.5$ استفاده می شود اما می توان از روش های زیر نیز برای محاسبه v استفاده کرد.

$$V = (n + 1)/2n \quad \text{رابطه (۳۹-۲)}$$

$$V + 0.5(n - 1)/n = 1 \quad \text{رابطه (۴۰-۲)}$$

مقادیر بهینه S و R به ترتیب $\tilde{S}^*$ و $\tilde{R}^*$ نشان داده می شود.

رتبه بندی گزینه ها به واسطه طبقه بندی مقادیر هسته ای $j = 1, 2, \dots, J$ ، Q_j^m به ترتیب کاهنده صورت

می گیرد. مرتب سازی به دست آمده با $\{A\} Q^m$ نشان داده می شود.

جایگاه z ام رتبه بندی در $\{A\}_{Q^m}$ یک گزینه $j = 1, \dots, J$ ، $A(j)$ مورد تأیید است در صورتی که رابطه $Q^{(j)}$

$\text{MIN}_{K \in J} j$ برقرار باشد. در این رابطه $\tilde{Q}^{(k)} = \{j, j + 1, \dots\}$ مقدار فازی برای گزینه $A(k)$ در k

امین موقعیت در $\{A\}_{Q^m}$ به شمار می آید. مرتب سازی تأیید شده نشان دهنده رتبه بندی فازی دقیق

$\{A\}_{\tilde{Q}}$ است، اگرچه مجموعه $\{A\}_{\tilde{Q}}$ نمی تواند مرتب سازی کاملی باشد (این مجموعه ممکن است تا

اندازه ای رتبه بندی باشد).

الگوریتم پیشنهادی خود برای فازی زدایی از روش ساده زیر استفاده کرده است:

$$j = 1, \dots, J, \tilde{Q}_j, \tilde{R}_j, \tilde{S}_j$$

$$\text{Crisp}(\tilde{N}) = (2m + 1 + r)/4 \quad \text{رابطه (۲-۴۱)}$$

برای رتبه‌بندی گزینه‌ها از طبقه‌بندی با استفاده از مقادیر قطعی Q, R, S به ترتیب کاهنده استفاده می‌شود. نتایج سه فهرست رتبه‌بندی $\{A\}_Q, \{A\}_R, \{A\}_S$ هستند. در این زمینه درست مانند الگوریتم روش ویکور با مقادیر قطعی عمل می‌شود.

گزینه $A^{(1)}$ که در مجموعه $\{A\}_Q$ بهترین رتبه را دارد، بعنوان یک راه‌حل بهینه انتخاب می‌شود در صورتیکه دو شرط ذیل برقرار باشد:

شرط اول: مزیت قابل قبول

$$Adv \geq DQ$$

$$Adv = (Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) / Q(A^{(1)}) - Q(A^{(1)})) \quad \text{رابطه (۲-۴۲)}$$

$$\text{رابطه (۲-۴۳)}$$

$$DQ = 1/(J - 1)$$

شرط دوم: ثبات قابل قبول در تصمیم‌گیری

گزینه $A^{(1)}$ حداقل بر اساس S و R بهترین رتبه را داشته باشد.

اگر یکی از شروط برآورده نشود، آنگاه یک مجموعه از راه‌حل‌های توافقی پیشنهاد می‌شود که متشکل از: گزینه‌های $A^{(1)}$ و $A^{(2)}$ اگر تنها شرط دوم برآورده نشود، یا گزینه‌های $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(m)}$ اگر شرط اول برآورده نشود: $A^{(m)}$ بوسیله رابطه $Q(A^{(m)}) - Q(A^{(1)}) < DQ$ برای نقطه‌ای حداکثر M تعیین می‌شود (مکان‌های این گزینه‌ها در نزدیکی یکدیگر قرار دارند).

تعیین موازنه‌های قطعی، $tr_{ik} = (D_i w_k) / (D_k w_i)$ ، $k \neq i, k = 1, \dots, n$ که در آن tr_{ik} تعداد واحدهای معیار i ام می‌باشد که بصورت یک واحد از معیار k ام ارزیابی می‌شود:

$$W = \text{Crisp}(\tilde{w}) \quad D_i = r_i^0 - I_i^* \text{ for } i \in I^c, D_i = r_i^* - I_i^0 \text{ for } i \in I^b \quad \text{رابطه (۴۴-۲)}$$

که بوسیله فازی‌زدایی مورد استفاده در گام هفتم بدست می‌آیند. روش ویکور این موازنه‌ها را به‌عنوان نتیجه نرمال سازی بکار رفته در عملیات گام‌های مختلف این روش معرفی می‌کند. تصمیم گیرنده در صورتیکه با مقادیر محاسبه شده موافق نباشد ممکن است مقدار جدیدی از $tr_{ik} \quad k \neq i, k = 1, \dots, n$ بدست آورد. مقادیر جدید وزن‌ها بدین صورت محاسبه می‌شوند:

$$w_i = |(D_i w_k - tr_{ik}) / D_j|, k \neq i, k = 1, \dots, n \quad \text{رابطه (۴۵-۲)}$$

مقدار w_i مقدار قبلی وزن معیار i می‌باشد. سپس ویکور با استفاده از رابطه زیر رتبه بندی جدیدی از گام سوم انجام می‌شود.

$$\tilde{w}_j = (w_k, w_k, w_k), k=1, \dots, n \quad \text{رابطه (۴۶-۲)}$$

موازنه‌های تعیین شده می‌توانند به تصمیم‌گیرنده در ارزیابی مقادیر جدید کمک نمایند. در صورتی که موازنه‌های جدیدی صورت نگیرد، الگوریتم ویکور خاتمه می‌یابد.

۲-۱۰- روش ANP فازی

به جهت وابستگی معیارها در واقعیت، استفاده از روش‌های قدیمی و سنتی قابل به کارگیری ناست و استفاده از فرایندهای تحلیلی شبکه‌ای که در آن فرض وابستگی معیارها برقرار است، برای به دست آوردن مجموعه‌ای از وزن‌های مناسب برای معیارها پیشنهاد می‌شود.

شناخت کافی از هدف تصمیم‌گیری، محیط تصمیم و تمامی عناصر تصمیم‌گیری به‌وسیله تصمیم‌گیرنده بسیار حائز اهمیت است. تصمیم‌گیرنده باید بتواند همه ملاک‌های مؤثر در تصمیم را تعیین و تأثیر آن‌ها بر یکدیگر را مشخص و واقعی‌ترین حالتی از شبکه را رسم کند. مقایسه‌های زوجی بایستی اولویت واقعی عناصر نسبت به یکدیگر را نشان دهند، اما از آنجاکه این شناخت کافی از سیستم

همیشه موجود نیست و تصمیم‌گیرنده نمی‌تواند در حالت کلی با اطمینان کامل در مقایسه‌های زوجی قضاوت کند، بنابراین برای رفع این مشکل مدل تحلیل شبکه‌ای توسعه داده شده است. راه‌حل طبیعی برای انجام مقایسه‌ها در حالت‌های نبود قطعیت استفاده از مقایسه‌های فازی است که حالت‌های ابهام در مقایسه را مدل‌سازی می‌کند [۴۴، ۴۵].

فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی از تلفیق فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی و ماتریس تأثیرات وابستگی متقابل بین معیارها به دست می‌آید. فرایند تحلیل شبکه‌ای به این منظور توسعه یافته است که بدون در نظر گرفتن فرضیاتی درباره رابطه سلسله مراتبی یک‌طرفه بین سطوح تصمیم، شرایط واقعی‌تری را برای تصمیم‌گیری فراهم آورد. برای جایگزینی شکل خطی از بالا به پایین و اکیداً سلسله مراتبی مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی، مدل فرایند تحلیل شبکه‌ای ساختار شبکه‌ای انعطاف‌پذیری را در اختیار می‌گذارد. اهمیت نسبی یا توان اثرگذاری عنصر توسط مقیاس فاصله‌ای دوقطبی، مشابه فرایند تحلیل سلسله مراتبی اندازه‌گیری می‌شود [۴۶].

این روش در قیاس با روش با AHP قادر است روابط درونی بین سطح‌های مختلف از تصمیم و شاخص‌ها را با محاسبه ترکیب وزن‌ها، از طریق تشکیل سوپر ماتریس اداره کند. منظور از سوپر ماتریس در این روش، ماتریس تفکیک شده‌ای است که هر زیر ماتریس آن، از مجموعه‌ای از روابط بین دو عنصر یا خوشه در ساختار شبکه‌ای به وجود آمده باشد.

در راستای مطرح شدن بحث روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی، بسیاری از محققین تلاش نمودند تا از مفهوم تئوری مجموعه فازی در روش ANP بهره ببرند. به همین منظور روش‌های مختلفی برای انجام فرایند تحلیل شبکه‌ای فازی ارائه شده است. اما روش‌های مطرح شده معمولاً تنها بخش مقایسات زوجی را فازی لحاظ کرده و هنگام تشکیل سوپر ماتریس از وزن‌های قطعی استفاده می‌کنند. اگر روشی هم وجود داشته باشد که بتواند سوپر ماتریس را نیز فازی لحاظ کند به علت

دشواری محاسبات استقبال چندانی از آن نشده است.

۲-۱۱- نمودار پیش‌بینی-مساحت

یوسفی و کارانزا، نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت را برای وزن‌دهی به لایه‌های شاهد توسعه داده‌اند. در این روش از تابع لجستیک به منظور تخصیص امتیاز عضویت فازی به مقادیر پیوسته شواهد فضایی استفاده می‌گردد. تابع لجستیکی کل داده‌ها را به یک دامنه محدود [۰-۱] انتقال می‌دهد. مقادیر حاصل‌شده، محور افقی نمودار را شامل می‌شود. دو محور قائم در نمودار، درصد آنومالی‌های پیش‌بینی‌شده در منطقه و مساحت متناظر است. 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 [۶].

در تهیه مدل پتانسیل معدنی، مکان کانسارها و آنومالی‌های شناخته‌شده می‌تواند جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی کننده مورد استفاده قرار گیرد. این امر با همپوشانی مکان‌های ذخایر معدنی در یک مدل هدفمند اکتشافی طبقه‌بندی شده به دست می‌آید [۶، ۴۷، ۴۸].

در یک نمودار پیش‌بینی-مساحت از یک لایه شاهد، دو منحنی وجود دارد. منحنی مربوط به نرخ پیش‌بینی کانی‌سازی‌های شناخته‌شده در منطقه و منحنی مربوط به درصد ناحیه اشغال‌شده توسط آنومالی‌های موجود می‌باشد. در نمودار P-A برای یک لایه، اگر نمودار در نقطه عطف، مقدار محور عمودی بیشتری را برای منحنی چپ نشان دهد (نرخ پیش‌بینی بیشتری باشد)، پس دارای کمترین مقدار درصد مساحت دربرگیرنده بوده و این لایه بیشترین وزن را خواهد داشت زیرا مجموع مقدار نرخ پیش‌بینی و مساحت دربرگیرنده در نقطه تلاقی برابر ۱۰۰ است. با ترسیم نمودار P-A، هر دو پارامتر نرخ پیش‌بینی و مساحت دربرگیرنده از اهداف اکتشافی در ارزیابی مدل‌ها، دخالت داده می‌شوند و این

باعث بالا رفتن دقت وزن‌های تخصیص یافته می‌گردد. از آنجاکه هدف، اختصاص وزن به هر شاخص است، نسبت نرخ پیش‌بینی به مساحت اشغال‌شده مربوطه از طریق معادله زیر تعیین می‌شود:

$$N_d = P_r / O_a$$

$$W_I = \ln N_d \quad \text{رابطه (۲-۴۸)}$$

در این روابط، N_d چگالی نرمال شده، P_r نرخ پیش‌بینی و O_a مساحت اشغال‌شده 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

فصل سوم

زمین‌شناسی منطقه

و

داده‌های تحقیق

۳-۱- زمین‌شناسی محدوده

بلوک پشت بادام در خرد قاره ایران مرکزی - شرقی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زون‌های کشور ایران شناخته می‌شود که میزبان بسیاری از کانسارهای آهن - آپاتیت، آهن - منگنز و فلزات سنگین روی - سرب می‌باشد. کانسارهای آهن در منطقه بافق به علت سن مشابه تشکیل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی مرتبط با سنگ میزبان، تشکیل شده‌اند. کانه زایی مگنتیت - آپاتیت عمدتاً به‌صورت کانسارهای توده‌ای و متاسوماتیسم کننده، همراه با عناصر نادر خاکی کمیاب و کانه زایی اورانیوم محیطی رخ می‌دهد. در سال‌های اخیر، نهشته‌های این تیپ به‌طور کلی به کانسارهای اکسید آهن (ویلیامز) یا غنی از فسفر (گرووز) اشاره دارند. علاوه بر سنگ‌های آتشفشانی، سایر میزبان‌های سنگ معدن آهن غنی از فسفر، سنگ‌آهک و دولومیت هستند. لایه‌هایی از دولومیت، هماتیت و گوتیت در ارتفاعات شرقی این ناحیه وجود دارد. منطقه معدنی بافق در وسط کمان آتشفشانی - نفوذی کرمان - سیرجان قرار دارد. این کمان ماگمایی میزبان کانسارهای مگنتیت - آپاتیت دار مهم است و به‌صورت یک منطقه شکاف باریک از پشت بادام در شمال تا بافق در جنوب امتداد دارد. مجموعه وسیعی از سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و ماگمایی در ساختار زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه شرکت کردند. بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی و بررسی‌های صحرایی، سه مجموعه از کامبرین پیشین-کامبرین، کامبرین-ترشیری و کواترنری در منطقه وجود دارد. سازندهای پرکامبرین عمدتاً در جنوب خاور شهرستان بافق واقع شده است. این سنگ‌ها شامل ریولیت، سنگ‌های کریستالی، گنیس، سنگ‌های سبز و مرمر هستند [۴۹، ۵۰]. بیشتر ذخایر کانسنگ آهن ایران در منطقه بافق در مرکز ایران واقع شده است که به‌طور گسترده در طول دهه‌های ۱۹۶۰ و ۷۰ میلادی در یک پروژه همکاری ایران و روسیه بررسی شده است. ذخایر منفرد تا چند صد تن کانسنگ آهن با مقادیر متغیر آپاتیت افزایش می‌یابد. کانسارهای آهن منطقه بافق با توده‌های نفوذی و توده‌های نفوذی سطح بالا همراه بوده و یک مجموعه کانی‌های غنی از سولفید قلع با مقادیر مختلف از هماتیت و اکتینولیت دارند. این مجموعه

مشابه کانسارهای آهن کانه دار در شمال سوئد است که از آنجا این کانسنگ‌ها به‌عنوان " تیپ کایرونا " شناخته‌شده‌اند [۵۱].

قدیمی‌ترین واحدهای منطقه مربوط به دوره پرکامبرین بوده که مجموعه‌ای از سنگ‌های دگرگونی شامل شیست، گنایس، مرمر و آمفیبولیت را در برمی‌گیرد. قدیمی‌ترین واحدهای رسوبی موجود در منطقه، مجموعه‌ای از شیل و ماسه‌سنگ اسلیتی و فیلیتی است که توسط نهشته‌های کربناته-آتشفشانی مربوط به پرکامبرین -کامبرین زیرین پوشانده شده‌اند. رسوبات پرمین با رخساره آهکی رخنمون دارند. واحدهای تریاس به شکل دگرشیب روی رسوبات پرمین جای گرفته‌اند و شامل شیل، سنگ آهک‌های نازک لایه، دولومیت، ماسه‌سنگ و گچ هستند. واحدهای ژوراسیک بیشتر شامل شیل-های میکادار، ماسه‌سنگ‌های کوارتزی و شیل‌های زغال‌دار به همراه آثار گیاهی است. سنگ‌های کرتاسه به‌طور دگرشیب روی واحدهای کهن جای می‌گیرند و شامل کنگلومرا، مارن، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک نازک تا سستبرلایه هستند. رسوبات ترشیری و کواترنری بیشتر شامل مجموعه‌هایی از کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آبرفت‌های جوان هستند. توده‌های نفوذی موجود در منطقه شامل گرانیت‌های زیرگان، ناریگان، بهاباد و سینیت اسفوردی و مجموعه‌ای از دایک‌های دیوریتی و گابرویی هستند [۵۲]. ناحیه معدنی بافق در ایران مرکزی یکی از بزرگترین نواحی دارای ذخایر آهن کشور با ذخیره‌ای حدود ۷۵۰ میلیون تن است. این منطقه حدود ۱۰۰ سال است که مورد توجه زمین‌شناسان از اقصی نقاط دنیا قرار گرفته است، برای نخستین بار ویلیامز^۱، مذاب ماگمایی را به عنوان منشأ کانسار چفارت پیشنهاد کرد و با قرار دادن آن در ردیف کانسارهای نوع کایرونا، برای اولین بار به حضور آپاتیت به عنوان کانی همراه ذخایر آهن اشاره نمود [۵۳].

کانه‌زایی‌های مختلف به ویژه آهن، سرب و روی در منطقه بافق مرتبط با فعالیت‌های آتشفشانی قلیایی و زمین‌ساخت کششی رخ داده در آن محیط است. منطقه بافق، طی دوره‌ای از فعالیت‌های

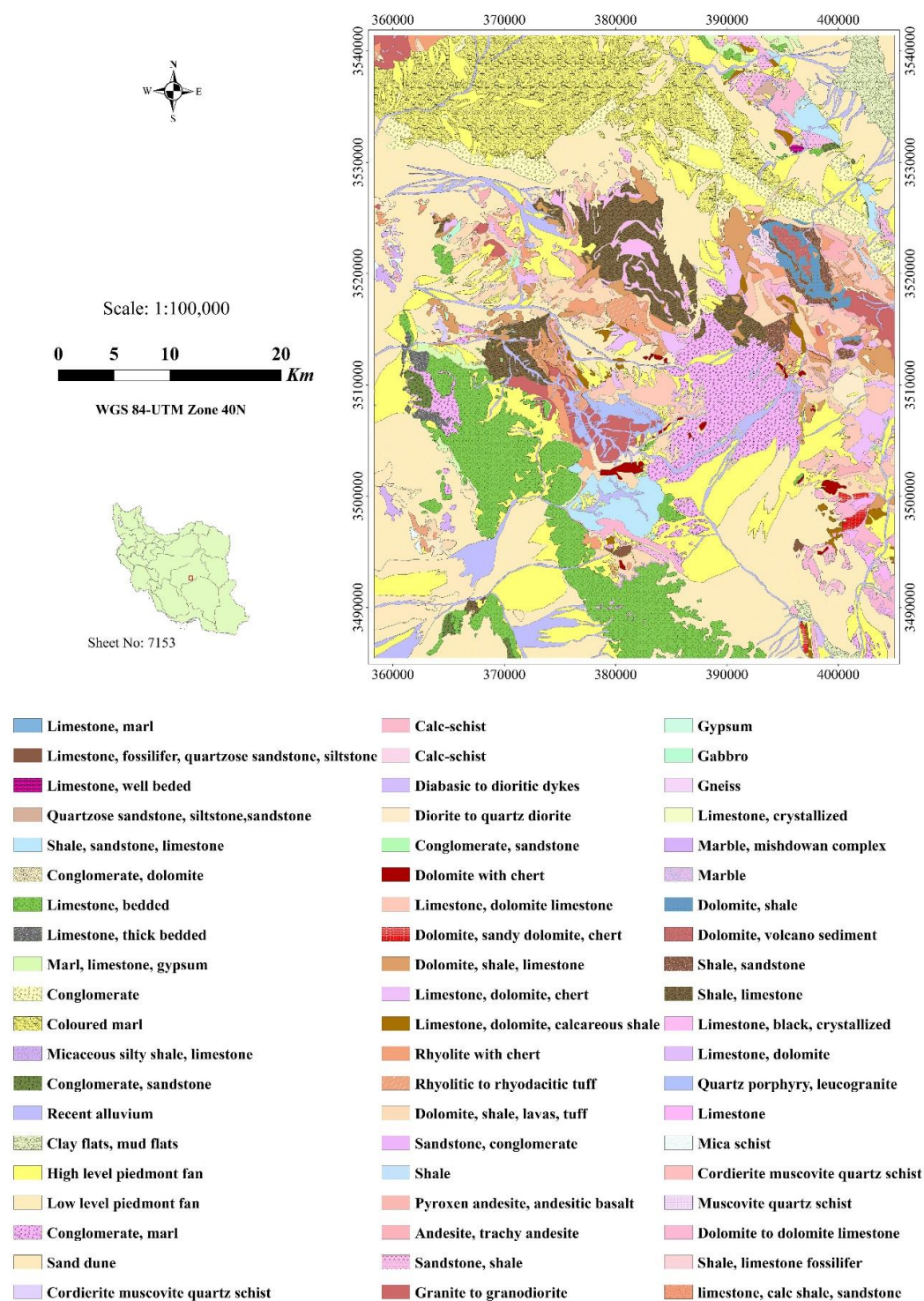
¹ Williams

زمین‌ساختی همراه با فعالیت دوباره گسل‌های همزمان با رسوب‌گذاری، رسوبات آواری ناشی از فعالیت گسل‌ها، جایگزینی سنگ‌های آتشفشانی ریولیتی، فرونشست رسوبات کافتی و ته‌نشست سازند اسفوردی تشکیل شده است [۵۴، ۵۵]. براساس مطالعات دلیران و همکاران (۲۰۰۷)، کانسارهای آهن-آپاتیت منطقه بافق از نوع ماگمایی کایرونا و مرتبط با سنگ‌های اسیدی می‌باشند. بنابراین در این ناحیه نیز کانی‌زایی آهن، آپاتیت و عناصر نادر خاکی همانند سایر کانسارهای مشابه دنیا منشأ گرمایی دارند. بررسی سنگ‌های آذرین و دگرگونی ناحیه‌ای ساغند و کاشمر-کرمان و همچنین گرانیتهای پی‌سنگ ایران مرکزی، نشان دهنده نبود رخداد کافت درون قاره‌ای در این منطقه بوده و معرف موقعیت فعالیت ماگمایی کمانی از نوع آند است [۵۶، ۵۷].

از لحاظ ساختاری، این منطقه جزء پهنه ایران مرکزی، زیر پهنه بافق-پشت بادام است. کهن‌ترین سنگ‌های این ناحیه مربوط به پرکامبرین است که مجموعه‌هایی از سنگ‌های دگرگونی شیست، گنایس، مرمر و آمفیبولیت را شامل می‌شود. رسوبات ترشیری و کواترنری بیشتر شامل مجموعه‌هایی از کنگلومرا، ماسه سنگ و آبرفت‌های جوان هستند. توده‌های نفوذی موجود در منطقه شامل گرانیتهای زیرگان، ناریگان، بهاباد و سینیت اسفوردی و مجموعه‌ای از دایک‌های دیوریتی و گابرویی هستند [۵۸]. این پهنه به وسیله گسل‌های بافق-پشت بادام، کلرد، کاشمر و کوهبنان محدود شده است. ایالت فلرزایی بافق-ساغند در مرکز این پهنه و میان دو گسل کوهبنان در شرق و بافق-پشت بادام در غرب واقع شده است. کانسارهای اکسید آهن-آپاتیت در پهنه بافق به شکل توده‌ای، جانشینی رگه‌ای و استوک‌ورک تشکیل شده‌اند. کانسنگ‌های آهن، توده‌های گنبدی شکل نامنظم تا منظمی را ایجاد کرده‌اند که بیشتر به صورت لنز و توده‌های بی‌شکل مگنتیت نمایان شده و با سنگ میزبان دارای مجموعه‌ای از مگنتیت‌های برشی شده و افشان در برگرفته شده‌اند. در این معادن مگنتیت فراوان‌ترین کانی آهن است که گاه مارتیتی شده است و پس از آن کانی‌های اکتینولیت و آپاتیت به وجود آمده‌اند. توده‌های مگنتیت در برخی از رخنمون‌ها به صورت استوک‌ورک‌های حاوی مگنتیت، آپاتیت و

اکتینولیت دیده می‌شود. این توده‌ها دارای مرز تدریجی با سنگ میزبان هستند و مرزهای کاملاً مشخص کانسنگ و سنگ میزبان به وسیله کنترل کننده‌های ساختاری ایجاد شده است [۵۶، ۵۸]. بر اساس نقشه‌برداری زمین‌شناسی و تحقیقات صورت گرفته، مجموعه سنگ‌های پرکامبرین، کامبرین و کواترنر در این ناحیه وجود دارد [۵۸]. تشکیلات پرکامبرین عمدتاً در جنوب سه‌چاهون، در شمال-شرقی بافق ایجاد شده است. کهن‌ترین سنگ‌های این ناحیه مربوط به پرکامبرین است که مجموعه-هایی از سنگ‌های دگرگونی شیست، گنایس، مرمر و آمفیبولیت را شامل می‌شود. رسوبات ترشیری و کواترنری بیشتر شامل مجموعه‌هایی از کنگلومرا، ماسه سنگ و آبرفت‌های جوان هستند. توده‌های نفوذی موجود در منطقه شامل گرانیت‌های زیرگان، ناریگان، بهاباد و سینیت اسفوردی و مجموعه‌ای از دایک‌های دیوریتی و گابرویی هستند [۵۶، ۵۷].

برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی در ناحیه بافق-پشت بادام قرار گرفته است. رسوبات این منطقه متعلق به کامبرین بالایی و پرکامبرین پایینی همراه با مقادیر کم ماسه‌سنگ در رسوبات قدیمی قرار دارند و از دو قسمت زیرین و فوقانی تشکیل شده‌اند. قسمت زیرین شامل دولومیت، سنگ آهک، شیل و ماسه سنگ، گدازه‌های اسیدی و شیل آهکی است و قسمت فوقانی اغلب کربنات‌ها را شامل می‌شود. کانی-سازی هیدروترمال مگنتیت-آپاتیت عمدتاً به عنوان ماده معدنی غالب در این ناحیه و جایگزینی‌های متاسوماتیک از عناصر خاکی کمیاب و کانی‌سازی اورانیوم اتفاق افتاده است. ذخایر سنگ‌آهن این منطقه با سنگ‌های آتشفشانی رسوبی و نفوذی‌های درجه بالا همراه است و دارای یک مجموعه معدنی فقیر سولفید از مگنتیت کم تیتانیوم ($\pm$ هماتیت) است. معدن آپاتیت-مگنتیت اسفوردی در ۳۵ کیلومتری شمال شرقی شهر بافق واقع شده است. معدن فسفات اسفوردی در اوایل دهه ۱۹۷۰ به دلیل پتانسیل سنگ‌آهن موجود در آن مورد بررسی قرار گرفت اما به دلیل وجود درصد بالایی از ماده معدنی آپاتیت به عنوان پتانسیل فسفات مطرح و معروف است. نقشه واحدهای زمین‌شناسی باز تولید شده محدوده برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی در شکل (۳-۱) آورده شده است.



شکل (۳-۱) نقشه واحدهای زمین‌شناسی در محدوده مطالعه (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی)

۳-۲- آماده سازی لایه ها

در این بخش چگونگی آماده سازی و پردازش داده های مربوط به هر یک از لایه های اطلاعاتی، شامل زمین شناسی، دورسنجی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی توضیح داده شده است. در این پژوهش از چهار نوع داده شامل، داده های ژئوشیمیایی (رسوبات آبراهه ای)، ژئوفیزیکی (مغناطیس هوا برد)، تصاویر ماهواره- ای و زمین شناسی استفاده شده است. بر اساس این داده ها، هشت معیار (لایه) تهیه شده و جهت تلفیق نهایی مورد استفاده قرار گرفته اند. هشت لایه اکتشافی شامل: آنومالی Fe_2O_3 ، آنومالی TiO_2 ، توده مغناطیسی (لایه سیگنال تحلیلی)، دگرسانی (فیلیک)، اکسیدهای آهن، گوسان، گسل ها و سنگ میزبان می باشند که جهت انجام تلفیق و تهیه نقشه پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار گرفته اند. لازم به ذکر است که لایه های دیگری همچون دگرسانی های آرژیلیک و پروپیلیتیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند اما در تلفیق نهایی شرکت داده نشده اند. استفاده از روش یا پارامترهای نه چندان صحیح موجب اخذ نقشه های پتانسیلی خواهد شد که متفاوت با واقعیت خواهند بود. این مساله به ظاهر ساده جز مهمترین و حساسترین مرحله کار تهیه نقشه های پتانسیل معدنی است.

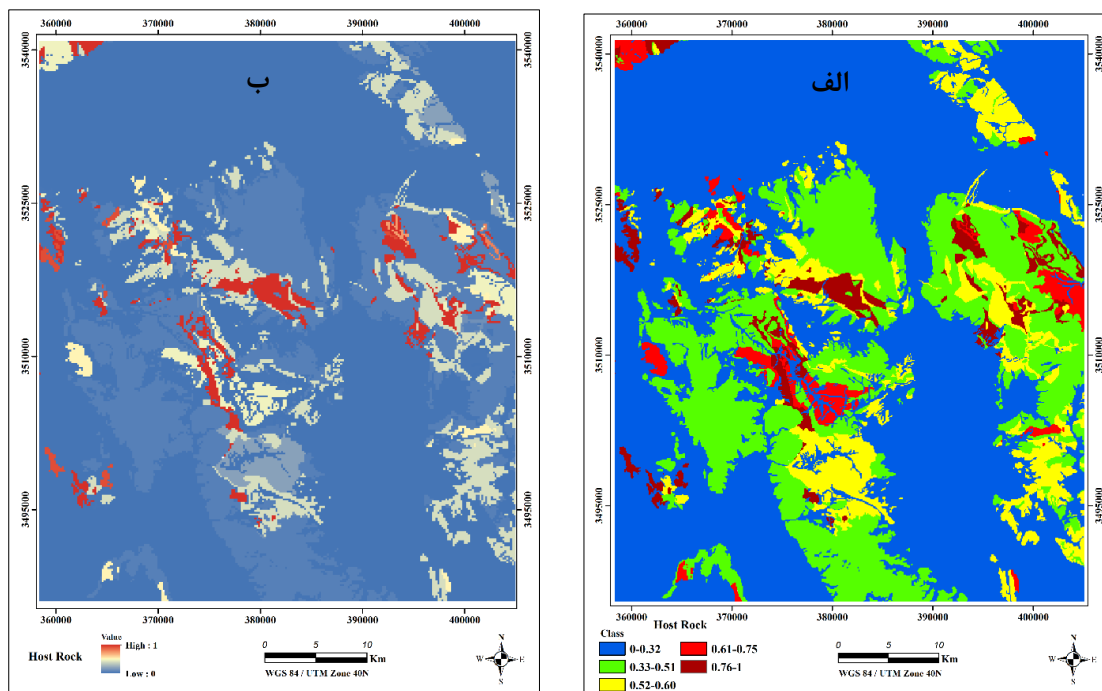
۳-۳- واحدهای زمین شناسی

از لایه های بسیار مهم در تهیه نقشه پتانسیل معدنی، لایه واحدهای زمین شناسی و یا سنگ میزبان کانی زایی است. با استفاده از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ برگه اسفوردی، واحدهای زمین شناسی تفکیک و پتانسیل هر کدام از واحدها در کانی زایی آهن مورد ارزیابی قرار گرفت. بر همین اساس و با مشورت با زمین شناسان و به ویژه زمین شناسان اقتصادی، واحدهای زمین شناسی این برگه بر حسب پتانسیل کانی زایی آهن امتیازدهی شدند. در جدول (۳-۱) پتانسیل کانی زایی های مختلف واحدهای زمین- شناسی محدوده آورده شده است. بر همین اساس نقشه کلاس بندی و فازی شده واحدهای زمین- شناسی تهیه و در شکل (۳-۲) الف و ب به ترتیب نمایش داده شده است.

جدول (۱-۳) پتانسیل واحدهای زمین‌شناسی محدوده در میزبانی انواع کانی‌زایی

نماد	واحد زمین‌شناسی	پتانسیل کانی‌زایی
S ¹	limestone, calc shale, sandstone	Pb - Zn - Ag - Au - Cu
O ^{sh}	Micaceous silty shale, limestone	Fe - Au - Pb - Zn - Ag
E ^d _m	Dolomite, sandy dolomite, chert	Pb - Zn - Au - Ag - Fe - Ba
E _m	Limestone, dolomite, calcareous shale	Pb - Zn - Au - Ag - Fe - Ba
E ^c	Conglomerate, chert, sandstone	Au - Ag - Pb - Zn - Fe
E _{z1}	Sandstone, shale	Pb - Zn - Ag - Ba - Au - Fe
E _{bt}	Dolomite, limestone, silty shale, sandstone	Pb - Zn - Ag - Au
E ^{v2}	Andesite, trachy andesite	Cu - Au - Ag - Fe - Pb - Zn
E ^{1d}	limestone + dolomite	Pb - Zn - Ag - Ba - Au
E ¹	Limestone, dolomite, chert	Pb - Zn - Ag - Au
E ^{sh}	Shale	Au - Fe - Ag - Pb - Zn
E ^{rt}	Rhyolitic to rhyodacitic tuff	Fe - Au - Cu - Sn - W - Pb - Zn
E _r	Rhyolite with chert	Fe - P - Au
E ^d	Dolomite, chert	Pb - Zn - Ag
E ^{dsh}	Dolomite, shale, limestone	Pb - Zn - Cu - Ag - Au - Ba
E ^{vl}	Pyx Andesite + pyx basalt	Cu - Au - Mo - Ag - Pb - Zn - Fe
E _{rz}	Dolomite, shale, lavas, tuff	Au - Ag - Ba - Pb - Zn - Fe
E ^s	Detrital	Cu - Zn - Pb - Ba - Ag
PE ^{sh}	Shale + sandstone	Zn - Pb - Au - Ag - Ba
PE _d	Dolomite, shale	Pb - Zn - Ba - Au - Ag
PE _{dv}	Dolomite + volcano sediment	Zn - Pb - Ag - Ba - Au
PE _{t1}	Detrital, shale, limestone	Pb - Zn - Ag - Ba - Au
PE _t	Detrital, shale, limestone	Pb - Zn - Ag - Ba - Au
G	Granite to granodiorite	Cu - Au - Mo - W - Sn - Ag - Fe - Zn - Pb
qp	Quartz porphyry, leucogranite	Cu - Mo - Au
Sy	syenite	Fe - Cu - Mo - W - Sn - Au

Di	Diorite to quartz diorite	Cu – Mo – Au
Gb	Gabbro	Fe
1 ⁿ	Limestone, neden complex	Fe – Pb – Zn – Cu – Au
C ⁿ _s	Calc schist	Fe – Au – Pb – Zn – Cu
Sch ⁿ²	Quartz schist	Au – Fe – Pb – Zn – Ag – Cu
Sch ⁿ¹	Cordierite muscovite quartz schist	Fe – Au – Pb – Zn – Ag – Cu
Mb ⁿ	Marble	Fe – Au – Pb – Zn – Ag – Cu
Mb	Marbel , mishdowan complex	Fe – Au – Cu – Pb – Zn
Qu	Quartzite	Au – Cu – Pb – Zn – Fe
Cs	Calc schist	Fe – Au – Cu – Pb – Zn – Ag
?	Mica schist	Fe – Au – Cu – Pb – Zn – W – U – Sn
Gn	Gneiss	Au – Sn – U – W – Fe
P ^c ₁	Conglomerate, sandstone	Placer?
K ¹ ₂	Limestone	Pb – Zn – Ag – Ba – Au
K ¹ ₁	Limestone	Pb – Zn – Ba – Ag - Au
K ^m _i	Marl, limestone, gypsum	Au – Pb – Zn – gypsum
K ^c ₁	Conglomerate, dolomite	Au – Cu – Pb – Zn
J _s	Shale, sandstone, limestone	Cu – Pb – Zn – Ba – W
TR _{nshl}	Shale, limestone	Pb – Zn – Cu – Au – Ag – Fe
TR _s	Limestone	Pb – Zn – Au – Ag – Ba
TR ^g ₃	Gypsum	gypsum
TR _{sh}	Dolomite, limestone	Pb – Zn – Au – Ag – Fe
TR ₂	Limestone, marl	Au – Ag – Pb – Zn – Fe
TR ₁	Shale, sand, conglomerate	Cu – Au – Pb – Zn – Ag – W
P ^{1d}	Limestone to dolomite	Pb – Zn – Au – Ag – Fe – Ba
D ¹²	Limestone	Pb – Zn – Ba – Au – Ag – Fe
D ^s	Sandstone, siltstone	Zn – Pb – Ag – Cu – Co
D ¹¹	Limestone	Pb – Zn – Ba – Ag – Au



شکل (۲-۳) نقشه واحدهای زمین‌شناسی محدوده: الف- کلاس‌بندی شده. ب- فازی شده

۳-۴- دورسنجی

با توجه به کارایی تصاویر ماهواره‌ای، در این پژوهش از سه نوع تصویر ماهواره‌ای شامل سنتینل-۲^۱، لندست-۸^۲ و استر^۳ جهت شناسایی مناطق دگرسان شده و با پتانسیل بالای کانی‌زایی استفاده شده است. تصاویر ماهواره‌ای پوشش دهنده برگه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی، از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا^۴ دانلود شدند که با توجه محل قرارگیری برگه اسفوردی، دو فریم تصویر سنتینل-۲، یک فریم تصویر لندست-۸ و سه فریم تصویر استر جهت پوشش برگه اسفوردی اخذ شد. این تصاویر به نحوی انتخاب شدند که پوشش ابر آن‌ها صفر درصد باشد. دو فریم تصویر سنتینل-۲ به شماره تصویر T40SCA و T40RCV به تواریخ ۲۰ آگوست ۲۰۱۸ و ۳۱ جولای ۲۰۱۸، تصویر لندست-۸ به شماره ردیف و گذر ۰۳۸-۱۶۱ و تاریخ ۲۴ جولای ۲۰۱۹ و سه فریم تصویر استر به تواریخ ۱۰ آگوست ۲۰۰۱ (دو فریم) و ۲۵ جولای ۲۰۰۱ اخذ شد.

^۱ Sentinel-2

^۲ Landsat-8

^۳ ASTER

^۴ <https://earthexplorer.usgs.gov/>

۳-۴-۱- پیش پردازش تصاویر

به منظور اخذ اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای لازم است قبل از استفاده از آن‌ها پردازش‌هایی به منظور تصحیح و بارز نمودن تغییرات صورت گیرد. امواج الکترومغناطیس که توسط سنجنده‌ها دریافت می‌شوند پس از عبور از جو به سنجنده‌ها می‌رسند. در اثر عبور امواج الکترومغناطیس از جو، فعل و انفعالاتی صورت می‌گیرد که باعث تغییر در میزان انرژی رسیده به سنجنده می‌شود. اتمسفر بر روی طول موج‌های کوتاه‌تر از 0.5 میکرومتر، بیشترین و طول موج‌های بلندتر، کمترین تأثیر پراکنشی را دارد [۵۹، ۶۰].

با توجه به سطوح پردازشی تصاویر (L1T) مورد استفاده در این تحقیق، جهت تصحیح این تصاویر از تصحیحات اتمسفری برای پیش‌پردازش آن‌ها استفاده شد. از تصحیح اتمسفری ^۱FLAASH در تصاویر لندست-۸ و استر بهره برده شد و تصویر سنتینل-۲ با استفاده نرم افزار ^۲SNAP و افزونه Sen2cor تصحیح شد و بدین ترتیب سطح پردازشی همه تصاویر از سطح بالای جو (Top of Atmosphere) به سطح زمین-پایین تر از اتمسفر (Bottom of Atmosphere) رسانده شد.

۳-۴-۲- ماسک پوشش گیاهی

وجود پوشش گیاهی در مناطقی که برای مطالعات اکتشافی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای انتخاب می‌گردند به عنوان یک عامل مزاحم تلقی می‌گردد [۶۰، ۶۱] چرا که طیف‌های مشابهی مابین پوشش گیاهی و برخی کانی‌ها مانند کانی‌های کربناته و یا رسی وجود دارد لذا حذف اثر این عامل به عنوان پارامتری اساسی قبل از انجام آنالیزهای دورسنجی مطرح است. با شناسایی این واحدها می‌توان محدوده‌های دربرگیرنده گیاهان را از تمامی باندهای داده ماهواره‌ای حذف نمود که این مرحله با ماسک کردن اطلاعات باندی صورت می‌گیرد. ابتدا مناطق حاوی پوشش گیاهی بارزسازی و سپس با استفاده از عملیات ماسک کردن در هر یک از تصاویر، مناطقی که دارای پوشش گیاهی هستند به

^۱ Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes

^۲ Sentinel Application Platforms

عنوان پیکسل‌های تیره در نظر گرفته شد و بدین ترتیب در پردازش‌ها (مانند نسبت‌های باندی) این پیکسل‌ها به صورت تیره نمایان خواهند شد و اثری بر نتایج نخواهند گذاشت.

۳-۴-۳- پردازش تصاویر

جهت پردازش داده‌های ماهواره‌ای از روش‌های نسب‌باندی^۱، ترکیبات‌رنگی‌کاذب^۲، آنالیز مؤلفه‌های اصلی^۳ و فیلتراسیون جهت‌دار^۴ استفاده شده است.

۳-۴-۳-۱- نسبت باندی

تصاویر نسبتی یا نسبت‌های باندی از شیوه‌های بسیار مفید جهت بارزسازی پدیده‌ها در تصاویر چند باندی محسوب می‌شوند [۶۲]. از این روش برای کاهش تأثیر روشنایی خورشید، توپوگرافی و بارزسازی اطلاعات طیفی در تصاویر استفاده می‌شود. مهمترین مزیت کاربرد نسبت‌های باندی، تهیه تصویری است که کاملاً مستقل از شرایط روشنایی است [۶۳]. این روش در به نقشه درآوردن گیاهان، رس‌ها، برخی از سنگ‌ها و تشخیص زون‌های دگرسانی گرمایی استفاده می‌شود [۶۴].

۳-۴-۳-۲- ترکیبات رنگی کاذب

از آنجا که اغلب تصاویر ماهواره‌ای به شکل چند باندی در دسترس قرار دارند، تجزیه و تحلیل یک باند به تنهایی نمی‌تواند حداکثر اطلاعات را در اختیار قرار دهد. فهم روابط بین طول موج‌های متفاوت در تشخیص پدیده‌ها و نوع پوشش منطقه بسیار مهم است. این دیدگاه در به تصویر کشیدن بیش از یک باند بر روی سامانه‌های پردازش تصویر و تولید تصاویر چند باندی سودمند خواهد بود. استفاده از این شیوه در تهیه تصاویر رنگی مرکب متداول است که در آن سه باند متفاوت به سه رنگ سرخ، سبز و آبی نسبت داده می‌شود [۶۵]. بر این اساس، ترکیبات رنگی متعددی که می‌توان از یک تصویر چند باندی بدست آورد بسیار زیاد خواهد بود.

¹ Band Ratio

² False Color Composite

³ Principal Component Analysis

⁴ Direction Filter

۳-۴-۳- آنالیز مؤلفه‌های اصلی

آنالیز مؤلفه اصلی یک روش آماری چند متغیره است که جهت تقلیل حجم داده‌ها استفاده می‌شود. اطلاعات باندهای مختلف تصاویر چند طیفی در سنجش از دور، غالباً همبستگی دارند. معمولاً همبستگی منفی مابین باندهای مرئی و مادون قرمز و مثبت بین باندهای مرئی بر روی پوشش‌های خاکی و سنگی وجود دارد. وجود همبستگی مابین تصاویر باندهای چند طیفی حکایت از وجود اطلاعات مشترک و یا به عبارت دیگر تکرار اطلاعات است. وجود اطلاعات مشترک در باندها بصورت همبستگی مابین آنها آشکار می‌شود [۶۶-۶۹].

آنالیز مؤلفه‌های اصلی در اصل جهت فشردگی داده‌ها بکار می‌رود ولی در سنجش از دور جهت حذف اطلاعات تکراری یا اضافی طیفی و متمرکز کردن اطلاعات چند باند که کم و بیش دارای همبستگی هستند در یک باند با واریانس بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. از روش مؤلفه‌های اصلی جهت نقشه‌برداری برخی از کانی‌ها استفاده می‌شود. آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات بسیاری از محققین دیده شده است [۷۰-۷۲]. این روش برای جداسازی مناطق دگرسان شده گرمابی بسیار موفقیت آمیز است و به طور گسترده برای آشکارسازی دگرسانی‌ها در ایالت‌ها و کمربندهای فلزایی استفاده شده است. این روش در حالت کلی به دو صورت به کار گرفته می‌شود:

۱- آنالیز مؤلفه‌های اصلی استاندارد

۲- آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی مرسوم به کراستا (Crosta)

در حالت اول تمامی باندهای یک تصویر در آنالیز شرکت داده خواهد شد و در حالت دوم باندهای مهم و تأثیرگذار در یک مورد خاص انتخاب و در فرآیند آورده می‌شود که با این کار دقت عملیات بالاتر و حجم آن کاهش خواهد یافت.

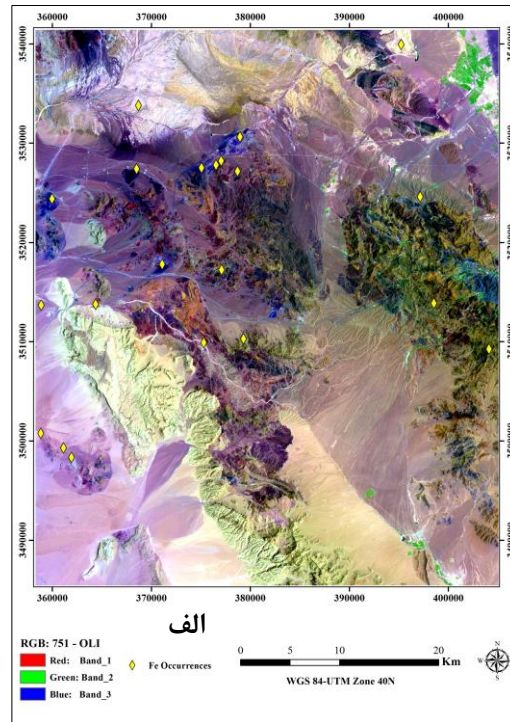
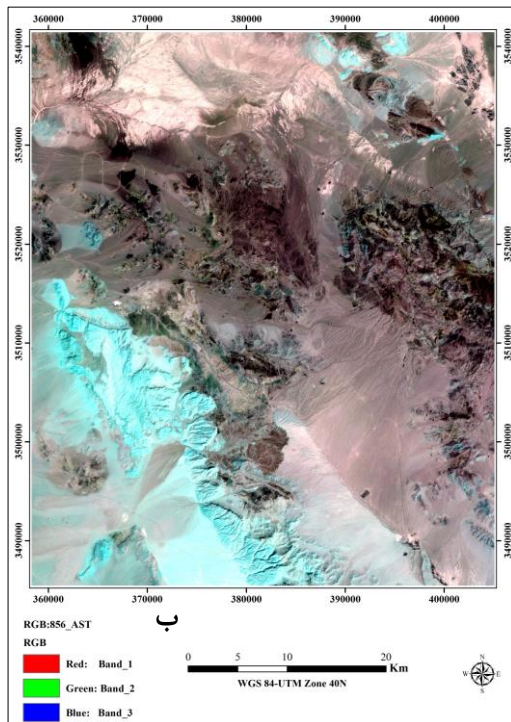
۳-۴-۳-۴- فیلترگذاری

فیلترهای مکانی یا فراوانی مکانی به تغییرات عددی در میزان روشنایی در واحد فاصله برای هر بخش خاص از یک تصویر گفته می‌شود. فیلترها به وسیله تولید یک دسته از وزن‌ها به پیکسل‌های متناظر نسبت به پیکسل‌های مجاور تولید می‌شوند [۷۳].

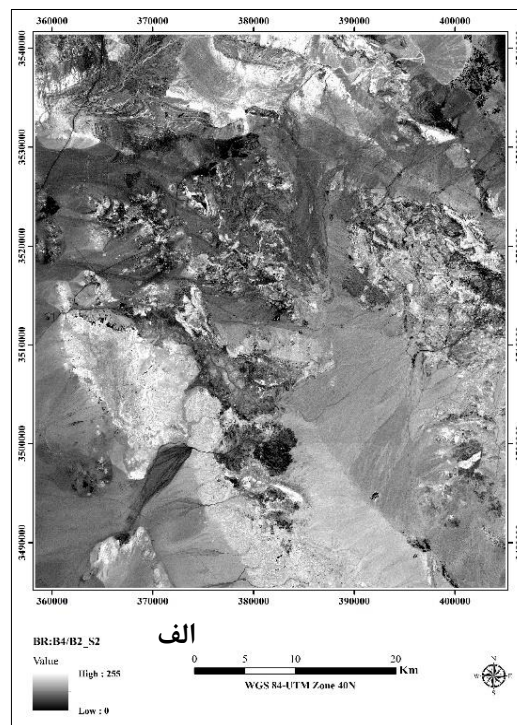
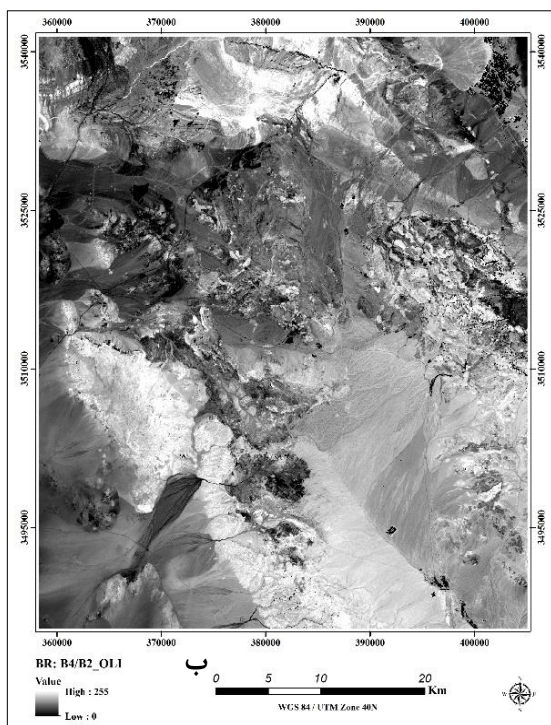
استخراج خطواره از روی تصاویر ماهواره‌ای، بسیار حائز اهمیت است زیرا نسبت به عکس‌های هوایی دارای ابعاد وسیع‌تر و تنوع طیفی بیشتری است. استخراج خطواره از روی تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند به شیوه‌های گوناگون انجام پذیرد که شامل روش‌های اتوماتیک، دستی و نیمه اتوماتیک است [۷۳-۷۵].

۳-۴-۴- تهیه لایه‌های دورسنجی

جهت تفکیک لیتولوژی‌ها، در بسیاری از تحقیقات قبلی از ترکیب رنگی RGB 741 در تصاویر لندست-۸ استفاده شده است [۷۶, ۷۷]. اگر بجای باند ۴ از باند ۵ استفاده شود تفکیک بهتری حاصل می‌شود که در آن پوشش‌های گیاهی به رنگ سبز روشن، اکسیدهای آهن به رنگ زرد متمایل به قهوه‌ای و ماسه‌سنگ‌های قرمز به رنگ سبز تیره نمایان خواهند شد. ترکیب رنگی RGB 856 در تصاویر استر از ترکیبات پرکاربرد در شناسایی کربنات‌ها است [۷۸]. نتیجه آن، بارزسازی کربنات‌ها و مناطق آهکی به رنگ آبی روشن (فیروزه‌ای) خواهد بود. ترکیب رنگی RGB 751 از تصویر لندست ۸ و ترکیب رنگی RGB 856 از تصویر استر در شکل (۳-۳) نمایش داده شده‌اند. محل مناطق آنومال و معادن موجود در برگه اسفوردی نیز در این تصویر نمایش داده شده است (نقاط زرد رنگ). با توجه به تصویر 856، مناطق آهکی و کربنات‌ها به خوبی بارز شده و به رنگ آبی روشن نمایان است. این واحدها غالباً در غرب و جنوب‌غربی محدوده مشاهده می‌گردد. بر اساس محدوده جذب و بازتاب آهن، نسبت باندی ۴/۲ در تصاویر سنتینل-۲ و لندست-۸، مناطق حاوی اکسید آهن را بارزسازی می‌کند [۷۹-۸۱]. نتیجه حاصل از این نسبت‌باندی در هر دو تصویر در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



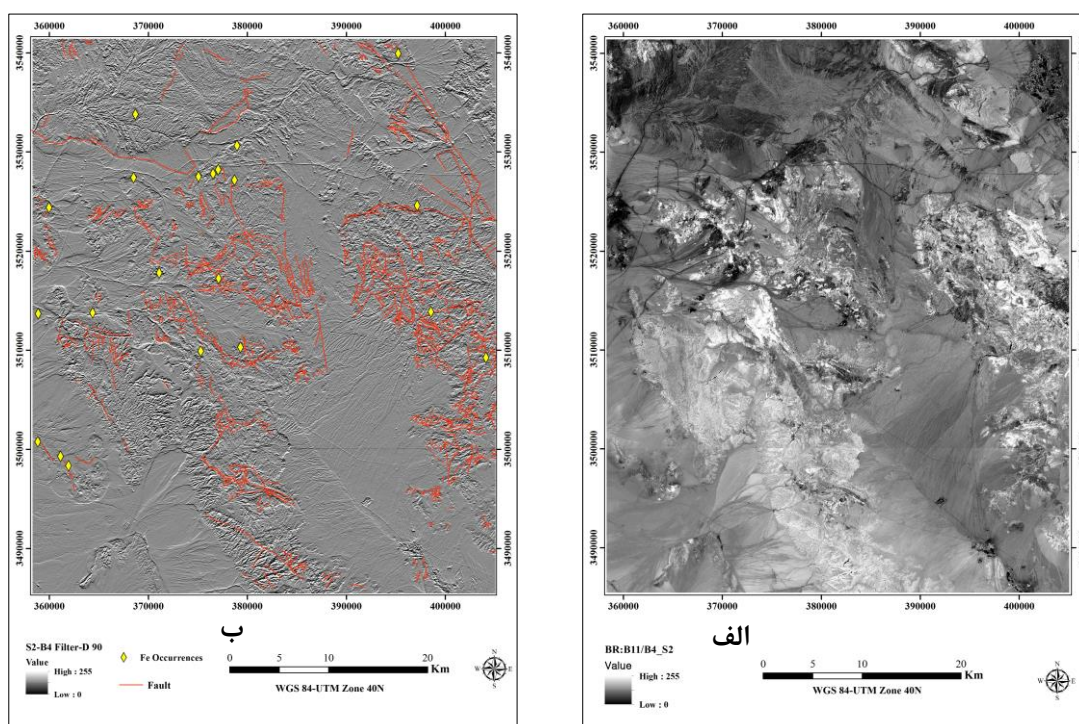
شکل (۳-۳) ترکیبات رنگی کاذب از محدوده: الف- ترکیب رنگی RGB 751 در تصویر لندست ۸. ب- ترکیب رنگی RGB 856 در تصویر استر



شکل (۴-۳) بارزسازی مناطق اکسید آهن: الف- در تصویر سنتینل ۲. ب- در تصویر لندست ۸

طبق نتایج این دو تصویر، مناطق حاوی اکسید آهن غالباً در بخش شمالی منطقه به چشم می‌خورد جایی که واحدهایی همچون مارن و کنگلومرا در محدوده وجود دارد. مناطق نشان دهنده اکسید آهن در هر دو تصویر تقریباً منطبق بر هم بوده و نتیجه حاصل از هر کدام دیگری را تایید می‌کند. پیکسل‌های روشن بیانگر مناطق حاوی اکسیدهای آهن در این تصاویر است.

جهت بارزسازی مناطق گوسان از نسبت باندهی ۱۱/۴ در تصویر سنتینل-۲ استفاده شد [۸۲، ۸۳]. پیکسل‌های روشن مناطق تشکیل زون گوسان را نشان می‌دهد. این مناطق ارتباط نزدیکی با حضور آنومالی‌ها و معادن موجود در محدوده دارد و به همین دلیل لایه زون گوسان جز لایه‌های با اهمیت در تلفیق نهایی خواهد بود. جهت تهیه لایه خطواره‌های محدوده از باندهای ۱۰ متری تصویر سنتینل-۲ استفاده شد. همزمان از نقشه زمین‌شناسی محدوده نیز کمک گرفته شد. با استفاده از فیلتراسیون باند ۴ در سنتینل-۲، خطواره‌های محدوده ترسیم شد. نتایج مربوط به زون گوسان و خطواره‌های محدوده در شکل (۳-۵) آورده شده است.

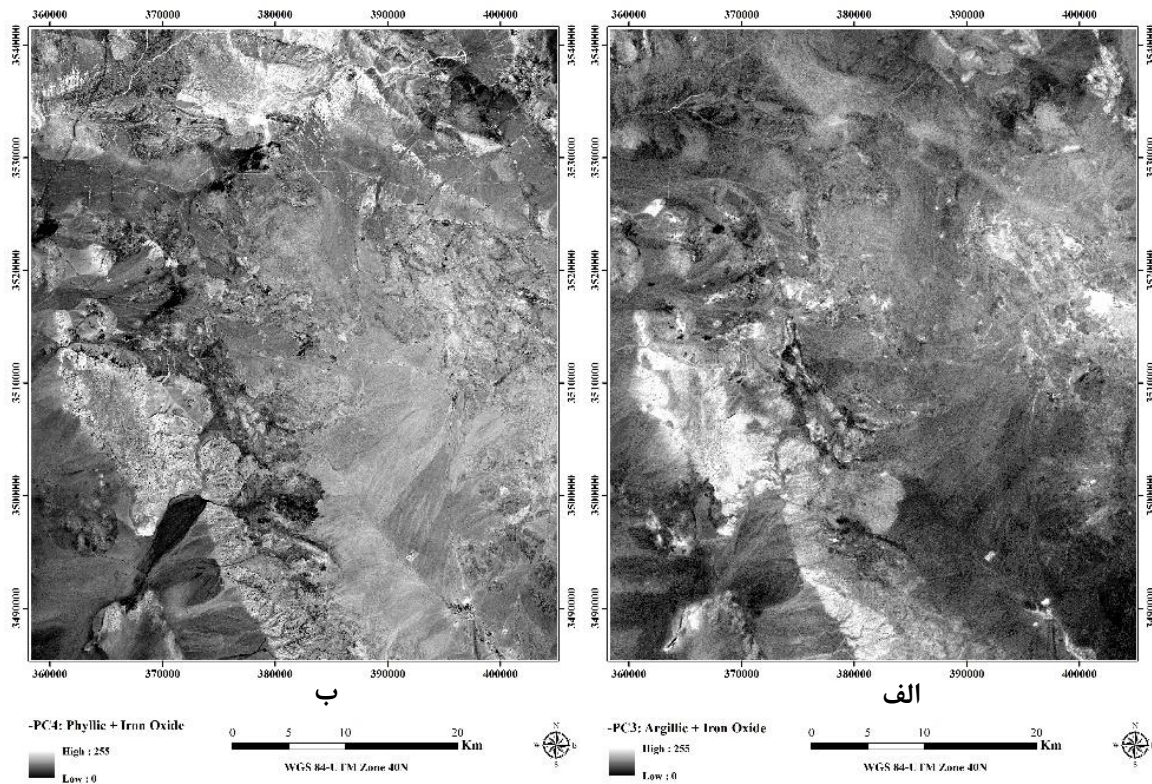


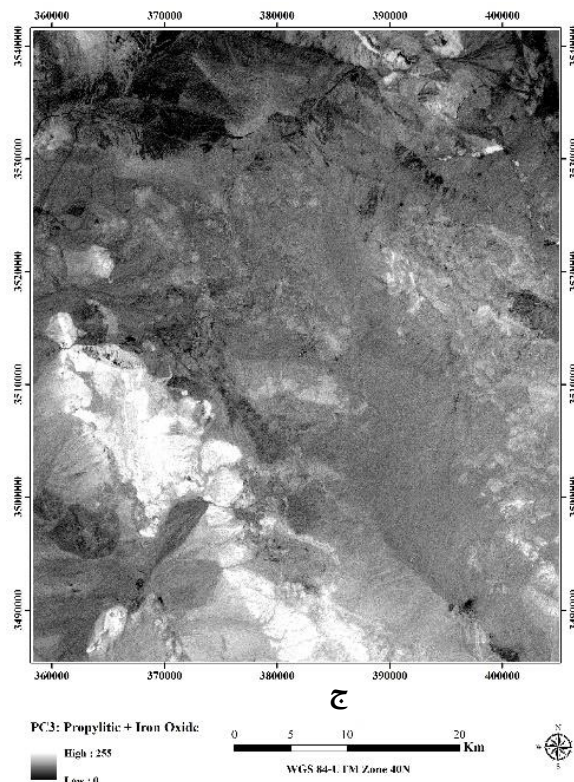
شکل (۳-۵) الف: بارزسازی زون گوسان در محدوده در تصویر سنتینل ۲. ب- ترسیم گسل‌های محدوده و نمایش محل اندیس‌های معدنی

در این تحقیق از شیوه ترکیبی انتخابی جهت انجام آنالیز مؤلفه‌های اصلی بهره برده شده است بدین صورت که با ترکیب باندهای شاخص هر دگرسانی از تصویر استر با باندهای ۲ و ۴ سنتینل-۲ (جذب و بازتاب آهن)، مناطق دگرسان شده آغشته به اکسید آهن شناسایی شد. باندهای ۵ و ۴ از تصویر استر به عنوان باندهای جذب و بازتاب کانی‌های رسی با باند ۲ و ۴ از سنتینل-۲ ترکیب و آنالیز مؤلفه‌های اصلی انجام گرفت. با توجه به مقادیر ویژه حاصله، معکوس مؤلفه سوم مناطق دگرسانی آرژیلیک به همراه اکسیدهای آهن را بارز می‌کند. دگرسانی آرژیلیک در غرب و جنوب‌شرقی محدوده مشاهده می‌گردد. جهت بارزسازی دگرسانی فیلیک به همراه اکسید آهن از باندهای ۷ و ۵ تصویر استر به همراه باندهای ۲ و ۴ تصویر سنتینل-۲ استفاده شد. بر اساس مقادیر خروجی، معکوس مؤلفه چهارم دگرسانی فیلیک آغشته به اکسیدهای آهن را بارز خواهد کرد. غالباً این نوع دگرسانی در بخش‌های شمالی و مرکزی منطقه دیده می‌شود. در بارزسازی دگرسانی پروپیلیتیک به همراه اکسیدهای آهن، از باندهای ۸ و ۹ تصویر استر به عنوان جذب و بازتاب شاخص این دگرسانی به همراه باند ۲ و ۴ از سنتینل-۲ استفاده شد. طبق مقادیر حاصله، مؤلفه سوم نتیجه مورد انتظار را خواهد داد. همانند انتظار، واحدهای آهکی در بخش شرقی و جنوب‌شرقی محدوده، بیشترین تأثیر را داشته و این نوع دگرسانی در این بخش مشاهده می‌گردد. نتایج مقادیر ویژه آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی ترکیبی در آورده شده است. مؤلفه‌های مربوطه برای نمایش هر دگرسانی با رنگ سبز مشخص شده‌اند. نتایج مرتبط با بارزسازی دگرسانی‌های مختلف آغشته به اکسیدهای آهن در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. پیکسل‌های سفید در هر سه تصویر مناطق هدف را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۳) نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی انتخابی ترکیبی در تصویر استر

	آرژلیک+اکسید آهن				فیلیک+اکسید آهن				پروپیلیتیک+اکسید آهن			
	استر		سنتینل ۲		استر		سنتینل ۲		استر		سنتینل ۲	
	باند ۵	باند ۴	باند ۲	باند ۷	باند ۵	باند ۴	باند ۲	باند ۹	باند ۸	باند ۴	باند ۲	باند ۲
مؤلفه اول	۰/۵۴۸	۰/۶۸۲	-۰/۴۳۸	۰/۲۰۹	۰/۶۰۲	۰/۵۸۲	۰/۴۹۱	۰/۲۳۹	۱/۵۸۲	-۰/۵۲۷	-۰/۵۵۶	-۰/۲۷۳
مؤلفه دوم	۰/۲۴۶	۰/۴۱۵	-۰/۷۰۸	۰/۵۱۶	۱/۳۹۳	-۰/۳۷۰	۰/۶۸۰	۰/۴۹۵	۱/۳۹۸	۰/۴۷۳	-۰/۶۴۱	-۰/۴۵۵
مؤلفه سوم	۰/۷۹۸	-	۰/۵۸۷	-۰/۱۱۷	۰/۰۶۹	۱/۰۹۱	-۰/۵۳۳	۰/۸۱۵	۱/۶۶۶	-۰/۶۹۳	۰/۰۸۷	-۰/۲۶۱
مؤلفه چهارم	۰/۰۵۱	-	۰/۱۳۶	۰/۵۴۲	۰/۸۲۸	۱/۶۸۹	-۰/۱۱۱	۰/۱۸۱	۱/۲۴۳	۰/۱۳۶	۰/۵۲۲	-۰/۸۰۷





شکل (۳-۶) بارزسازی دگرسانی‌های مختلف همراه با اکسید آهن: الف- دگرسانی آرژیلیک آغشته به اکسید آهن. ب- دگرسانی فلیک آغشته به اکسید آهن. ج- دگرسانی پروپیلیتیک آغشته به اکسید آهن.

۳-۵- تهیه لایه‌های ژئوشیمیایی

جداسازی ناهنجاری‌های ژئوشیمیایی یک ابزار مفید برای اکتشافات ژئوشیمیایی است. حد آستانه آنومالی که مفیدترین معیار برای بررسی متقابل اطلاعات با داده‌های عددی از منابع مختلف است معمولاً در مطالعات ژئوشیمی استفاده می‌شود. مناطق دارای آنومالی ژئوشیمیایی را می‌توان با مقادیر بیشتر از یک آستانه مشخص تعریف کرد. جداسازی مناطق بی‌هنجاری از پس زمینه، بخشی جدایی ناپذیر از تحقیقات اکتشافی ژئوشیمیایی است.

با توجه به داده‌های این تحقیق، ۸۴۳ نمونه برداشت شده از رسوبات آبراهه‌ای برای ۱۹ عنصر و اکسید موجود و در دسترس بود. طبق تحقیقات و گزارشات مربوط به این برداشت‌ها، داده‌های سنسورد در

آنها دیده و گزارش نشده است و لذا در ابتدا داده‌های خارج از ردیف با استفاده از روش دورفل^۱ شناسایی و جایگزین شدند. در مرحله بعد نرمال و یا غیر نرمال بودن عناصر مورد ارزیابی قرار گرفت و عناصری که با لگاریتم گرفتن نرمال شدند این عمل انجام و جهت نرمال سازی مابقی عناصر از روش کاکس-باکس^۲ استفاده شد [۸۴، ۸۵]. جهت استاندارد سازی عناصر نیز از روش Z-score در نرم افزار SPSS استفاده شد. پارامترهای آماری اولیه عناصر و اکسیدها به شرح جدول (۳-۳) می‌باشد. جهت بررسی میزان همبستگی و ارتباط عناصر ابتدا از رسم دندوگرام استفاده شد که نتیجه تجزیه خوشه‌ای با استفاده از روش وارد^۳ [۸۶، ۸۷] برای ۱۹ متغیر ژئوشیمیایی در شکل (۳-۷) نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که بررسی همبستگی و نمودار خوشه‌ای عناصر جز روش‌های چندمتغیره است و به دلیل یافتن عناصر و اکسیدهای در ارتباط با کانی‌زایی آهن در این قسمت آورده شده است تا در ادامه مراحل از پردازش دیگر متغیرهای بدون ارتباط جلوگیری به عمل آید. بر اساس این نمودار، آهن بیشترین همبستگی را به ترتیب با TiO_2 ، P_2O_5 ، V ، B و Cr دارد. به کمک نقشه زمین شناسی و تصویر Google Earth، رسوبات آبراهه‌ای محدوده اسفوردی تهیه و نتیجه آن در شکل (۳-۸) نمایش داده شده است که نقاط نمونه‌برداری شده بر روی این رسوبات پلات شده است. با توجه به عناصر مهم و بررسی همبستگی عناصر در ارتباط با آهن، TiO_2 و وانادیوم، دو متغیری هستند که می‌توان همراهی آنها با آهن را تشخیص داد و لذا علاوه بر Fe_2O_3 ، بررسی و تهیه لایه‌های مربوط به TiO_2 و V ، نیز جز اهداف این تحقیق قرار گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل آماری تک متغیره نشان می‌دهد که میانگین مقادیر Fe_2O_3 ، TiO_2 و V به ترتیب ۵/۵۴، ۰/۷۹۵ و ۸۳/۸۴ ppm است. جهت داشتن دید کلی از مقادیر این پارامترها و نحوه توزیع آنها هیستوگرام و نمودار جعبه‌ای هر کدام ترسیم شده و نتیجه در شکل (۳-۹) نمایش داده شده است.

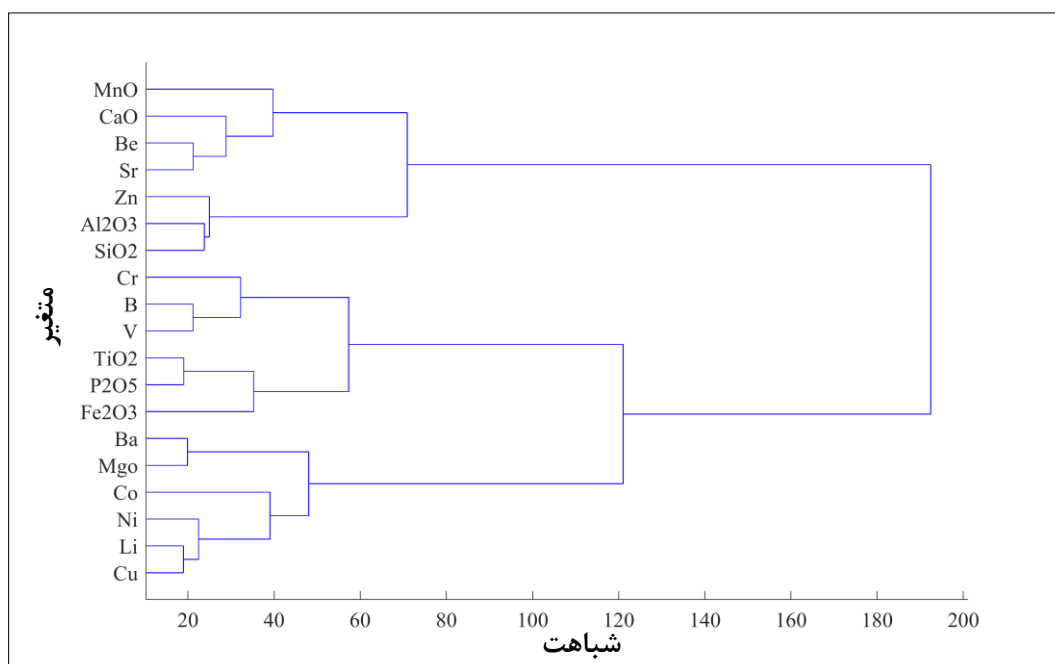
¹ DORFEL

² Cox-Box

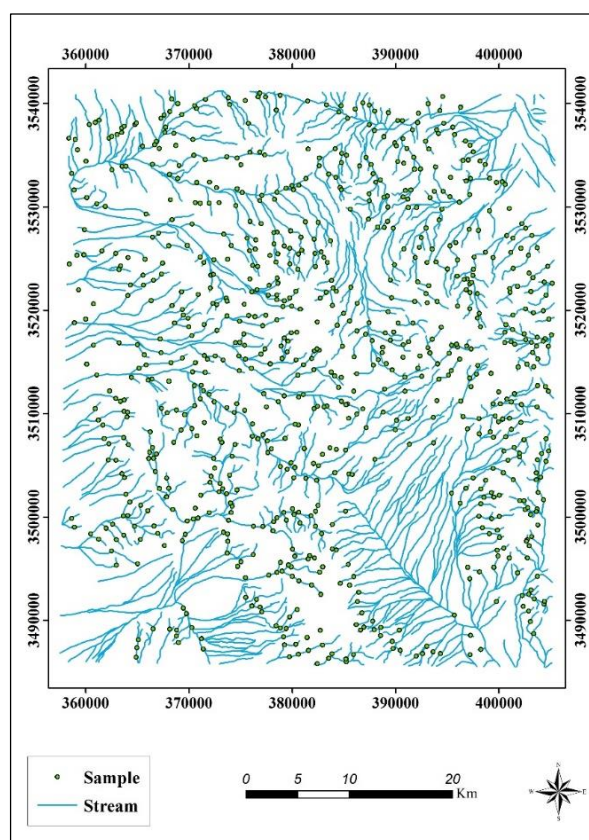
³ Ward

جدول (۳-۳) پارامترهای آماری عناصر و اکسیدها

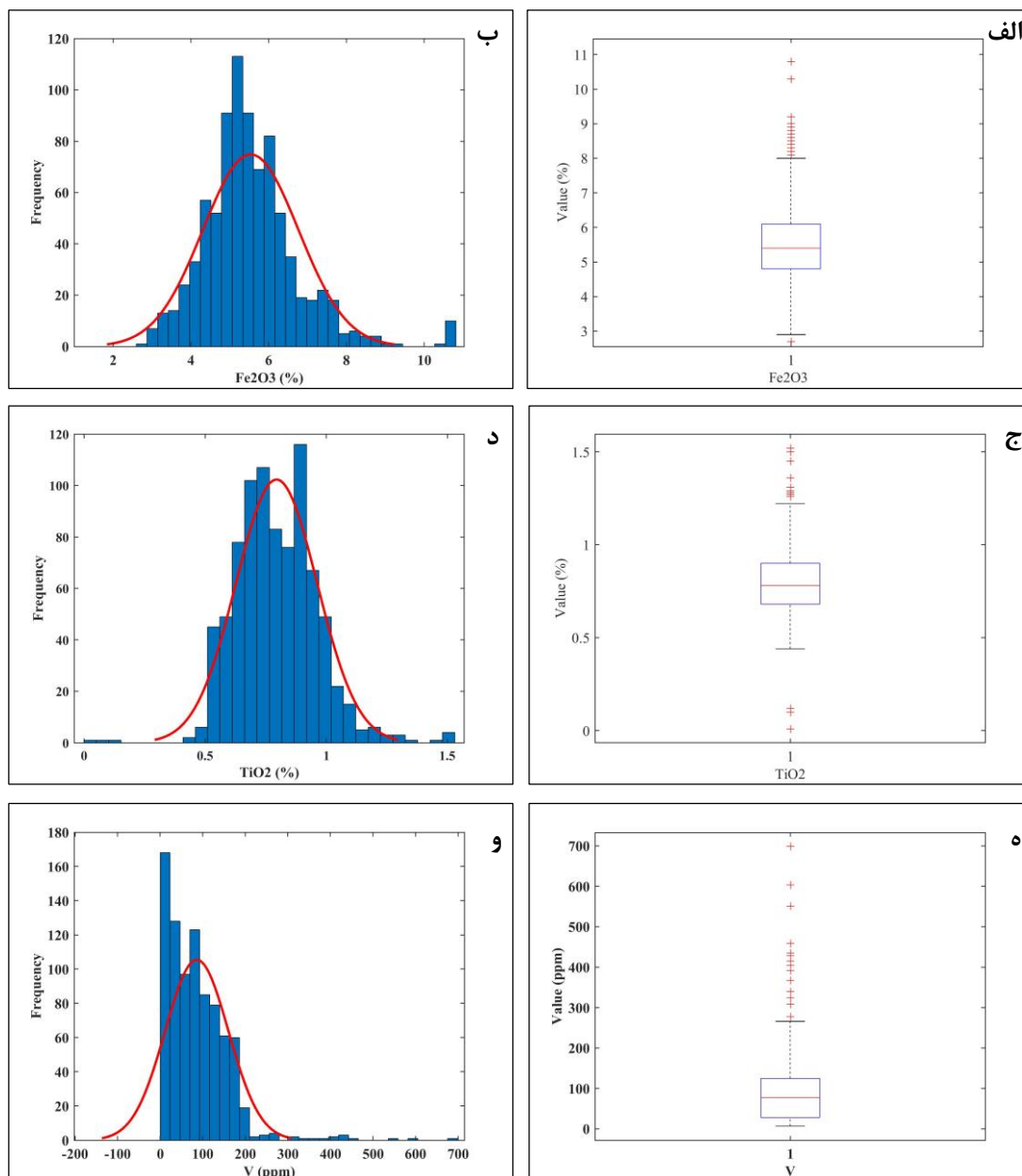
	N Statistic	Minimum Statistic	Maximum Statistic	Mean		Std. Deviation Statistic	Variance Statistic	Skewness		Kurtosis	
				Statistic	Std. Error			Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
SiO ₂ (%)	۸۴۳	۳۳/۳۰	۷۸/۵۰	۵۴/۴۰۱	۰/۲۰۰	۵/۸۲۰	۳۳/۸۶۹	-۰/۷۹۱	۰/۰۸۴	۱/۵۶۹	۰/۱۶۸
Al ₂ O ₃ (%)	۸۴۳	۴/۰۰	۱۳/۲۰	۸/۵۱۱	۰/۰۴۷	۱/۳۶۰	۱/۸۴۸	۰/۱۳۷	۰/۰۸۴	۱/۶۶۵	۰/۱۶۸
Fe ₂ O ₃ (%)	۸۴۳	۲/۷۰	۱۰/۸۰	۵/۵۳۹	۰/۰۴۲	۱/۲۳۰	۱/۵۱۶	۱/۱۵۴	۰/۰۸۴	۳/۲۴۴	۰/۱۶۸
Mgo (%)	۸۴۳	۱/۱۰	۶/۲۰	۲/۶۷۳	۰/۰۲۹	۰/۸۵۷	۰/۷۳۵	۰/۸۱۶	۰/۰۸۴	۱/۲۴۶	۰/۱۶۸
Cao (%)	۸۴۳	۱/۰۴	۲۵/۱۰	۱۱/۳۲۹	۰/۱۱۲	۳/۲۴۲	۱۰/۵۱۰	۰/۸۲۴	۰/۰۸۴	۱/۵۹۰	۰/۱۶۸
P ₂ O ₅ (%)	۸۴۳	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۱۰۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰	-۲/۸۲۱	۰/۰۸۴	۳۸/۴۹۱	۰/۱۶۸
TiO ₂ (%)	۸۴۳	۰/۰۱	۱/۵۲	۰/۷۹۵	۰/۰۰۵۸	۰/۱۶۷	۰/۰۲۸	۰/۴۲۶	۰/۰۸۴	۲/۲۹۵	۰/۱۶۸
Mno (%)	۸۴۳	۰/۰۱	۰/۲۹	۰/۱۰۳	۰/۰۰۱۶	۰/۰۴۶	۰/۰۰۲	۰/۱۱۷	۰/۰۸۴	۰/۷۵۹	۰/۱۶۸
Zn (%)	۸۴۳	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۷۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۲۸	۰/۰۰۰	۱/۶۶۵	۰/۰۸۴	۴/۰۳۸	۰/۱۶۸
Cr (%)	۸۴۳	۰/۰۰۷۷	۰/۰۴۹۰	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۰	۱/۸۱۳	۰/۰۸۴	۴/۰۹۰	۰/۱۶۸
Ni (%)	۸۴۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۱۰۵	۰/۰۰۰	۰/۷۷۲	۰/۰۸۴	۰/۵۲۲	۰/۱۶۸
Cu (%)	۸۴۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۱۶۹	۰/۰۰۰	۱/۷۷۶	۰/۰۸۴	۴/۱۶۶	۰/۱۶۸
Co (%)	۸۴۳	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۳۹	۰/۰۰۰	۰/۵۰۱	۰/۰۸۴	۱/۳۸۸	۰/۱۶۸
Ba (%)	۸۴۳	۰/۰۱۶۷	۰/۲۸۰۰	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۱۴۳	۰/۰۴۱۵	۰/۰۰۲	۲/۷۸۰	۰/۰۸۴	۹/۰۷۳	۰/۱۶۸
V (%)	۸۴۳	۰/۰۰۰۷	۰/۰۳۷۰	۰/۰۰۸۵	۰/۰۰۰۲۳	۰/۰۰۰۶۷	۰/۰۰۰	۱/۳۵۲	۰/۰۸۴	۳/۱۰۰	۰/۱۶۸
Sr (%)	۸۴۳	۰/۰۰۰۹	۰/۰۷۰۰	۰/۰۳۰۹	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۰۰۹۲	۰/۰۰۰	۱/۰۲۷	۰/۰۸۴	۴/۶۷۰	۰/۱۶۸
B (%)	۸۴۳	۰/۰۰۰۹	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰	۱/۲۲۰	۰/۰۸۴	۳/۳۹۸	۰/۱۶۸
Be (%)	۸۴۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰	۰/۹۱۰	۰/۰۸۴	-۰/۴۶۲	۰/۱۶۸
Li (%)	۸۴۳	۰/۰۰۰۸	۰/۰۱۳۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۲۵	۰/۰۰۰	۱/۴۵۱	۰/۰۸۴	۱/۹۵۰	۰/۱۶۸



شکل (۷-۳) نمودار خوشه‌ای همبستگی عناصر



شکل (۸-۳) نقاط نمونه‌برداری و رسوبات آبراهه‌ای محدوده مطالعه



شکل (۳-۹) الف- نمودار جعبه‌ای مقادیر Fe_2O_3 ب- توزیع فراوانی Fe_2O_3 ج- نمودار جعبه‌ای مقادیر TiO_2 د- توزیع فراوانی TiO_2 و- نمودار جعبه‌ای مقادیر V ه- توزیع فراوانی V.

یکی از روش‌هایی که در مطالعه مدل ژئوشیمیایی عناصر بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های آماری چند متغیره است [۸۸-۹۱] که همزمان تغییرات چندین متغیر و تأثیر آنها بر یکدیگر را مورد بررسی قرار می‌دهد. یکی از روش‌های آماری چند متغیره ضریب همبستگی بین عناصر است که بر اساس آن متغیرهای اصلی در ارتباط با هدف استنباط و شناسایی می‌شود.

همبستگی بین عناصر نیز با استفاده از روش پیرسون بررسی شد که نتایج برای متغیرهای با اهمیت در جدول (۴-۳) آمده است. بر اساس این جدول، بیشترین همبستگی بین Fe_2O_3 و TiO_2 برابر با ۰/۶۹۰ است.

جدول (۴-۳) ضرایب همبستگی بین عناصر با اهمیت بر اساس روش پیرسون

											۱	Fe2O3
										۱	۰/۶۹۰	TiO2
									۱	۰/۳۲۹	۰/۴۰۸	MnO
								۱	۰/۴۵۴	۰/۱۱۳	۰/۳۹۳	V
							۱	۰/۰۵۲	۰/۰۳۷	۰/۲۴۷	۰/۳۸۰	Cr
						۱	۰/۰۸۰	۰/۲۸۴	۰/۵۳۲	۰/۳۷۰	۰/۴۱۰	Ba
					۱	۰/۲۸۶	-۰/۲۴۰	۰/۲۹۰	۰/۱۶۴	۰/۲۷۲	۰/۳۱۸	SiO2
				۱	۰/۴۶۱	۰/۲۳۶	-۰/۰۱۹	۰/۱۷۴	۰/۱۵۶	۰/۱۹۷	۰/۳۰۱	Al2o3
			۱	۰/۲۶۹	۰/۱۶۰	۰/۳۴۵	-۰/۰۷۵	۰/۲۹۰	۰/۳۴۴	۰/۲۸۱	۰/۴۴۲	P2O5
		۱	۰/۳۰۸	۰/۴۷۷	۰/۴۵۵	۰/۴۵۰	۰/۰۸۰	۰/۲۰۶	۰/۲۳۴	۰/۲۵۰	۰/۳۵۰	B
	۱	۰/۲۵۲	۰/۲۲۳	۰/۲۶۹	۰/۰۶۱	۰/۱۱۱	۰/۳۷۴	-۰/۲۰۰	۰/۰۳۹	۰/۲۹۲	۰/۲۸۳	Ni
۱	۰/۴۰۴	۰/۱۹۸	۰/۲۳۱	۰/۲۶۹	۰/۱۱۶	۰/۱۹۸	۰/۲۸۰	۰/۰۵۲	۰/۱۸۷	۰/۳۰۵	۰/۴۹۳	Co
Co	Ni	B	P2O5	Al2o3	SiO2	Ba	Cr	V	MnO	TiO2	Fe2O3	

تجزیه و تحلیل فاکتوری یک ابزار جهت کاهش ابعاد در تجزیه و تحلیل آماری است [۸۵, ۹۲, ۹۳] که توجه محققان را برای یافتن عوامل اصلی از چندین متغیر ژئوشیمیایی جلب کرده است. تحلیل عاملی یک روش مناسب برای طبقه‌بندی و کاهش تعداد متغیرهای ژئوشیمیایی است. تجزیه و تحلیل فاکتوری به طور گسترده‌ای برای تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای استفاده شده است [۹۴, ۹۵]. هدف نهایی تجزیه و تحلیل فاکتوری، توضیح انواع داده‌های چند متغیره توسط چند فاکتور تا حد امکان و تشخیص ساختار داده‌های چند متغیره پنهان است. در نتیجه، تحلیل فاکتوری اغلب به عنوان ابزاری قدرتمند برای تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی استفاده می‌شود [۸۵, ۹۶].

تجزیه و تحلیل فاکتوری برای داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای انجام شد که نتایج در جدول (۵-۳) آورده شده است. شش عامل اصلی ذکر شده است. عناصر اصلی هر فاکتور بر اساس مقادیر هر

عنصر تعیین می شود. فاکتور اول با مقادیر زیاد Fe_2O_3 ، TiO_2 و V به عنوان یک شاخص ژئوشیمیایی در ارتباط با مناطق دارای Fe استفاده می شود. عیار آهن در کانی‌های این ناحیه با عیار TiO_2 و V همبستگی بالایی را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۵) نتایج آنالیز فاکتوری

C6	C5	C4	C3	C2	C1	
۰/۰۱۴	-۰/۳۴۸	۰/۱۷۳	۰/۲۲۴	۰/۱۷۰	۰/۷۵۴	Fe_2O_3
-۰/۰۲۶	-۰/۴۹۰	-۰/۰۸۸	۰/۳۷۶	۰/۰۸۲	۰/۶۱۳	TiO_2
-۰/۱۹۳	۰/۳۱۹	۰/۱۰۰	۰/۵۹۰	-۰/۰۶۰	۰/۵۳۵	MnO
-۰/۳۸۰	۰/۲۳۲	-۰/۰۷۶	-۰/۰۴۱	۰/۶۲۲	۰/۳۳۷	Zn
۰/۳۲۳	۰/۱۸۲	۰/۲۴۷	-۰/۵۸۲	۰/۱۶۵	-۰/۴۰۶	Cu
۰/۲۰۲	۰/۳۶۲	۰/۴۳۸	۰/۲۹۱	-۰/۳۱۵	۰/۵۳۵	V
-۰/۶۲۲	۰/۱۱۳	۰/۱۹۸	۰/۰۳۴	۰/۵۶۷	-۰/۰۲۹	Sr
-۰/۰۹۲	۰/۰۷۷	-۰/۰۴۸	-۰/۴۵۶	-۰/۰۸۹	۰/۶۵۰	Al_2O_3
-۰/۰۹۲	۰/۴۰۴	-۰/۱۲۸	۰/۱۸۹	-۰/۰۱۶	۰/۵۵۸	P_2O_5
۰/۲۵۸	۰/۱۱۳	۰/۱۱۹	۰/۰۵۴	۰/۶۵۱	-۰/۵۵۴	CaO
۰/۱۰۵	۰/۲۶۷	-۰/۶۹۵	۰/۳۰۵	۰/۳۶۵	۰/۱۳۴	MgO
-۰/۳۰۳	-۰/۲۳۱	-۰/۱۴۷	-۰/۲۳۹	-۰/۴۳۳	۰/۵۶۲	SiO_2
۰/۱۴۲	-۰/۲۹۶	۰/۴۶۶	۰/۱۳۶	۰/۶۸۸	۰/۱۲۳	Cr
۰/۲۲۵	-۰/۱۰۹	-۰/۳۸۹	-۰/۰۹۵	۰/۵۸۰	۰/۴۲۳	Ni
۰/۲۴۴	۰/۰۶۷	۰/۰۳۲	-۰/۰۹۶	۰/۴۳۹	۰/۴۹۱	Co
۰/۰۳۵	۰/۰۵۱	۰/۱۳۹	۰/۳۷۷	-۰/۱۶۳	۰/۵۹۰	Ba
-۰/۱۱۰	-۰/۱۰۳	-۰/۱۴۰	-۰/۲۱۳	-۰/۲۸۸	۰/۶۹۶	B
۰/۰۱۴	-۰/۳۴۸	۰/۱۷۳	۰/۲۲۴	۰/۱۷۰	-۰/۳۰۱	Li
-۰/۰۲۶	-۰/۴۹۰	-۰/۰۸۸	۰/۳۷۶	۰/۰۸۲	۰/۵۷۰	Be

۳-۶- تهیه لایه‌های ژئوفیزیکی

عملیات مغناطیس‌سنجی از قدیمی‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی است که برای فعالیتهای اکتشافی در زمینه‌های مختلف و به ویژه اکتشاف ذخایر آهن مورد استفاده قرار گرفته است. برداشت اصولی و تفسیر

صحیح داده‌های مغناطیسی‌سنجی 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. این روش از جمله روش‌هایی است که منشأ آن طبیعی بوده و ناشی از تأثیرات میدان مغناطیسی 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.

برای بدست‌آوردن شاخص‌های ژئوفیزیکی، ابتدا داده‌های مغناطیسی‌سنجی هوابرد مورد آنالیز قرار گرفتند. با توجه به نوع داده‌های در اختیار قرار داده شده، داده‌های مغناطیس هوابرد در فرآیندهای بعدی مورد استفاده قرار گرفت. بدین معنی که مقدار مغناطیس زمینه ($IGRF^1$) از آن کم شده است (شکل ۳-۹ الف). فیلتر کاهش یافته به قطب مغناطیسی (RTP^2) بر روی داده‌های باقیمانده مغناطیسی اعمال شد (شکل ۳-۹ ب). با استفاده از این فیلتر، میدان مغناطیسی از یک عرض مغناطیسی که در آن بردار میدان زمین مایل و شیبدار است به قطب 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 مغناطیس هوایی به طور معمول بر روی تصاویر مختلف برگردان به قطب صورت می‌گیرد [۹۷، ۹۸]. در ادامه روند کار، فیلترهای ادامه فراسو ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری

¹ International Geomagnetic Reference Field

² Reduction to the Pole

بر روی نقشه برگردان به قطب اعمال شد (اشکال ۲ ج تا ۵۲). 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^۱ (AS) و زاویه تیلت افقی^۲ (TDX) استفاده شد (اشکال ۲ و ۲ز). 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 [۹۹]:

$$A_n(x,y) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial}{\partial z} \right)^n G \right] \quad \text{رابطه (۴-۱)}$$

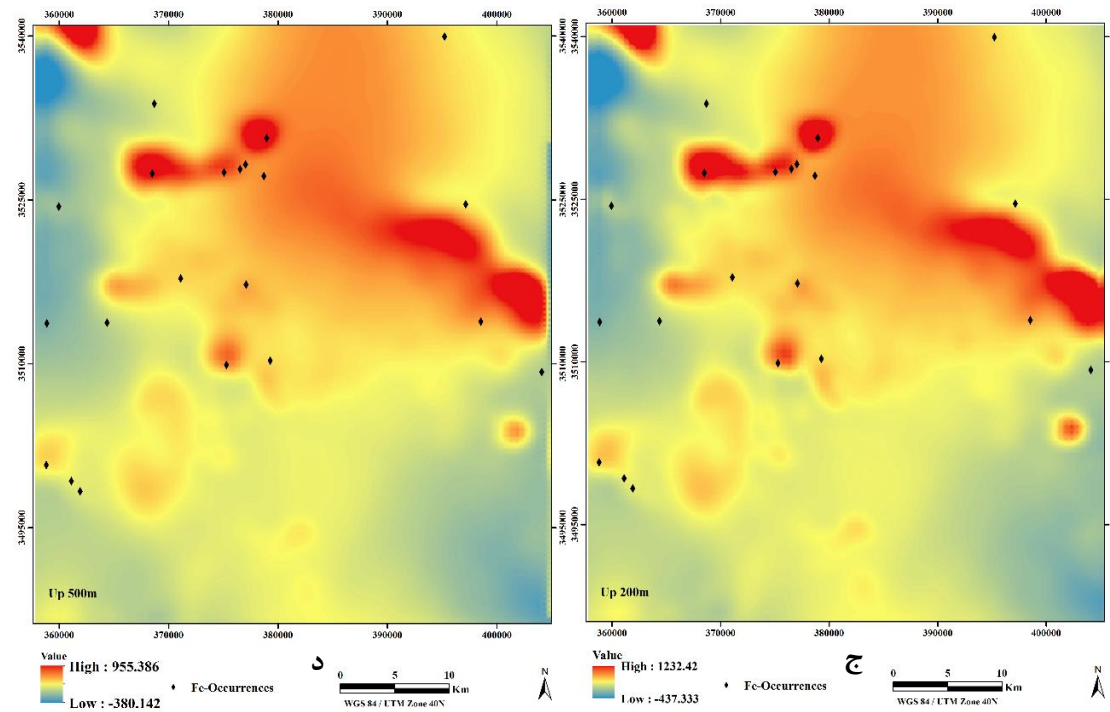
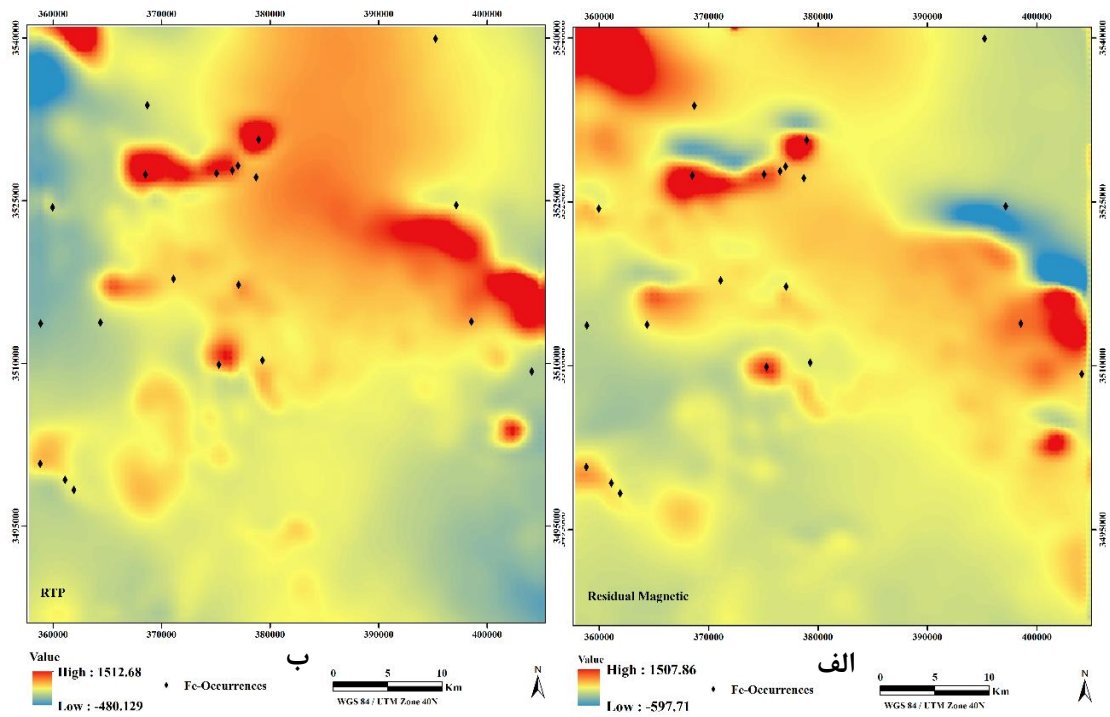
که در آن $A_n(x,y)$ دامنه سیگنال تحلیلی و G ، بی‌هنجاری مغناطیسی است که اندازه آن نیز به-راحتی قابل محاسبه است. زاویه تیلت نیز مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۰۰]:

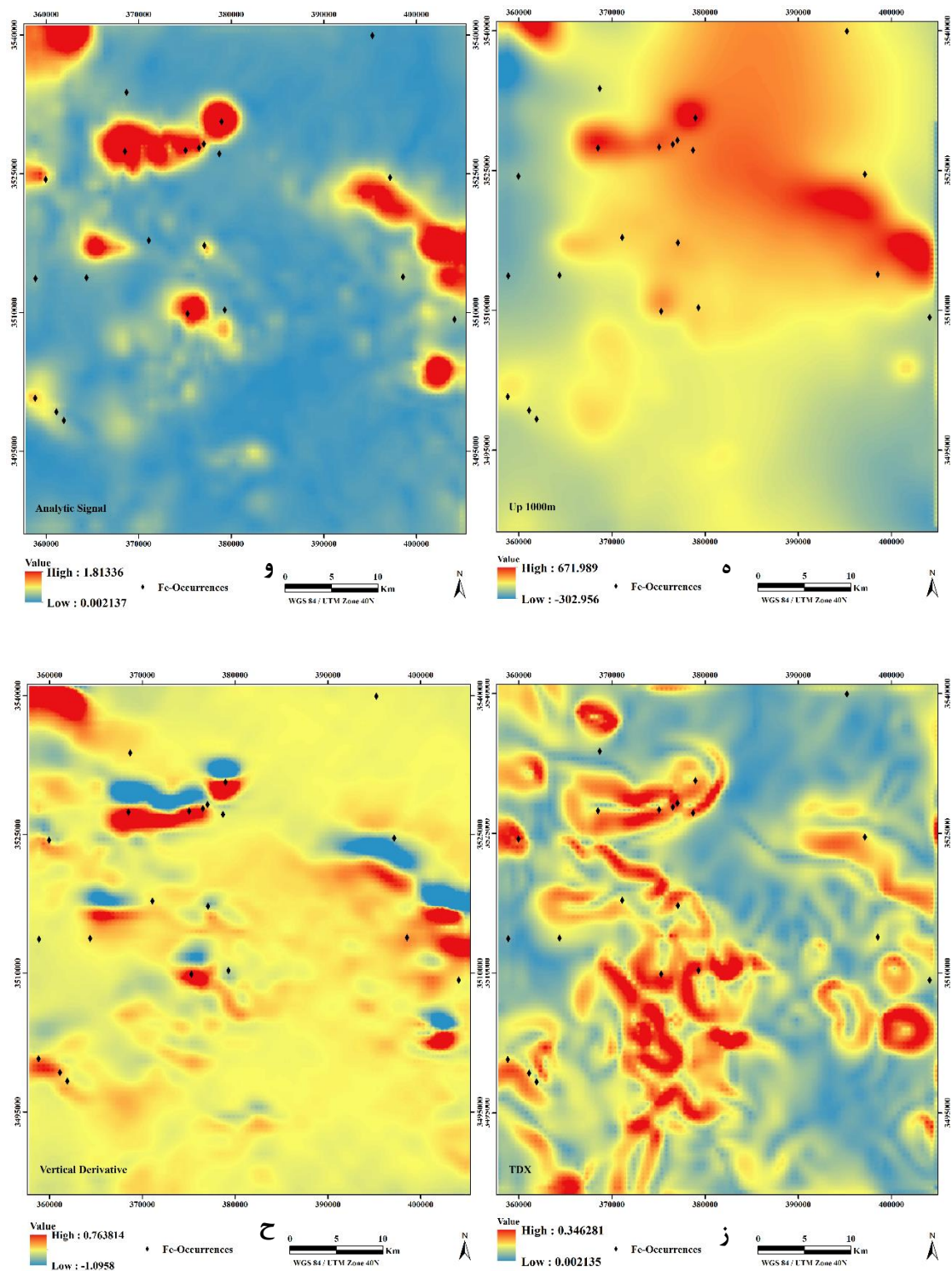
$$T = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}} \right] \quad \text{رابطه (۴-۲)}$$

که در آن، T مقدار زاویه تیلت و f میدان مغناطیسی است. مقدار زاویه تیلت و تغییرات زاویه تیلت در بالای توده‌های معدنی و همچنین بدون بعد بودن آن مهم‌ترین دلیل کاربرد این فیلتر است. در نهایت نقشه مشتق قائم اول تهیه شد تا جزییات برجسته‌تر شده و تفکیک بهتری از بی‌هنجاری‌های موجود انجام شود شکل (۳-۱۰ ح).

³ Analytic Signal

⁴ Horizontal Tilt Angle





شکل (۳-۱۰) لایه‌های ژئوفیزیکی: الف- مغناطیس باقی‌مانده. ب- بازگشت به قطب. ج- ادامه فراسو ۲۰۰ متر. د- ادامه فراسو ۵۰۰ متر. ه- ادامه فراسو ۱۰۰۰ متر. و- سیگنال تحلیلی. ز- زاویه تیلت افقی. ح- مشتق قائم.

۳-۷- جمع‌بندی

در این فصل نحوه تهیه لایه‌های اکتشافی بیان شد. بر این اساس لایه‌های مختلف با توجه به چهار نوع داده زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی موجود تهیه شدند. لایه سنگ میزبان از زمین‌شناسی، دگرسانی‌های به همراه لایه گسل‌ها مختلف از داده‌های ماهواره‌ای، لایه‌های اکسید آهن و اکسید تیتان از داده ژئوشیمیایی و هشت لایه مختلف از داده‌های ژئوفیزیکی تهیه شد. لازم به ذکر است که در بین هشت لایه ژئوفیزیکی فقط یک لایه در فرآیند مدل‌سازی شرکت داده خواهد شد. با آماده‌سازی لایه‌ها و تهیه نقشه‌های مربوطه، در ادامه اقدام به تهیه نقشه پتانسیل معدنی شد که در فصل بعد این فرآیند تشریح خواهد شد.

فصل چهارم

مدل سازی پتانسیل معدنی

۴-۱- مقدمه

در این بخش با استفاده از روش‌های نمودار پیش‌بینی-مساحت و ANP فازی اقدام به تعیین وزن هر لایه شد. در واقع به نوعی از یک روش جدید داده‌محور در کنار یکی از روش‌های قدرتمند دانش‌محور برای یافتن وزن لایه‌ها بهره برده شده است تا بدین صورت هم نتایج قابل اعتمادتری حاصل شود و در عین حال مقایسه‌ای بین دو روش با محوریت‌های متفاوت صورت پذیرد. نتایج حاصل از روش دیمتل-فازی نیز به عنوان بخشی از روش ANP فازی مورد استفاده قرار گرفت. بدین معنی که روابط درونی ANP فازی به وسیله دیمتل‌فازی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل از روش دیمتل‌فازی به عنوان ورودی در کنار سوپر ماتریس روش ANP فازی استفاده شد. در ادامه به کمک روش‌های ویکور و تاپسیس فازی، نواحی با پتانسیل بالای کانی‌زایی اولویت‌بندی شدند.

۴-۲- تعیین اوزان با روش نمودار پیش‌بینی-مساحت

با توجه به ماهیت این روش در استفاده از اندیس‌های معدنی موجود در منطقه مطالعه، ابتدا این اندیس‌ها شناسایی شدند. در محدوده مورد مطالعه، تعداد ۲۲ نهشته و اندیس مرتبط با ذخایر سنگ آهن گزارش شده است [۱۰۱]. مشخصات این اندیس‌ها در جدول (۴-۱) آورده شده است. پس از بررسی‌های اولیه و تهیه لایه‌ها، با استفاده از روش فرکتال، حدود آستانه‌ای برای هر لایه به کمک روش فرکتالی 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. نقشه سنگ میزبان کانی‌زایی مطابق با آنچه در فصل گذشته عنوان شد، با توجه به قابلیت واحدها در تشکیل ذخایر احتمالی آهن تهیه شد. این نقشه در شکل (۴-۱) آورده شده است. طبق نمودار فرکتالی شکل (۴-۱ الف)، این نقشه شامل ۵ جامعه است. مناطق با رنگ آبی با کمترین احتمال و رنگ قهوه‌ای بیشترین احتمال را در

برمی‌گیرد شکل (۱-۴ ب). با توجه به نتیجه حاصل از نمودار پیش‌بینی-مساحت، با ۲۱ درصد از مساحت اشغال شده، ۷۹ درصد از آنومالی‌ها توجیه می‌شوند شکل (۱-۴ ج). نقشه شاهد دگرسانی آرژیلیک در شکل (۲-۴) آورده شده است. طبق نمودار فرکتالی مقدار-مساحت، این لایه به پنج کلاس (جامعه) تقسیم شده است شکل (۲-۴ الف). پایین‌ترین کلاس به رنگ آبی و بالاترین کلاس به رنگ قهوه‌ای نمایان است شکل (۲-۴ ب). بر اساس نمودار پیش‌بینی-مساحت این لایه، با ۵۰ درصد از مساحت، ۵۰ درصد از آنومالی‌ها قابل پیش‌بینی است شکل (۲-۴ ج). نقشه شاهد دگرسانی فیلیک در شکل (۳-۴) آورده شده است. نمودار فرکتالی دگرسانی فیلیک نیز شامل پنج جامعه است شکل (۳-۵ الف). نقشه کلاس‌بندی دگرسانی فیلیک شامل پنج کلاس است شکل (۳-۴ ب) که نقطه عطف نمودار پیش‌بینی-مساحت نشان می‌دهد که با ۳۰ درصد از مساحت، ۷۰ درصد آنومالی‌ها قابل توجیه است شکل (۳-۴ ج). لایه مربوط به دگرسانی پروپیلیتیک با چهار کلاس در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. همانند لایه آرژیلیک، این لایه نیز نقطه عطفی در ۵۰ درصد دارد که به نوعی بیانگر وزن صفر این لایه‌ها در پتانسیل‌یابی نهایی خواهد بود. نقشه شاهد اکسیدهای آهن در شکل (۵-۴) نمایش داده شده است. با توجه به نمودار مقدار-مساحت فرکتالی اکسیدآهن، این لایه شامل پنج جامعه است شکل (۵-۴ الف) به همین جهت نقشه کلاس‌بندی مجدد آن پنج کلاس را نشان می‌دهد شکل (۵-۴ ب). همانطور که ملاحظه می‌شود نمودار پیش‌بینی-مساحت آن، نقطه عطفی در مقدار ۵۸، از منحنی نرخ پیش‌بینی دارد بدین معنی که با ۴۲ درصد از مساحت می‌توان ۵۸ از آنومالی‌ها را پیش‌بینی نمود شکل (۵-۴ ج). نقشه شاهد زون گوسان در شکل (۶-۴) آورده شده است. مطابق این شکل، نمودار فرکتال چهار جامعه را بارز نموده است شکل (۶-۴ الف) که پایین‌ترین کلاس به رنگ آبی و بالاترین کلاس به رنگ قرمز مشخص است شکل (۶-۴ ب). نقطه عطف نمودار پیش‌بینی-مساحت آن، در نرخ پیش‌بینی ۶۴ درصد است که بیان می‌کند با ۳۶ درصد از مساحت می‌توان ۶۴ درصد آنومالی‌ها را توجیه کرد شکل (۶-۵ ج). نقشه شاهد خطواره‌های محدوده در شکل (۷-۴) آورده شده است.

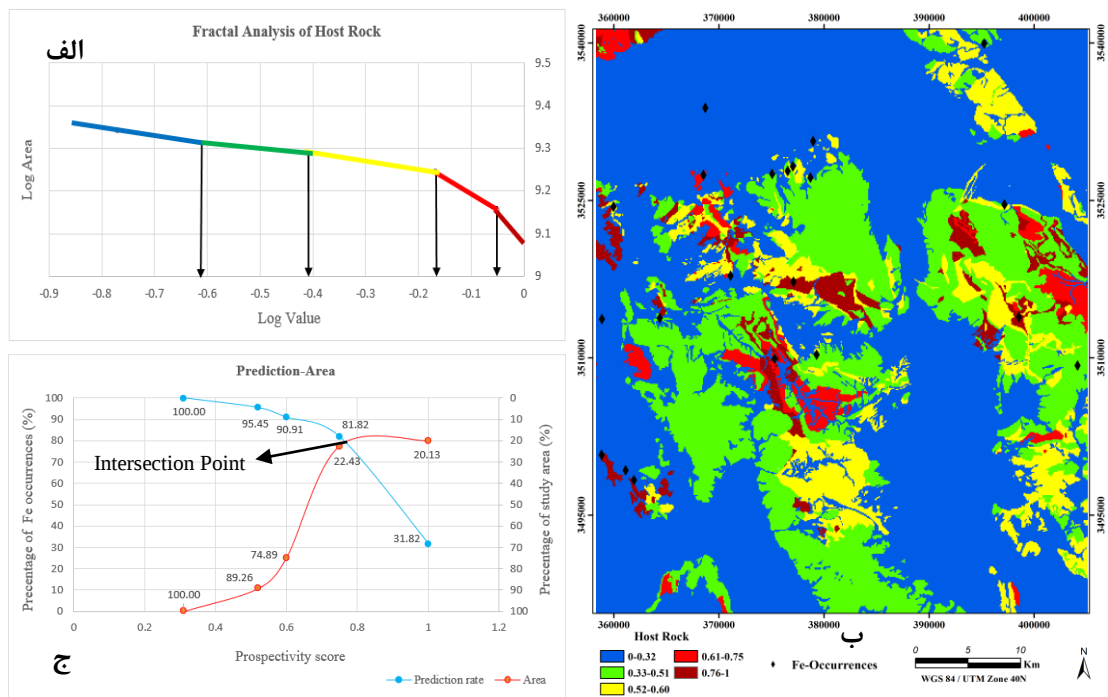
گسل‌های برگه اسفوردی به وسیله بافرهای ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متری محدوده‌گذاری شد و سپس به کمک نمودار فرکتالی حاصل شده که پنج کلاس را نشان می‌دهد شکل (۵-۷ الف) نقشه کلاس‌بندی مجدد خطواره‌ها تهیه شد شکل (۴-۷ ب). بر اساس نمودار پیش‌بینی-مساحت این لایه، ۶۰ درصد از آنومالی‌ها با ۴۰ درصد از مساحت اشغال شده قابل توجیه است. نقشه شاهد آنومالی Fe_2O_3 در شکل (۴-۸) نمایش داده شده است. طبق نمودار فرکتالی این لایه، شاهد پنج جامعه برای آن هستیم شکل (۴-۸ الف). نقشه کلاس‌بندی آن نیز طبق همین روال با پنج رنگ مختلف به نمایش در آمده است شکل (۴-۸ ب). همانطور که از نمودار پیش‌بینی-مساحت برای این لایه مشاهده می‌شود شکل (۴-۸ ج)، نقطه عطفی در نرخ پیش‌بینی ۷۴ دارد پس ۷۴ درصد از آنومالی‌های آهن را می‌توان با ۲۶ درصد از مساحت اشغال شده پیش‌بینی کرد. نقشه شاهد TiO_2 نیز همانند دیگر لایه‌ها تهیه و نتیجه آن در شکل (۴-۹) آورده شده است. نمودار فرکتالی عیار-مقدار این لایه، چهار جامعه مختلف را نشان می‌دهد شکل (۴-۹ الف). بر طبق این نمودار، در کلاس‌بندی نقشه مربوطه، چهار ناحیه با رنگ‌های مختلف نمایش داده شده است شکل (۴-۹ ب) که مناطق با رنگ قرمز با بیشترین احتمال حضور TiO_2 هستند. نمودار P-A این لایه مطابق با شکل (۴-۹ ج) است که نقطه عطف آن در نرخ پیش‌بینی ۶۴ درصد است. لایه شاهد وانادیوم نیز به عنوان یک عنصر همراه در منطقه تهیه و نتیجه در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. نمودار فرکتال آن در شکل (۴-۱۰ الف) نمایش داده شده است که شامل پنج جامعه است. نقشه کلاس‌بندی شده با توجه به تحلیل فرکتالی در شکل (۵-۱۰ ب) آورده شده است. با ترسیم نمودار P-A این لایه، مشاهده می‌شود با ۳۷ درصد از مساحت اشغال شده، ۶۳ درصد از آنومالی‌ها قابل شناسایی هستند شکل (۵-۱۰ ج). آخرین لایه شاهد که از مهمترین لایه‌های مورد استفاده در این تحقیق است لایه شاهد توده مغناطیسی است که در شکل (۴-۱۱) آورده شده است. این نقشه شامل چهار کلاس می‌باشد. نمودار فرکتالی این لایه در شکل (۴-۱۱ الف)، نقشه کلاس‌بندی مجدد در شکل (۴-۱۱ ب) و نمودار پیش‌بینی-مساحت نیز در شکل (۴-۱۱ ج) نمایش

داده شده است. با توجه به نمودار پیش‌بینی-مساحت آن، با ۲۴ درصد از مساحت اشغال‌شده، ۷۶ درصد از آنومالی‌ها توجیه می‌گردند.

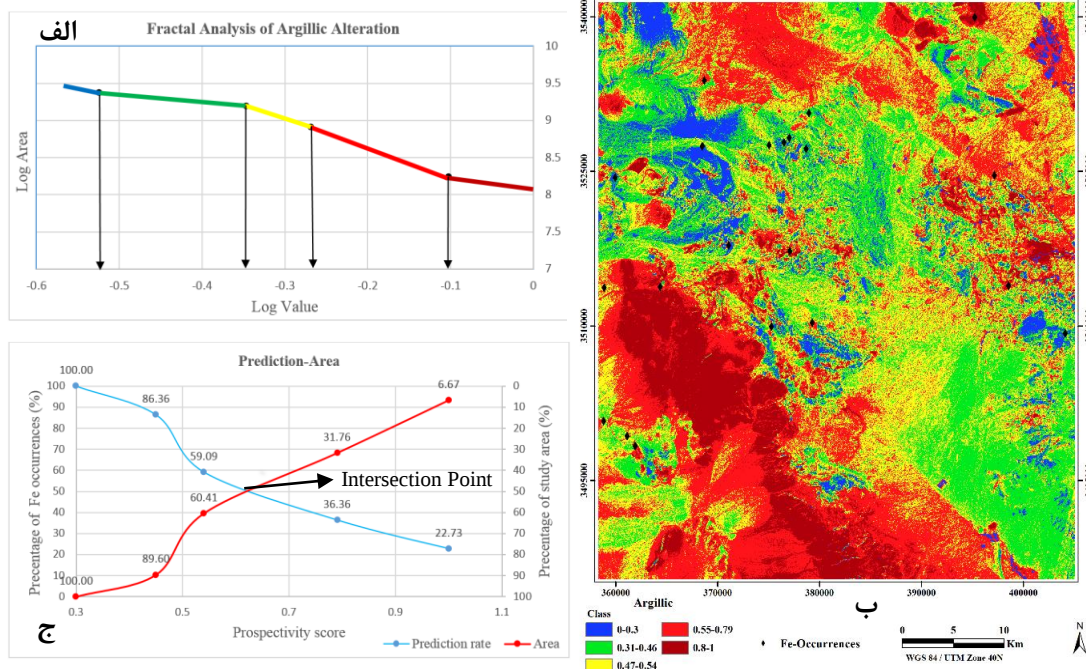
با تهیه لایه گسل‌ها، شش لایه شاهد جهت تلفیق نهایی آماده شده که وزن هر کدام از لایه‌ها به کمک نمودار پیش‌بینی-مساحت محاسبه شد.

جدول (۱-۴) مشخصات اندیس‌های معدنی در محدوده مطالعه [۱۰۱].

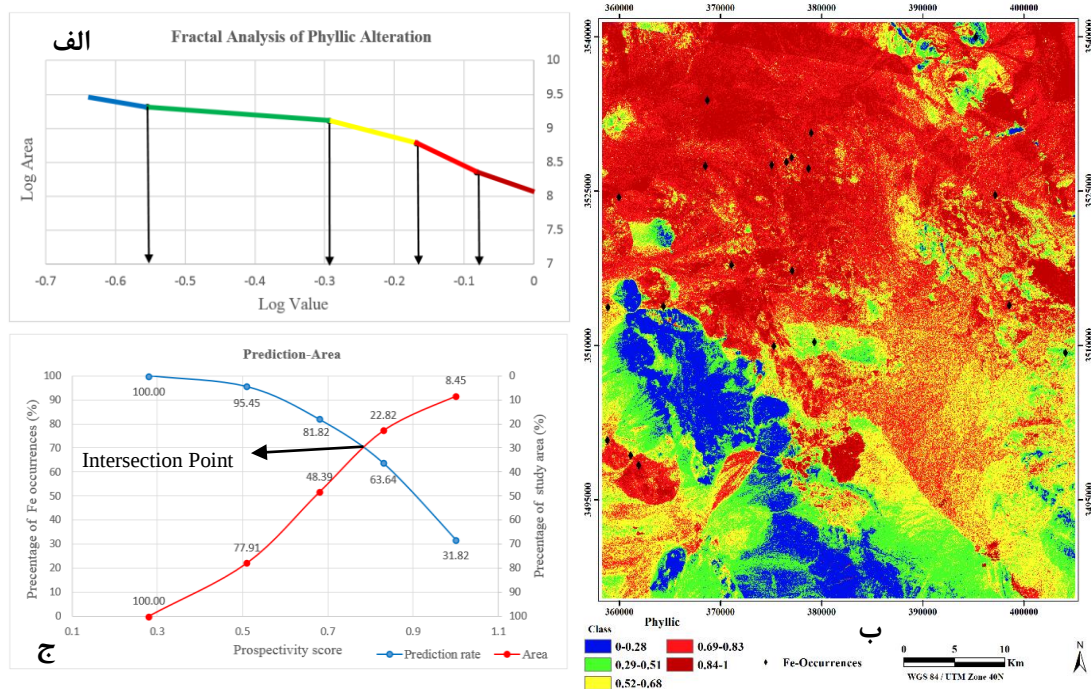
ردیف	اندیس معدنی	واحد زمین‌شناسی / سن
۱	آنومالی X	ماسه سنگ و شیل / پالئوزوئیک
۲	آنومالی II B	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده / پرکامبرین
۳	آنومالی II C	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده / پرکامبرین
۴	آنومالی IV	سنگ‌های متاسوماتیک و دگرگون شده / پرکامبرین
۵	آنومالی V B	ماسه سنگ و شیل / پالئوزوئیک
۶	آنومالی 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	آلکالی گرانیت، ولکانیک، ماسه سنگ و شیست / پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۳	شرق بافق	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک / پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۴	اسفوردی	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک / پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۵	لکه سیاه	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک / پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۶	مشیدوان	آلکالی گرانیت، ولکانیک اسیدی، دولومیت و سنگ آهک / پرکامبرین بالا-کامبرین پایین
۱۷	مبارکه	سنگ‌های دگرگون شده / پرکامبرین
۱۸	نارگون	آلکالی 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



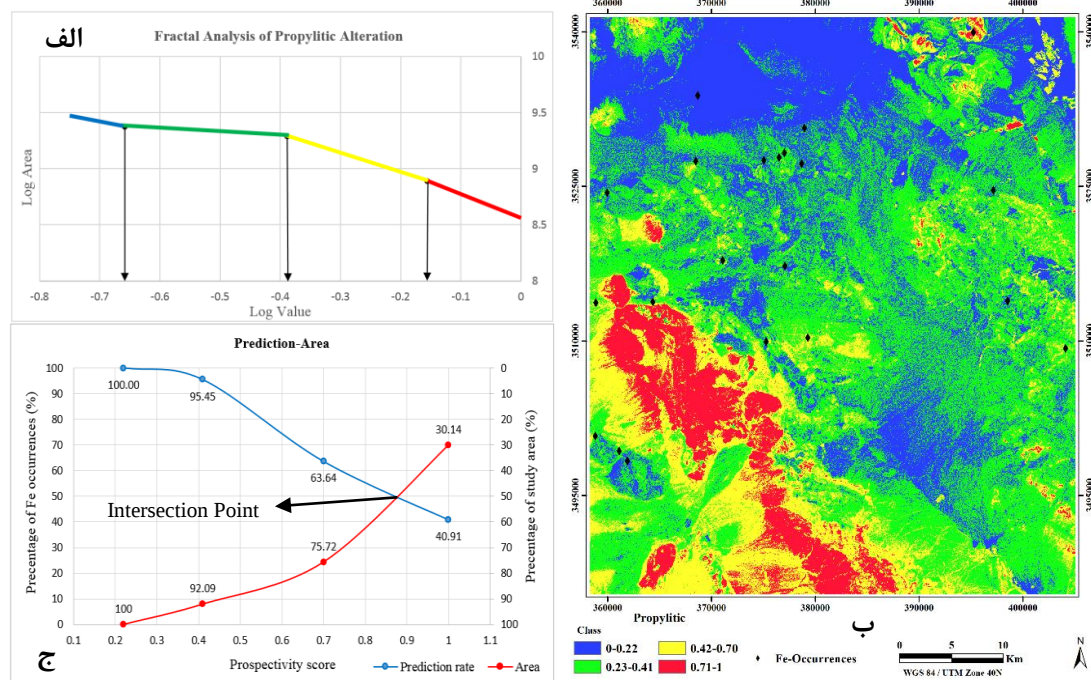
شکل (۴-۱) نقشه شاهد سنگ میزبان کانی زایی: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس-بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش‌بینی-مساحت



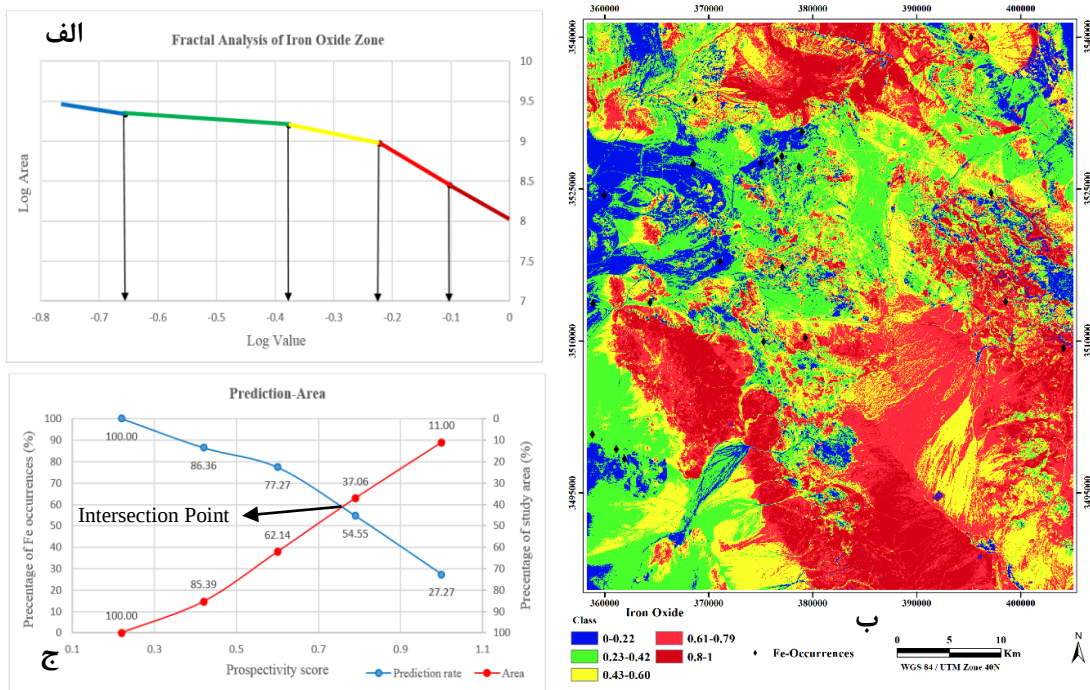
شکل (۴-۲) نقشه شاهد دگرسانی آرژیلیک: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس‌بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش‌بینی-مساحت



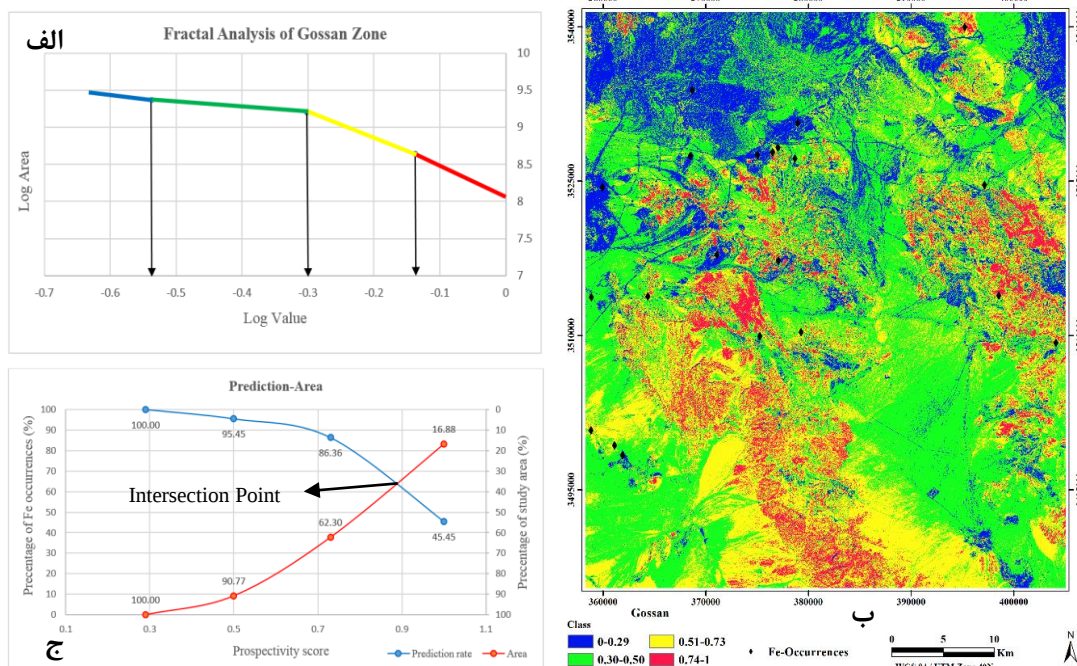
شکل (۳-۴) نقشه شاهد دگرسانی فیلیک: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش بینی-مساحت



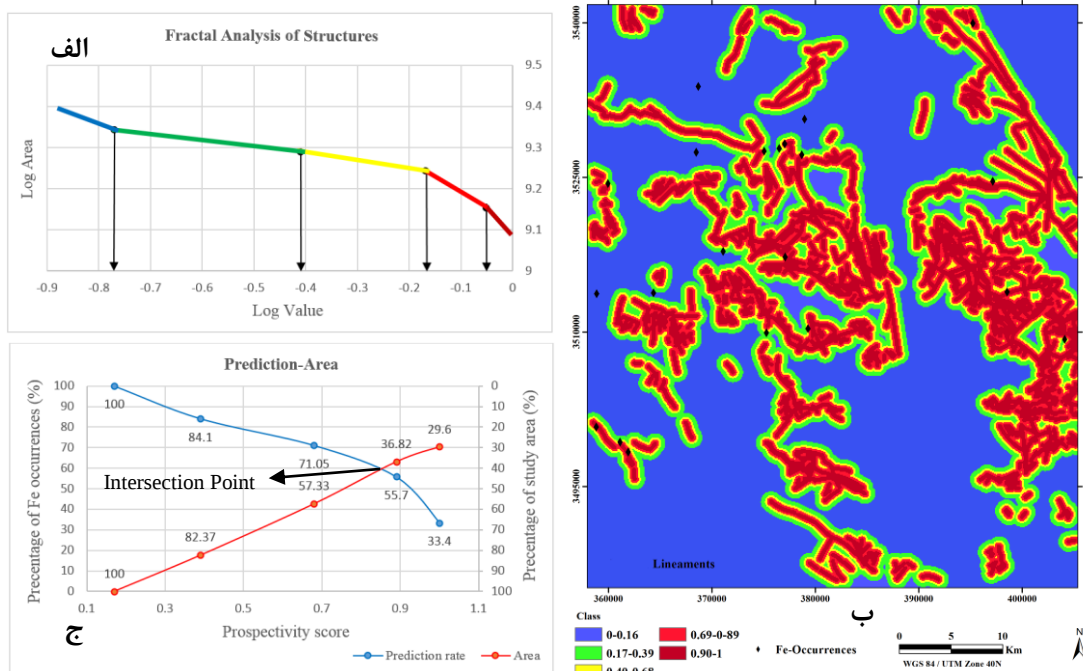
شکل (۴-۴) نقشه شاهد دگرسانی پروپیلیتی: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش بینی-مساحت



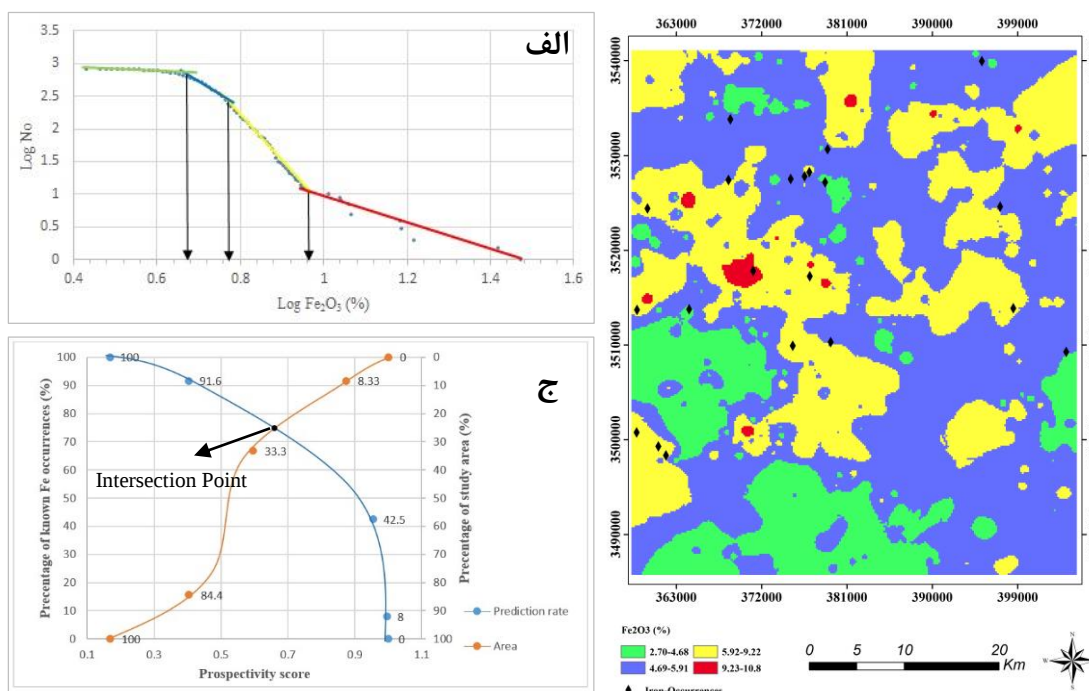
شکل (۴-۵) نقشه شاهد اکسید آهن: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش بینی-مساحت



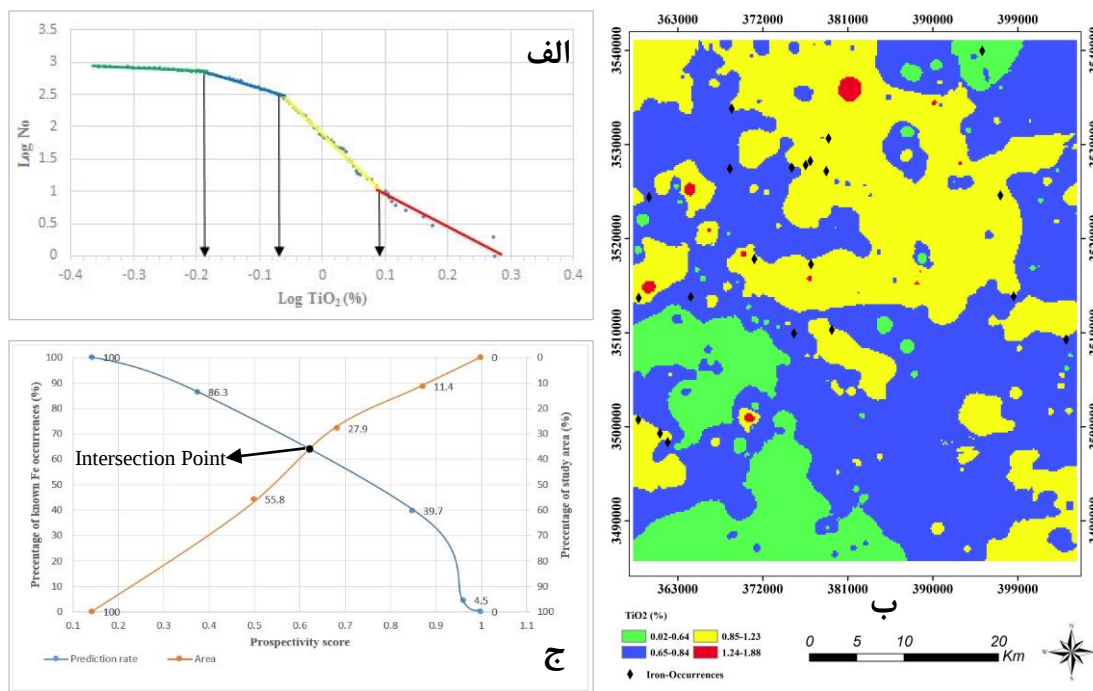
شکل (۴-۶) نقشه شاهد زون گوسان: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش بینی-مساحت



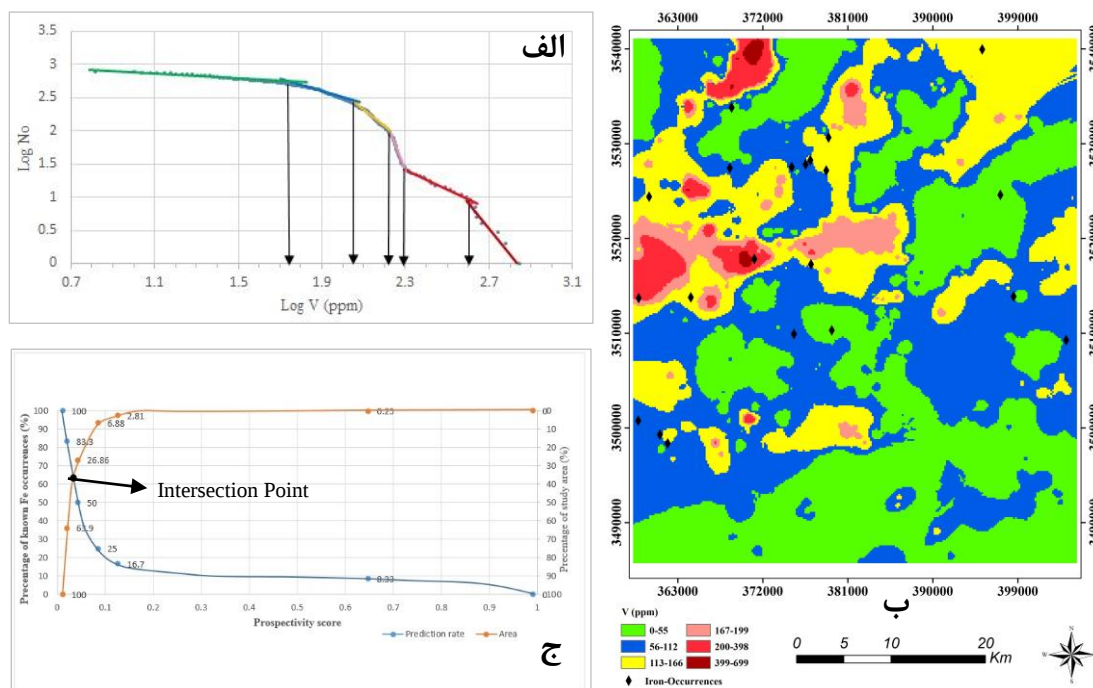
شکل (۷-۴) نقشه شاهد خطواره‌ها: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس‌بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش‌بینی-مساحت



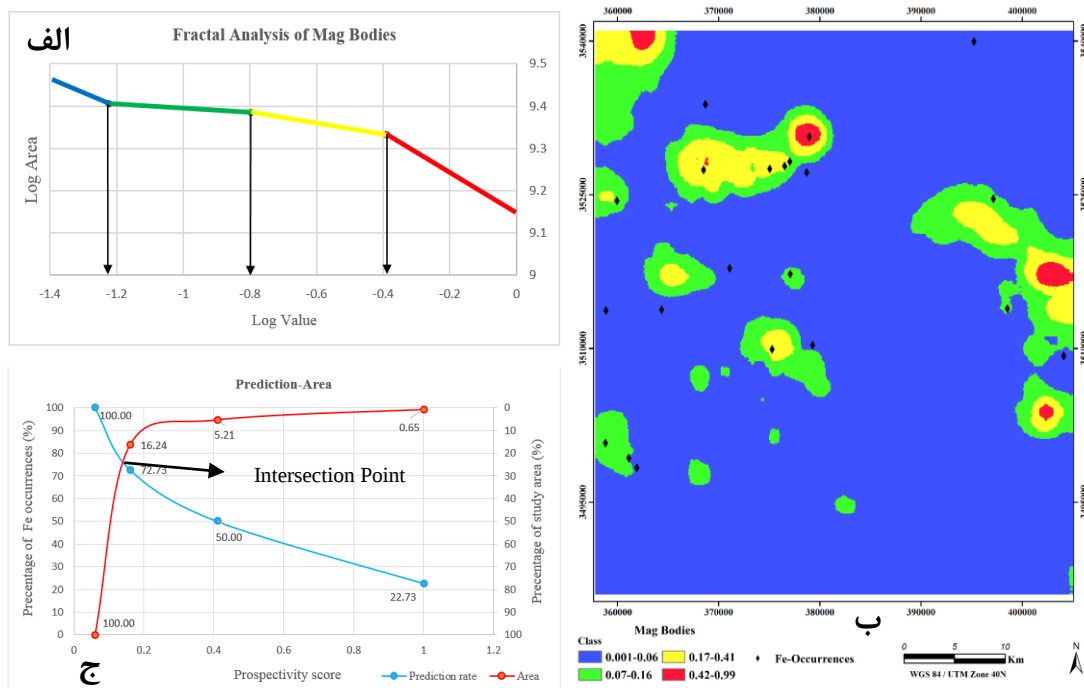
شکل (۸-۴) نقشه شاهد آنومالی Fe_2O_3 : الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس‌بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش‌بینی-مساحت



شکل (۹-۴) نقشه شاهد آنومالی TiO_2 : الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش بینی-مساحت



شکل (۱۰-۴) نقشه شاهد آنومالی واندیوم: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش بینی-مساحت



شکل (۴-۱۱) نقشه شاهد توده مغناطیسی: الف- نمودار تمام لگاریتمی مقدار-مساحت. ب- نقشه کلاس بندی شده بر اساس نمودار فرکتالی. ج- نمودار پیش بینی-مساحت

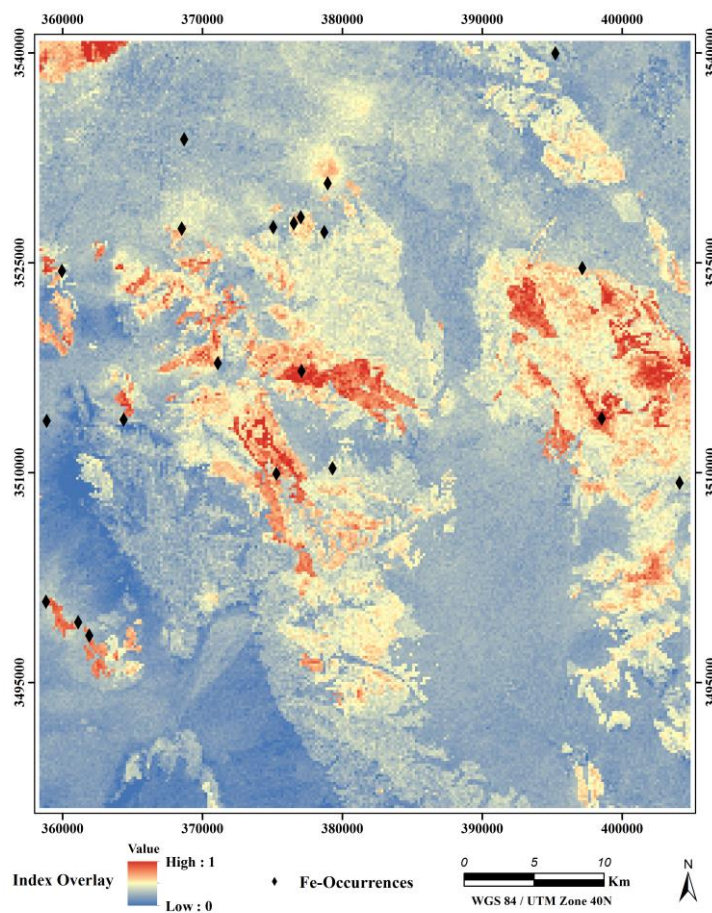
پس از تهیه نمودارهای پیش بینی-مساحت برای هر کدام از لایه های شاهد، اقدام به محاسبه وزن هر یک از این لایه ها شد. مطابق با رابطه های (۲-۳۶) و (۲-۳۷)، این اوزان محاسبه شد. در واقع با تقسیم مقدار نرخ پیش بینی بر مساحت دربرگیرنده، چگالی نرمالایز شده بدست می آید و سپس با محاسبه مقدار $\ln$ این چگالی، وزن لایه محاسبه شد.

برای تلفیق لایه های اطلاعاتی، روش های مختلفی وجود دارد که بر حسب روش های وزن دهی و روش های

مدل سازی مختلف می توان از آنها استفاده کرد. در اینجا از روش همپوشانی شاخص برای تلفیق لایه های شاهد استفاده شد. در این روش، مقدار فازی شده هر نقشه در وزن به دست آمده آن لایه ضرب می شود و سپس مجموع این مقادیر بر مجموع وزن های به دست آمده تقسیم می گردد. بر همین اساس لایه نهایی حاصل از تلفیق همه لایه های شاهد تهیه شد. نتیجه این تلفیق در شکل (۴-۱۲) نمایش داده شده است.

جدول (۴-۲) لایه‌های شاهد و وزن تخصیص یافته بر اساس نمودار پیش‌بینی-مساحت

وزن	چگالی نرمالایز شده	مساحت	نرخ پیش‌بینی	لایه	نوع داده
۱/۳۲۵	۳/۷۶	۲۱	۷۹	سنگ میزبان	زمین‌شناسی
۰	۱	۵۰	۵۰	آرژلیک	دورسنجی
۰	۱	۵۰	۵۰	پروپلیتیک	
۰/۸۴۶	۲/۳۳	۳۰	۷۰	فلیک	
۰/۳۲۳	۱/۳۸	۴۲	۵۸	اکسید آهن	
۰/۵۷۵	۱/۷۸	۳۶	۶۴	گوسان	
۰/۴	۱/۵	۴۰	۶۰	خطواره‌ها	
۱/۰۹۹	۳	۲۵	۷۵	Fe ₂ O ₃	ژئوشیمی
۰/۵۳۲	۱/۷۰۳	۳۷	۶۳	TiO ₂	
۰/۵۷۷	۱/۷۸۰	۳۶	۶۴	V	
۱/۱۵۳	۳/۱۶۷	۲۴	۷۶	توده مغناطیسی	ژئوفیزیک



شکل (۴-۱۲) نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از روش نمودار پیش‌بینی-مساحت

۳-۴- پیاده‌سازی روش دیمتل فازی

برای اجرای این روش، در ابتدا پرسشنامه‌ای طراحی شد که بر اساس آن میزان تأثیرپذیری و تأثیرگذاری هر معیار ارزیابی شد. نظرات ۱۴ خبره برای انجام روش دیمتل فازی استفاده شد. نحوه ارزیابی تأثیرات معیارهای پرسشنامه در جدول (۳-۴) آورده شده است. معادل پارامترهای جدول به صورت زیر است:

C1: سنگ میزبان C2: گسل C3: آهن دوظرفیتی C4: اکسیدتیتان
C5: سیگنال تحلیلی C6: اکسیدآهن C7: گوسان C8: دگرسانی

جدول (۳-۴) جدول طراحی شده در پرسشنامه دیمتل

C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	
							0	C1
						0		C2
					0			C3
				0				C4
			0					C5
		0						C6
	0							C7
0								C8

طیف فازی مورد استفاده در این روش در جدول (۴-۴) نمایش داده شده است. در ادامه ماتریس ارتباط مستقیم حاصل از نظرات ۱۴ خبره تهیه شد (جدول ۴-۵). پس از این مرحله، ماتریس حاصله نرمال شده و مقادیر ماتریس ارتباط مستقیم، فازی شد. به وسیله این ماتریس، ماتریس ارتباط کامل فازی تهیه شد که نتیجه در جدول (۴-۶) نشان داده شده است. سپس اقدام به فازی‌زدایی مقادیر شد.

جدول (۴-۴) طیف فازی مورد استفاده در روش دیمتل فازی

کد	عبارت کلامی	L	M	U
۱	بدون تأثیر	۰	۰	۰/۲۵
۲	تأثیر خیلی کم	۰	۰/۲۵	۰/۵
۳	تأثیر کم	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵
۴	تأثیر زیاد	۰/۵	۰/۷۵	۱
۵	تأثیر خیلی زیاد	۰/۷۵	۱	۱

جدول (۵-۴) ماتریس ارتباط مستقیم بر اساس نظرات کارشناسی

دگرسانی	گوسان	اکسید آهن	توده مغناطیسی	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	گسل	سنگ میزبان
سنگ میزبان	(۰/۴۵۸، ۰/۶۸۸، ۰/۸۵۴)	(۰/۴۲۸، ۰/۶۸۸، ۰/۹۱۷)	(۰/۵۶۲، ۰/۸۱۳، ۰/۸۹۶)	(۰/۵۶۳، ۰/۸۱۳، ۰/۹۵۸)	(۰/۵۸۲، ۰/۸۳۳، ۰/۹۵۸)	(۰/۱۰۴، ۰/۳۷۱، ۰/۵۲۱)	(۰، ۰، ۰)
گسل	(۰/۴۷۹، ۰/۷۲۹، ۰/۸۵۴)	(۰/۲۹۲، ۰/۵۴۲، ۰/۷۵۰)	(۰/۱۹۶، ۰/۶۴۶، ۰/۸۵۴)	(۰/۳۳۳، ۰/۵۸۳، ۰/۷۷۱)	(۰/۳۱۳، ۰/۵۶۳، ۰/۷۵۰)	(۰، ۰، ۰)	(۰/۳۱۳، ۰/۵۲۱، ۰/۷۷۱)
Fe ₂ O ₃	(۰/۲۹۲، ۰/۵۲۱، ۰/۷۲۹)	(۰/۶۰۴، ۰/۸۵۴، ۱)	(۰/۳۷۵، ۰/۶۰۴، ۰/۷۹۳)	(۰/۳۱۳، ۰/۵۶۳، ۰/۷۹۳)	(۰، ۰، ۰)	(۰/۰۶۳، ۰/۱۶۷، ۰/۴۱۷)	(۰/۱۰۴، ۰/۲۵۰، ۰/۴۷۹)
TiO ₂	(۰/۱۰۴، ۰/۳۱۳، ۰/۵۶۳)	(۰/۲۵۰، ۰/۵۰۰، ۰/۷۲۹)	(۰/۲۷۱، ۰/۵۰۰، ۰/۷۲۹)	(۰، ۰، ۰)	(۰/۳۵۴، ۰/۶۰۴، ۰/۷۹۳)	(۰/۰۴۲، ۰/۱۴۶، ۰/۳۹۶)	(۰/۱۰۴، ۰/۲۵۰، ۰/۴۷۹)
توده مغناطیسی	(۰/۱۴۶، ۰/۳۱۳، ۰/۵۶۳)	(۰/۳۵۴، ۰/۵۶۳، ۰/۷۵۰)	(۰، ۰، ۰)	(۰/۱۶۷، ۰/۳۷۵، ۰/۶۲۵)	(۰/۲۹۲، ۰/۵۰۰، ۰/۷۰۸)	(۰/۱۲۵، ۰/۲۵۰، ۰/۴۷۹)	(۰/۱۰۴، ۰/۲۵۰، ۰/۴۷۹)
اکسید آهن	(۰/۳۷۵، ۰/۶۲۵، ۰/۸۳۳)	(۰، ۰، ۰)	(۰/۴۵۸، ۰/۷۰۸، ۰/۸۹۶)	(۰/۲۰۸، ۰/۴۵۸، ۰/۶۸۸)	(۰/۶۰۴، ۰/۸۵۴، ۰/۹۳۸)	(۰/۰۴۲، ۰/۱۲۵، ۰/۳۷۵)	(۰/۱۴۶، ۰/۳۳۳، ۰/۵۸۳)
گوسان	(۰/۴۵۸، ۰/۷۰۸، ۰/۸۷۵)	(۰، ۰، ۰)	(۰/۴۵۸، ۰/۷۰۸، ۰/۹۱۷)	(۰/۲۹۲، ۰/۵۶۳، ۰/۷۷۱)	(۰/۵۴۲، ۰/۷۹۳، ۰/۹۳۸)	(۰/۱۲۵، ۰/۲۲۹، ۰/۴۵۸)	(۰/۱۰۴، ۰/۳۷۱، ۰/۵۲۱)
دگرسانی	(۰، ۰، ۰)	(۰/۴۱۷، ۰/۶۴۶، ۰/۸۳۳)	(۰/۱۹۶، ۰/۶۴۶، ۰/۸۵۴)	(۰/۳۱۳، ۰/۵۶۳، ۰/۷۹۳)	(۰/۴۵۸، ۰/۷۰۸، ۰/۸۹۶)	(۰/۱۰۴، ۰/۲۵۰، ۰/۵۰۰)	(۰/۳۵۴، ۰/۵۸۳، ۰/۷۵۰)

جدول (۴-۶) ماتریس ارتباط کامل فازی در روش دیمتل

دگرسانی	گوسان	اکسید آهن	توده مغناطیسی	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	گسل	سنگ میزبان	سنگ میزبان
(۰/۱۱۰، ۰/۲۷۰، ۰/۸۹۵)	(۰/۱۲۲، ۰/۳۰۸، ۱)	(۰/۱۲۴، ۰/۳۱۲، ۱، ۰۰۷)	(۰/۱۲۸، ۰/۳۲۲، ۰/۹۹۷)	(۰/۱۲۵، ۰/۲۸۹، ۰/۹۲۹)	(۰/۱۴۷، ۰/۳۲۷، ۱/۰۱۴)	(۰/۰۲۸، ۰/۱۰۹، ۰/۵۶۵)	(۰/۰۲۰، ۰/۱۰۷، ۰/۶۰۴)	سنگ میزبان
(۰/۱۰۸، ۰/۲۶۱، ۰/۸۴۷)	(۰/۰۹۹، ۰/۲۷۴، ۰/۹۲۹)	(۰/۰۹۱، ۰/۲۷۰، ۰/۹۳۲)	(۰/۱۰۴، ۰/۲۷۸، ۰/۹۳۷)	(۰/۰۸۴، ۰/۲۴۰، ۰/۸۵۴)	(۰/۰۹۶، ۰/۲۷۷، ۰/۹۳۱)	(۰/۰۱۰، ۰/۰۶۰، ۰/۴۵۵)	(۰/۰۶۸، ۰/۱۷۸، ۰/۶۸۱)	گسل
(۰/۰۷۶، ۰/۲۱۳، ۰/۷۷۶)	(۰/۱۱۸، ۰/۲۷۴، ۰/۸۸۴)	(۰/۱۲۵، ۰/۲۹۳، ۰/۹۰۴)	(۰/۰۹۷، ۰/۲۵۱، ۰/۸۶۸)	(۰/۰۷۶، ۰/۲۱۷، ۰/۸۰۰)	(۰/۰۴۳، ۰/۱۷۱، ۰/۷۶۰)	(۰/۰۱۹، ۰/۰۷۹، ۰/۴۸۵)	(۰/۰۳۲، ۰/۱۲۴، ۰/۵۹۸)	Fe ₂ O ₃
(۰/۰۳۵، ۰/۱۵۱، ۰/۶۶۷)	(۰/۰۶۱، ۰/۱۹۸، ۰/۷۶۰)	(۰/۰۶۶، ۰/۲۰۵، ۰/۷۷۱)	(۰/۰۶۶، ۰/۱۹۹، ۰/۷۶۳)	(۰/۰۱۶، ۰/۱۰۱، ۰/۵۹۶)	(۰/۰۸۱، ۰/۲۲۱، ۰/۷۷۸)	(۰/۰۱۲، ۰/۰۶۴، ۰/۴۲۸)	(۰/۰۲۶، ۰/۱۰۴، ۰/۵۳۰)	TiO ₂
(۰/۰۴۵، ۰/۱۵۴، ۰/۶۶۳)	(۰/۰۸۴، ۰/۲۰۹، ۰/۷۶۲)	(۰/۰۸۵، ۰/۲۱۵، ۰/۷۷۳)	(۰/۰۲۷، ۰/۱۲۴، ۰/۶۵۲)	(۰/۰۶۶، ۰/۱۶۲، ۰/۶۸۸)	(۰/۰۷۶، ۰/۲۰۸، ۰/۷۶۴)	(۰/۰۲۶، ۰/۰۸۰، ۰/۴۲۸)	(۰/۰۲۸، ۰/۱۰۶، ۰/۵۲۸)	توده مغناطیسی
(۰/۰۹۰، ۰/۲۲۵، ۰/۸۰۵)	(۰/۱۳۲، ۰/۲۹۵، ۰/۹۰۵)	(۰/۰۴۷، ۰/۱۷۸، ۰/۷۷۹)	(۰/۱۱۲، ۰/۲۷۵، ۰/۹۰۰)	(۰/۰۶۲، ۰/۲۱۱، ۰/۸۰۳)	(۰/۱۲۸، ۰/۳۰۵، ۰/۹۱۲)	(۰/۰۱۷، ۰/۰۷۷، ۰/۴۹۰)	(۰/۰۳۹، ۰/۱۴۱، ۰/۶۲۴)	اکسید آهن
(۰/۱۰۴، ۰/۲۵۲، ۰/۸۳۲)	(۰/۰۴۷، ۰/۱۸۰، ۰/۷۹۵)	(۰/۱۴۴، ۰/۳۱۲، ۰/۹۴۴)	(۰/۱۱۵، ۰/۲۸۱، ۰/۹۳۷)	(۰/۰۷۶، ۰/۲۲۸، ۰/۸۲۶)	(۰/۱۳۲، ۰/۳۰۴، ۰/۹۳۸)	(۰/۰۲۰، ۰/۰۹۴، ۰/۵۱۵)	(۰/۰۳۵، ۰/۱۲۷، ۰/۶۳۲)	گوسان
(۰/۰۳۳، ۰/۱۴۸، ۰/۷۱۷)	(۰/۱۱۶، ۰/۲۸۶، ۰/۹۳۷)	(۰/۱۱۲، ۰/۲۸۲، ۰/۹۳۸)	(۰/۱۰۵، ۰/۲۷۵، ۰/۹۳۲)	(۰/۰۸۱، ۰/۲۳۴، ۰/۸۵۲)	(۰/۱۱۹، ۰/۲۹۴، ۰/۹۴۵)	(۰/۰۲۶، ۰/۰۹۸، ۰/۵۲۸)	(۰/۰۷۲، ۰/۱۸۲، ۰/۶۷۳)	دگرسانی

در گام بعدی مقادیر کامل فازی، فازی‌زدایی شدند و در نتیجه مقادیر قطعی به‌دست آمد. مقادیر قطعی در جدول (۷-۴) ارائه شده است. تمام مقادیر ماتریس ارتباط کامل قطعی شده که کمتر از میانگین ماتریس ارتباط کامل باشند، با استفاده از رابطه (۸-۲) شناسایی و مقدار آنها صفر شد. به عبارت دیگر آن رابطه علی در نظر گرفته نمی‌شود. جدول (۸-۴)، ماتریس ارتباط کامل که مقادیر کمتر از آستانه حذف شده است را نشان می‌دهد. مقدار آستانه (TS) در این تحقیق برابر ۰/۲۹۷ به-دست آمد.

جدول (۷-۴) مقادیر قطعی معیارها در روش دیمتل فازی

سنگ میزبان	گسل	Fe_2O_3	TiO_2	توده مغناطیسی	اکسید آهن	گوسان	دگرسانی
سنگ میزبان	۰/۱۸۳	۰/۴۳۳	۰/۳۸۲	۰/۴۱۸	۰/۴۱۳	۰/۴۰۸	۰/۳۶۲
گسل	۰/۱۲۸	۰/۳۷۶	۰/۳۳۴	۰/۳۷۷	۰/۳۷۱	۰/۳۷۴	۰/۳۴۹
Fe_2O_3	۰/۱۴۸	۰/۲۷۰	۰/۳۱۰	۰/۳۴۸	۰/۳۸۷	۰/۳۶۹	۰/۳۰۳
TiO_2	۰/۱۲۷	۰/۳۱۲	۰/۱۸۷	۰/۲۹۲	۰/۲۹۸	۰/۲۹۱	۰/۲۳۸
توده مغناطیسی	۰/۱۴۲	۰/۳۰۰	۰/۲۵۰	۰/۲۱۵	۰/۳۰۷	۰/۳۰۱	۰/۲۴۰
اکسید آهن	۰/۱۴۷	۰/۳۹۷	۰/۳۰۵	۰/۳۷۱	۰/۲۷۹	۰/۳۸۸	۰/۳۲۴
گوسان	۰/۱۶۵	۰/۳۹۹	۰/۳۲۳	۰/۳۷۹	۰/۴۰۶	۰/۲۸۳	۰/۳۴۰
دگرسانی	۰/۱۶۹	۰/۳۹۲	۰/۳۳۰	۰/۳۷۵	۰/۳۸۲	۰/۳۸۴	۰/۲۴۴

جدول (۸-۴) مقادیر قطعی معیارها با حذف مقادیر کمتر از حد آستانه

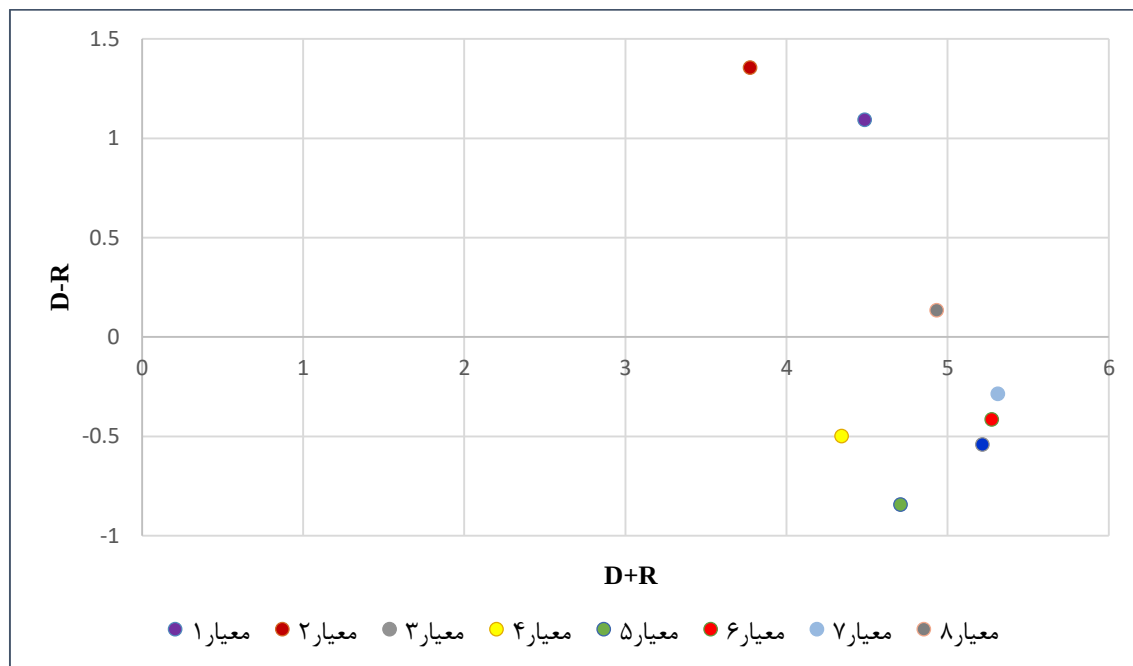
سنگ میزبان	گسل	Fe_2O_3	TiO_2	توده مغناطیسی	اکسید آهن	گوسان	دگرسانی
سنگ میزبان	۰	۰/۴۳۳	۰/۳۸۲	۰/۴۱۸	۰/۴۱۳	۰/۴۰۸	۰/۳۶۲
گسل	۰	۰/۳۷۶	۰/۳۳۴	۰/۳۷۷	۰/۳۷۱	۰/۳۷۴	۰/۳۴۹
Fe_2O_3	۰	۰	۰/۳۱۰	۰/۳۴۸	۰/۳۸۷	۰/۳۶۹	۰/۳۰۳
TiO_2	۰	۰/۳۱۲	۰	۰	۰/۲۹۸	۰	۰
توده مغناطیسی	۰	۰/۳	۰	۰	۰/۳۰۷	۰/۳۰۱	۰
اکسید آهن	۰	۰/۳۹۷	۰/۳۰۵	۰/۳۷۱	۰	۰/۳۸۸	۰/۳۲۴
گوسان	۰	۰/۳۹۹	۰/۳۲۳	۰/۳۷۹	۰/۴۰۶	۰	۰/۳۴۰
دگرسانی	۰	۰/۳۹۲	۰/۳۳۰	۰/۳۷۵	۰/۳۸۲	۰/۳۸۴	۰

در ادامه، مجموع سطرها (D) و ستون‌های (R) ماتریس T محاسبه شد. سپس با توجه به D و R، مقادیر $D+R$ و $D-R$ حاصل شد که به ترتیب نشان دهنده میزان تعامل و قدرت تأثیرگذاری عوامل هستند. خروجی نهائی در آمده است. جمع عناصر هر سطر (D) برای هر عامل نشانگر میزان تأثیرگذاری آن عامل بر سایر عامل‌های سیستم است. سنگ میزبان با مقدار $2/789$ از بیشترین تأثیرگذاری برخوردار است و گسل، دگرسانی، گوسان، اکسید آهن، Fe_2O_3 ، توده مغناطیسی و TiO_2 به ترتیب در درجات بعدی تأثیرگذاری قرار دارند. جمع عناصر ستون (R) برای هر عامل نشانگر میزان تأثیرپذیری آن عامل از سایر عامل‌های سیستم است. Fe_2O_3 با مقدار $2/879$ از بیشترین تأثیرپذیری برخوردار است و اکسید آهن، گوسان، توده مغناطیسی، TiO_2 ، دگرسانی، سنگ میزبان و گسل در درجات بعدی تأثیرپذیری قرار دارند. بردار افقی ($D + R$) میزان تأثیر و تاثر عامل مورد نظر در سیستم را نشان می دهد. به عبارت دیگر هرچه مقدار $D + R$ بیشتر باشد، آن عامل، تعامل بیشتری با سایر عوامل سیستم دارد. در این تحقیق گوسان با مقدار $5/31$ از بیشترین تعامل برخوردار است و اکسید آهن، آنومالی Fe_2O_3 ، دگرسانی، توده مغناطیسی، سنگ میزبان، TiO_2 و گسل در درجات بعدی تعامل با سیستم قرار دارند. بردار عمودی ($D - R$) قدرت تأثیرگذاری هر عامل را نشان می دهد. بطور کلی اگر $D - R$ مثبت باشد، متغیر یک متغیر علی محسوب می شود و اگر منفی باشد، معلول محسوب می شود. بر همین اساس لایه‌های سنگ میزبان، گسل و دگرسانی، علی بوده و Fe_2O_3 ، TiO_2 ، توده مغناطیسی، اکسید آهن و گوسان معلول به حساب می آیند.

الگوی روابط معنی دار در شکل (۴-۱۳) آورده شده است. این الگو در قالب یک نمودار بوده که در آن محور طولی مقادیر $D + R$ و محور عرضی براساس $D - R$ می باشد. موقعیت و روابط هر عامل با نقطه‌ای به مختصات ($D + R$, $D - R$) در دستگاه معین می شود.

جدول (۹-۴) خروجی نهایی روش دیمتل فازی

D-R	D+R	D	R	
۱/۰۹۳	۴/۴۸۵	۲/۷۸۹	۱/۶۹۶	سنگ میزبان
۱/۳۵۵	۳/۷۷۴	۲/۵۶۵	۱/۲۰۹	گسل
-۰/۵۴۱	۵/۲۱۶	۲/۳۳۷	۲/۸۷۹	Fe ₂ O ₃
-۰/۴۹۹	۴/۳۴۱	۱/۹۲۱	۲/۴۲	TiO ₂
-۰/۸۴۳	۴/۷۰۸	۱/۹۳۳	۲/۷۷۵	توده مغناطیسی
-۰/۴۱۵	۵/۲۷۳	۲/۴۲۹	۲/۸۴۴	اکسید آهن
-۰/۲۸۶	۵/۳۱	۲/۵۱۲	۲/۷۹۸	گوسان
۰/۱۳۵	۴/۹۳۲	۲/۵۳۳	۲/۳۹۸	دگرسانی



شکل (۴-۱۳) الگوی روابط علت و معلولی بین معیارها

نتایج روش دیمتل در ارزیابی دقیق عملکرد معیارها بسیار مؤثر خواهد بود. اینکه هر کدام از معیارها تا چه اندازه می‌تواند بر روی یک سیستم تأثیرگذار باشد و چه اندازه تأثیر خواهند گرفت. علاوه بر این موضوع، با توجه به ماهیت روشی همچون فرآیند تحلیل شبکه‌ای که در آن معیارها به هم وابسته بوده و روابط درونی آنها حائز اهمیت است، روش دیمتل کارآمد واقع می‌شود.

۴-۴- تعیین اوزان با روش ANP فازی

پس از بررسی علت و معلولی معیارها و شناسایی روابط درونی آنها، با استفاده از روش ANP فازی و نرم افزار Super Desicion اقدام به تعیین وزن هر لایه شد. در این راستا نیز پرسشنامه‌ای جداگانه تهیه و جهت مقایسات زوجی به کارشناسان مربوطه داده شد. پس از گردآوری نظرات کارشناسان، ابتدا به وسیله روش AHP فازی چانگ [۱۰۲] وزن هر معیار تعیین شد و در ادامه این وزن‌ها همراه با روابط به دست آمده از روش دیمتل فازی، به عنوان ورودی نرم افزار استفاده شدند. در نهایت وزن‌های معیارها با استفاده از روش ANP فازی مطابق با جدول (۴-۱۰) حاصل شد. در این حالت نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ به دست آمد. تصویر گرافیکی این وزن‌ها در شکل (۴-۱۴) آورده شده است. در این تصویر مقادیر مربوط به ستون Normals همان وزن‌ها هستند. مقادیر ستون Ideals به این ترتیب است که بالاترین وزن را معادل عدد یک در نظر گرفته و بقیه وزن‌ها را نسبت به آن محاسبه می‌کند. طبق این تصویر بیشترین وزن مربوط به توده مغناطیسی با ضریب ۳۸۱/ و کمترین وزن مربوط به دگرسانی با ضریب ۰/۰۴۷ می‌باشد. پس از محاسبه وزن‌ها، با استفاده از روش مجموع وزن-ها، نقشه نهایی حاصل از تلفیق همه لایه‌ها تهیه شد و سپس به صورت فازی درآمد. این تصویر در شکل (۴-۱۵) نمایش داده شده است.

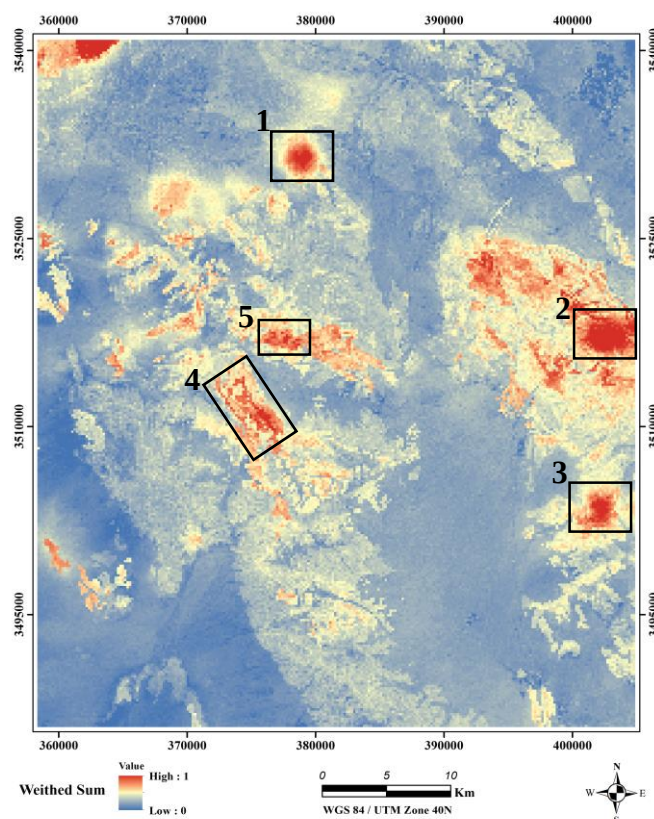
در ادامه، از میان نواحی با پتانسیل بالای کانی‌زایی، پنج منطقه به عنوان مناطق با بیشترین احتمال کانی‌زایی انتخاب شد تا این مناطق به کمک روش‌های ویکور و تاپسیس فازی مورد ارزیابی و اولویت‌بندی قرار گیرند. این پنج منطقه به وسیله پلیگون‌های سیاه رنگ بر روی شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است.

جدول (۴-۱۰) اوزان بدست آمده از روش Fuzzy ANP

لایه	سنگ میزبان	گسل	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	توده مغناطیسی	اکسید آهن	گوسان	دگرسانی
وزن	۰/۱۲۹	۰/۰۶۹	۰/۱۵۶	۰/۰۸۶	۰/۳۸۶	۰/۰۶۶	۰/۰۶۵	۰/۰۴۷

Name	Graphic	Ideals	Normals
Alteration		0.123211	0.047034
Fault		0.180785	0.069011
Fe2O3 Anomaly		0.408084	0.155778
Gossan		0.170188	0.064966
Host Rock		0.337653	0.128893
Iron Oxide		0.172613	0.065892
Magnetic Body		1.000000	0.381731
TiO2 Anomaly		0.227111	0.086695

شکل (۴-۱۴) تصویر گرافیکی حاصل از خروجی روش Fuzzy ANP



شکل (۴-۱۵) نقشه پتانسیل کانی‌زایی آهن در محدوده اسفوردی با استفاده از روش دیمتل و ANP فازی. پلیگون‌های سیاه، نواحی با پتانسیل بالا می‌باشند

۴-۵- اولویت‌بندی اکتشافی با روش ویکور فازی

جهت اولویت‌بندی نواحی با پتانسیل بالا از روش ویکور فازی استفاده شد. بر همین اساس پنج منطقه انتخاب شده از قبل به عنوان گزینه‌های این فرآیند در نظر گرفته شدند. بنابراین پنج گزینه همراه با هشت معیار در اختیار داشته که با اجرای روش ویکور فازی، نتایج در ادامه آمده است.

طیف فازی استفاده شده در روش ویکور فازی همانند روش دیمتل و مطابق با جدول (۴-۴) است. پس از اعمال نظرات کارشناسی، ماتریس تصمیم تشکیل شد. این ماتریس در جدول (۴-۱۱) ارائه شده است. در ادامه ایده‌آل مثبت و منفی معیارها به کمک فرمول‌های ارائه شده در فصل دوم مربوط به این بخش، محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده در جدول (۴-۱۲) آورده شده است. سپس مقادیر به-دست آمده نرمالایز شده و در نهایت مقادیر فازی R ، S و Q محاسبه شد که در جدول (۴-۱۳) نشان داده شده است. مقادیر قطعی این سه پارامتر به همراه رتبه گزینه‌ها نیز محاسبه و در جدول (۴-۱۴) آورده شده است.

جدول (۱۱-۴) ماتریس تصمیم در روش ویکور فازی

دگرسانی	گوسان	اکسید آهن	توده مغناطیسی	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	گسل	سنگ میزبان
(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	(۰/۷۵،۱،۱)	(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	(۰/۲۵،۰/۵۰،۰/۷۵)	(۰،۰/۲۵)	گزینه ۱
(۰/۷۵،۱،۱)	(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	(۰/۵۰،۰/۷۵،۱)	(۰/۷۵،۱،۱)	(۰،۰،۰/۲۵)	(۰/۵۰،۰/۷۵،۱)	(۰/۲۵،۰/۵۰،۰/۷۵)	گزینه ۲
(۰،۰،۰/۲۵)	(۰/۲۵،۰/۵۰،۰/۷۵)	(۰/۲۵،۰/۵۰،۰/۷۵)	(۰/۷۵،۱،۱)	(۰،۰،۰/۲۵)	(۰/۵۰،۰/۷۵،۱)	(۰،۰،۰/۲۵)	گزینه ۳
(۰/۲۵،۰/۵۰،۰/۷۵)	(۰/۵۰،۰/۷۵،۱)	(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	(۰/۵۰،۰/۷۵،۱)	(۰،۰،۰/۲۵)	(۰/۲۵،۰/۵۰،۰/۷۵)	(۰/۵۰،۰/۷۵،۱)	گزینه ۴
(۰/۲۵،۰/۵۰،۰/۷۵)	(۰/۵۰،۰/۷۵،۱)	(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	(۰،۰،۰/۲۵)	(۰/۲۵،۰/۵۰،۰/۷۵)	(۰،۰/۲۵،۰/۵۰)	گزینه ۵

جدول (۴-۱۲) مقادیر ایده آل مثبت و منفی فازی در روش ویکور فازی

نام معیار	ایده آل مثبت	ایده آل منفی
سنگ میزبان	(۰/۷۵، ۱، ۱)	(۰، ۰، ۰/۲۵)
گسل	(۰/۵۰، ۰/۷۵، ۱)	(۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰)
Fe ₂ O ₃	(۰/۵۰، ۰/۷۵، ۱)	(۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰)
TiO ₂	(۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰)	(۰، ۰، ۰/۲۵)
توده مغناطیسی	(۰/۷۵، ۱، ۱)	(۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰)
اکسید آهن	(۰/۵۰، ۰/۷۵، ۱)	(۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰)
گوسان	(۰/۵۰، ۰/۷۵، ۱)	(۰، ۰/۲۵، ۰/۵۰)
دگرسانی	(۰/۷۵، ۱، ۱)	(۰، ۰، ۰/۲۵)

جدول (۴-۱۳) مقادیر فازی R, S, Q

نام گزینه	فازی R	فازی S	فازی Q
گزینه ۱	(۰/۰۶۳، ۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵)	(۰/۱۲۵، ۰/۴۰۶، ۰/۸۴۴)	(۰/۵۹۷، ۰/۳۱۹، ۰/۱)
گزینه ۲	(۰، ۰/۰۶۳، ۰/۱۲۵)	(۰/۲۵۰، ۰/۲۵۰، ۰/۶۵۶)	(۰/۹۰۳، ۰، ۰/۹۱۷)
گزینه ۳	(۰/۰۶۳، ۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵)	(۰/۰۹۴، ۰/۴۳۸، ۰/۷۸۱)	(۰/۵۸۳، ۰/۳۳۳، ۰/۹۷۲)
گزینه ۴	(۰، ۰/۰۶۳، ۰/۱۲۵)	(۰/۲۸۱، ۰/۲۸۱، ۰/۶۸۸)	(۰/۹۱۷، ۰/۰۱۴، ۰/۹۳۱)
گزینه ۵	(۰/۰۳۱، ۰/۰۹۴، ۰/۱۲۵)	(۰/۱۵۶، ۰/۳۷۵، ۰/۷۸۱)	(۰/۷۳۶، ۰/۱۸۱، ۰/۹۷۲)

جدول (۴-۱۴) مقادیر قطعی R, S, Q و رتبه این پارامترها

نام گزینه	قطعی R	رتبه R	قطعی S	رتبه S	قطعی Q	رتبه Q
گزینه ۱	۰/۱۰۹	۳	۰/۳۸۳	۴	۰/۲۶	۴
گزینه ۲	۰/۰۶۲	۱	۰/۲۲۷	۱	۰/۰۰۳	۱
گزینه ۳	۰/۱۰۹	۳	۰/۳۹۱	۵	۰/۲۶۴	۵
گزینه ۴	۰/۰۶۲	۱	۰/۲۴۲	۲	۰/۰۱	۲
گزینه ۵	۰/۰۸۶	۲	۰/۳۴۴	۳	۰/۱۴۹	۳

با توجه به این جدول، کمترین مقدار تاسف مربوط به گزینه‌های ۲ و ۴ و کمترین مقدار سودمندی نیز مربوط به گزینه ۲ و سپس گزینه ۴ است. با توجه به مقادیر R و S، شاخص ویکور محاسبه و در نتیجه گزینه‌های ۲، ۴، ۵، ۱ و ۳ به ترتیب اهمیت معرفی می‌شوند.

۴-۶- اولویت‌بندی اکتشافی با روش تاپسیس فازی

همانند تعیین اولویت‌های اکتشافی به وسیله روش ویکور فازی، در اینجا نیز با هشت معیار و پنج گزینه مواجه هستیم. طیف فازی مورد استفاده در این تحقیق برای پیاده‌سازی این روش مطابق با جدول (۴-۱۵) می‌باشد. ماتریس تصمیم‌گیری نیز بر اساس میانگین نظرات خبرگان تهیه و در جدول (۴-۱۶) نمایش داده شده است. برای بی‌مقیاس کردن (نرمال کردن) ماتریس تصمیم‌گیری با توجه به معیارهای مثبت و منفی، از روابط مربوطه استفاده شد. نتایج این بی‌مقیاس کردن در جدول (۴-۱۷) ارائه شده است. با توجه به وزن معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم وزن‌دار از ضرب کردن وزن مربوط به هر معیار در ماتریس بی‌مقیاس شده فازی حاصل شد که مقادیر مربوطه در جدول (۴-۱۸) آورده شده است. در ادامه راه حل ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه و مقادیر در جدول (۴-۱۹) ارائه شده است. سپس فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه شد. نتایج این محاسبات به قرار جدول (۴-۲۰) است.

جدول (۴-۱۵) طیف فازی مورد استفاده در روش تاپسیس فازی

کد	عبارت کلامی	L	M	U
۱	خیلی کم	۱	۱	۳
۲	کم	۱	۳	۵
۳	متوسط	۳	۵	۷
۴	زیاد	۵	۷	۹
۵	خیلی زیاد	۷	۹	۹

جدول (۴-۱۶) ماتریس تصمیم به‌دست آمده در روش تاپسیس فازی

گزینه	سنگ میزبان	گسل	Fe2O3	TiO2	توده مغناطیسی	اکسید آهن	گوسان	دگرسانی
گزینه ۱	(۳، ۵، ۷)	(۳، ۵، ۷)	(۵، ۷، ۹)	(۳، ۵، ۷)	(۷، ۹، ۹)	(۱، ۱، ۳)	(۱، ۳، ۵)	(۳، ۵، ۷)
گزینه ۲	(۵، ۷، ۹)	(۷، ۹، ۹)	(۱، ۳، ۵)	(۱، ۱، ۳)	(۷، ۹، ۹)	(۱، ۱، ۳)	(۱، ۱، ۳)	(۷، ۹، ۹)
گزینه ۳	(۳، ۵، ۷)	(۷، ۹، ۹)	(۱، ۱، ۳)	(۱، ۳، ۵)	(۷، ۹، ۹)	(۳، ۵، ۷)	(۵، ۷، ۹)	(۱، ۳، ۵)
گزینه ۴	(۷، ۹، ۹)	(۷، ۹، ۹)	(۳، ۵، ۷)	(۳، ۵، ۷)	(۷، ۹، ۹)	(۵، ۷، ۹)	(۵، ۷، ۹)	(۷، ۹، ۹)
گزینه ۵	(۷، ۹، ۹)	(۷، ۹، ۹)	(۵، ۷، ۹)	(۵، ۷، ۹)	(۳، ۵، ۷)	(۱، ۳، ۵)	(۳، ۵، ۷)	(۷، ۹، ۹)

جدول (۴-۱۷) مقادیر بی‌مقیاس شده وزن‌دار در روش تاپسیس فازی

دگرسانی	گوسان	اکسید آهن	توده مغناطیسی	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	گسل	سنگ میزبان
گزینه ۱ (-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)	(-۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸، ۱)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)
گزینه ۲ (-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸، ۱)
گزینه ۳ (-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶)	(-۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸، ۱)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)
گزینه ۴ (-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸، ۱)	(-۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸، ۱)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)
گزینه ۵ (-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)	(-۰/۱۱۱، -۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶)	(-۰/۳۳۳، -۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸)	(-۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸، ۱)	(-۰/۵۵۶، -۰/۷۷۸، ۱)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)	(-۰/۷۷۸، ۱، ۱)

جدول (۴-۱۸) ماتریس بی‌مقیاس شده در روش تاپسیس فازی

دگرسانی	گوسان	اکسید آهن	توده مغناطیسی	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	گسل	سنگ میزبان
گزینه ۱ (-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۱۴، -۰/۴۲، -۰/۶۹)	(-۰/۱۴، -۰/۴۲، -۰/۶۹)	(-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۶۹، -۰/۹۷، -۰/۱۲۵)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)
گزینه ۲ (-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۱۴، -۰/۴۲، -۰/۶۹)	(-۰/۱۴، -۰/۴۲، -۰/۶۹)	(-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۱۴، -۰/۴۲، -۰/۶۹)	(-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۶۹، -۰/۹۷، -۰/۱۲۵)	(-۰/۶۹، -۰/۹۷، -۰/۱۲۵)
گزینه ۳ (-۰/۱۴، -۰/۴۲، -۰/۶۹)	(-۰/۶۹، -۰/۹۷، -۰/۱۲۵)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۱۴، -۰/۴۲، -۰/۶۹)	(-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)
گزینه ۴ (-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۶۹، -۰/۹۷، -۰/۱۲۵)	(-۰/۶۹، -۰/۹۷، -۰/۱۲۵)	(-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)
گزینه ۵ (-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۱۴، -۰/۴۲، -۰/۶۹)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۶۹، -۰/۹۷، -۰/۱۲۵)	(-۰/۹۷، -۰/۱۲۵، -۰/۱۲۵)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)	(-۰/۴۲، -۰/۶۹، -۰/۹۷)

جدول (۴-۱۹) راه حل ایده آل مثبت و منفی

معیار	ایده آل مثبت	ایده آل منفی
سنگ میزبان	(۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۹۷)	(۰/۰۹۷، ۰/۰۶۹، ۰/۰۴۲)
گسل	(۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۹۷)	(۰/۰۹۷، ۰/۰۶۹، ۰/۰۴۲)
Fe ₂ O ₃	(۰/۱۲۵، ۰/۰۹۷، ۰/۰۶۹)	(۰/۰۴۲، ۰/۰۱۴، ۰/۰۱۴)
TiO ₂	(۰/۱۲۵، ۰/۰۹۷، ۰/۰۶۹)	(۰/۰۴۲، ۰/۰۱۴، ۰/۰۱۴)
توده مغناطیسی	(۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۹۷)	(۰/۰۹۷، ۰/۰۶۹، ۰/۰۴۲)
اکسید آهن	(۰/۱۲۵، ۰/۰۹۷، ۰/۰۶۹)	(۰/۰۴۲، ۰/۰۱۴، ۰/۰۱۴)
گوسان	(۰/۱۲۵، ۰/۰۹۷، ۰/۰۶۹)	(۰/۰۴۲، ۰/۰۱۴، ۰/۰۱۴)
دگرسانی	(۰/۱۲۵، ۰/۱۲۵، ۰/۰۹۷)	(۰/۰۶۹، ۰/۰۴۲، ۰/۰۱۴)

جدول (۴-۲۰) مقادیر فاصله از ایده آل های مثبت و منفی

نام گزینه	فاصله ایده آل مثبت	فاصله ایده آل منفی
گزینه ۱	۰/۳۰۳	۰/۲۲۲
گزینه ۲	۰/۳۰۴	۰/۲۲۲
گزینه ۳	۰/۲۸۲	۰/۲۴۲
گزینه ۴	۰/۰۵۶	۰/۴۶۶
گزینه ۵	۰/۱۳۱	۰/۳۹۳

در نهایت شاخص شباهت (Ci) بر اساس فرمول مربوطه به دست آمد و در پی آن رتبه بندی گزینه ها انجام شد. نتایج در جدول (۴-۲۱) نشان داده شده اند. بهترین رتبه مربوط به گزینه ۴ و پایین ترین رتبه مربوط به گزینه ۲ است.

جدول (۴-۲۱) مقادیر شاخص شباهت و رتبه بندی گزینه ها در روش تاپسیس فازی

نام گزینه	Ci	رتبه
گزینه ۱	۰/۴۲۳	۴
گزینه ۲	۰/۴۲۲	۵
گزینه ۳	۰/۴۶۲	۳
گزینه ۴	۰/۸۹۴	۱
گزینه ۵	۰/۷۴۹	۲

۴-۷- جمع‌بندی

در این فصل مدل پتانسیل معدنی سنگ آهن برای ناحیه مورد مطالعه تهیه شد. برای این امر از دو روش نمودار پیش‌بینی-مساحت و ANP فازی بهره برده شد. نقشه‌های پتانسیل معدنی در هر دو روش بسیار منطبق بر هم بوده و مناطق با پتانسیل بالا در چندین ناحیه قابل مشاهده است. جهت اولویت‌بندی این نواحی با پتانسیل، از روش‌های ویکور و تاپسیس فازی استفاده شد. هر کدام از این روش‌ها ترتیب متفاوتی از اولویت‌بندی نواحی پنج‌گانه با پتانسیل بالا را ارائه داده‌اند. با توجه به اینکه این نتایج نیازمند بررسی‌های میدانی و اعتبارسنجی هستند لذا در فصل بعد به این موضوع پرداخته شده است.

فصل پنجم

اعتبارسنجی

۵-۱- مقدمه

جهت ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج، بررسی میدانی از نواحی با پتانسیل صورت پذیرفت. به این منظور و جهت نمونه‌برداری از مناطق مستعد کانی‌زایی، یک تیم اکتشافی به منطقه مطالعه اعزام و عملیات پی‌جویی و نمونه‌برداری صورت پذیرفت. از هر ناحیه مستعد در محدوده، نمونه‌های ماکروسکوپی برداشت شد. در محدوده مطالعه عملیات اکتشافی متعددی صورت پذیرفته است. در طی این عملیات بخش‌های مختلفی مورد بازدید قرار گرفت که آثار و شواهد زمین‌شناسی گوناگون ثبت شد.

۵-۲- بازدید میدانی

با توجه به نتایج و نقشه نهایی پتانسیل معدنی، با هدف صحت‌سنجی و ارزیابی مناطق با پتانسیل بالای کانی‌زایی آهن، بررسی‌های میدانی در اغلب نواحی محدوده برگه اسفوردی صورت گرفت. در شکل (۵-۱) نمایی از دو معدن در محدوده مطالعه نمایش داده شده است. شکل (۵-۱ الف) مربوط به یکی از معادن سنگ‌آهن در جنوب‌غرب محدوده است که در زمان عکس‌برداری به دلیل شرایط بازار، فعالیت‌های آن متوقف شده بود و البته به تیم اکتشافی نیز اجازه ورود داده نشد. در شکل (۵-۱ ب)، تصویری از دپوی معدن فسفات اسفوردی آورده شده است که از معروف‌ترین معادن محدوده است. فراوانترین واحدهای مشاهده شده در محدوده و به ویژه جنوب‌غرب آن، واحدهای آهکی و دولومیتی است. نمونه‌هایی از این واحدها در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. علاوه بر واحدهای آهکی، کربنات‌های محدوده نیز حضور چشمگیری در جنوب و جنوب‌غرب محدوده دارد. واحدهای کربناتی و رخنمون دولومیتی در شکل (۵-۳) نمایش داده شده است. شکل (۵-۴) ساختارهای خطی و گسل-خوردگی شدید را در بخش جنوبی محدوده نشان می‌دهد. در شکل (۵-۵)، حضور توده‌های نفوذی را در جنوب‌غرب برگه و در میان واحدهای آهکی شاهد هستیم. نمونه‌های دیگری از حضور واحدهای نفوذی مافیک در بین واحدهای آهکی و کربناته در شکل (۵-۶) و شکل (۵-۷) نمایش داده شده است.



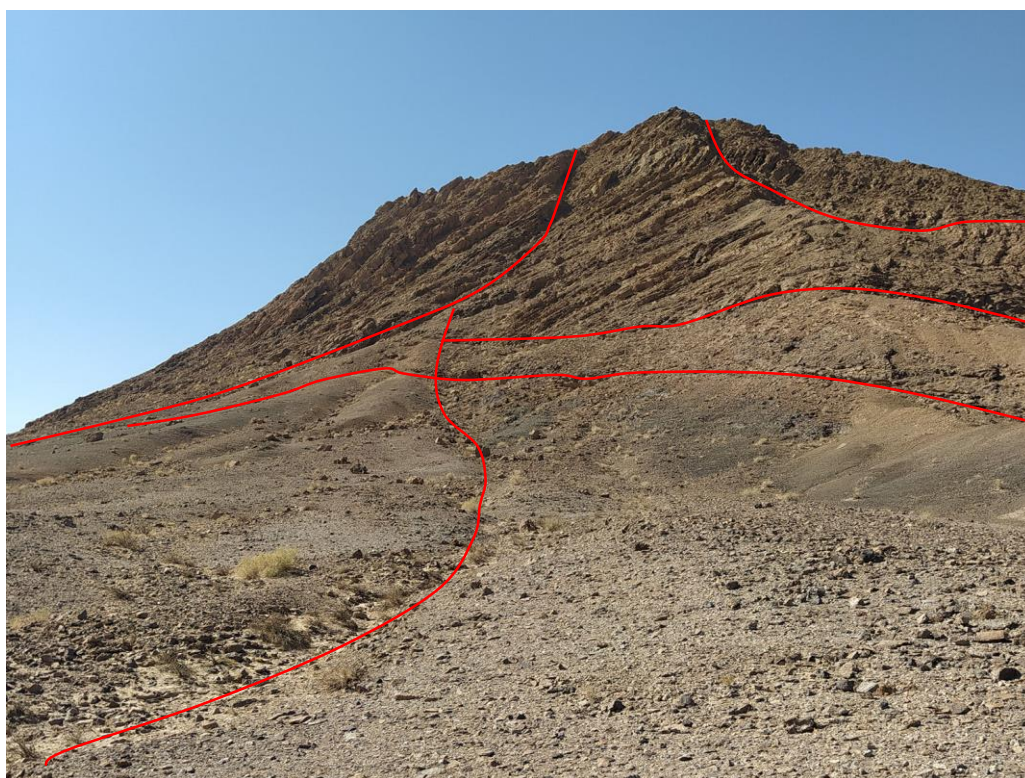
شکل (۱-۵) معادن در محدوده مطالعه: الف- معدن سنگ آهن غیرفعال در جنوب غرب محدوده. ب- نمایی از دیو معدن فسفات اسفوردی



شکل (۲-۵) واحدهای آهکی در محدوده: الف- آهک دولومیتی شده. ب- رخنمون سنگ آهک



شکل (۳-۵) واحدهای کربناتی در محدوده: الف- کربناتهای جنوب غرب برگه اسفوردی. ب- رخنمون دولومیتی در جنوب شرق محدوده



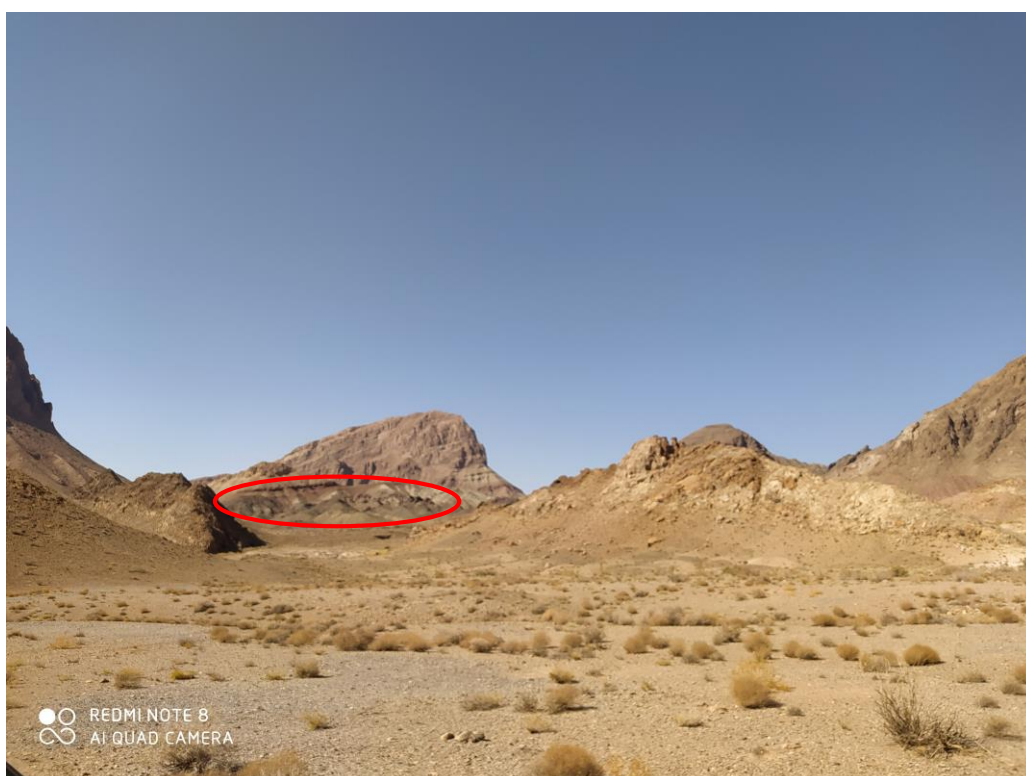
شکل (۴-۵) گسل خوردگی شدید در بخش جنوبی محدوده مطالعه



شکل (۵-۵) حضور واحدهای نفوذی در سنگ میزبان آهکی



شکل (۵-۶) حضور واحدهای نفوذی مافیک در سنگ‌های آهکی محدوده



شکل (۵-۷) توده های نفوذی در توالی آهک و دولومیت

گرانیت‌های محدوده غالباً در جنوب‌شرق محدوده مشاهده شدند که در بسیاری از نواحی دگرسانی-
 هایی مانند دگرسانی سیلیسی و آرژیلیکی در آنها مشاهده می‌شود. در شکل (۵-۸) رخنمون گرانیتی
 و در شکل (۵-۹) دگرسانی سیلیسی در کنار مارن و آهک مشاهده می‌شود (توده گرانیتی در تصویر
 نیست).



شکل (۵-۸) رخنمون گرانیتی در جنوب‌شرق محدوده



شکل (۵-۹) دگرسانی سیلیسی در توالی مارن و آهک

پدیده اسکارنی شدن جز رخدادهایی بود که در بخش جنوب شرقی محدوده مطالعه به چشم می خورد. نمونه ای از این رخداد در شکل (۵-۱۰) آورده شده است. در تصویر شکل (۵-۱۱)، واریزه های مگنتیتی مشاهده شده اما رگه پیدا نشد و لذا این ناحیه نیازمند پی جویی و کارهای اکتشافی بیشتری است.



شکل (۵-۱۰) اسکارنی شدن آهک در محدوده مطالعه



شکل (۵-۱۱) وجود واریزه های مگنتیتی در سنگ میزبان کربناتی

در محدوده برگه اسفوردی عملیات اکتشافی بسیاری صورت گرفته است. از بارزترین این حفريات، حفر ترانشه‌های متعدد در نواحی مختلف محدوده مطالعه است. یکی از این حفريات در شکل (۵-۱۲) نمایش داده شده است. واریزه مگنتیتی بسیاری حاصل از حفر ترانشه در این قسمت مشاهده شد.



شکل (۵-۱۲) حفر ترانشه بر روی کوه حاوی مگنتیت در جنوب محدوده

در بخش مرکزی محدوده حفر یکی از ترانشه‌ها جلب توجه می‌نمود، جایی که احتمال حضور زغال-سنگ نیز داده می‌شد اما با توجه به سن واحد زمین‌شناسی، این احتمال رد شد و شیل سیاه همراه با لیمونیت دیده شد. در شکل (۵-۱۳) تصاویر مرتبط به این ترانشه آورده شده است.



شکل (۵-۱۳) الف- حفر ترانشه در بخش مرکزی محدوده. ب- شیل سیاه دارای پیریت هوازده و تبدیل آن به لیمونیت و گوگرد. ج- نمونه ماکروسکوپی برداشت شده از این ترانشه.

از دیگر موارد حفریات در محدوده، حفر تونل‌های اکتشافی است که در بخش‌هایی از محدوده مشاهده شد. نمونه‌ای از این تونل‌های اکتشافی در شکل (۵-۱۴) نمایش داده شده است. این تونل بر روی کوهی واقع شده است که واریزه‌های لیمونیتی را می‌توان از چند صدمتر دورتر تشخیص داد. در این بخش زون گوسان مشاهده شد.



شکل (۵-۱۴) حفر تونل اکتشافی در زون حاوی گوسان آهنی

از دیگر شواهد اکتشافی در محدوده مطالعه، حضور رخنمون هماتیتی و واریزه‌های بزرگ سنگ آهن در رسوبات منطقه است. در بخش مرکزی محدوده چندین رخنمون بزرگ از هماتیت مشاهده شد. شکل (۵-۱۵) یکی از رخنمون‌های هماتیتی را نشان می‌دهد که بخشی از آن را ماسه‌های بادی پوشانده است. در شکل (۵-۱۶) تصویری از واریزه سنگ آهن در رسوبات جنوب شرق محدوده آورده شده است. علی‌رغم پی‌جویی زیاد در این منطقه، رخنمون مربوطه یافت نشد و لذا این بخش نیز از نواحی مستعد کانی‌زایی احتمالی است که قطعاً نیازمند بررسی‌های میدانی بیشتری خواهد بود.



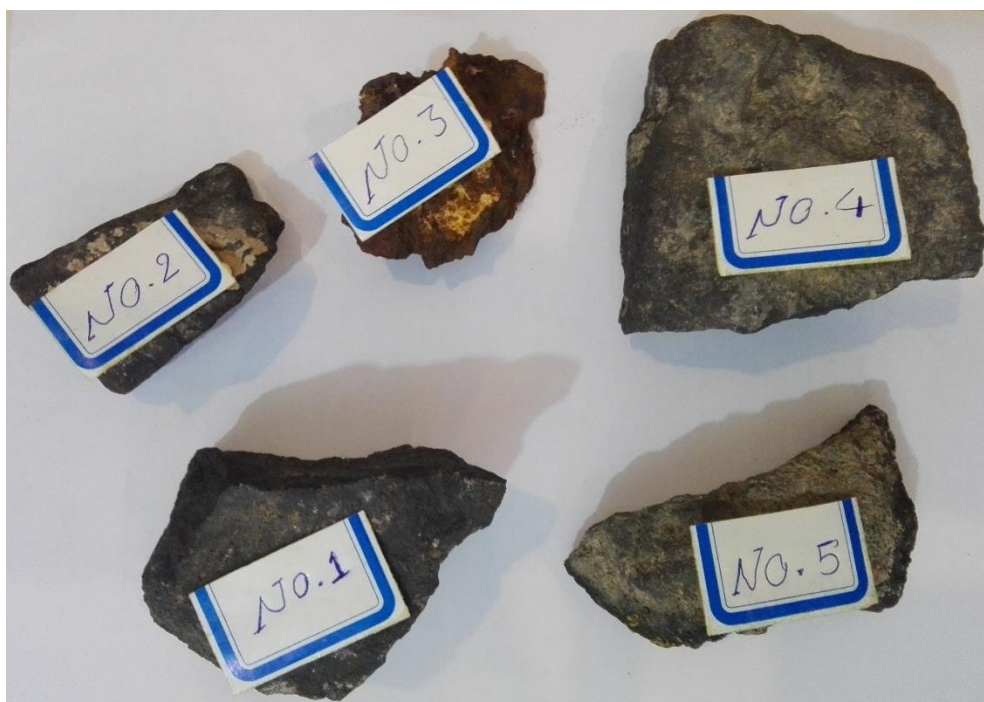
شکل (۵-۱۵) رخنمون هماتیته در نواحی مرکزی محدوده مطالعه



شکل (۵-۱۶) واریزه سنگ آهن در رسوبات جنوب شرق محدوده

۵-۳- آنالیز نمونه‌ها

جهت صحت‌سنجی نتایج، بررسی میدانی در نواحی پنج‌گانه با پتانسیل بالا صورت پذیرفت. به جهت نمونه‌برداری از مناطق مستعد کانی‌زایی، از هر ناحیه مستعد در محدوده، نمونه‌های ماکروسکوپی برداشت شد. هر کدام از این نمونه‌ها با توجه به ناحیه برداشت، اسم‌گذاری و جهت ارسال به آزمایشگاه مهیا شدند. نمونه‌های اسم‌گذاری شده در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده‌اند.



شکل (۵-۱۷) نمونه‌های ماکروسکوپی از نواحی پنج‌گانه

این نمونه‌ها به روش‌های XRF و ICP-MS مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج آنالیز XRF در جدول (۵-۱) و نتایج ICP-MS در جدول (۵-۲) آورده شده است. بر طبق نتایج، نمونه‌های ناحیه ۲ و بعد از آن ناحیه ۴ دارای بیشترین درصد آهن هستند و در عین حال ناحیه ۲، دارای کمترین فسفر می‌باشد. این نتایج همخوانی بسیار بالایی با اولویت‌بندی در روش ویکورفازی دارد. نکته جالب درصد بسیار پایین سیلیس در نمونه مربوط به ناحیه شماره ۵ می‌باشد.

جدول (۱-۵) نتایج آنالیز نمونه‌ها به روش vnr

Element	SiO2	Al2O3	BaO	CaO	Fe _t	K2O	MgO	MnO	Na2O	P	S	TiO2	Cr2O3	Cu	Pb	Zn	LOI
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
DL	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Scheme	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01
NO-1	32.06	0.48	<0.01	2.4	42.21	<0.01	0.86	0.12	0.19	0.17	<0.05	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	3.16
NO-2	2.24	0.34	0.01	0.28	67.51	0.06	0.19	0.06	0.24	0.03	<0.05	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06
NO-3	2.99	0.42	0.01	0.73	63.15	0.01	0.15	0.01	0.18	0.1	<0.05	0.24	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.7
NO-4	3.93	0.41	<0.01	0.58	65.54	<0.01	0.99	0.11	0.19	0.07	<0.05	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
NO-5	0.4	0.1	0.01	8.07	58.54	0.01	0.13	0.07	0.22	1.12	<0.05	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.57

جدول (۲-۵) نتایج آنالیز نمونه‌ها به روش ICP-MS

Element	Ag	As	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	La	Li	Mo	Ni	Pb	Sb	Sc	Th	V
Unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
DL	0.1	0.5	0.1	1	1	1	1	100	1	1	0.5	1	1	0.5	0.5	0.5	1
Method	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01	ME-01
NO-1	32.06	0.48	<0.01	2.4	42.21	<0.01	0.86	0.12	0.19	0.17	<0.05	0.02	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	3.16
NO-2	2.24	0.34	0.01	0.28	67.51	0.06	0.19	0.06	0.24	0.03	<0.05	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.06
NO-3	2.99	0.42	0.01	0.73	63.15	0.01	0.15	0.01	0.18	0.1	<0.05	0.24	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.7
NO-4	3.93	0.41	<0.01	0.58	65.54	<0.01	0.99	0.11	0.19	0.07	<0.05	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01
NO-5	0.4	0.1	0.01	8.07	58.54	0.01	0.13	0.07	0.22	1.12	<0.05	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	4.57

فصل ششم

نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق با استفاده از چهار نوع داده مختلف اقدام به تهیه نقشه پتانسیل معدنی کانی‌زایی آهن در برگه اسفوردی شد. یکی از مزیت‌های این تحقیق استفاده همزمان از سه نوع داده ماهواره‌ای شامل تصاویر سنتینل-۲، لندست-۸ و استر است چرا که از هشت معیار اکتشافی، چهار معیار توسط این داده‌ها تولید و مورد استفاده قرار گرفت. روش نمودار پیش‌بینی-مساحت به عنوان یک روش داده‌مبنا، نتایج بسیار قدرتمندی را ارائه داده است. دلیل این امر استفاده از اندیس‌های معدنی در منطقه مطالعاتی است. از آنجایی که معیارهای مختلف در تلفیق، مستقل از هم نمی‌باشند لذا چگونگی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری آنها نیز با اهمیت خواهد بود. به همین دلیل علاوه بر وزن هر لایه، ارزیابی میزان اثرپذیری و اثرگذاری آن لایه در شناسایی بهتر سیستم کانی‌زایی مؤثر خواهد بود. در این تحقیق از روش دیمتلفازی برای این امر بهره برده شد. ترکیب روش دیمتلف و فرآیند تحلیل شبکه امری است که در بسیاری از تحقیقات در زمینه‌های مختلف صورت گرفته است اما در بحث پتانسیل-یابی معدنی تابحال این امر صورت نگرفته است و لذا این تحقیق به عنوان رهیافتی جهت ارزیابی عملکرد این روش در بحث پتانسیل‌یابی معدنی می‌باشد. به کمک روش دیمتلف، معیارهای با بیشترین و کمترین تأثیرگذاری و در تعامل با سیستم شناسایی شدند. این امر در ابتدا شاید چندان در پتانسیل‌یابی معدنی مهم به نظر نرسد اما زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که حتی می‌توان برخی لایه‌های بدون تأثیر را از فرآیند MPM حذف نمود. با توجه به نوع تیپ کانی‌زایی، معیارهای دیگری نیز می‌تواند مدنظر قرار بگیرد و به همین روال، روابط معیارها مورد ارزیابی قرار گیرد تا علی و یا معلول بودن هر معیار تعیین گردد. با توجه به نقشه نهایی حاصل از تلفیق همه لایه‌ها که با استفاده از روش ANP فازی تهیه شد، پنج ناحیه در محدوده مطالعه به عنوان نواحی با پتانسیل بالای کانی‌زایی آهن شناسایی شد و مدنظر قرار گرفت. در نهایت جهت اولویت‌بندی این نواحی از روش ویکور و تاپسیس فازی استفاده شد. با مقایسه روش‌های نمودار پیش‌بینی-مساحت و روش ANP فازی،

شباهت زیادی در نقشه نهایی حاصل شده مشاهده می‌گردد و لذا این مطلب مؤید قابل اعتماد بودن نقشه تلفیقی نهایی خواهد بود. علاوه بر این از آنجا که این دو روش ماهیتی متفاوت دارند و نتایج آنها با مطالعات صحرایی و اندیس‌های معدنی در محدوده همخوانی بالایی دارد، می‌توان اظهار داشت که در این تحقیق نواحی جدید با پتانسیل بالا نیز، به درستی معرفی شده‌اند. با انجام بررسی‌های میدانی، فرآیند پتانسیل‌یابی کامل و اعتبارسنجی شد. در این بررسی‌ها، مشخص شد که نتایج حاصل از روش‌های تئوری بسیار قابل اعتماد است که نتایج آنالیز نمونه‌ها نیز مؤید این مطلب است. با مقایسه روش‌های ویکور و تاپسیس فازی در اولویت‌بندی نواحی با پتانسیل بالا، کارایی هر دو روش در این زمینه به خوبی قابل تشخیص است اما در این زمینه در رتبه‌بندی اندکی تفاوت دیده می‌شود. بارزترین اختلاف در ناحیه ۲ دیده می‌شود که در روش ویکور رتبه اول و در روش تاپسیس رتبه پنجم را گرفته است. به نظر می‌رسد خطای کارشناسی در این امر دخیل باشد اما در رتبه‌بندی نواحی دیگر و به ویژه ناحیه ۴، مطابقت زیادی دیده می‌شود. با این وجود روش ویکور نتایج بهتری ارائه داده است چرا که در اعتبارسنجی نتایج به وسیله آنالیز نمونه‌های برداشت‌شده، مطابقت روش ویکور فازی با نتایج بیشتر از روش تاپسیس فازی است. با مقایسه نتایج آنالیز نمونه‌های برداشت شده از نواحی پنج‌گانه، در اولویت‌بندی به وسیله ویکور فازی، مطابقت زیادی با عیار آهن در نمونه‌ها دیده می‌شود. مناطق با پتانسیل بالای کانی‌زایی، به طور بسیار دقیقی شناسایی شدند. استفاده همزمان از چند روش بسیار کارآمد به نظر می‌رسد از آنجا که هر کدام از روش‌ها، نقش خاصی را بر عهده داشته و در نهایت به عنوان مکمل یکدیگر عمل می‌کنند. ممکن است در این بین خطاهای ناچیزی نیز وجود داشته باشد از جمله خطای انسانی (کارشناسی) در ارزیابی اهمیت معیارها. زمانی که همه پارامترها و فیلترها در مراحل مختلف اعمال می‌شود اثرات این خطاها بسیار کم شده و در نهایت نتایج قابل قبولی به دست خواهد آمد. علاوه بر پنج ناحیه معرفی شده، نواحی دیگری نیز دارای پتانسیل کانی‌زایی بوده که به رنگ قرمز و قهوه‌ای در نقشه نهایی مشخص هستند که اغلب این نواحی نیز به صورت معدن فعال

می‌باشند. در این بین ناحیه با پتانسیل شماره ۳ که در جنوب شرقی محدوده اسفوردی معرفی شده- است می‌تواند به عنوان ناحیه جدید با پتانسیل بالا لحاظ گردد. با مقایسه نواحی با پتانسیل بالا با واحدهای زمین‌شناسی محدوده مطالعه، می‌توان واحدهای ریولیتی، داسیتی و ریوداسیتی را به عنوان با پتانسیل‌ترین واحدهای زمین‌شناسی جهت کانی‌زایی سنگ‌آهن در این محدوده در نظر گرفت. بنابراین یکی دیگر از پارامتر و یافته‌های مهم تحقیق، شناسایی واحدهای زمین‌شناسی مهم در تشکیل کانی‌زایی احتمالی در محدوده مطالعه است.

۶-۲- پیشنهادات

با توجه همه پارامترها و نتایج حاصل شده می‌تون موارد زیر را به عنوان پیشنهاد مطرح نمود:

- ۱- در صورت امکان از نواحی با پتانسیل بالای کانی‌زایی معرفی شده، داده‌های جزئی‌تر و دقیق‌تر تهیه گردد (مقیاس محلی) و فرآیند پتانسیل‌یابی مجدد در این مقیاس صورت گیرد.
- ۲- با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و اهمیت سنگ میزبان در تشکیل انواع کانی‌زایی، با شناسایی محل دقیق واحدهای مستعد کانی‌زایی معرفی شده در این تحقیق، زمین‌شناسی این مناطق به صورت کامل بررسی و ارزیابی گردد.
- ۳- عملیات تکمیلی اکتشافی در نواحی معرفی شده به عنوان نواحی جدید با پتانسیل کانی‌زایی صورت گیرد و طراحی شبکه حفاری بهینه نیز انجام پذیرد.
- ۴- از روش دیمتل در کنار دیگر روش‌های با ساختار سلسله‌مراتبی در تهیه نقشه پتانسیل معدنی انواع تیپ‌های کانی‌سازی استفاده گردد و معیارهای با تأثیرگذاری زیاد در این سیستم‌های کانی‌زایی شناسایی شوند.

مراجع

- [1] G. F. Bonham-Carter, "Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS," vol. 13, p. 398, 1994.
- [2] E. J. M. Carranza, *Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS*. Elsevier, 2008.
- [3] A. Porwal and E. J. M. Carranza, "Introduction to the Special Issue: GIS-based mineral potential modelling and geological data analyses for mineral exploration," ed: Elsevier, 2015.
- [4] م. عطایی پور، مبانی مدل سازی دو بعدی ذخائر معدنی، چاپ دوم. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۳.
- [5] K. Pazand, A. J. G. Hezarkhani, Ecology, and Landscapes, "Predictive Cu porphyry potential mapping using fuzzy modelling in Ahar-Arasbaran zone, Iran," vol. 2, no. 4, pp. 229-239, 2018.
- [6] M. Yousefi, E. J. Carranza, and Geosciences", "Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling," vol. 79, pp. 69-81, 2015.
- [7] R. Ghezelbash, A. Maghsoudi, and E. J. Carranza, "An improved data-driven multiple criteria decision-making procedure for spatial modeling of mineral prospectivity: adaption of prediction-area plot and logistic functions," vol. 28, no. 4, pp. 1299-1316, 2019.
- [8] ع. نوری "ارزیابی قابلیت مدل Fuzzy TOPSIS برای تهیه نقشه پتانسیل معدنی طلا با استفاده از GIS در زون آلتراسیون طارم" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۰.
- [9] س، علایی مقدم. م، کریمی، م، س، مسگری و ن، صاحب الزمانی، "مدل سازی فرایند تهیه نقشه پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه استنتاجگر فازی (منطقه مورد مطالعه: کانسار مس چاه فیروزه)."
 - [۱۰] ک. صادق، ف. مهران، ک. محمد، ب. عباس، "تهیه نقشه پتانسیل معدنی برای کانسارهای مس با استفاده از مدل ترکیبی نروفازی: مطالعه موردی برگه ۱/۱۰۰۰۰۰ چهارگنبد در استان کرمان."
 - [11] K. Pazand, A. Hezarkhani, and K. J. A. G. Pazand, "Predictive mapping for porphyry copper mineralization: a comparison of knowledge-driven and data-driven fuzzy models in Siahrud area, Azarbaijan province, NW Iran," vol. 5, no. 3, pp. 215-224, 2013.
 - [۱۲] ا، قدیری صوفی، م، یوسفی. "ترکیب روش های فازی داده محور و دانش محور در مدل سازی پتانسیل معدنی به منظور تولید نواحی اهداف اکتشاف". فصلنامه علوم زمین، سال بیست و پنجم،

- [۱۳] ر. قاسمی، "تولید نقشه‌های پیشگوی اکتشافی بوسیله روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی فازی و ارائه مدل عدم قطعیت، مطالعه موردی: ذخایر ماسیوسولفاید بوانات،" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۷.
- [14] M. Abedi, & G.H. Norouzi. "A general framework of TOPSIS method for integration of airborne geophysics, satellite imagery, geochemical and geological data". International journal of applied earth observation and geoinformation, 46, 31-44, 2016.
- [15] I. Gonzalez-Alvarez, A. Porwal, S. Beresford, T. McCuaig, and W. Maier, "Hydrothermal Ni prospectivity analysis of Tasmania, Australia," vol. 38, no. 3, pp. 168-183, 2010.
- [16] Y. Liu, Q. Cheng, Q. Xia, and X. Wang, "Mineral potential mapping for tungsten polymetallic deposits in the Nanling metallogenic belt, South China," vol. 25, no. 4, pp. 689-700, 2014.
- [17] R. G. Skirrow, "Mapping iron oxide Cu-Au (IOCG) mineral potential in Australia using a knowledge-driven mineral systems-based approach," vol. 113, p. 103011, 2019.
- [18] E. D. Forson, A. Menyeh, D. D. Wemegah, S. K. Danuor, I. Adjovu, and I. Appiah, "Mesothermal gold prospectivity mapping of the southern Kibi-Winneba belt of Ghana based on Fuzzy analytical hierarchy process, concentration-area (CA) fractal model and prediction-area (PA) plot," vol. 174, p. 103971, 2020.
- [۱۹] ر. زاده، م. علی، حسینی، کیامرث، م. ن. ز. ش. اقتصادی، "مطالعه کانی شناسی و زمین شیمی آپاتیت و سنگهای میزبان فسفات در کانسار اسفوردی استان یزد با هدف تعیین منشأ و خاستگاه آپاتیت،" ۱۳۹۳.
- [۲۰] ف. زینالی، "پتانسیل یابی کانه‌زایی آهن در برگه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی با به کارگیری الگوریتم تعمیم یافته PROMETHEE II،" کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، ۱۳۹۶.
- [21] S. Cargill and A. Clark, "Report on the activity of IGCP Project 98," vol. 10, no. 5, pp. 411-417, 1978.
- [22] E. J. M. Carranza, M. Hale, "Logistic regression for geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines," vol. 10, no. 3, pp. 165-175, 2001.
- [23] A. Porwal, E. Carranza, and M. Hale, "Artificial neural networks for mineral-potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India," vol. 12, no. 3, pp. 155-171, 2003.
- [24] R. Zuo, E. J. M. Carranza, "Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity," vol. 37, no. 12, pp. 19.۲۰۱۱, ۱۹۷۵-۶۷.
- [25] V. Rodriguez-Galiano, M. Chica-Olmo, and M. J. I. J. o. G. I. S. Chica-Rivas,

- "Predictive modelling of gold potential with the integration of multisource information based on random forest: a case study on the Rodalquilar area, Southern Spain," vol. 28, no. 7, pp. 1336-1354, 2014.
- [26] J. Malczewski, "GIS and multicriteria decision analysis", John Wiley & Sons, 1999.
- [27] L. A. Zadeh, "Fuzzy Logic and the Calculus of Fuzzy H-Then Rules," p. 42, 1992.
- [28] A. Akbari, S. Zare, and M. Ataei, "Ranking the Risk of Mechanized Tunnel construction in Large Cross Section by Fuzzy Multi Criteria Decision Making Methods in Western Alborz Tunnel," vol. 5, no. 2, pp. 43-65, 2020.
- [29] B. Kosko and M. Toms, *Fuzzy thinking: The new science of fuzzy logic*. Hyperion New York, 1993.
- [30] L. A. Zadeh, "Information and control," vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [۳۱] م. عطایی، تصمیم گیری چندمعیاره فازی. انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۹.
- [32] D. Dubois and H. Prade, *Fundamentals of fuzzy sets*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [۳۳] آ. حبیبی، ص. ایزدیار، ا. سرافرازی، تصمیم گیری چندمعیاره فازی. انتشارات کتیبه گیل، ۱۳۹۳.
- [34] G. Bojadziev and M. Bojadziev, *Fuzzy logic for business, finance, and management*. World Scientific, 2007.
- [35] E. Bottani and A. Rizzi, "A fuzzy TOPSIS methodology to support outsourcing of logistics services," 2006.
- [36] C. Chen and systems, "Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment," vol. 114, no. 1, pp. 1-9, 2000.
- [37] A. Gabus and E. Fontela, Geneva, Switzerland, "Perceptions of the world problematique: Communication procedure, communicating with those bearing collective responsibility," 1973.
- [38] J. Shieh, H. Wu, and K. Huang, "A DEMATEL method in identifying key success factors of hospital service quality," vol. 23, no. 3, pp. 277-282, 2010.
- [39] W. Wu and Y. Lee, "Developing global managers' competencies using the fuzzy DEMATEL method," vol. 32, no. 2, pp. 499-507, 2007.
- [40] S. Opricović, "Simulating the environmental impact of a large hydroelectric project: Normand Thérien (Ed.) Volume 9, Number 2 in: Simulation Proceedings Series, Simulation Councils ,La Jolla, 1981, xiv+ 118 pages," ed: North-Holland, 1984.
- [41] S. Opricovic, "Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning," vol. 38, no. 10, pp. 12983-12990, 2011.
- [42] T. Chang, "Fuzzy VIKOR method: A case study of the hospital service evaluation in Taiwan," vol. 271, pp. 196-212, 2014.
- [43] S. Opricovic and G. Tzeng, "Extended VIKOR method in comparison with outranking methods," vol. 178, no. 2, pp. 514-529, 2007.
- [44] H. A. Gheshlaghi and B. Feizizadeh, "An integrated approach of analytical network process and fuzzy based spatial decision making systems applied to

- landslide risk mapping," vol. 133, pp. 15-24, 2017.
- [45] R. Liu, J. Yu, H. Sun, P. Tian, "Introduction to the ANP super decisions software and its application," vol. 8, p. 024, 2003.
- [46] T. L. Saaty and L. G. Vargas, *Decision making with the analytic network process*. Springer, 2006.
- [47] E. J. M. Carranza and A. Laborte, "Data-driven predictive modeling of mineral prospectivity using random forests: a case study in Catanduanes Island (Philippines)," vol. 25, no. 1, pp. 35-50, 2016.
- [48] V. Nykänen, I. Lahti, T. Niiranen, and K. Korhonen, "Receiver operating characteristics (ROC) as validation tool for prospectivity models—A magmatic Ni–Cu case study from the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Finland," vol. 71, pp. 853-860, 2015.
- [49] F. Daliran, *The magnetite-apatite deposit of Mishdovan, East Central Iran: an alkali rhyolite hosted, "Kiruna type" occurrence in the infracambrian Bafq metatect (mineralogic, petrographic and geochemical study of the ores and the host rocks)*. Ruprecht-Karls-Universität, 1990.
- [50] F. Daliran, H. Stosch, and P. J. Williams, "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," 2009.
- [51] Z. Bonyadi, G. J. Davidson, B. Mehrabi, S. Meffre, and F. J. C. G. Ghazban, "Significance of apatite REE depletion and monazite inclusions in the brecciated Se–Chahun iron oxide–apatite deposit, Bafq district, Iran: insights from paragenesis and geochemistry," vol. 281, no. 3-4, pp. 253-269, 2011.
- [52] F. Daliran, and T. Porter, "Kiruna-type iron oxide-apatite ores and apatites of the Bafq district, Iran, with an emphasis on the REE geochemistry of their apatites," vol. 2, pp. 303-320, 2002.
- [53] F. M. Torab, *Geochemistry and metallogeny of magnetite apatite deposits of the Bafq mining district, Central Iran*. Univ. Bibliothek, 2008.
- [54] F. Daliran, "Multistage metasomatism and mineralization at hydrothermal Fe oxide-REE-apatite deposits and "apatites" of the Bafq district, centraleast Iran," in *Digging Deeper, Proc. 9th Biennial SGA Meeting Dublin, 2007*, 2007, pp. 1501-1504.
- [55] J. Ramezani and R. Tucker, "The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology, petrogenesis and implications for Gondwana tectonics," vol. 303, no. 7, pp. 622-665, 2003.
- [56] H. G. Stosch, R. L. Romer, F. Daliran, and D. Rhede, "Uranium–lead ages of apatite from iron oxide ores of the Bafq District, East-Central Iran," vol. 46, no. 1, pp. 9-21, 2011.
- [57] F. Torab and B. Lehmann, "Iron oxide-apatite deposits of the Bafq district, Central Iran: an overview from geology to mining," vol. 58, no. 6, p. 355, 2006.
- [58] ا، مجیدی، م، لطفی، م، ه، امامی، ن، نظافتی، "ژنز کانسارهای اکسید آهن–آپاتیت: بر پایه مطالعه آپاتیت‌های پهنه بافق–ساغند، ایران مرکزی," ۱۳۹۶.
- [59] M. A. Janssen, "Atmospheric remote sensing by microwave radiometry," 1994.
- [60] G. L. Prost, *Remote sensing for geologists: a guide to image interpretation*.

- CRC Press, 1994.
- [61] B. S. Siegal, A. Goetz, and R. Sensing, "Effect of vegetation on rock and soil type discrimination," vol. 43, no. 2, pp. 191-196, 1977.
 - [62] J. J. Wilkinson, M. J. Baker, D. R. Cooke, and C. Wilkinson, "Exploration targeting in porphyry Cu systems using propylitic mineral chemistry: A case study of the El Teniente deposit, Chile," vol. 115, no. 4, pp. 771-791, 2020.
 - [63] S. Gabr, A. Ghulam, and T. Kusky, "Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data ", vol. 38, no. 1-2, pp. 59-69, 2010.
 - [64] R. P. Gupta, "Multispectral Imaging Systems," in *Remote Sensing Geology*: Springer, 2003, pp. 75-122.
 - [65] H. Aboelkhair, Y. Ninomiya, Y. Watanabe, and I. Sato, "Processing and interpretation of ASTER TIR data for mapping of rare-metal-enriched albite granitoids in the Central Eastern Desert of Egypt," vol. 58, no. 1, pp. 141-151, 2010.
 - [66] P. A. Coelho, "Automatic near-infrared hyperspectral image analysis of copper concentrates," vol. 52 ,no. 14, pp. 94-98, 2019.
 - [67] H. Shahriari, H. Ranjbar, and M. Honarmand, "Image segmentation for hydrothermal alteration mapping using PCA and concentration–area fractal model," vol. 22, no. 3, pp. 191-206, 2013.
 - [68] H. Yan, and B. Yu, "The principal component analysis for RS image processing," vol. 20, no. 2, pp. 168-170, 2006.
 - [69] M. Zoran, R. Savastru, D. Savastru, S. Miclos, and M. Tautan, "Remote sensing techniques for mining waste characterization," in *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology IX*, 2009, vol. 7478, p. 74780Q: International Society for Optics and Photonics.
 - [70] M. Khaleghi, H. Ranjbar, J. Shahabpour, and M. Honarmand, "Spectral angle mapping, spectral information divergence, and principal component analysis of the ASTER SWIR data for exploration of porphyry copper mineralization in the Sarduiyeh area, Kerman province, Iran," vol. 6, no. 1, pp. 49-58, 2014.
 - [71] K. Pazand, J. F. Sarvestani, and M. Ravasan, "Hydrothermal alteration mapping using ASTER data for reconnaissance porphyry copper mineralization in the Ahar area, NW Iran," vol. 41, no. 2, pp. 379-389, 2013.
 - [72] S. Rajendran "ASTER detection of chromite bearing mineralized zones in Semail Ophiolite Massifs of the northern Oman Mountains: Exploration strategy," vol. 44, pp. 121-135, 2012.
 - [73] J. R. Jensen, "Introductory Digital Image Processing 3rd Edition by John R Jensen," 2013.
 - [74] R. Amer, A. Mezayen, and M. Hasanein, "ASTER spectral analysis for alteration minerals associated with gold mineralization," vol. 75, pp. 239-251, 2016.
 - [75] A. Rezaei, H. Hassani, P. Moarefvand, A. Golmohammadi, Ecology, "Lithological mapping in Sangan region in Northeast Iran using ASTER satellite data and image processing methods," vol. 4, no. 1, pp. 59-70, 2020.
 - [76] K. W. Abdelmalik and S. Science, "Landsat 8: Utilizing sensitive response bands concept for image processing and mapping of basalts," 2019.

- [77] K. Kavak and H. J. O. J. o. E. S. Cetin, "A detailed geologic lineament analysis using Landsat TM data of Gölarmara/Manisa region, Turkey," vol. 1, no. 3, pp. 145-153, 2007.
- [78] Z. Ourhzif, A. Algouti, F. Hadach, "LITHOLOGICAL MAPPING USING LANDSAT 8 OLI AND ASTER MULTISPECTRAL DATA IN IMINI-OUNILLA DISTRICT SOUTH HIGH ATLAS OF MARRAKECH," 2019.
- [79] N. Pahlevan, S. Sarkar, B. Franz, S. Balasubramanian, and J. He, "Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations," vol. 201, pp. 47-56, 2017.
- [80] F. Van der Meer, H. Van der Werff, and F. J. R. s. o. e. Van Ruitenbeek, "Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications," vol. 148, pp. 124-133, 2014.
- [81] H. Van der Werff and F. J. R. s. Van der Meer, "Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters," vol. 7, no. 10, pp. 12635-12653, 2015.
- [82] S. Salehi, C. Mielke, C. Brogaard Pedersen, S. J. Dalsenni Olsen, and G. Bulletin, "Comparison of ASTER and Sentinel-2 spaceborne datasets for geological mapping: a case study from North-East Greenland," vol. 43, 2019.
- [83] H. Van der Werff and F. J. R. s. Van der Meer, "Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing," vol. 8, no. 11, p. 883, 2016.
- [84] A. Nazarpour, N. R. Omran, and G. R. Paydar, "Application of multifractal models to identify geochemical anomalies in Zarshuran Au deposit, NW Iran," vol. 8, no. 2, pp. 877-889, 2015.
- [85] C. Reimann, P. Filzmoser, and R. G. J. A. g. Garrett, "Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities," vol. 17, no. 3, pp. 185-206, 2002.
- [86] F. H. Ammar, N. Chkir, K. Zouari, B. Hamelin, P. Deschamps, and A. Aigoun, "Hydro-geochemical processes in the Complexe Terminal aquifer of southern Tunisia: An integrated investigation based on geochemical and multivariate statistical methods," vol. 100, pp. 81-95, 2014.
- [87] A. Zumlot and E. Sciences, "Multivariate statistical approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the shallow aquifer system of the Yarmouk Basin of north Jordan," vol. 4, no. 7, pp. 756-768, 2012.
- [88] M. Anju, D. J. E. m. Banerjee, and assessment, "Multivariate statistical analysis of heavy metals in soils of a Pb-Zn mining area, India," vol. 184, no. 7, pp. 4191-4206, 2012.
- [89] L. Belkhiri, A. Boudoukha, L. Mouni, and T. J. G. Baouz, "Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater—a case study: Ain Azel plain (Algeria)," vol. 159, no. 3-4, pp. 390-398, 2010.
- [90] A. J. Grant, "Multivariate statistical analyses of sediment geochemistry," vol. 21, no. 6, pp. 297-299, 1990.
- [91] S. T. Landry *et al.*, "Stream sediment geochemical survey of Gouap-Nkollo prospect, southern Cameroon: implications for gold and LREE exploration," vol. 2, no. 1, pp. 8-16, 2014.

- [92] K. Karar, A. Gupta, A. Kumar, A. Biswas, and Assessment, "Characterization and identification of the sources of chromium, zinc, lead, cadmium, nickel, manganese and iron in PM 10 particulates at the two sites of Kolkata, India," vol. 120, no. 1, pp. 347-360, 2006.
- [93] R. Sprovieri, R. Thunell, and M. Howe, "Paleontological and geochemical analysis of three laminated sedimentary units of late Pliocene-early Pleistocene age from the Monte San Nicola section in Sicily," vol. 92, no. 3, 1986.
- [94] D. Hirst, "Geochemistry of Sediments from Eleven Black Sea Cores: Geochemistry," 1974.
- [95] R. Wu, J. Chen, J. Zhao, J. Chen, and S. Chen, "Identifying Geochemical Anomalies Associated with Gold Mineralization Using Factor Analysis and Spectrum–Area Multifractal Model in Laowan District, Qinling-Dabie Metallogenic Belt, Central China," vol. 10, no. 3, p. 229, 2020.
- [96] P. Afzal, H. D. Ahari, N. R. Omran, and F. J. O. G .R. Aliyari, "Delineation of gold mineralized zones using concentration–volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran," vol. 55, pp. 125-133, 2013.
- [97] S. O. Elkhateeb, A. M. Eldosouky, A. J. Samir, and E. Sciences, "Interpretation of aeromagnetic data to delineate structural complexity zones and porphyry intrusions at Samr El Qaa Area, North Eastern Desert, Egypt," vol. 5, no. 1, pp. 1-9, 2018.
- [98] J. I. Union, "Airborne geophysics and the Indian scenario," vol. 11, no. 1, pp. 1-28, 2007.
- [99] S. Hsu, J. Sibuet, and C. Shyu, "High-resolution detection of geologic boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytic signal technique," vol. 61, no. 2, pp. 373-386, 1996.
- [100] H .G. Miller and V. J. Singh, "Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources," vol. 32, no. 2-3, pp. 213-217, 1994.
- [101] M. Ghorbani, *Economic geology of Iran*. Springer, 2013.
- [102] D. Chang" ,Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP," vol. 95, no. 3, pp. 649-655, 1996.

Abstract

At the preliminary prospecting and exploration stages, the areas that must be paid attention to in more detailed studies are identified by mineral potential mapping (MPM). The final goal of this study is prepare the MPM of iron ore mineralization in Esfordi 1:100000 sheet. The Esfordi 1:100,000 Sheet is located in the Bafgh-Posht-e-Badam district of the central Iran structural zone. Iron oxide-apatite, lead and zinc mineralizations have been observed in different areas of this region. The simultaneous utilization of the Prediction-Area plot and DEMATEL, ANP, VIKOR, and TOPSIS methods in fuzzy space has resulted in reliable results. The P-A plot and fuzzy ANP methods were used to weighting and integrated the exploratory layers. In the P-A plot method, the weight of each layer was calculated using simultaneous analyses of the value-area fractal curve and the use of 22 Fe-bearing occurrences in the study region. The host rock layer has the most weight with the intersection point of 78%. Causal and effect relationships of the criteria were assessed by fuzzy DEMATEL method. Eight exploratory layers were extracted from four various types of data and utilized; thus, anomaly layers of Fe₂O₃ and TiO₂ were prepared from the stream sediments data, magnetic body layer from airborne geophysics, host rock layer from geology map, the gossan zone, iron oxide, phyllic alteration and lineament layers were prepared from satellite images. The use of three types of satellite imagery, including Sentinel-2, Landsat-8 and ASTER, caused that the results are reliable and powerful. Meanwhile, host rock layer was identified as the most effective criteria. The results from DEMATEL method were integrated with fuzzy ANP method and mineral potential model was prepared. Several areas in the resulting map were introduced as zones with high potential of mineralization that five areas were selected then the fuzzy VIKOR and the fuzzy TOPSIS methods were employed to prioritize them. In field surveys, regions with high potential of iron ore mineralization were examined. The sample analysis results of each region largely confirm the findings of the used methods. In the meantime, some parts of the southeast of Esfordi area have been introduced as new zones with high potential of iron ore mineralization. The results indicate that rhyolite, rhyodacite and calcareous dolomites are mostly units associated with mineralization.

Keywords: Mineral potential, DEMATEL, VIKOR, Prediction-Area plot, Sentinel-2, Esfordi



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mineral Exploration

Mineral Potential Modeling using Fuzzy Multi Criteria Decision Making Methods and DEMATEL

By: Fardin Ahmadi

Supervisors:

Dr. Hamid Aghajani

Dr. Meysam Abedi

February 2022