

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری اکتشاف مواد معدنی

مدل سازی ذخایر کرومیت در مقیاس ناحیه‌ای و محلی با استفاده از شواهد وزن دار پیوسته در شبکه‌ی عصبی

نگارنده: بیژن روشن‌روان

استاد راهنما

دکتر حمید آقاجانی

اساتید مشاور

دکتر مهیار یوسفی

دکتر الیور کروزر

دی ۱۳۹۷

شماره: ۴۴۷۴۳۷
تاریخ: ۹۷/۱۱/۲۳
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای بیژن روشن‌روان دانشجوی دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن به شماره دانشجویی ۹۳۰۰۶۷۵ ورودی مهرماه سال ۱۳۹۳ در تاریخ ۱۳/۱۰/۱۳۹۷ از رساله خود با عنوان: "مدلسازی ذخایر کرومیت در مقیاس ناحیه‌ای و محلی با استفاده از شواهد وزن‌دار پیوسته در شبکه‌ی عصبی" دفاع و با اخذ نمره ۱۹.۲۰ به درجه عالی نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبیه علمی	امضاء
۱	دکتر حمید آقاجانی	استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر مهیار یوسفی	مشاورین	دانشیار	
	Dr. Oliver Kreuzer		دانشیار	
۳	دکتر علی اصغر آل شیخ	استاد مدعو خارجی	استاد	
۴	دکتر پرویز ضیائیان	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۵	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۶	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

تاریخ و امضاء:



تقدیم بہ:

مہربانی ہامی و صف ناندیر مادرم
پتہ

دل دریائی پدرم
پتہ

خواہر و برادر عزیزم
پتہ

کہ خطہ خطہ زندیکیم دیون وجود کریشان ہست...

شکر و قدردانی

حمد و سپاس بیکران خداوندی را که یاریم داد تا با بهره از کسترش بی انتهای لطفش، گذر از مرحله های زندگی را تجربه نمایم. خداوندی را که بر هر نعمت حق سپاسی برای بندگانش مقرر فرموده. لذا این تقریر را ابتدا با قدردانی از زحمات پدر و مادر عزیزم آغاز می کنم. آنان که بهواره دورنمای سائل جایمشان مرا از غرق شدن در امواج متلاطم نامنمی بارانیده است. بر خود لازم می دانم که از راهبانی های جناب آقای دکتر حمید آقا جانی، جناب آقای دکتر امیر کرور و جناب آقای دکتر هیادیوسفی شکر نموده و از خداوند مهربان سلامتی، موفقیت و بهر روزی را برای آن ها خواستارم.

از اساتید محترم آقایان دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی، دکتر پرویز ضیائی و دکتر علی اصغر آل شیخ که زحمت دآوری رساله را متحمل شدند شکر می کنم. هم چنین از کلیه اساتید و کالنان محترم دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک و دوستان عزیزم به دلیل مساعدت ایشان در زمان تحصیل شکر و قدردانی می کنم. در پایان از همی معلمان، دبیران و اساتید گران قدرم، به خصوص معلم اول دبستان سرکار خانم زیوری، شکر و قدردانی می کنم و از درگاه خداوند متعال سلامتی و موفقیت آن ها را خواستارم.

بیشن روشن روان

دانشگاه صنعتی شاهرود

زمستان ۱۳۹۷

تعمیرنامه

اینجانب بیژن روشن‌روان دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله تحت عنوان **"مدلسازی ذخایر کرومیت در مقیاس ناحیه‌ای و محلی با استفاده از شواهد وزن‌دار پیوسته در شبکه‌ی عصبی"** تحت راهنمایی دکتر حمید آقاجانی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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 افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

کلید

وجود تعداد قابل توجهی از معادن کوچک و بزرگ و اندیس‌های معدنی کرومیت و هم‌چنین شرایط مساعد زمین‌شناسی، سبب شده تا کمربند افیولیتی سبزوار به‌عنوان یکی از مناطق امیدبخش کانی‌زایی کرومیت در ایران تبدیل شود. ولی به علت عدم به‌کارگیری روش‌های اکتشافی مناسب و صحیح و نیز عدم وجود یک مدل اکتشافی مناسب و فراگیر، بیش‌تر ذخایر معدنی به صورت ناقص شناسایی و استخراج شده‌اند. بنابراین با توجه به ضرورت مطالعه در این خصوص، مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی هدف اصلی این تحقیق در نظر گرفته شد. برای نیل به این هدف کلیه ویژگی‌های مرتبط با کانی‌زایی کرومیت به صورت لایه‌ی مجزا تهیه و با استفاده از روش‌های مختلف در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی تلفیق و ترکیب شدند. با توجه به این‌که در رسیدن به این هدف، خطاهای تصادفی و نظام‌مند حاصل از قضاوت کارشناسی و تخصیص اوزان اریب به نقشه‌های شاهد اکتشافی سبب عدم قطعیت و قابلیت اطمینان پایین مدل‌های پتانسیل تولیدی می‌شوند، در این تحقیق از روش‌های داده‌محور بهبودیافته و پیوسته برای شناسایی مناطق امیدبخش کانی‌زایی در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی استفاده شد. در این راستا، ابتدا بر اساس تحلیل سیستم کانی‌سازی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای و هم‌چنین مجموعه داده‌های اکتشافی در دسترس، معیارهای اکتشافی ناحیه‌ای و محلی شناسایی و سپس الگوهای شاهد معرف کانی‌سازی در مقیاس ناحیه‌ای (الگوهای زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی) و محلی (الگوهای زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی) با استفاده از روش‌های بصری و عددی استخراج و به‌روش پیوسته وزن‌دهی شدند. سنجش قرابت فضایی نقشه‌های شاهد ناحیه‌ای پیوسته با کانی‌زایی به‌وسیله‌ی نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت و مشخصه‌ی عمل‌کرد سیستم نشان داد که همه‌ی این نقشه‌ها، شاخص‌های با اهمیت بوده و نقش مؤثری در تهیه‌ی مدل اکتشافی دارند. هم‌چنین، الگوهای شاهد معرف کانی‌سازی در مقیاس ناحیه‌ای به‌روش دانش‌محور (گسسته) برای مقایسه با الگوهای شاهد پیوسته وزن‌دهی و پس از تلفیق لایه‌ها، ارزیابی شدند. در این تحقیق، از روش‌های داده‌محور شبکه‌ی عصبی - فازی، جنگل تصادفی و توابع ریاضیاتی برای تلفیق نقشه‌های شاهد پیوسته در مقیاس ناحیه‌ای استفاده شده است. علاوه بر این، ارزش‌های شاهد مکانی وزن‌دار گسسته نیز به‌وسیله‌ی شبکه‌ی عصبی - فازی ترکیب شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل پتانسیل عصبی - فازی تولیدی با استفاده از ارزش‌های شاهد مکانی وزن‌دار پیوسته کارایی بهتری نسبت به مدل پتانسیل عصبی - فازی تولیدی با استفاده از ارزش‌های شاهد مکانی وزن‌دار گسسته دارد. از بین تمامی مدل‌های پتانسیل تولیدی

در مقیاس ناحیه‌ای، مدل پتانسیل معدنی حاصل از روش جنگل تصادفی با عملکرد مناسب، برای انتخاب یک محدوده جهت انجام عملیات اکتشافی در مقیاس محلی استفاده شد. هم‌چنین به‌منظور شناسایی نقشه‌های شاهد اکتشافی مناسب و ارزیابی عملکرد مدل‌های پتانسیل معدنی، نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته با لحاظ نمودن سه معیار مهم نرخ پیش‌بینی نقاط واجد کانی‌زایی، نرخ پیش‌بینی نقاط فاقد کانی‌زایی و مساحت دربر گیرنده‌ی اهداف اکتشافی توسعه داده شد که با لحاظ معیارهای پیش‌تر؛ نقش مؤثری در شناخت نقشه‌های شاهد اکتشافی مهم و انتخاب مدل‌های پتانسیل معدنی معتبر دارد. در این تحقیق، از عمل‌گرهای گامای فازی و میانگین هندسی برای تلفیق نقشه‌های شاهد پیوسته، جهت تعیین مناسب‌ترین نقاط برای حفاری در مقیاس محلی استفاده شد. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از عملگرهای مختلف، با عنایت به نگاه بدبینانه در مدل میانگین هندسی؛ نواحی مستعد کانی‌زایی حاصله محدودتر بوده و وسعت کم‌تری را پوشش داده است، بنابراین به‌نظر می‌رسد احتمال رسیدن گمانه‌های اکتشافی به ماده‌ی معدنی کرومیت در نواحی پتانسیل‌دار حاصل از این مدل بالاتر است.

کلمات کلیدی: کمر بند افیولیتی سبزوار، کرومیت تیپ انبانه‌ای، مدل‌سازی پتانسیل معدنی، نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته، تحلیل سیستم کانی‌سازی، شبکه‌ی عصبی - فازی، جنگل تصادفی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- 1- Roshanravan, B., Aghajani, H., Yousefi, M., and Kreuzer, O. (2018) “**Particle Swarm Optimization Algorithm for Neuro-Fuzzy Prospectivity Analysis Using Continuously Weighted Spatial Exploration Data**”, Natural Resources Research, DOI: 10.1007/s11053-018-9385-4.
- 2- Roshanravan, B., Aghajani, H., Yousefi, M., and Kreuzer, O. (2018) “**An Improved Prediction-Area Plot for Prospectivity Analysis of Mineral Deposits**”, Natural Resources Research, DOI: 10.1007/s11053-018-9439-7.
- ۳- روشن‌روان، ب.، آقاجانی، ح.، یوسفی، م.، کروزر، ا.، (۱۳۹۷) "تولید مدل پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته در کمربند افیولیتی سبزوار"، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی منابع معدنی.
- 4- Roshanravan, B., Aghajani, H., Yousefi, M., and Kreuzer, O. (2018b) “**Generation of a Geochemical Model to Prospect Podiform Chromite Deposits in North of Iran**”, In : 80th EAGE Conference and Exhibition, Denmark, DOI: 10.3997/2214-4609.201800909.
- ۵- روشن‌روان، ب.، آقاجانی، ح.، یوسفی، م. (۱۳۹۵) "شناسایی مناطق امیدبخش کرومیت با استفاده از الگوهای مغناطیسی حاصل از لایه‌های مختلف در برگه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ باشتین"، سی و پنجمین گردهمایی ملی علوم زمین، تهران.
- ۶- روشن‌روان، ب.، آقاجانی، ح.، یوسفی، م. (۱۳۹۷) "شناسایی مناطق سرپانتینیزه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ETM⁺ و ASTER و بررسی ارتباط آن‌ها با مناطق کانی‌سازی کرومیت با روش آنالیز فرای، کمربند افیولیتی سبزوار"، دهمین همایش ملی انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، اصفهان.
- ۷- روشن‌روان، ب.، آقاجانی، ح.، یوسفی، م. (۱۳۹۷) "شناسایی مناطق مستعد کانی‌زایی کرومیت با استفاده از ویژگی‌های شاخص حاصل از سنجش از دور"، یازدهمین همایش ملی تخصصی زمین شناسی دانشگاه پیام نور و بیست و یکمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، قم.

فهرست مطالب

ه	فهرست جداول
و	فهرست اشکال
ط	جدول اختصارات
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۵	۲-۱ مروری بر مطالعات انجام شده
۶	۱-۲-۱ مطالعات زمین‌شناسی و ژئوشیمی
۹	۲-۲-۱ مطالعات ژئوفیزیکی
۱۴	۳-۲-۱ مطالعات دورسنجی
۱۶	۴-۲-۱ مطالعات انجام شده به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی کرومیت
۱۶	۳-۱ منطقه‌ی مطالعاتی
۲۰	۴-۱ بیان مسأله و اهداف تحقیق
۲۱	۵-۱ نوآوری و فرض‌های تحقیق
۲۲	۶-۱ روش اجرای تحقیق
۲۲	۱-۶-۱ فاز اول (ناحیه‌ای)
۲۳	۲-۶-۱ فاز دوم (محلی)
۲۶	۷-۱ ساختار رساله
۲۷	فصل ۲: ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای با نگرش ویژه بر سیستم کانی‌سازی و معیارهای اکتشافی
۲۸	۱-۲ مقدمه
۲۸	۲-۲ سیستم کانی‌سازی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای

- ۲۹..... ۱-۲-۲ تله‌ی کان‌سنگ
- ۳۲..... ۲-۲-۲ مکانیزم تهنشست کرومیت
- ۳۲..... ۳-۲-۲ مکانیزم بالا آمدن ذخایر کرومیت
- ۳۶..... ۳-۲ استنتاج معیارهای اکتشافی از سیستم کانی‌سازی کرومیت
- ۳۶..... ۱-۳-۲ استنتاج معیارهای اکتشافی ناحیه‌ای از سیستم کانی‌سازی کرومیت
- ۳۶..... ۲-۳-۲ استنتاج معیارهای اکتشافی محلی از سیستم کانی‌سازی کرومیت
- ۳۹ فصل ۳: مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در مقیاس ناحیه‌ای به‌منظور تعیین اهداف اکتشافی
- ۴۰..... ۱-۳ مقدمه
- ۴۱..... ۲-۳ تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته
- ۴۱..... ۱-۲-۳ نقشه‌ی شاهد فاصله از سنگ میزبان
- ۴۷..... ۲-۲-۳ نقشه‌ی شاهد چگالی گسل
- ۴۷..... ۳-۲-۳ نقشه‌ی شاهد اثر ژئوشیمیایی چندعنصره
- ۴۸..... ۳-۳ تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته
- ۵۰..... ۴-۳ شبکه‌ی عصبی - فازی بهبودیافته
- ۵۲..... ۱-۴-۳ شبکه‌های عصبی مصنوعی
- ۶۰..... ۲-۴-۳ شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه
- ۶۴..... ۳-۴-۳ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات
- ۶۹..... ۴-۴-۳ تولید مدل‌های پتانسیل عصبی - فازی در کمربند افیولیتی سبزوار
- ۷۳..... ۵-۴-۳ ارزیابی و مقایسه‌ی مدل‌های پتانسیل عصبی - فازی
- ۷۵..... ۵-۳ تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از توابع ریاضیاتی
- ۷۶..... ۱-۵-۳ تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از عملگر گامای فازی
- ۷۶..... ۲-۵-۳ تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از عملگر میانگین هندسی

۷۸.....	۳-۵-۳ تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از روش شاخص هم پوشانی داده محور
۸۱.....	۳-۶ روش جنگل تصادفی
۸۴.....	۳-۶-۱ تولید مدل پتانسیل جنگل تصادفی در کمربند افیولیتی سبزوار
۸۷.....	۳-۷ مقایسه‌ی مدل‌ها و تعیین مرز اهداف اکتشافی
۹۱	فصل ۴: توسعه‌ی نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبود یافته برای ارزیابی مدل‌های پتانسیل معدنی
۹۲.....	۴-۱ مقدمه
۹۳.....	۴-۲ تولید مدل‌های پتانسیل ترکیبی و زمین‌شناسی
۹۶.....	۴-۳ نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبود یافته
۱۰۱.....	۴-۳-۱ ارزیابی و مقایسه‌ی مدل‌های پتانسیل معدنی
۱۰۳	فصل ۵: مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در مقیاس محلی
۱۰۴.....	۵-۱ مقدمه
۱۰۴.....	۵-۲ محدوده‌ی مورد مطالعه
۱۰۶.....	۵-۳ مطالعات گرانی‌سنجی جهت تهیه‌ی نقشه‌ی شاهد گرانی
۱۰۶.....	۵-۳-۱ اندازه‌گیری میدان گرانی
۱۰۷.....	۵-۳-۲ جمع‌آوری داده‌های گرانی‌سنجی
۱۰۸.....	۵-۳-۳ پیش‌پردازش (تصحیح) داده‌های گرانی‌سنجی
۱۱۶.....	۵-۳-۴ پردازش داده‌های گرانی و تفکیک بی‌هنجاری‌ها
۱۲۰.....	۵-۴ مطالعات مغناطیس‌سنجی جهت تهیه‌ی نقشه‌ی شاهد مغناطیسی
۱۲۲.....	۵-۴-۱ اندازه‌گیری میدان مغناطیس در محدوده‌ی چشمه‌پلنگان
۱۲۲.....	۵-۴-۲ پیش‌پردازش (تصحیح) داده‌های مغناطیس‌سنجی
۱۲۵.....	۵-۴-۳ بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده‌ی مغناطیسی و فیلتر برگردان به قطب
۱۲۷.....	۵-۴-۴ پردازش داده‌های ژئومغناطیسی و تفکیک بی‌هنجاری‌ها

- ۵-۴-۵ شناسایی گسل‌ها و خطواره‌های مغناطیسی ۱۲۸
- ۵-۵ تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته ۱۲۹
- ۵-۵-۱ نقشه‌ی شاهد فاصله از سنگ میزبان ۱۲۹
- ۵-۵-۲ نقشه‌ی شاهد چگالی گسل ۱۲۹
- ۵-۵-۳ نقشه‌ی شاهد بی‌هنجاری‌های گرانی ۱۳۰
- ۵-۵-۴ نقشه‌ی شاهد بی‌هنجاری‌های ژئومغناطیسی ۱۳۰
- ۵-۶ تولید مدل محلی پتانسیل معدنی ۱۳۱
- ۵-۶-۱ مقایسه‌ی مدل‌ها و تعیین مرز نواحی مستعد کانی‌زایی ۱۳۱

فصل ۶: بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۳۵

- ۶-۱ بحث و نتیجه‌گیری ۱۳۶
- ۶-۲ پیشنهادات ۱۳۸

منابع و مراجع ۱۳۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۱: روش‌های داده‌محور چند متغیره ۵
- جدول ۱-۲: مشخصات رخداد‌های معدنی شناخته‌شده (KMOS) در کمربند افیولیتی سبزوار ۱۹
- جدول ۱-۳: پارامترهای تعیین‌شده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت ۴۸
- جدول ۲-۳: کوچک‌ترین مقدار میانگین مربعات خطای مجموعه‌ی اعتبارسنجی ۷۲
- جدول ۳-۳: پارامترهای تعیین‌شده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت ۸۰
- جدول ۳-۴: کوچک‌ترین مقدار میانگین مربعات خطای مجموعه‌ی اعتبارسنجی برای هر جنگل ۸۶
- جدول ۱-۴: پارامترهای تعیین‌شده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته ۱۰۰
- جدول ۲-۴: پارامترهای تعیین‌شده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته ۱۰۱
- جدول ۱-۵: بخشی از داده‌های برداشت‌شده و تصحیح اثر رانه‌ی دستگاه بر روی آن‌ها ۱۱۰
- جدول ۲-۵: چگالی برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها ۱۱۶
- جدول ۳-۵: خودپذیری مغناطیسی برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها ۱۲۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمودار گردشی فاز اول (ناحیه‌ای) ۲۴
- شکل ۲-۱: نمودار گردشی فاز دوم (محلی) ۲۵
- شکل ۳-۱: الف) واحدهای ساختاری و موقعیت افیولیت‌های اصلی ایران ۱۸
- شکل ۱-۲: الف) توالی تشکیل افیولیت‌ها و پراکندگی کرومیت‌های انبانه‌ای ۳۱
- شکل ۲-۲: ارتباطات فازی در سیستم الیون- کوارتز- کرومیت ۳۳
- شکل ۳-۲: الف) نمایش روند پراکندگی نقاط معدنی کرومیت در کمربند افیولیتی سبزوار ۳۵
- شکل ۴-۲: شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد ناحیه‌ای به‌منظور شناسایی مناطق هدف ۳۷
- شکل ۵-۲: شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد محلی به‌منظور تعیین نقاط حفاری ۳۷
- شکل ۱-۳: اندازه‌گیری آزمایشگاهی بازتاب طیفی سرپانتینیت ۴۲
- شکل ۲-۳: الف) نسبت بانندی (RGB: 5/3, 5/1, 7/5) ETM⁺ محدوده‌ی مورد مطالعه ۴۶
- شکل ۳-۳: گسل‌های استخراج‌شده‌ی کمربند افیولیتی سبزوار ۴۷
- شکل ۴-۳: نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته؛ الف) فاصله از سنگ میزبان، ب) چگالی گسل ۴۹
- شکل ۵-۳: نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته؛ الف) فاصله از سنگ میزبان، ب) چگالی گسل ۵۰
- شکل ۶-۳: ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی ۴-۶-۴-۶ ۵۴
- شکل ۷-۳: مدل ریاضی یک نرون بیولوژیک ۵۷
- شکل ۸-۳: انواع توابع تحریک ۵۷
- شکل ۹-۳: اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک سلول عصبی بیولوژیکی ۵۹
- شکل ۱۰-۳: ساختار شماتیک یک شبکه‌ی عصبی پرسپترون سه لایه ۶۰
- شکل ۱۱-۳: تعیین زمان توقف آموزش ۶۳
- شکل ۱۲-۳: مفهوم کمینه‌های محلی و کلی در بهینه‌سازی ۶۴
- شکل ۱۳-۳: چگونگی تعیین جهت و بزرگی بردار حرکت ذرات در هر موقعیت ۶۷
- شکل ۱۴-۳: فلوجارت الگوریتم استاندارد بهینه‌سازی ازدحام ذرات ۶۸
- شکل ۱۵-۳: توزیع مکانی نقاط تعیین‌شده‌ی آموزشی و اعتبارسنجی ۷۰
- شکل ۱۶-۳: شبکه‌ی عصبی- فازی به‌منظور پیشگویی ذخایر کرومیت ۷۱
- شکل ۱۷-۳: مدل‌های پتانسیل عصبی- فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار ۷۲
- شکل ۱۸-۳: روند تکاملی منحنی میانگین مربعات خطا برای داده‌های شاهد اکتشافی وزن‌دار ۷۳
- شکل ۱۹-۳: نمودارهای نرخ پیش‌بینی- مساحت و مشخصه‌ی عمل‌کرد سیستم ۷۵
- شکل ۲۰-۳: الف) مدل پتانسیل معدنی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار ۷۷
- شکل ۲۱-۳: الف) مدل پتانسیل معدنی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار ۷۸
- شکل ۲۲-۳: الف) نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت برای نقشه‌ی شاهد فاصله از سنگ میزبان ۸۰

- شکل ۳-۲۳: الف) مدل پتانسیل هم‌پوشانی شاخص چندکلاسه‌ی داده‌محور ۸۱
- شکل ۳-۲۴: روند کلی الگوریتم RF برای مدل رگرسیونی ۸۳
- شکل ۳-۲۵: مدل پتانسیل جنگل تصادفی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار ۸۵
- شکل ۳-۲۶: روند تکاملی منحنی میانگین مربعات خطا ۸۶
- شکل ۳-۲۷: الف) سطح زیر نمودار مشخصه‌ی عمل کرد سیستم (AUC) برای مدل‌های مختلف ۸۷
- شکل ۳-۲۸: الف) نمودار فرکتالی عیار- مساحت ۸۸
- شکل ۳-۲۹: الف) رخنمون آمیزه‌ی رنگین در منطقه‌ی سبزوار ۸۹
- شکل ۴-۱: الف) نقشه‌ی ساده‌سازی‌شده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه ۹۴
- شکل ۴-۲: الف) گسل‌های شناسایی‌شده با استفاده از ترکیب رنگی $ETM^+ RGB (1,3,5)$ ۹۵
- شکل ۴-۳: الف) مدل پتانسیل میانگین هندسی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار ۹۵
- شکل ۴-۴: الف) مدل فرکتالی عیار- مساحت ۹۸
- شکل ۴-۵: الف) مدل فرکتالی عیار- مساحت ۹۹
- شکل ۴-۶: منحنی‌های مشخصه‌ی عمل کرد سیستم برای مدل‌های پتانسیل تولیدشده ۱۰۰
- شکل ۴-۷: عمل کرد کلی (O_e) مدل‌های پتانسیل مختلف ۱۰۱
- شکل ۴-۸: نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت بهبودیافته برای مدل‌های پتانسیل مختلف ۱۰۲
- شکل ۵-۱: الف) نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده‌شده‌ی برگه‌ی ۱:۱۰۰/۰۰۰ باشتین ۱۰۵
- شکل ۵-۲: الف) عملیات برداشت داده‌ها در محدوده‌ی مورد مطالعه ۱۰۷
- شکل ۵-۳: تصحیح تخته‌ی بوگه ۱۱۳
- شکل ۵-۴: اثر توپوگرافی بر میزان گرانی اندازه‌گیری‌شده؛ الف) اثر کوه و ب) اثر دره ۱۱۳
- شکل ۵-۵: نقشه‌ی رقومی ارتفاعی محدوده‌ی مورد مطالعه ۱۱۴
- شکل ۵-۶: نقشه‌ی رقومی ارتفاعی منطقه‌ی اطراف محدوده‌ی چشمه‌پلنگان ۱۱۵
- شکل ۵-۷: نقشه‌ی آنومالی بوگه‌ی کامل (مقدار اثر گرانی بر حسب میلی‌گال) ۱۱۵
- شکل ۵-۸: نتایج حاصل از روش نتلتون ۱۱۷
- شکل ۵-۹: الف) نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی ۱۱۹
- شکل ۵-۱۰: نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی به‌دست‌آمده از روش ادامه فراسو ۱۲۰
- شکل ۵-۱۱: الف) خطوط شار میدان مغناطیسی زمین ۱۲۱
- شکل ۵-۱۲: شبکه‌ی برداشت داده‌های مغناطیسی محدوده‌ی چشمه‌پلنگان ۱۲۲
- شکل ۵-۱۳: درون‌یابی خطی در یک برداشت دوبعدی ۱۲۴
- شکل ۵-۱۴: نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی مغناطیسی در محدوده‌ی مورد مطالعه ۱۲۵
- شکل ۵-۱۵: الف) تغییر شکل بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی مغناطیسی ۱۲۶
- شکل ۵-۱۶: نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی بر حسب تغییرات ارتفاع ۱۲۷
- شکل ۵-۱۷: بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی به‌دست‌آمده از روش ادامه فراسو و ارتفاع بهینه‌ی ۲۰ متر ۱۲۷
- شکل ۵-۱۸: نقشه‌ی گسل‌ها و خطواره‌های مغناطیسی ۱۲۸

- شکل ۵-۱۹: گسل‌ها و خطواره‌های استخراج‌شده‌ی محدوده‌ی مورد مطالعه ۱۳۰
- شکل ۵-۲۰: نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته ۱۳۲
- شکل ۵-۲۱: مدل‌های پتانسیل معدنی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته ۱۳۲
- شکل ۵-۲۲: الف) منحنی مساحت تجمعی در مقابل مقادیر تجمعی عضویت فازی ۱۳۳
- شکل ۵-۲۳: الف) نواحی مستعد کانی‌زایی تعیین‌شده با استفاده از روش برگردان فازی ۱۳۳

جدول اختصارات

Mineral prospectivity mapping (MPM)	مدل سازی پتانسیل معدنی
Probability of occurrence of mineralization (POM)	احتمال رخداد کانی سازی
Known mineral occurrences (KMOs)	رخدادهای شناخته شده معدنی
Mineral deposit locations (MDLs)	نقاط دارای ذخیره معدنی
Non-deposit locations (NDLs)	نقاط فاقد ذخیره معدنی
Platinum-group element (PGE)	عناصر گروه پلاتین
Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS)	ناهمسان گردی پذیرفتاری مغناطیسی
Rare earth element (REE)	عناصر نادر خاکی
Ground penetrating radar (GPR)	رادار نفوذی به زمین
Factorial Kriging Analysis (FKA)	آنالیز کریجینگ فاکتوری
Very low frequency-electromagnetic (VLF-EM)	الکترومغناطیس فرکانس پایین
Metallic factor (MF)	ضریب فلزی
Percent frequency effect (PFE)	درصد اثر فرکانس
Spectral Feature Fitting (SFF)	انطباق الگوی طیفی
Mixture tuned matched filtering (MTMF)	فیلترینگ تطبیقی میزان شده با مخلوط
Geographical information system (GIS)	سامانه اطلاعات جغرافیایی
Random Forest (RF)	جنگل تصادفی
Prediction-area (P-A) plot	نمودار نرخ پیش بینی - مساحت
Receiver operating characteristic (ROC)	نمودار مشخصه عمل کرد سیستم
Atmospheric and topographic correction (ATCOR)	تصحیح توپوگرافی و اتمسفری
Principle component analysis (PCA)	تجزیه مؤلفه های اصلی
Inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES)	طیف سنج نشری پلاسمای جفت شده القایی
Normalized density (N_d)	چگالی نرمال شده
Area under curve (AUC)	مساحت زیر نمودار مشخصه عمل کرد سیستم
Particle swarm optimization (PSO)	بهینه سازی ازدحام ذرات
Multilayered perceptron neural network (MLPNN)	شبکه عصبی پرسپترون چندلایه
Radial basis function neural network (RBFNN)	شبکه عصبی شعاعی
Mean squared error (MSE)	میانگین مربعات خطا
Learning sample (LS)	نمونه یادگیری
Out-of-bag (OOB)	نمونه خارج از کیسه
Classification and regression tree (CART)	درخت طبقه بندی و رگرسیون
False positive rate (FPr)	نرخ مثبت کاذب
True positive rate (TPr)	نرخ مثبت واقعی
Digital elevation model (DEM)	مدل رقومی ارتفاعی
Total magnetic intensity (TMI)	شدت کل میدان مغناطیسی
International geomagnetic reference field (IGRF)	مدل مرجع جهانی ژئومغناطیس
Reduction to the pole (RTP)	فیلتر برگردان به قطب

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

عملیات اکتشافی ذخایر معدنی شامل چهار مرحله‌ی عملیات پی‌جویی، اکتشاف عمومی، اکتشاف تفصیلی و ارزیابی ذخیره می‌باشد. عملیات پی‌جویی به‌منظور انتخاب مناطق معمولاً وسیع، که در آن‌ها احتمال وجود ذخایر تیپ ماده‌ی معدنی مورد جستجو بالا می‌باشد، انجام می‌گیرد. این انتخاب بر اساس شناخت سیستم کانی‌سازی ذخیره در مکان‌هایی که فرآیندهای زمین‌شناسی و ساختاری برای کانی‌سازی مناسب هستند، صورت می‌گیرد (Singer, 1993; McCuaig et al., 2010; Hagemann et al., 2016). به‌عنوان مثال اگر هدف، اکتشاف کرومیت تیپ انبانه‌ای در ایران باشد با مطالعات اولیه روشن خواهد شد که برخی از مهم‌ترین ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در کمربند افیولیت ملانژ ایران مرکزی قرار دارند. بنابراین اگر این کمربند به‌عنوان منطقه‌ای انتخاب شود که باید در آن عملیات اکتشافی بعدی صورت گیرد، در واقع مرحله‌ی اول از چهار مرحله‌ی فوق انجام شده است. اکتشاف عمومی، مرحله‌ای است که در آن با استفاده از داده‌های با دقت پایین‌تر، مانند: نقشه‌های زمین‌شناسی کوچک‌مقیاس، تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی^۱ و رسوبات آبراه‌های، مناطقی تحت‌عنوان اهداف اکتشافی^۲ یا مناطق امیدبخش^۳ معرفی می‌شوند که باید مورد بررسی‌های تفصیلی‌تر قرار گیرند. هم‌چنین اکتشاف تفصیلی، مرحله‌ای است که در آن اهداف اکتشافی شناسایی شده در مرحله‌ی قبل با استفاده از داده‌های با دقت بالاتر، مانند: نقشه‌های زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس، تصاویر ماهواره‌ای ابرطیفی^۴، نمونه‌های سنگی ژئوشیمیایی و برداشت‌های زمینی ژئوفیزیکی، تحت بررسی‌های تفصیلی‌تری به‌منظور تعیین نقاط حفاری قرار می‌گیرند. بنابراین با وجود تفاوت در مقیاس، عملیات پی‌جویی، اکتشاف عمومی و اکتشاف تفصیلی دارای یک هدف مشترک می‌باشند و آن، تعیین مرز نواحی مستعد کانی‌زایی برای بررسی‌های تکمیلی‌تر می‌باشد (Singer, 1993). تعیین مرز نواحی مستعد کانی‌زایی برای بررسی‌های دقیق‌تر اکتشافی، یک فرآیند چند مرحله‌ای است که در مقیاس ناحیه‌ای تا محلی شامل جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و یک‌پارچه‌سازی داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی به‌منظور الف) تشخیص الگوهای ناهنجار زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی مرتبط با کانی‌زایی و ب) تعیین مرز مناطق مستعد کانی‌زایی با یک‌پارچه‌سازی الگوهای ناهنجار می‌باشد (Carranza, 2008). فرآیند بازشناسی، استخراج، بررسی و یک‌پارچه‌سازی الگوهای ناهنجار به‌منظور تعیین مرز مناطق مستعد کانی‌زایی، مدل‌سازی

^۱ Multi-spectral satellite images

^۲ Exploration targets

^۳ Promising areas

^۴ Hyperspectral satellite images

پتانسیل معدنی (MPM)^۱ نامیده می‌شود (Carranza, 2008). هدف از مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مقیاس ناحیه‌ای تا محلی، اولویت‌بندی و تعیین مرز مناطق مستعد کانی‌زایی است که با تحلیل و تلفیق الگوهای شاهد اکتشافی (یعنی متغیرهای مستقل ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی) حاصل می‌شود (Hornsky and Goves, 2008; Parsa et al., 2017). خروجی مدل‌سازی پتانسیل معدنی، نقشه‌ای خواهد بود که در آن محل وجود احتمالی ذخایر شناخته‌نشده مورد پیش‌بینی قرار گرفته است (Bonham-Carter, 1994).

در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، یک ناحیه به سلول‌های هم‌اندازه تقسیم می‌شود. در مدل پتانسیل معدنی، هر سلول به صورت واحدی همگن با ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی یکسان در نظر گرفته می‌شود (Carranza, 2008). احتمال وجود ذخیره در هر سلول از مدل (نقشه) پتانسیل معدنی، در واقع احتمال رخداد کانی‌سازی (POM)^۲ در آن سلول است که با استفاده از متغیرهای پیش‌گوی زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی برآورد شده است که به زبان ریاضی می‌توان آن را به صورت زیر نشان داد:

$$POM = f\{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\} \quad (1-1)$$

که در آن؛ e_i الگوی شاهد اکتشافی (متغیر مستقل) i ام است. در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، متغیر وابسته وجود و یا عدم وجود ذخیره (کانی‌سازی) در یک ناحیه، منطقه و یا سلول است. POM برای یک سلول دارای ذخیره برابر یک و یا بیشینه (POM_{max}) و برای یک سلول فاقد ذخیره برابر صفر و یا کمینه (POM_{min}) است. در سایر سلول‌ها، POM بین ۰ و ۱ و یا بین کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار متغیر است. طبیعی است که هر قدر POM یک سلول به ۱ و یا POM_{max} نزدیک‌تر باشد، احتمال یافتن کانسار مورد جستجو در آن سلول بیش‌تر است. بر اساس رابطه‌ی (۱-۱)، POM یک سلول به الگوهای شاهد اکتشافی آن سلول وابسته است. بالا بودن امتیاز الگوهای شاهد اکتشافی (متغیرهای مستقل)، به معنی وجود شواهد زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوشیمیایی مرتبط با ذخیره‌ی مورد جستجو و در نتیجه بالا بودن احتمال وجود کانی‌زایی است (Carranza, 2008).

در مقیاس‌های مختلف، تعیین مرز مناطق مستعد کانی‌زایی با توجه به سیستم کانی‌سازی و مدل توصیفی ذخیره‌ی مورد جستجو صورت می‌گیرد. تحلیل سیستم کانی‌سازی^۳، فهم مجموعه فرآیندهای زمین‌شناسی مورد نیاز برای تشکیل و حفظ ذخایر معدنی در تمام مقیاس‌ها می‌باشد که به‌طور فزاینده‌ای در مطالعه‌ی ژنز و توزیع مکانی و زمانی ذخایر معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wyborn,

^۱ Mineral prospectivity mapping (MPM)

^۲ Probability of occurrence of mineralization (POM)

^۳ Mineral system approach (analysis)

(1994; McCuaig et al., 2010). بنابراین بر اساس تحلیل سیستم کانی‌سازی ذخیره‌ی مورد جستجو می‌توان به شناسایی معیارهای اکتشافی و نوع داده‌های مورد نیاز و در نتیجه استخراج الگوهای شاهد اکتشافی پرداخت. پس از استخراج الگوهای شاهد اکتشافی، این الگوها باید به منظور تعیین مرز مناطق مستعد کانی‌زایی با استفاده از یک روش مناسب تلفیق شوند.

روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی به‌طور کلی به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند که با تنوعی از چالش‌ها از جمله انواع مختلف عدم قطعیت روبه‌رو می‌باشند (McCuaig et al., 2010; Lisitsin et al., 2013; Roshanravan et al., 2018a). این تقسیم‌بندی عمدتاً بر اساس روش‌های تخصیص وزن به الگوها (ویژگی‌ها)ی شاهد می‌باشد به‌طوری‌که الگوهای شاهد اکتشافی به‌وسیله‌ی یکی از روش‌های دانش‌محور، داده‌محور، ترکیبی (دانش‌محور و داده‌محور) و پیوسته (بر اساس توابع لجستیکی) وزن‌دار می‌شوند. روش‌های وزن‌دهی به الگوهای پیش‌گو با توجه به وجود یا عدم وجود رخداد‌های شناخته‌شده‌ی معدنی (KMOs)^۱ در منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب می‌شوند. به‌طور کلی در صورت عدم وجود KMOs در منطقه‌ی مورد مطالعه، و یا به‌طور کلی در پهنه‌های سبز^۲، وزن‌دهی به الگوهای شاهد اکتشافی به‌صورت دانش‌محور بوده که بر اساس قضاوت کارشناس انجام می‌گیرد. در مقابل، در صورت وجود KMOs کافی در منطقه‌ی مورد مطالعه، و یا به‌طور کلی در پهنه‌های قهوه‌ای^۳، وزن‌دهی به نقشه‌های شاهد اکتشافی به‌صورت داده‌محور بوده که بر اساس مقایسه‌ی آن‌ها با KMOs انجام می‌گیرد. در روش‌های پیوسته، وزن‌دهی به ویژگی‌های شاهد بدون استفاده از KMOs و بدون یا با حداقل دخالت قضاوت کارشناس صورت می‌گیرد.

از آن‌جایی‌که روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی با عدم قطعیت همراه می‌باشند، بنابراین ارزیابی عمل‌کرد مدل‌های پیش‌گوی مناطق مستعد کانی‌زایی امری ضروری و مهم می‌باشد که این کار در مقیاس ناحیه‌ای با سنجش میزان انطباق آن‌ها با KMOs و در مقیاس محلی با سنجش میزان انطباق آن‌ها با حفاری‌های انجام‌گرفته صورت می‌پذیرد. به‌طور کلی، هر روش مدل‌سازی پتانسیل معدنی دارای دو نوع عدم قطعیت می‌باشد: الف) عدم قطعیت نظام‌مند^۴ ناشی از پیچیدگی فرآیندهای زمین‌شناسی حاکم بر کانی‌سازی و ب) عدم قطعیت تصادفی^۵ ناشی از داده‌های اکتشافی (Carranza et al., 2005; Porwal and Kreuzer, 2010; Zuo et al., 2015). با ارزیابی الگوهای شاهد اکتشافی با روش‌های مختلف می‌توان الگوهای شاهد اکتشافی مؤثر و غیر مؤثر در کانی‌سازی را شناسایی و به‌دنبال آن با حذف الگوهای شاهد اکتشافی غیر مؤثر، کارایی مدل

^۱ Known mineral occurrences (KMOs)

^۲ Green field

^۳ Brown field

^۴ Systematic uncertainty

^۵ Stochastic uncertainty

پتانسیل معدنی را افزایش و عدم قطعیت نظام‌مند آن را کاهش داد (Parsa et al., 2016a, b). تأکید این رساله بر استفاده و توسعه‌ی روش‌های داده‌محور بهبودیافته، به‌خصوص روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، است. این بدان دلیل است که در این روش‌ها، تلفیق الگوهای شاهد اکتشافی بر اساس نقاط دارای ذخیره‌ی معدنی (MDLs)^۱ و نقاط فاقد ذخیره‌ی معدنی (NDLs)^۲، که تحت‌عنوان نقاط آموزشی نیز نامیده می‌شوند، انجام می‌گیرد. علاوه بر این، روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین روش‌های چند متغیره‌ای هستند که توانایی حل مسائل پیچیده از جمله مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده‌ی کانی‌سازی را دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی اشاره نمود که در این پژوهش نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در جدول ۱-۱، مهم‌ترین منابعی که این دو روش (شبکه‌های عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی) را به‌منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده کرده‌اند، ذکر شده است.

جدول ۱-۱: روش‌های داده‌محور چند متغیره

منابع	روش چند متغیره
Porwal et al., 2003, 2004; Nykänen, 2008; Skabar, 2007a, b; Oh and Lee, 2010; Rodriguez-Galiano et al., 2015	شبکه‌های عصبی مصنوعی
Rodriguez-Galiano et al., 2015; Carranza and Laborte, 2016a, b, c; Parsa et al., 2018	جنگل تصادفی

۲-۱ مروری بر مطالعات انجام‌شده

اکتشاف ذخایر کرومیت در مناطق مختلف اقیانوسی کشور از دیرباز به وسیله پیمایش‌های میدانی توسط زمین‌شناسان و بومیان مناطق انجام شده است. هم‌چنین تاکنون مطالعات زیادی در مناطق مختلف دنیا و به‌ویژه ایران به‌منظور پی‌جویی و اکتشاف ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای با استفاده از روش‌های گوناگون اکتشافی مانند زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوفیزیک و ژئوشیمی انجام گرفته است. اما با این‌وجود، مدل‌سازی پتانسیل معدنی این نوع ذخایر به‌ندرت انجام گرفته و هنوز مدل اکتشافی دقیقی از این ذخایر به‌دست نیامده است. در این بخش، ابتدا مطالعات انجام‌شده به‌منظور

^۱ Mineral deposit locations (MDLs)

^۲ Non-deposit locations (NDLs)

اکتشاف ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف اکتشافی مورد بررسی قرار گرفته و سپس به بیان کارهای انجام‌شده به‌منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی این نوع ذخایر پرداخته شده است.

۱-۲-۱ مطالعات زمین‌شناسی و ژئوشیمی

▪ عرفانی (۱۳۵۱) را می‌توان اولین نفری دانست که به مطالعه‌ی تیپ کنسارهای کرومیت ایران پرداخته است. او در این بررسی نشان داد که: ۱) در سری سنگ‌های اولترابازیک شمال و جنوب ایران یک‌نوع نظم و ترتیب توالی واکنشی از دونیت تا گابرو دیده می‌شود. سنگ‌های اسیدی‌تر متعلق به توده‌های نفوذی جدیدتر هستند که به‌خصوص در شمال، سنگ‌های قدیمی‌تر را قطع نموده و رخساره‌های مختلفی را در اثر هضم نیز به‌وجود آورده‌اند؛ ۲) توده‌های کرومیت در داخل این سنگ‌ها، در شمال به‌طور نامنظم و در جنوب لاقل در فاریاب و اسفندقه به‌طور پیوسته تشکیل شده است و به‌نظر می‌رسد به‌صورت یک لایه‌ی کوچک ماگمایی بوده باشد که در اثر تکتونیک به توده‌های کوچک‌تری تقسیم شده است. در محل معادن امیر و شهریار تاثیر تکتونیک به‌صورت سیستم گرابن^۱ دیده می‌شود. ظاهراً ارتباط و پیوستگی توده‌ها در سراسر این منطقه وجود دارد و این ارتباط بالاخص بین معدن شهریار و ابراهیم در منطقه فاریاب که هر دو در دو سوی یک خط گسل معین قرار گرفته‌اند دیده می‌شود؛ و ۳) با تهیه‌ی نقشه‌ی تکتونیک محل از روی تغییرات رخساره‌ی سنگ‌شناسی در جهت عمودی و افقی این توده‌ها و همچنین نوع سرپانتین تشکیل‌شده در اطراف توده‌های کرومیت و محل شکستگی‌ها می‌توان محل دقیق توده‌های دیگری از کرومیت را تعیین کرد و از این طریق برای اکتشاف کرومیت در منطقه اسفندقه و فاریاب استفاده شده است.

▪ سلیمانی منفرد (۱۳۸۳) در تحقیقات خود به ارائه‌ی یک مدل ژنتیکی ریاضی و ژئوشیمیایی برای ذخایر کرومیت در زون سبزواری پرداخته است. او در این مطالعه نشان داد که برای اکتشاف ذخایر کرومیت یکی از راه‌کارهای مناسب، استفاده از مدل‌های زایشی آن‌ها به‌صورت مدل‌های انتزاعی ریاضی است که پارامترهای این مدل مشخصه‌های معادن در حال استخراج است.

▪ وطن‌پور و هم‌کاران (۱۳۸۸) به بررسی کاربرد عناصر گروه پلاتین (PGE)^۲ در اکتشاف و ارزیابی اقتصادی در کنسارهای کرومیت کمر بند افیولیتی سبزواری پرداخته است. در این بررسی مشخص شد که نسبت پالادیوم به ایریدیم در کنسارهای کرومیت مورد مطالعه به‌طور میانگین، پایین (کم‌تر از ۱) و مشابه بسیاری از کنسارهای مهم افیولیتی جهان است. پایین بودن این نسبت همراه با بالا بودن عدد

^۱ Graben

^۲ platinum-group element (PGE)

کروم نوید وجود کانسارهای کرومیت با پتانسیل بالا و از درجه‌ی متالورژی را می‌دهد. کرومیت‌های منطقه مورد مطالعه از نظر عناصر کالکوفیل^۱ ترکیب یکسان ندارند. با استفاده از الگوی PGE مشخص شده است که پریدوتیت‌های منطقه گفت در بخش‌های بالایی بیش‌تر مشابه سنگ‌های فوق بازی انباشتی پوسته اقیانوسی و در بخش‌های زیرین منطقه فرومد مشابه گوشته است.

▪ قوی‌اندام امام‌وردی‌خان (۱۳۸۹) در تحقیقات خود به بررسی و مطالعه‌ی روش پردازش تصویر^۲ در اکتشاف کانسارهای کرومیت (مطالعه‌ی موردی کانسار کرومیت فاریاب) پرداخته است. او در این بررسی برای اولین بار روش آنالیز تصویر را برای اکتشاف رگه‌های کرومیت مورد استفاده قرار داد. نتایج حاصل از این روش با نتایج سایر روش‌ها از جمله زمین‌شناسی ساختاری، کانی‌شناسی، ناهمسان‌گردی پذیرفتاری مغناطیسی (AMS)^۳ و آنالیز فرای^۴ انطباق داشتند. بنابراین این روش می‌تواند نتایج مفیدی از شکل و گسترش کانسارهای عمیق و پنهان ارائه بدهد.

▪ شمسی‌پور دهکردی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی منشا کرومیت و عناصر گروه پلاتین در افیولیت شمال نائین پرداختند. در این بررسی با استفاده از شواهد ژئوشیمی سنگ میزبان و کرومیت مشخص شد که سری ماگمائی از نوع تولیتی است و تیپ این کرومیت، آلپی است. عناصر گروه پلاتین در کرومیت غنی‌شدگی دارند و هم‌چنین فرآیند ذوب بخشی^۵ و وجود سری بونینیتی با استفاده از الگوی نمودار عنکبوتی REE^۶ مورد تایید قرار گرفت.

▪ نویدی قاضیانی (۱۳۹۱) در تحقیقات خود نشان داد که مدل‌های فرکتالی^۷ و منطقه‌بندی ژئوشیمیایی^۸ به تنهایی نمی‌توانند پاسخ مناسبی برای آشکارسازی مناطق آنومال کرومیت ارائه دهند، اما تلفیق روش‌های مدرن فرکتالی و روش منطقه‌بندی ژئوشیمیایی می‌تواند مدل مناسبی برای پی‌جویی ژئوشیمی کانسارهای منطقه باشد.

▪ شیرزادی و همکاران (۲۰۱۳) به‌وسیله‌ی آنالیز شیمیایی نمونه‌های مربوط به چهار محدوده‌ی معدنی کرومیت به بررسی ماهیت ماگمای تولیدکننده‌ی کرومیت در افیولیت سبزواری واقع در شمال شرق ایران پرداختند. آن‌ها نشان دادند که ماگمای مادر کرومیت با مذاب بونینیتی حاصل از فرورانش پوسته اقیانوسی سازگار است (Shirzadi et al., 2013).

^۱ Chalcophillite

^۲ Image processing

^۳ Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS)

^۴ Fry analysis

^۵ Partia melting

^۶ Rare earth element (REE)

^۷ Fractal models

^۸ Geochemical zonality

- محمدزاده و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی سنگ‌نگاری، ژئوشیمی و ژنز کانسار کرومیت کوهی (افیولیت ملانژ رباطسفید) واقع در شمال شرق ایران پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این بررسی مشخص نمود که این کانسار به‌صورت همزاد با سنگ میزبان تشکیل و در خلال جای‌گیری مجموعه افیولیتی تشکیل شده است و پس از آن به‌وسیله‌ی دسته‌های متعدد گسل‌ها قطع و جابه‌جا شده است.
- داودی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی ژئوشیمی و پتروژنز پریدوتیت‌های مجموعه‌ی افیولیتی نیریز فارس پرداخته‌اند. در این بررسی مشخص شد که سنگ‌های این منطقه تهی‌شدگی زیادی از آلومینیوم، تیتانیوم و آهن به‌نسبت منیزیم نشان می‌دهند و هم‌چنین پریدوتیت‌های نیریز ویژگی‌های پریدوتیت‌های تشکیل‌شده در پهنه‌ی بالای فرورانش را نشان می‌دهند.
- خاوری و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی ژئوشیمی و خاستگاه کرومیت‌های گلاب در شرق سریشه واقع در خراسان جنوبی پرداختند که نتیجه‌ی آن بالا بودن مقدار MgO و Cr_2O_3 در کرومیت‌ها است و حاکی از تبلور آن‌ها از ماگمایی با درجه ذوب بخشی نسبتاً بالاست.
- کانی‌شناسی و ژئوشیمی کرومیت‌های چشمه‌بید نیریز توسط تقی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) به‌منظور تعیین جایگاه زمین‌ساختی بررسی شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که کرومیت‌های معدن چشمه‌بید نیریز در نتیجه نفوذ ماگمای بونینیتی با منشأ گوشته‌ی اولیه و درجه بالای ذوب سنگ میزبان پریدوتیتی در زون بالای فرورانش جزیره قوسی ایجاد شده‌اند.
- بازآمد و میرنژاد (۱۳۹۴) به بررسی ژئوشیمی و شکل‌گیری کرومیت‌های مناطق دروازه‌چنار (نیریز) و فاریاب پرداخته‌اند. در این بررسی مشخص گردید که کرومیت‌های دروازه چنار از ماگمایی با ترکیب بونینیتی در یک محیط وابسته به منطقه‌ی بالای فرورانش (SSZ)^۱ تشکیل شده‌اند، در حالی که کرومیت‌های فاریاب از ماگمایی با ترکیب بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی و در محیطی وابسته به منطقه‌ی بالای فرورانش به‌وجود آمده‌اند.
- کریمی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی توزیع ژئوشیمیایی عناصر اصلی، جزئی و کمیاب در گستره‌ی کرومیت‌های توده‌ی افیولیتی نیریز پرداخته‌اند. در این بررسی مشخص شد که کان‌سنگ‌های مورد مطالعه دارای عیار کرومیت در حد اقتصادی بوده ولی میزان عناصر کمیاب ناچیز و فاقد ارزش اقتصادی است.
- بکی‌راج و همکاران (۲۰۰۰) ویژگی‌های ژئوشیمیایی کانسارهای کرومیت انبانه‌ای واقع در توده‌های اولترامافیکی بولجیزه^۲ در کمربند شرقی افیولیتی آلبانی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در

^۱ Suprasubduction Zone

^۲ Bulqiza

این بررسی نسبت اکتشافی کروم به مجموع کروم و آلومینیوم را ارائه دادند و نشان دادند که مقدار این نسبت عمق کانسار را در سکانس (توالی) افیولیتی منعکس می‌کند. این نسبت سطح چینه‌شناسی ایجاد ذخایر کرومیت را نشان می‌دهد، به طوری که هر چه این نسبت پایین‌تر باشد ذخایر کرومیت در بخش تکتونیکی عمیق‌تری ایجاد می‌شوند و برعکس. علاوه بر این، آن‌ها نشان دادند که نسبت‌های $\frac{Cr}{Cr+Al}$ ، $\frac{Mg}{Fe_{tot}}$ و $\frac{Cr}{Fe_{tot}}$ به طور مستقیم با عیار کانسنگ ارتباط دارند. بنابراین این نسبت‌ها می‌توانند در اکتشاف کانسنگ کرومیت در سراسر توده‌ی بولجیزه و دیگر مجموعه‌های ژئودینامیکی مشابه مفید واقع شوند (Beqiraj et al., 2000).

▪ یعقوب‌پور و حسن‌نژاد (۲۰۰۰) با استفاده از آنالیز فرای^۱ به بررسی توزیع مکانی تعدادی از ذخایر کرومیت در ایران پرداختند. در این بررسی مشخص شد که کنترل‌کننده‌های ساختاری در توزیع ذخایر کرومیت موجود در کمپلکس‌های افیولیتی ایران بسیار مهم هستند و با یافتن روندهای اصلی ساختاری در هر کانسار، پی‌جویی‌های بعدی می‌تواند امیدبخش‌تر باشد (Yaghubpur and Hassannejad, 2006).

▪ نویدی و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از تلفیق نقشه‌های ژئوشیمیایی حاصل از روش‌های مالتی‌فرکتال و شاخص منطقه‌بندی به تعیین مناطق پتانسیل‌دار کرومیت در برکه ۱:۱۰۰/۰۰۰ پرنگ واقع در استان خراسان جنوبی پرداختند. در این مطالعه، نتایج حاصل از شاخص منطقه‌بندی و مدل‌سازی فرکتالی عیار-مساحت با نتایج حاصل از روش ماتریس نسبت لگاریتمی^۲ مورد مقایسه قرار گرفت و نشان داد که قسمت‌های غربی و مرکزی منطقه دارای پتانسیل‌های مناسبی از کرومیت می‌باشند که همبستگی خوبی با واحدهای سنگی و نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰/۰۰۰ پرنگ دارند (Navidi et al., 2014).

۲-۲-۱ مطالعات ژئوفیزیکی

▪ کامکار روحانی و بیکی (۱۳۸۸) به پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی به منظور پی‌جویی ذخایر کرومیت در منطقه سبزوار پرداختند. در این مطالعه، پی‌جویی ذخایر کرومیت با ردیابی کانی‌های مغناطیسی همراه با کرومیت، که خود هیچ خاصیت مغناطیسی از خود نشان نمی‌دهد، صورت گرفته است. با بررسی نقشه‌های مغناطیسی به دست آمده و به‌ویژه بررسی جواب‌های مغناطیسی در محل کانسارهای کرومیت قبلاً پی‌جویی شده در نتیجه‌ی بررسی‌های زمین‌شناسی و

^۱ Fry Analysis

^۲ Log-ratio matrix

اکتشافی، یک الگوی مغناطیسی به دست آمد. به کمک الگوهای مغناطیسی به دست آمده، در مجموع ۲۰ منطقه‌ی جدید امیدبخش یا مساعد از نظر وجود کرومیت تعیین و برای عملی شدن مراحل بعدی اکتشاف، معرفی شد.

▪ آمانیان (۱۳۹۰) با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR)^۱ به مطالعه‌ی کرومیت‌های واقع در محدوده‌ی معدنی ایرندگان در استان سیستان و بلوچستان پرداخت. از آن جایی که خروجی دستگاه GPR در هر نقطه به صورت تصاویر رنگی کاذب^۲ ذخیره می‌گردد که بر اساس شدت و نوع رنگ‌ها می‌توان پدیده‌های مختلف را تفکیک نمود، او در این مطالعه پس از حذف نوفه‌های^۳ مزاحم از داده‌ها به شناسایی توده‌های کرومیتی در دو محدوده‌ی شرقی و غربی پرداخته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تا عمق کم‌تر از ۱۰ متر تقریباً در همه‌ی پروفیل‌ها، رگه‌هایی از کرومیت دیده می‌شوند و نیز با توجه به زبری و ناهمواری سطح زمین، اطلاعات عمقی تا حدود دو متری مشخص نیست و وضعیت بلوک‌ها از دو متر به پایین قابل بررسی است. حداکثر عمق نفوذ در این منطقه حدود ۲۰ متر است.

▪ آقاجانی (۱۳۹۱) به انجام پیمایش و مطالعات گرانی‌سنجی در محدوده‌ی اکتشافی کرومیت شرق سبزوار پرداخت. او در این مطالعه پس از اعمال کلیه‌ی تصحیحات لازم بر روی داده‌ها، جهت شناسایی و تفکیک محدوده‌های بی‌هنجاری باقی‌مانده از روش‌های مختلفی مانند روش روند سطحی، تبدیل گسترش میدان به سمت بالا و مشتق قائم اول و دوم جهت حذف یا تضعیف اثر بی‌هنجاری گرانی ناحیه‌ای استفاده کرد. هم‌چنین با توجه به این‌که در برخی از مناطق، کانی‌زایی در راستای شکستگی‌ها و گسل‌ها دیده شده است، از فیلتر فازی محلی زاویه‌ی تمایل نیز استفاده کرده است. نتایج بررسی‌ها ۱۰ بی‌هنجاری مثبت در محدوده نشان داد که در همه‌ی نقشه‌های باقی‌مانده‌ی حاصل از روش روند سطحی با درجات مختلف قابل مشاهده است. در این تحقیق عمق این بی‌هنجاری‌ها با روش واهمامیخت اوپلر تخمین زده شده است.

▪ آزاد و همکاران (۱۳۹۲) با به‌کارگیری روش آنالیز کریجینگ فاکتوری (FKA)^۴ به جدایش بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی در منطقه‌ی معدنی کرومیت فاریاب پرداخته‌اند که براساس آن دو محدوده برای ادامه‌ی عملیات اکتشافی پیشنهاد شده است. نتایج حاصل از این روش با نتایج حاصل از فیلترهای ژئوفیزیکی مقایسه شده است که به‌خوبی قابلیت کاربرد این روش را در فیلتر کردن داده‌های گرانی‌سنجی نشان می‌دهد.

^۱ Ground penetrating radar (GPR)

^۲ False color images

^۳ Noises

^۴ Factorial Kriging Analysis (FKA)

▪ شهبازی (۱۳۹۲) در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود با استفاده از روش گسترش میدان به سمت بالای توسعه‌یافته و تخمین ارتفاع بهینه‌ی آن، به تفکیک بی‌هنجاری‌های گرانی حاصل از کانسار کرومیت چشمه‌سیر سبزوار پرداخته است. در این مطالعه پس از اعمال تصحیحات مورد نیاز، یک ارتفاع بهینه برای ادامه‌فراسوی مرسوم و ادامه‌فراسوی توسعه‌یافته که به ترتیب ۴۸ و ۲۱ متر است تخمین زده شد و با استفاده از آن‌ها این روش‌ها بر روی داده‌ها اعمال گردیدند. با مقایسه‌ی این روش‌ها و کیفیت جداسازی آن‌ها در نهایت چند جسم آنومال سطحی از نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی منتج از ادامه‌فراسوی توسعه‌یافته نتیجه شد.

▪ شایسته‌فر و همکاران (۱۳۹۳) به اکتشاف کرومیت با استفاده از پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی منطقه‌ی آبدشت پرداختند. با بررسی نقشه‌های مغناطیسی به‌دست آمده و به‌ویژه بررسی بی‌هنجاری‌های مغناطیسی در محل معادن کرومیت موجود، یک الگوی مغناطیسی تهیه شد. به کمک الگوهای مغناطیسی به‌دست آمده، در مجموع ۲۵ محدوده برای اکتشافات تفصیلی و برداشت‌های زمینی پیشنهاد شد.

▪ روشندل کاهو و نجاتی کلاته (۱۳۹۳) به برآورد ارتفاع بهینه در روش پردازش ادامه فراسو داده‌های گرانی به‌منظور تفسیر داده‌های گرانی محدوده‌ی کرومیت‌دار در استان هرمزگان پرداخته‌اند. در این بررسی جداسازی بی‌هنجاری‌های محلی و ناحیه‌ای با استفاده از ارتفاع بهینه ادامه فراسو به نحو مطلوب صورت گرفته و سبب شناخت بهتر موقعیت ذخیره‌ی معدنی شده است.

▪ علی‌پور و همکاران (۱۳۹۳) به مقایسه‌ی روش‌های طیف توان شعاعی و واهمامیخت اویلر برای تخمین عمق ساختارهای زیرسطحی کرومیت در منطقه‌ی کاماگئی کوبا پرداختند. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این دو روش و همچنین نتایج حاصل از حفاری، روش طیف توان شعاعی برای سطحی‌ترین قسمت از ساختار معدنی پاسخ دقیق‌تری نسبت به روش اویلر دیکانولوشن ارائه داده است. اما روش واهمامیخت اویلر تغییرات عمقی توده‌ی معدنی با شیب مربوطه را نزدیک‌تر به ساختار زمین‌شناسی منطقه پیش‌بینی کرده است.

▪ روشندل کاهو و نجاتی کلاته (۱۳۹۴) به طراحی فیلتر داده‌مبنا به‌منظور تفکیک بی‌هنجاری‌های داده‌های گرانی‌سنجی، برای پتانسیل‌یابی کرومیت در منطقه‌ی دولت‌آباد هرمزگان، پرداختند. در این مطالعه بر روی داده‌های گرانی منطقه، مدل‌سازی به روش وارون‌سازی انجام شد.

▪ کوثری (۱۳۹۵) در پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد خود با استفاده از روش گرادیان کل نرمال و مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌ها به تفسیر داده‌های میدان پتانسیل محدوده‌ی اکتشافی کرومیت شرق سبزوار پرداخته است. در این مطالعه، ابتدا از روش توابع چندجمله‌ای، بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و

محلی از هم تفکیک و سپس با استفاده از روش گرادیان کل نرمال دوبعدی بی‌هنجاری‌های گرانی تعیین شده‌اند و برای تعیین وضعیت توده‌های معدنی مدل‌سازی مستقیم با استفاده از نرم‌افزار WinGLink و مدل‌سازی دوبعدی وارون با استفاده از نرم‌افزار Modelvision Pro انجام شده است. نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی محدوده اکتشافی سبزووار با نتایج حفاری‌های انجام‌شده در محدوده بی‌هنجاری‌ها انطباق بالایی دارد.

اکتشاف کرومیت به‌روش‌های ژئوفیزیکی یکی از روش‌های اصلی هست که در اکثر کشورهای جهان مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

▪ از قدیمی‌ترین مطالعات جهت اکتشاف کرومیت به‌روش گرانی، تحقیقات دیویس و همکاران (۱۹۵۷) جهت شناسایی ذخایر کرومیت در کاماگئی کوبا بوده است. آن‌ها داده‌های گرانی برداشتی توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا را پردازش و تفسیر نمودند و بر اساس مطالعات ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی نقاط حفاری را پیشنهاد دادند. حفاری‌های انجام‌شده بر روی ۱۰۹ بی‌هنجاری مثبت نشان داد که ۱۰ بی‌هنجاری بر روی ذخایر کرومیت و ۸۹ بی‌هنجاری دیگر بر روی توده‌های دارای مواد متراکم دیگر قرار گرفته‌اند اما ۷ بی‌هنجاری دیگر به‌خاطر موادی که در حفاری ظاهر شدند مورد تفسیر قرار نگرفتند (Davis et al., 1957).

▪ باتاچاریا و همکاران (۱۹۶۹) با استفاده از روش ژئوفیزیکی گرانی‌سنجی به کشف کرومیت در کمربند اولترامافیکی محدوده‌ی کوتک^۱ واقع در آریسا^۲ هند پرداخته است. در این مطالعه نه منطقه‌ی بی‌هنجار مشخص شده که چهار تای آن‌ها مربوط به توده‌های کرومیتی شناخته‌شده و ناشناخته بوده، یکی از آن‌ها تا حدی بر روی کرومیت و تا حدی بر روی گابرو افتاده و مابقی بی‌هنجاری‌ها بر روی توده‌های دیگر با چگالی بالاتر از کرومیت قرار گرفته‌اند (Bhattacharya et al., 1969).

▪ کاسپیری و همکاران (۱۹۹۹) به بررسی سوابق استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به‌منظور کشف کرومیت در منطقه‌ی بالکان پرداخته است که نتایج بررسی‌های او به‌صورت زیر می‌باشد (Kospiri et al., 1999).

- در کشور ترکیه از روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی به‌منظور اکتشاف کرومیت استفاده شده است که با هم‌دیگر هم‌خوانی داشته و به‌وسیله‌ی نتایج حفاری‌های پیشنهادی مورد تأیید قرار گرفته‌اند. هم‌چنین نتایج او نشان می‌دهد که روش پی‌جویی گرانی‌سنجی یک تکنیک امیدبخش‌تر به‌منظور کشف توده‌های بزرگ کرومیت حتی در توپوگرافی‌های شدید است.

- در کشور یونان، که کرومیت درون توده‌های بزرگ پریدوتیتی-سرپانتینی تشکیل شده است،

^۱ Cuttack

^۲ Orissa

ذخایر کرومیت به روش مغناطیس‌سنجی کشف شده‌اند.

- کشور آلبانی یکی از دارندگان معروف ذخایر کرومیت می‌باشد که درون توده‌های اولترامافیکی تشکیل شده‌اند. تعدادی از این ذخایر از لحاظ گسترش و عیار در حد ذخایر کلاس جهانی قرار دارند. در این کشور برای اکتشاف ذخایر کرومیت نتایج حاصل از برداشت‌های زمین‌شناسی، گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی و ژئوالکتریک در مقیاس ۱:۲۰۰۰ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند که مناطق آنومال حاصل از این مقایسه با نتایج حفاری‌های انجام‌شده انطباق بالایی دارد.

- در کشورهای حوزه‌ی بالکان (مانند صربستان) با استفاده از روش‌های گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی و پلاریزاسیون القایی (IP)^۱ به اکتشاف کرومیت پرداخته شده است.

▪ بایراک (۲۰۰۲) با استفاده از روش الکترومغناطیسی فرکانس پایین (VLF-EM)^۲ به اکتشاف کان‌سنگ کروم در جنوب غربی ترکیه پرداخته است. نقشه‌های حاصل از این روش از قبیل مقاومت‌ویژه‌ی ظاهری، فاز و همچنین مقادیر به‌دست آمده از فیلترهای فریزر^۳، کاروس^۴ و هجلت^۵ نشان می‌دهند که بی‌هنجاری‌های مختلفی در امتداد N25°E گسترش دارند. او همچنین با مقایسه‌ی نقشه‌ی مقاومت‌ویژه‌ی حاصل از روش VLF-EM با نقشه‌های حاصل از روش پلاریزاسیون القایی مانند MF^۶ و PFE^۷ نشان داد که بی‌هنجاری‌ها در راستای N25°E جهت‌دهی شده‌اند که این بی‌هنجاری‌ها در ارتباط با کانی‌سازی کروم در محدوده‌های دارای سنگ‌های هارزبورژیت/دونیت و سنگ‌های سرپانتینی شده می‌باشند. او در این بررسی نشان داد که روش VLF-EM می‌تواند به‌عنوان یک ابزار سریع و ارزان به‌منظور نقشه‌برداری کان‌سنگ‌های کروم مورد استفاده قرار گیرد (Bayrak, 2002).

▪ موهانتی و همکاران (۲۰۱۱) با مقایسه‌ی روش‌های ژئوفیزیکی با اطلاعات زمین‌شناسی در محدوده‌ای واقع در آریسا (هند) به شناسایی ذخایر کرومیت پرداختند. آن‌ها در این بررسی با تهیه‌ی نقشه‌ی سنگ‌شناسی و روش‌های ژئوفیزیکی شامل گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، ژئوالکتریک و الکترومغناطیس به اکتشاف کرومیت در این محدوده‌ی ۵ کیلومتر مربعی پرداختند. در این تحقیق: (۱) نتایج حاصل از نقشه‌های گرانی و مغناطیس هم‌دیگر را تأیید کردند؛ (۲) مدل‌سازی مستقیم دو بعدی و سه بعدی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی گرانی وجود سنگ‌شناسی‌های با چگالی بالاتر از سنگ‌های مافیک و

^۱ Induced polarization

^۲ Very low frequency-electromagnetic (VLF-EM)

^۳ Fraser

^۴ Karous

^۵ Hjelt

^۶ Metallic conduction factor (MF)

^۷ Present frequency effect (PFE)

اولترامافیک را در زیر سطح نشان داد؛ ۳) نتایج حاصل از روش‌های الکترومغناطیسی فرکانس پایین و مقاومت‌ویژه (DC) نشان دادند که به‌طور کاذب طول کانسار ۳۰۰-۲۵۰ متر در جهت شمالی- جنوبی، عرض کانسار ۳۵۰-۳۰۰ متر در جهت شرقی- غربی و در عمق ۱۰۰-۳۵ متری واقع شده است؛ و ۴) روش‌های الکترومغناطیسی فرکانس پایین و مقاومت‌ویژه نشان دادند که کرومیت به‌صورت توده‌های کوچک پراکنده در زمینه‌ی سنگ‌های مافیک و اولترامافیک به‌وجود آمده است (Mohanty et al, 2011).

▪ علی و جهانگیرخان (۲۰۱۳) به جستجوی ژئوفیزیکی به‌منظور کشف کرومیت در افیولیت سمایل (عمان) پرداختند. آن‌ها در این مطالعه از روش‌های ژئوفیزیکی گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی و مقاومت‌ویژه استفاده نمودند. در محدوده‌ی زکی^۱ که انتظار می‌رفت کرومیت در بالای یک تپه واقع شده باشد، استخراج به روش روباز اجرا شد که با موفقیت همراه نبود. در حالی که مقایسه‌ی روش‌های ژئوفیزیکی (گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی و مقاومت‌ویژه) وجود کرومیت را در همان منطقه اما در محلی متفاوت آشکار ساخت. وجود کرومیت در عمق ۱۰ تا ۱۵ متری پیش‌بینی شد که به‌وسیله‌ی حفاری مورد تایید قرار گرفت (Ali and Jahangir Khan, 2013).

▪ آسکی و بیات (۲۰۱۵) با استفاده از روش میکروگرانی^۲ به اکتشاف کانسار کرومیت در منطقه‌ای واقع در عثمانیه (ترکیه) پرداختند. در این مطالعه به‌منظور اندازه‌گیری‌های میکروگرانی از دستگاه Scintrex CG-5 استفاده گردید و تعداد ۲۴۳۸ ایستگاه در کل منطقه برداشت شد که فواصل بین پروفیل‌ها و هم‌چنین ایستگاه‌ها برابر با ۳ متر می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری‌شده تصحیح و به نقشه درآمدند. بر اساس نتایج حفاری مشخص گردید که کروم با عیار پایین (۱۵ تا ۲۰ درصد) در محل‌هایی که دامنه‌ی بی‌هنجاری‌ها از ۸/۵ تا ۱۰ میلی‌گال تغییر می‌کند، یافت می‌شود. هم‌چنین حفاری‌های دیگری در محل‌هایی که دامنه‌ی بی‌هنجاری‌ها از ۲ تا ۵ میلی‌گال تغییر می‌کند انجام گرفتند اما کروم در آن‌ها یافت نشد. بنابراین نتیجه گرفتند که هارزبورژیت و دونیت، منشأ ایجاد بی‌هنجاری در این نقاط بوده‌اند (Asci and Bayat, 2015).

۱-۲-۳ مطالعات دورسنجی

▪ تنگستانی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی خصوصیات طیفی و نقشه‌برداری سنگ‌شناسی کمپلکس افیولیتی نیریز با استفاده از داده‌های استر (ASTER)^۳ پرداختند. در این مطالعه، برای طبقه‌بندی

^۱ Izki

^۲ Microgravity

^۳ Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER)

واحدهای سنگی مختلف از روش تطابق سنجی طیفی^۱ استفاده شد که مقایسه‌ی نتایج حاصل از آن با نقشه‌ی زمین‌شناسی حاکی از آن است که نقشه‌های طبقه‌بندی قابل اطمینانی را از واحدهای سنگی افیولیتی ارائه می‌دهد (Tangestani et al., 2011).

▪ راجندران و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از داده‌های استر به اکتشاف مناطق کرومیت‌دار در توده‌های افیولیتی اسماعیل واقع در کوه‌های شمالی عمان پرداختند. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از روش‌های پردازش تصویر نسبت‌های بانندی مختلف، Decorrelation Stretch و آنالیز مؤلفه‌های اصلی و بر اساس باندهای طیفی ناحیه VNIR و SWIR طیف الکترومغناطیس به کشف مناطق پتانسیل‌دار کرومیت در منطقه‌ی افیولیتی اسماعیل پرداخته‌اند. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده از این روش‌ها با نقشه‌ی زمین‌شناسی نشان می‌دهد که روش سنجش از دور در به نقشه در آوردن هارزبورژیت سرپانتینی شده که سنگ میزبان کرومیت می‌باشد، موفق بوده است (Rajendran et al., 2012).

▪ پورنامداری و ماژلان (۲۰۱۳) از داده‌های استر و لندست ETM⁺ جهت کشف مناطق کرومیت‌دار در کمپلکس افیولیتی آبدشت استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه از روش‌های پردازش تصویر Decorrelation Stretch، Log residual، نسبت بانندی و MTMF^۲ به منظور به نقشه در آوردن داده‌های سنگی کمپلکس افیولیتی آبدشت استفاده نموده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که این روش‌ها به خوبی مناطق کرومیت‌دار با پتانسیل بالا را در کمپلکس افیولیتی آبدشت شناسایی کرده‌اند (Pournamdari and Mazlan, 2013).

▪ پورنامداری و همکاران (۲۰۱۴) از تبدیل طیفی باندهای سنجنده‌ی استر و سنجنده‌ی TM ماهواره‌ی لندست برای تهیه‌ی نقشه‌ی واحدهای سنگ‌شناسی مجموعه‌ی افیولیتی صوغان واقع در جنوب کرمان استفاده کردند. آن‌ها در این مطالعه از روش‌های نسبت بانندی، آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تبدیل طیفی ضریب همبستگی و فاکتور شاخص بهینه برای نقشه‌برداری سنگ‌شناسی مجموعه‌ی افیولیتی صوغان استفاده نموده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که این روش‌ها به خوبی دونیت‌های سرپانتینی شده که سنگ میزبان ذخایر کرومیت است را از واحدهای سنگی اطراف تفکیک کرده‌اند (Pournamdari et al., 2014).

^۱ Spectral Feature Fitting (SFF)

^۲ Mixture tuned matched filtering (MTMF)

۱-۲-۴ مطالعات انجام شده به منظور مدل سازی پتانسیل معدنی کرومیت

مدل سازی پتانسیل معدنی در واقع یافتن مکان‌ها یا مناطقی است که یک سری معیارها و ملاک‌ها برای وجود ذخیره در آن‌ها صدق می‌کند. از آنجایی که ایران یکی از تولیدکنندگان کرومیت در جهان به‌شمار می‌رود و همچنین با توجه به کاربردهای مهمی که این ماده معدنی در فولاد، آلیاژهای غیرآهنی سخت، صنایع نسوز، ریخته‌گری و صنایع دیگر دارد از این رو، تهیه یک مدل اکتشافی دقیق از این ذخایر امری مهم و ضروری است. تاکنون مطالعات گسترده‌ای در مورد مدل سازی پتانسیل معدنی ذخایر دیگر از قبیل: مس، طلا، سرب و روی انجام شده است اما این مهم در مورد ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای به‌طور محدود صورت گرفته که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مطالعات پشنگ (۱۳۹۱)، امیری رودبار (۱۳۹۲) و کاشفی (۱۳۹۴) اشاره نمود. از آنجایی که در این تحقیقات، مدل‌های پتانسیل با استفاده از قضاوت کارشناسی و تخصیص اوزان اریب به نقشه‌های شاهد اکتشافی ایجاد شده‌اند بنابراین دارای عدم قطعیت بالا بوده و از دقت اکتشافی کمی برخوردار هستند. از طرفی به‌علت شرایط خاص این تیپ از کانی‌زایی کرومیت و عدم یک‌پارچگی این ماده معدنی، کم‌تر روشی که بتواند نیاز جامعه‌ی معدنی را پاسخ‌گو باشد، وجود ندارد. در کشورهای دیگر نیز مطلب انتشار یافته‌ای در مورد مدل سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای با استفاده از چهار روش دانش‌محور، داده‌محور، ترکیبی و پیوسته وجود ندارد و فقط با استفاده از مقایسه‌ی یک یا دو روش اکتشافی (زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی و دورسنجی) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از طرفی تاکنون هنوز مدل سازی پتانسیل معدنی برای این نوع ذخایر در مقیاس محلی در ایران و دنیا انجام نشده است. بنابراین مدل سازی این نوع ذخایر در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی یکی از نیازهای اساسی و ضروری است.

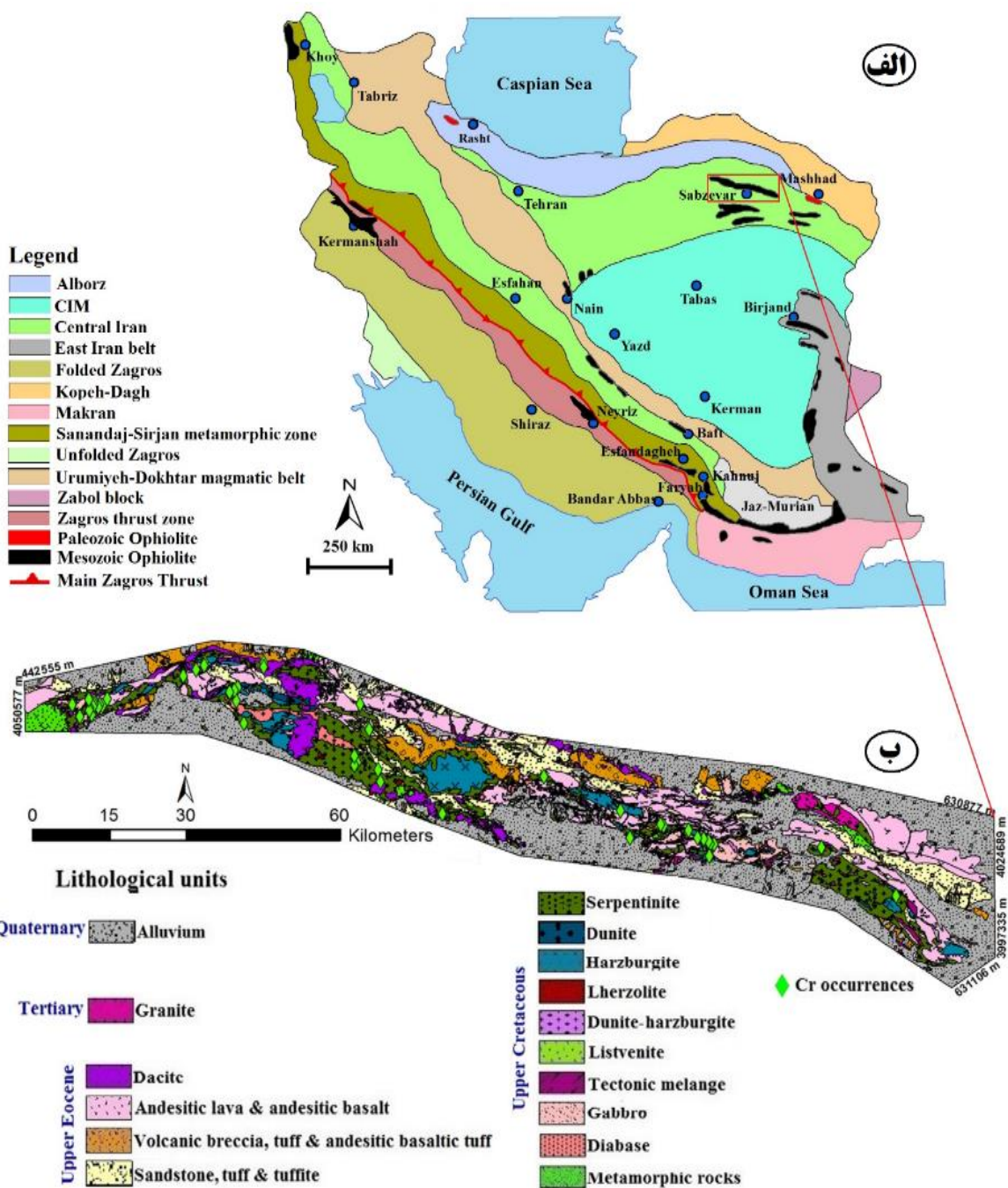
۱-۳ منطقه‌ی مطالعاتی

منطقه‌ی مورد مطالعه با مساحت تقریبی ۴۲۰۰ کیلومتر مربع در کمربند افیولیتی سبزوار در استان خراسان رضوی واقع شده است (شکل ۱- الف). از نظر تکتونیکی، این کمربند بخش کوچکی از اقیانوس نئوتتیس^۱ در اطراف خرد قاره‌ی ایران مرکزی (CIM)^۲ است (Stöcklin, 1974; Rajabzadeh et al., 2015). کمربند افیولیتی سبزوار دارای روند شرقی-غربی، طول تقریبی ۱۵۰ کیلومتر و عرض تا ۳۰ کیلومتر می‌باشد (Rajabzadeh et al., 2015). انواع مختلفی از سنگ‌های آذرین، دگرگونی، رسوبی و آتش‌فشانی- رسوبی در منطقه‌ی مورد مطالعه وجود دارند (Stöcklin, 1974; Shafaii Moghadam et

^۱ Neotethys Ocean

^۲ Central Iranian microcontinent

(al., 2010; Rajabzadeh et al., 2015). واحدهای سنگی اولترامافیکی و مافیکی که عمدتاً در منطقه برونزد دارند شامل هارزبورژیت، دونیت، سرپانتینیت، گابرو و میکروگابرو و دایک‌های دیابازی می‌باشند (شکل ۱-۱-ب). علی‌رغم این‌که افیولیت سبزوار به‌شدت گسل‌خورده و دگرسان‌شده است، اما نمونه‌ی شاخصی از افیولیت‌ها در ایران است زیرا تمامی بخش‌های تشکیل‌دهنده‌ی یک مجموعه‌ی افیولیتی را دارا است (Shirzadi et al., 2013). منطقه‌ی مورد مطالعه در ناحیه‌ای نیمه‌خشک تا خشک با رخنمون‌های فراوان و پوشش گیاهی بسیار کم قرار گرفته و در نتیجه، برای مطالعات دورسنجی مناسب است. با توجه به بررسی‌های به‌عمل آمده تعداد ۴۶ اندیس معدنی تا محدوده‌ی معدنی قابل کار مجموعه‌ی افیولیتی سبزوار گزارش شده است که به‌عنوان نقاط آموزشی برای یادگیری روش‌های شبکه‌ی عصبی و جنگل تصادفی و همچنین به‌عنوان نقاط آزمایش به‌منظور ارزیابی نقشه‌های شاهد و مدل‌های پتانسیل تولیدشده مورد استفاده قرار گرفتند که مشخصات آن‌ها در جدول ۱-۲ نشان داده شده است. تعدادی از این محدوده‌های معدنی بر اساس اطلاعات تجربی معدنکاری به‌طرز نامناسبی اکتشاف و استخراج شده و به‌علت نداشتن یک الگوی مناسب اکتشافی، معدنکاران با کند و کاری‌های زیاد سبب تغییر مورفولوژی منطقه‌های معدنی شده و در این بین، ذخایر بزرگ و کوچکی را استخراج کرده‌اند. نبود یک روش اکتشافی موفق و مناسب و عدم وجود یک ساختار مناسب شناخته در مناطق معدنی مذکور و عدم مطالعه‌ی یک‌پارچه روی این مناطق معدنی سبب شده که بخش زیادی از کرومیت، ناشناخته و بعضاً در محل باطله‌های معدنی استخراج‌شده مدفون شوند.



شکل ۱-۱: الف) واحدهای ساختاری و موقعیت افیولیت‌های اصلی ایران (Jannessary et al., 2012) و ب) نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده‌شده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه

جدول ۱-۲: مشخصات رخدادهای معدنی شناخته شده (KMOs) در کمربند افیولیتی سبزوار
(<http://www.ngdir.ir/MiningInfo>)

رخداد معدنی	برگه‌ی ۱:۱۰۰/۰۰۰	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	رخداد معدنی	برگه‌ی ۱:۱۰۰/۰۰۰	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	سلطان‌آباد	۵۸/۲۴۳	۳۶/۲۱۹	۲۴	فرومد	۵۶/۸۸۰	۳۶/۶۲۰
۲	سلطان‌آباد	۵۸/۰۸۳	۳۶/۳۰۴	۲۵	فرومد	۵۶/۸۳۸	۳۶/۵۲۳
۳	سبزوار	۵۷/۸۵۳	۳۶/۳۱۲	۲۶	فرومد	۵۶/۸۲۴	۳۶/۵۸۵
۴	سبزوار	۵۷/۸۴۴	۳۶/۳۱۳	۲۷	فرومد	۵۶/۸۲۲	۳۶/۵۶۲
۵	سبزوار	۵۷/۸۴۲	۳۶/۲۹۱	۲۸	فرومد	۵۶/۸۱۷	۳۶/۵۸۰
۶	سبزوار	۵۷/۸۴۰	۳۶/۳۱۷	۲۹	فرومد	۵۶/۸۰۷	۳۶/۵۷۶
۷	سبزوار	۵۷/۸۳۰	۳۶/۳۲۱	۳۰	فرومد	۵۶/۷۵۳	۳۶/۶۲۷
۸	سبزوار	۵۷/۸۱۷	۳۶/۳۲۳	۳۱	فرومد	۵۶/۷۵۲	۳۶/۶۲۲
۹	سبزوار	۵۷/۷۹۸	۳۶/۳۳۶	۳۲	فرومد	۵۶/۷۳۵	۳۶/۶۱۵
۱۰	سبزوار	۵۷/۷۴۴	۳۶/۳۴۴	۳۳	فرومد	۵۶/۷۰۷	۳۶/۶۰۴
۱۱	سبزوار	۵۷/۷۳۷	۳۶/۳۴۶	۳۴	فرومد	۵۶/۵۴۲	۳۶/۵۶۴
۱۲	سبزوار	۵۷/۶۷۱	۳۶/۳۲۳	۳۵	فرومد	۵۶/۵۳۲	۳۶/۵۵۲
۱۳	سبزوار	۵۷/۶۵۱	۳۶/۳۷۱	۳۶	فرومد	۵۶/۵۲۶	۳۶/۵۵۴
۱۴	باشتین	۵۷/۴۸۶	۳۶/۴۳۰	۳۷	فرومد	۵۶/۵۲۳	۳۶/۵۵۰
۱۵	باشتین	۵۷/۲۶۷	۳۶/۳۶۷	۳۸	فرومد	۵۶/۵۱۳	۳۶/۵۶۱
۱۶	باشتین	۵۷/۱۳۳	۳۶/۴۲۲	۳۹	فرومد	۵۶/۵۱۳	۳۶/۵۵۴
۱۷	باشتین	۵۷/۱۲۸	۳۶/۴۴۲	۴۰	فرومد	۵۶/۵۱۱	۳۶/۵۵۰
۱۸	باشتین	۵۷/۰۸۳	۳۶/۴۵۵	۴۱	فرومد	۵۶/۵۰۸	۳۶/۵۳۷
۱۹	باشتین	۵۷/۰۷۷	۳۶/۴۵۱	۴۲	فرومد	۵۶/۵۰۴	۳۶/۵۴۸
۲۰	باشتین	۵۷/۰۷۷	۳۶/۴۶۷	۴۳	فرومد	۵۶/۵۰۳	۳۶/۵۴۴
۲۱	جغتای	۵۷/۱۰۸	۳۶/۵۱۲	۴۴	فرومد	۵۶/۵۰۳	۳۶/۵۶۳
۲۲	جغتای	۵۷/۰۸۹	۳۶/۵۵۶	۴۵	جاجرم	۵۶/۴۸۳	۳۶/۵۳۳
۲۳	فرومد	۵۶/۸۸۱	۳۶/۶۲۸	۴۶	جاجرم	۵۶/۴۶۷	۳۶/۵۵۴

۱-۴ بیان مسأله و اهداف تحقيق

کمر بند افیولیتی سبزوار یکی از مناطق مستعد وجود کانی‌زایی کرومیت انبانه‌ای است که در شمال شرق ایران و در استان خراسان رضوی واقع شده است (Yaghubpur and Hassannejad, 2006; Shafaii Moghadam et al., 2010; Rajabzadeh et al., 2015). با توجه به بسیاری از معادن شناخته شده در منطقه از قبیل معادن گفتم، میرمحمود، علی‌آباد، زرقان، عباس‌آباد و چشمه‌پلنگان، و هم‌چنین با وجود توده‌های پریدوتیتی فراوان که در سطح وسیعی از منطقه به سرپانتینیت تبدیل شده‌اند، کمر بند افیولیتی سبزوار مستعد وجود کانی‌زایی‌های بیش‌تری از کرومیت انبانه‌ای است. شناسایی معیارهای اکتشافی ناحیه‌ای و به‌خصوص محلی ذخایر کرومیت انبانه‌ای به‌دلیل پیچیدگی محیط‌های زمین‌شناسی مرتبط، عدم گسترش یکنواخت و عدم پیوستگی کانی‌سازی و نیز استفاده از این معیارها در مدل‌سازی اکتشافی این ذخایر، یک مسئله‌ی مهم، پیچیده و کم مطالعه شده است. به همین دلیل است که در خصوص مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت با استفاده از تلفیق داده‌های مختلف اکتشافی منابع منتشر شده‌ی چندانی وجود ندارد.

همان‌طور که شناسایی علل موثر در کانی‌زایی در یافتن مرز مناطق مستعد کانی‌زایی حائز اهمیت است، نحوه تلفیق الگوهای شاهد اکتشافی و چگونگی وزن‌دهی به این الگوها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا استفاده از روش‌های موثر تلفیق در محیط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS)^۱ که عدم قطعیت و خطا را نیز به‌ویژه در محیط‌های پیچیده‌ی زمین‌شناسی بیش‌تر در مدل‌ها دخالت می‌دهند، تاثیر بسزایی در افزایش دقت مناطق مستعد کانی‌زایی تعیین‌شده، دارد. به‌طور کلی تعیین مرز مناطق مستعد کانی‌زایی با دو نوع خطای تصادفی و نظام‌مند همراه است (Singer, 2010; McCuaig et al., 2010; Lisitsin et al., 2013). وجود این خطاها موجب صرف هزینه و وقت بیش‌تر و هم‌چنین افزایش ریسک در مراحل بعدی اکتشاف می‌شود. بنابراین تعیین مرز بهینه‌ی مناطق مستعد کانی‌زایی در مراحل اکتشاف عمومی و تفصیلی ذخایر کرومیت انبانه‌ای در کمر بند افیولیتی سبزوار امری مهم و ضروری است که بر اساس کمینه‌کردن خطاهای تصادفی و نظام‌مند انجام می‌پذیرد. خطاهای تصادفی ناشی از خطاهای نمونه‌برداری و آنالیز داده‌ها، طراحی نامناسب شبکه‌های برداشت، داده‌های اکتشافی ناقص و قضاوت‌های نادرست متخصص می‌باشند (Singer, 2010; McCuaig et al., 2010). در مقابل، خطاهای نظام‌مند در اثر تخصیص اوزان اریب به الگوهای شاهد اکتشافی، طبقه‌بندی نامناسب داده‌ها و عدم انتخاب صحیح معیارهای اکتشافی حاصل می‌شوند (Carranza, 2008). با توجه به موارد ذکر شده در بالا، اهداف کلی این تحقیق عبارتند از:

- تفکیک معیارهای اکتشافی ذخایر کرومیت نوع انبانه‌ای در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی بر اساس تحلیل سیستم کانی‌سازی این نوع ذخایر

^۱ Geographical information system (GIS)

- ارائه‌ی شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد اکتشافی در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی
- مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت نوع انبانه‌ای و هم‌چنین تعیین مرز مناطق مستعد کانی‌زایی (اهداف اکتشافی) در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی با استفاده از روش‌های شبکه‌ی عصبی- فازی بهبودیافته، جنگل تصادفی و توابع ریاضیاتی (بر اساس تابع لجستیکی) که باعث کاهش خطاهای نظام‌مند و تصادفی ناشی از روش‌های داده‌محور و دانش‌محور می‌شوند.
- توسعه‌ی نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت بهبودیافته به‌منظور شناسایی الگوهای شاهد اکتشافی مؤثر و غیر مؤثر و هم‌چنین ارزیابی عملکرد مدل‌های پتانسیل
- ارائه‌ی یک مدل اکتشافی مناسب برای اکتشاف ذخایر کرومیت در سطح کشور

۱-۵ نوآوری و فرض‌های تحقیق

- برجسته‌ترین جنبه‌های نوآوری این تحقیق، موارد زیر را شامل می‌شود.
- تفکیک معیارهای اکتشافی و ارائه‌ی شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد اکتشافی برای ذخایر کرومیت نوع انبانه‌ای در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی بر اساس تحلیل سیستم کانی‌سازی این نوع ذخایر
- مدل‌سازی پتانسیل معدنی با استفاده از روش شبکه‌ی عصبی بهبودیافته
- مدل‌سازی پتانسیل معدنی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات
- مدل‌سازی پتانسیل معدنی برای ذخایر کرومیت نوع انبانه‌ای در مقیاس محلی
- توسعه‌ی نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت بهبودیافته به‌منظور شناسایی الگوهای شاهد اکتشافی مؤثر و غیر مؤثر و هم‌چنین ارزیابی عملکرد مدل‌های پتانسیل
- در این تحقیق، موارد زیر به‌عنوان فرض‌های تحقیق در نظر گرفته می‌شوند:
- روش‌های اکتشافی برای شناسایی کانسارهای کرومیت استفاده می‌شوند ولی یک روش خاص و مناسب برای اکتشاف کرومیت ارائه نشده است (می‌توان با استفاده از روش‌های تلفیقی چندمعیاره موفقیت بیش‌تری در شناخت مناطق تمرکز کرومیت به‌دست آورد).
- براساس مطالعات و تحقیقات صورت گرفته توسط دیگران، کانی‌سازی کرومیت در منطقه‌ی مورد بررسی از نوع انبانه‌ای می‌باشد.
- می‌توان با استفاده از مدل‌سازی کانسارهای شناخته‌شده‌ی کرومیت و تعیین شاخص‌های آن‌ها، مناطق و کانسارهای مشابه را شناسایی نمود.
- می‌توان از پارامترها و ویژگی‌های کانسارهای مهم شناخته‌شده و تیپیک خارج از محدوده مورد مطالعه و یا ترکیب آن‌ها با خصوصیات اندیس‌های شناخته‌شده داخل محدوده در اکتشاف ذخایر با تیپ مشابه

استفاده نمود.

- با مطالعه‌ی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در یک ناحیه خاص (مانند کمر بند سبزوار) می‌توان معیارهای اکتشافی ناحیه‌ای و سپس در یک محدوده کوچکتر محلی را استنتاج نمود.
- داده‌های مورد استفاده قابل اعتماد هستند.

۱-۶ روش اجرای تحقیق

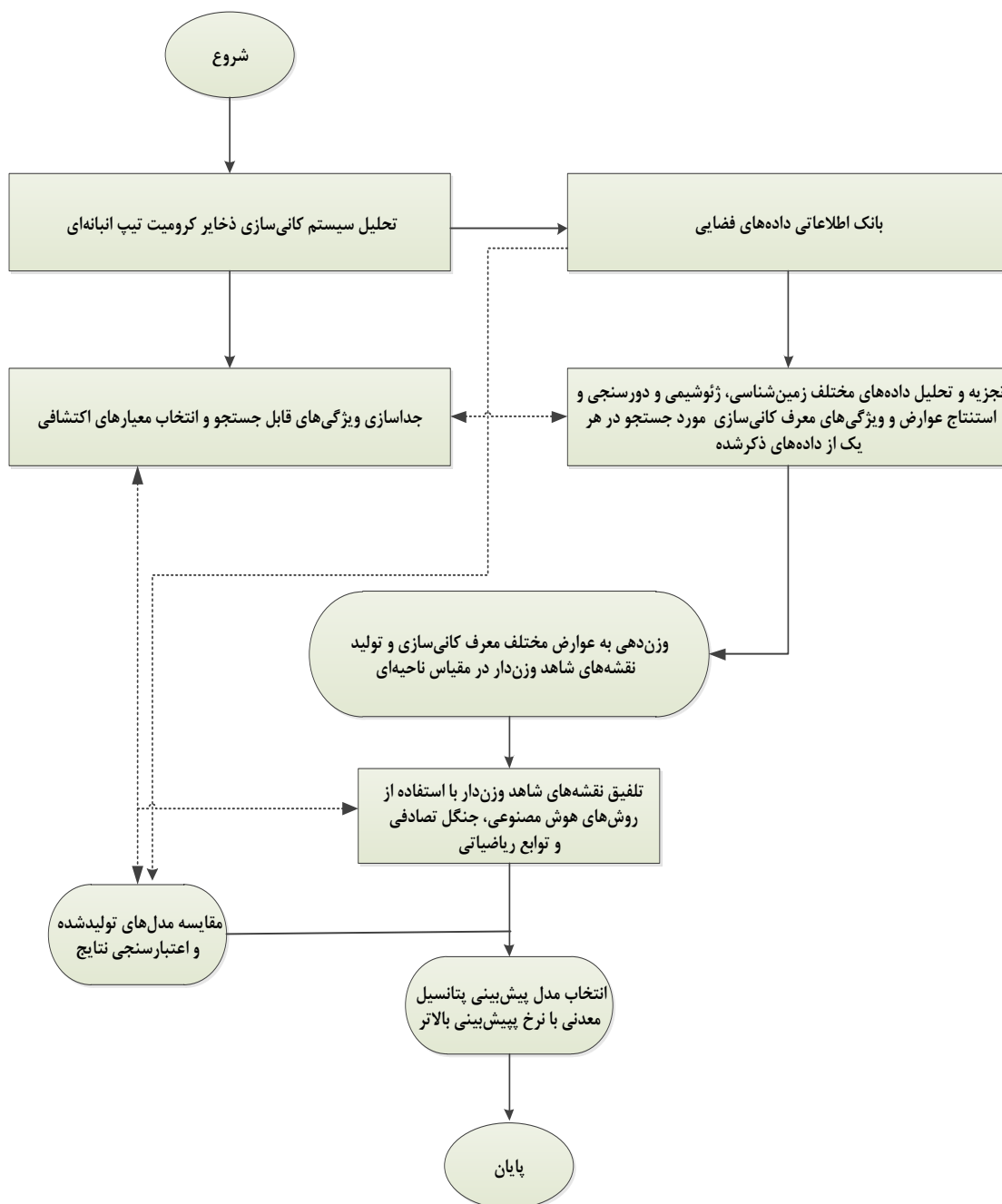
با توجه به این‌که هدف از تحقیق حاضر شناسایی معیارهای اکتشافی و مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت نوع انبانه‌ای در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی در کمر بند افیولیتی سبزوار است و از طرفی با توجه به این‌که داده‌های اکتشافی مورد استفاده و نیز معیارهای اکتشافی می‌تواند در این دو مقیاس متفاوت باشد، بنابراین اجرای آن در دو فاز جداگانه به صورت زیر پیش‌بینی می‌گردد. هم‌چنین، نمودارهای گردشی مربوط به فاز اول و دوم به ترتیب در شکل‌های ۱-۲ و ۱-۳ ارائه شده است.

۱-۶-۱ فاز اول (ناحیه‌ای)

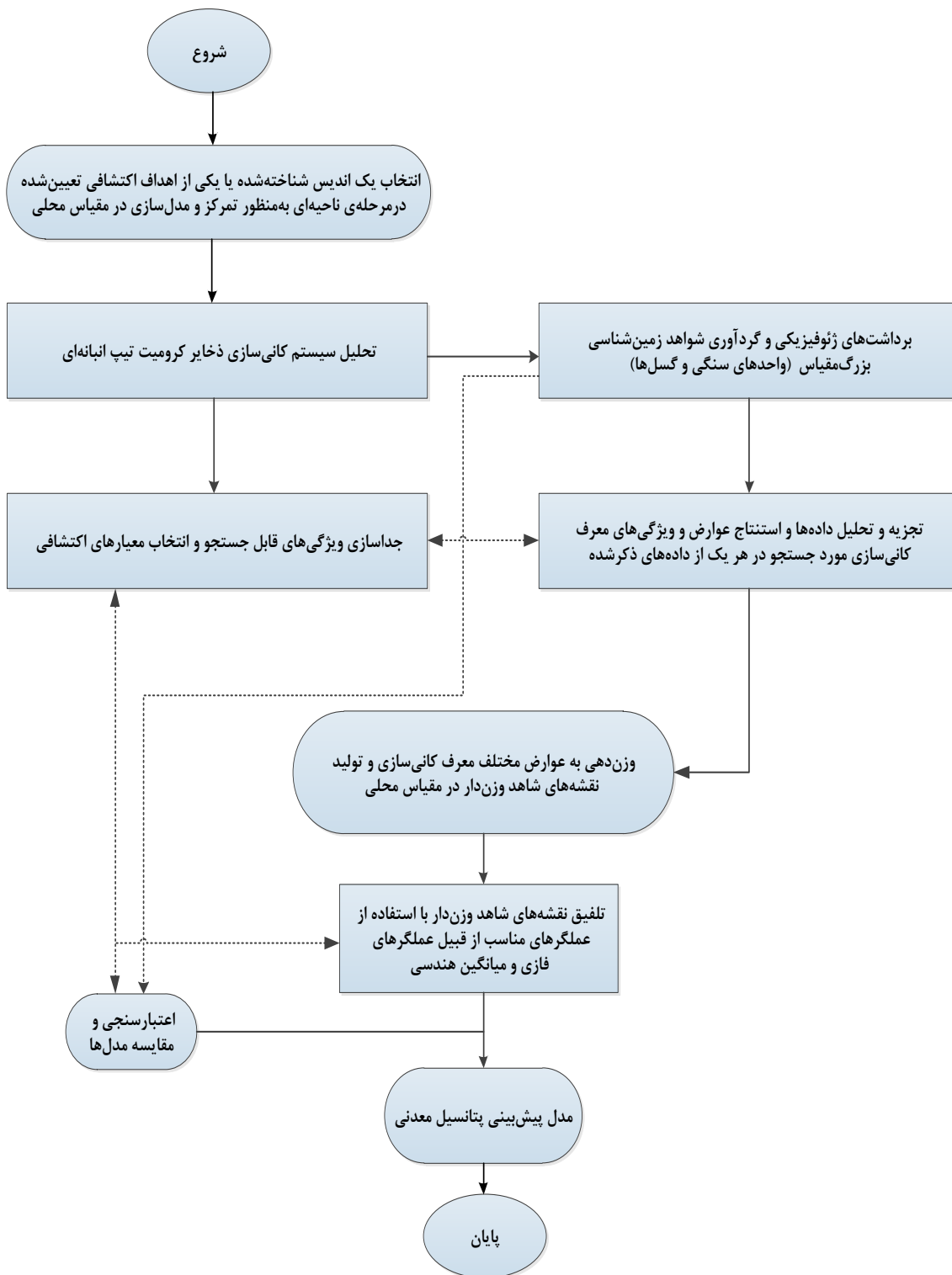
- تعیین معیارهای اکتشافی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در کمر بند افیولیتی سبزوار بر اساس تحلیل سیستم کانی‌سازی این نوع ذخایر
- تهیه‌ی بانک اطلاعاتی اکتشافی از کمر بند افیولیتی سبزوار از قبیل نقشه‌های زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های خام ژئوشیمیایی و هم‌چنین اطلاعات مربوط به اندیس‌های شناخته‌شده
- تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی زمین‌شناسی، ماهواره‌ای و ژئوفیزیکی
- استنتاج عوارض و ویژگی‌های معرف کانی‌سازی مورد جستجو در هر یک از داده‌های اکتشافی ذکر شده با توجه به تحلیل سیستم کانی‌سازی
- وزن‌دهی به عوارض مختلف معرف کانی‌سازی و تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار با استفاده از روش‌های پیوسته (بر اساس تابع لجستیکی) و دانش‌محور (گسسته)
- تلفیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار و تولید مدل پتانسیل معدنی ناحیه‌ای با استفاده از روش‌های عصبی-فازی معمول و بهبودیافته، جنگل تصادفی و توابع ریاضیاتی داده‌محور
- تعیین اعتبار مدل‌های تهیه‌شده با رسم نمودارهای نرخ پیش‌بینی-مساحت و مشخصه‌ی عمل‌کرد سیستم
- استفاده از بانک اطلاعاتی در توسعه‌ی نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت بهبودیافته به‌منظور شناسایی الگوهای شاهد اکتشافی مؤثر و غیر مؤثر و هم‌چنین ارزیابی عمل‌کرد مدل‌های پتانسیل

۱-۶-۲ فاز دوم (محلی)

- انتخاب یک اندیس شناخته‌شده یا یکی از اهداف اکتشافی تعیین‌شده در مرحله‌ی ناحیه‌ای به‌منظور تمرکز و مدل‌سازی در مقیاس محلی که داده‌های اکتشافی بیش‌تری در اختیار باشد.
- انتخاب معیارهای اکتشافی در این مقیاس بر اساس تحلیل سیستم کانی‌سازی
- برداشت‌های ژئوفیزیکی زمینی گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی
- تولید نقشه‌های بی‌هنجاری‌های ژئوفیزیکی و تفسیر آنها
- تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار ژئوفیزیکی با استفاده از تابع لجستیکی
- گردآوری شواهد زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس (واحدهای سنگی و گسل‌ها) و تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار زمین‌شناسی
- تلفیق لایه‌های شاهد وزن‌دار و تولید مدل پتانسیل معدنی محلی با استفاده از عملگرهای مناسب از قبیل عملگرهای فازی و میانگین‌هندسی
- تعیین اعتبار مدل‌های تولیدشده با استفاده از کنترل‌های صحرایی



شکل ۱-۲: نمودار گردش فاز اول (ناحیه‌ای)



شکل ۱-۳: نمودار گردش فاز دوم (محلی)

۱-۷ ساختار رساله

در راستای اهداف این رساله، نحوه‌ی ارائه‌ی مطالب در فصل‌های بعدی به شرح زیر است. در فصل دوم، سیستم کانی‌سازی ذخایر کرومیت نوع انبانه‌ای به‌منظور جداسازی ویژگی‌های قابل جستجو، شناسایی معیارهای اکتشافی و ارائه‌ی شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد اکتشافی در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم به مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در مقیاس ناحیه‌ای پرداخته شده است. به این منظور، نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته (بر اساس تابع لجستیکی) با استفاده از روش‌های عصبی-فازی، جنگل تصادفی و توابع ریاضیاتی (گامای فازی، میانگین هندسی و هم‌پوشانی شاخص) تلفیق شده‌اند. هم‌چنین، به‌منظور مقایسه‌ی مدل عصبی-فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد پیوسته با مدل عصبی-فازی معمول، نقشه‌های شاهد به‌روش دانش‌محور نیز وزن‌دهی شده‌اند. در نهایت، عمل‌کرد تمامی مدل‌های پتانسیل تولیدشده، به‌وسیله‌ی نمودارهای نرخ پیش‌بینی-مساحت و مشخصه‌ی عملکرد سیستم، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته و مدل برتر به‌منظور شناسایی مرز اهداف اکتشافی جهت انجام اکتشافات تفصیلی‌تر انتخاب شده است. در فصل چهارم، نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت بهبودیافته به‌منظور شناسایی الگوهای شاهد اکتشافی مؤثر و غیر مؤثر و هم‌چنین ارزیابی عملکرد مدل‌های پتانسیل مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل پنجم به مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در مقیاس محلی پرداخته شده که در آن نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته (بر اساس تابع لجستیکی)، به‌منظور شناسایی مناطق مستعد کانی‌زایی جهت تعیین نقاط حفاری، با استفاده از عملگرهای گامای فازی و میانگین هندسی تلفیق شده‌اند. در نهایت، فصل ششم به بخش نتیجه‌گیری و پیشنهادات اختصاص داده شده است.

فصل ۲: ذخایر کرومیت تپ انبانه ای بانگوش ویژه بر

سیستم کانی سازی و معیارهای اکتشافی

۲-۱ مقدمه

تحلیل سیستم کانی‌سازی، فهم مجموعه فرآیندهای زمین‌شناسی مورد نیاز برای تشکیل و حفظ یک ذخیره‌ی معدنی در تمام مقیاس‌ها، به‌طور فزاینده‌ای در مطالعه‌ی ژنز و توزیع مکانی و زمانی ذخایر معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعیین اهداف اکتشافی ذخایری که از طریق سیستم‌های کانی‌سازی درهم‌پیچیده ته‌نشست پیدا کرده و در محیط‌های پیچیده‌ی زمین‌شناسی واقع شده‌اند کار مشکلی است. این به‌دلیل نداشتن دانش کافی در مورد فرآیندهای تشکیل‌دهنده‌ی چنین ذخایری است که فهم آن‌ها را با مشکل مواجه می‌سازد. بنابراین تبدیل این اطلاعات ناقص و دانش ناکافی به شاخص‌های مکانی^۱ یک موضوع چالش برانگیز است. در نتیجه، هر چه محیط زمین‌شناسی و فرآیندهای تشکیل‌دهنده‌ی ذخیره پیچیده‌تر باشد، فرآیند تبدیل نیز مشکل‌تر خواهد بود. چالش اصلی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، تبدیل دانش به‌دست آمده از فرآیندهای زمین‌شناسی به نقشه‌های شاهد مکانی وزن‌دار دو بعدی است. در این فصل ابتدا سیستم کانی‌سازی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و سپس به شناسایی معیارهای اکتشافی و طراحی شبکه‌ی استنتاج برای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی در کمربند افیولیتی سبزوار پرداخته شده است.

۲-۲ سیستم کانی‌سازی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای

تحلیل سیستم کانی‌سازی که اولین بار توسط وایبرن و همکاران (۱۹۹۴) معرفی شد، چارچوبی را فراهم می‌سازد که همه‌ی فرآیندهای زمین‌شناسی که در تشکیل و حفظ ذخایر معدنی نقش دارند را مد نظر قرار می‌دهد (McCuaig et al., 2010; Hagemann et al., 2016). تله‌ی کان‌سنگ^۲، مکانیزم ته‌نشست کرومیت^۳ و مکانیزم بالا آمدن ذخایر کرومیت^۴ از فرآیندهای اصلی زمین‌شناسی هستند که در تشکیل و حفظ ذخایر ماگمایی کرومیت تیپ انبانه‌ای نقش دارند. این فرآیندها به‌طور مستقیم قابل به‌نقشه درآوردن نیستند، اما توصیف آن‌ها می‌تواند منجر به تولید نقشه‌های شاهد اکتشافی وزن‌دار دوبعدی با استفاده از مجموعه داده‌های در دسترس شود (McCuaig et al., 2010). در ادامه، هر کدام از فرآیندهای اصلی زمین‌شناسی سیستم کانی‌سازی کرومیت تیپ انبانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و

^۱ Spatial proxies

^۲ Ore trap

^۳ Mechanism of chromite deposition

^۴ Mechanism of rising chromite deposits

سپس در مقیاس ناحیه‌ای و محلی، نحوه‌ی ارتباط هر کدام از این فرآیندها با مجموعه داده‌های در دسترس جهت مدل‌سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در کمربند افیولیتی سبزوار مشخص شدند.

۲-۲-۱ تله‌ی کان‌سنگ

ذخایر کرومیت نوع آلپی یا انبانه‌ای در بخش تکتونیکی^۱ و انباشته‌ای^۲ مجموعه‌های افیولیتی قرار گرفته‌اند (شکل ۲-۱-الف). توالی افیولیت‌ها از بالا به پایین شامل: (۱) رسوبات پلاژیک و عمیق دریایی که معمولاً غنی از آهن و منگنز هستند (شامل رادیولاریت، چرت، آهک‌های پلاژیک مناطق عمیق دریا و رسوبات آبیسال)، (۲) گدازه‌های بالشتی که ضخامت آن‌ها تا حدود ۲ کیلومتر است، (۳) دایک‌های صفحه‌ای دیابازی که کانال‌های تغذیه‌کننده برای گدازه‌های بالشتی فوقانی می‌باشند، (۴) توالی انباشته‌ای که از دو قسمت اصلی اولترامافیکی و گابرویی تشکیل شده است و (۵) توالی گوشته‌ای یا تکتونیکی که ممکن است هارزبورژیتی یا لرزولیتی باشد (شکل ۲-۱-الف). توالی تکتونیکی که در قسمت بالایی گوشته واقع شده است شامل دونیت و هارزبورژیت تکتونیزه و همچنین لرزولیت (به صورت فرعی) است (شکل ۲-۱-الف). در توالی گوشته‌ای، ذخایر کرومیت به صورت عدسی‌های توده‌ای شکل بوده که اغلب آن‌ها در نزدیکی مرز پوسته و گوشته که زون انتقالی نیز نامیده می‌شود در داخل غلاف‌های دونیتی واقع در یک میزبان هارزبورژیتی تشکیل شده‌اند (شکل ۲-۱-ب و پ) (Paktunc, 1990; Yigit, 2008). عرض این غلاف‌های دونیتی از چند سانتی‌متر تا چندین ده‌متر متغیر است. مطالعات نشان می‌دهد که به‌طور کلی هیچ‌گونه ارتباطی بین اندازه‌ی غلاف دونیتی و حجم کرومیت در بر گیرنده وجود ندارد (Thayer, 1964; Paktunc, 1990). کرومیت به‌صورت انواع مختلفی از بافت‌ها دیده می‌شود که بافت پوست‌پلنگی^۳ یک مشخصه‌ی مهم به‌منظور تشخیص ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای از ذخایر لایه‌ای می‌باشد. در این حالت ندول‌ها و گلوله‌های کرومیت تیره‌رنگ به ابعاد مختلف که گاهی در حد سانتی‌متر هستند، در زمینه‌ای از سرپانتین و الیوین قرار گرفته‌اند (Paktunc, 1990; Mosier et al., 2012).

توالی انباشته‌ای مجموعه‌های افیولیتی از دو قسمت اصلی اولترامافیکی و گابرویی تشکیل شده است (Dickey, 1975; Paktunc, 1990; Mosier et al., 2012). قسمت اولترامافیکی توالی انباشته‌ای (شکل ۲-۱-الف)، تناوبی از دونیت، هارزبورژیت، پیروکسنیت، ورلیت و وبستریت می‌باشد که به‌صورت لایه‌ای بر روی هم قرار گرفته و کرومیت در داخل دونیت‌های این قسمت تشکیل شده

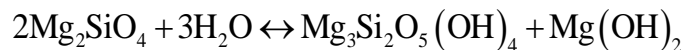
^۱ Tectonite

^۲ Cumulate

^۳ Leopard texture

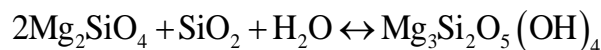
است و بر خلاف کرومیت‌های موجود در توالی گوشته‌ای ساختار لایه‌ای دارد (Dickey, 1975; Paktunc, 1990; Mosier et al., 2012). وسعت بخش اولترامافیکی توالی‌های انباشته‌ای بر خلاف ذخایر کرومیت نوع لایه‌ای یا چینه‌سان که در حد کیلومتر هستند محدود بوده و معمولاً کم‌تر از ۸۰۰ متر می‌باشد (Thayer, 1960; Mosier et al., 2012). هم‌چنین، قسمت گابرویی از گابروهای لایه‌ای زیرین و گابروهای توده‌ای فوقانی که فروگابرو نامیده شده و حاوی مگنتیت و ایلمنیت می‌باشند تشکیل شده است.

سنگ‌های اولترامافیک، به‌ویژه دونیت و هارزبورژیت، تحت شرایط خاصی در اثر آب‌گیری، کانی‌های گروه سرپانتین (لیزاردیت^۱، آنتی‌گوریت^۲ و کریزوتیل^۳) را به‌وجود می‌آورند که به تبدیل کانی‌های آهن و منیزیم‌دار به کانی‌های گروه سرپانتین، دگرسانی سرپانتینی گفته می‌شود. ساده‌ترین واکنش را می‌توان به‌صورت زیر نشان داد:



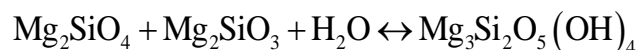
بروسیت + سرپانتین \longleftrightarrow آب + فورستریت

عمل سرپانتینی‌شدن معمولاً پس از تبلور اولیوین و دیگر کانی‌های پریدوتیت انجام گرفته و گاهی اوقات علاوه بر آب به سیلیکا نیز نیاز است که می‌توان آن را به‌صورت واکنش زیر نشان داد:



سرپانتین \longleftrightarrow آب + سیلیکا + فورستریت

این واکنش معمولاً در درجه حرارت‌های ۴۳۰-۴۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشارهای ۱-۳ کیلوبار انجام می‌گیرد. چنان‌چه در سنگ پیروکسن نیز موجود باشد می‌توان واکنش زیر را نوشت:



سرپانتین \longleftrightarrow آب + اورتوپروکسن + فورستریت

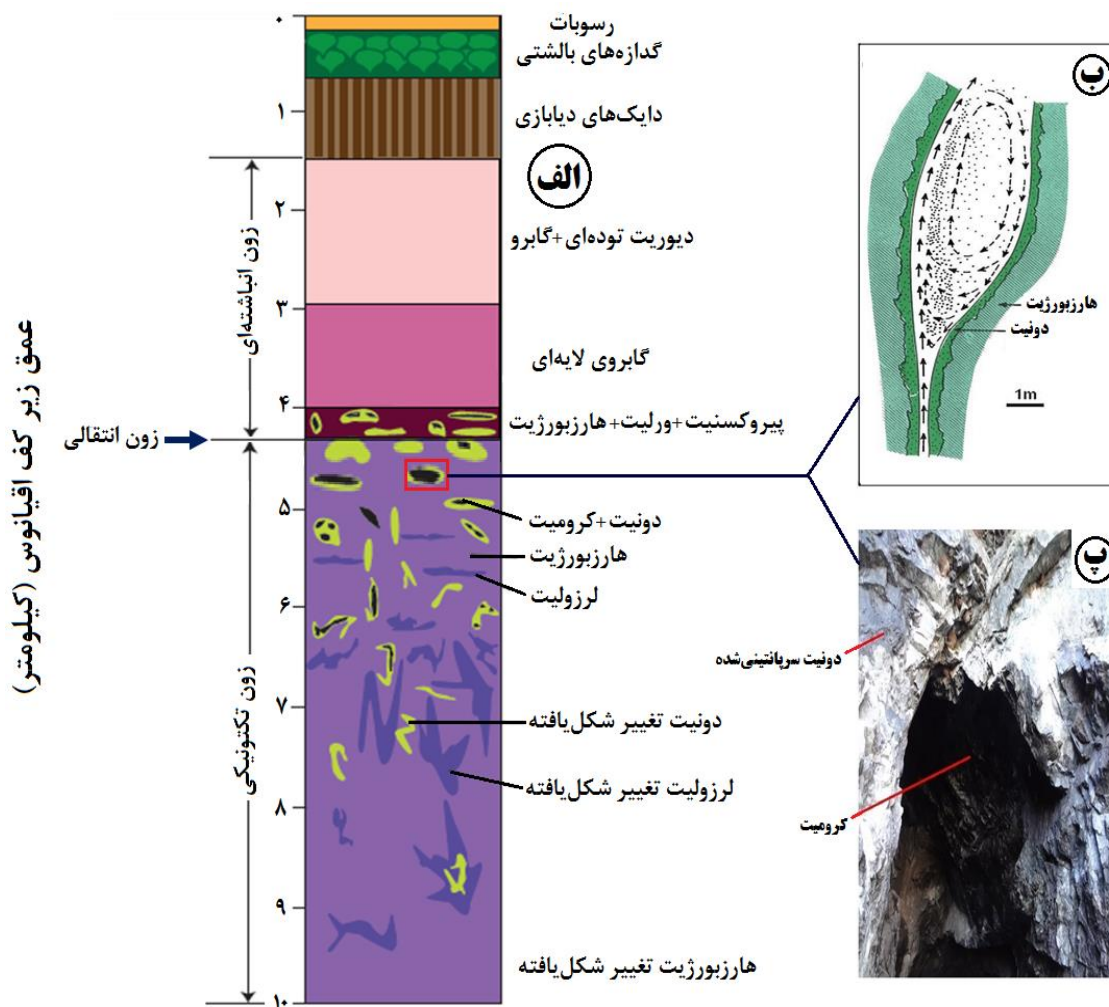
مقاومت کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی سنگ‌های اولترامافیکی در برابر سرپانتینی‌شدن متفاوت است، به‌طوری‌که ابتدا الیوین، سپس اورتوپروکسن‌ها و در نهایت کلینوپروکسن تحت تأثیر قرار می‌گیرند. بنابراین دونیت‌ها در مقایسه با هارزبورژیت‌ها و پیروکسنیت‌ها با شدت بیش‌تری سرپانتینی می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهند که توده‌های اولترامافیکی پس از جایگزین‌شدن می‌توانند تحت تأثیر هوازدگی و

^۱ Lizardite

^۲ Antigorite

^۳ Chrysotile

آب‌های زیرزمینی قرار گیرند و به سرپانتین تبدیل شوند. بافت‌های رایج در سرپانتینیت‌ها؛ بافت شبکه‌ای^۱ (به‌خصوص در سرپانتین درجه‌حرارت پایین مثل لیزاردیت دیده می‌شود)، بافت الیافی^۲ (معمولاً در سرپانتین نوع کریزوتیل دیده می‌شود) و بافت تیغه‌ای^۳ (خاص سرپانتینیت‌های درجه‌حرارت بالا مانند آنتی‌گوریت) هستند. در کمر بند افیولیتی سبزوار، اکثر سنگ‌های اولترامافیکی کرومیت‌دار به سرپانتینیت‌های نوع لیزاردیت و آنتی‌گوریت دگرسان شده‌اند که به‌رنگ سبز تیره و کرمی می‌باشند (Soleimani and Shokri, 2016).



شکل ۱-۲: الف) توالی تشکیل افیولیت‌ها و پراکندگی کرومیت‌های انبانه‌ای (لنزهای سیاه‌رنگ) (Mosier et al., 2012). ب) مقطع عرضی کرومیت انبانه‌ای به‌همراه مهاجرت سیال و سنگ‌های میزبان، هارزبورژیت‌های تهی‌شده از اورتوپیروکسن به‌تدریج تبدیل به توده‌های دونیتی حاوی کرومیت‌های عدسی‌شکل می‌شوند (Lago et al., 1982) و پ) کانی‌سازی کرومیت در داخل دونیت سرپانتینی‌شده (منطقه‌ی سبزوار)

^۱ Net texture
^۲ Fibrow texture
^۳ Bladed texture

۲-۲-۲ مکانیزم ته‌نشست کرومیت

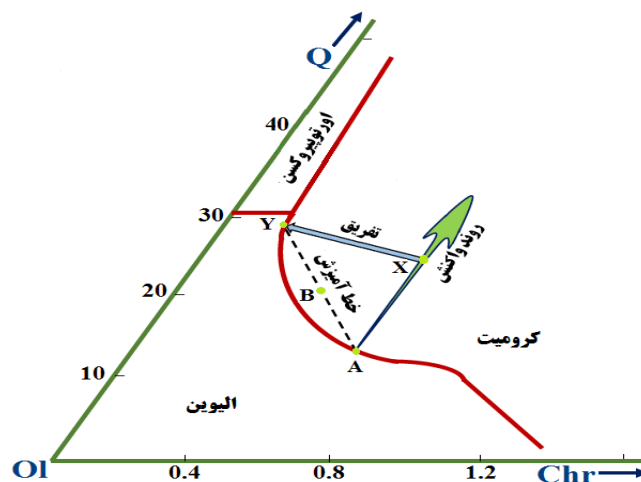
تاکنون نظریه‌های مختلفی در مورد نحوه‌ی تشکیل ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای ارائه شده است اما آن چیزی که در میان همه‌ی آن‌ها مشترک می‌باشد این است که ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در واحدهای مافیکی و اولترامافیکی مجموعه‌های افیولیتی در پوسته‌ی اقیانوسی تشکیل شده که بعدها در اثر عوامل تکتونیک در حاشیه‌ی قاره‌ها و جزایر قوسی شکل قرار گرفته‌اند (Allen, 1941; Thayer, 1961; Dickey, 1975; Greenbaum, 1977; Lago et al., 1982; Uysal et al., 2009). گوشته به سمت بالا حرکت می‌کنند بر اثر ذوب بخشی آن‌ها یک مذاب تشکیل می‌شود که اگر نرخ ذوب بخشی بالا باشد این مذاب ترکیب اولترامافیک خواهد داشت (Irvin, 1977; Paktunc, 1990; Zhou, 1994). این مذاب در عبور از داخل گوشته به تدریج تحول پیدا کرده و تبدیل به ماگمای تولییتی^۱، ماگمای بازالتی که Mg کم‌تری دارد، می‌شود. قطعات کرومیت هنگام برخورد ماگماهای تحول‌یافته (ماگماهای تولییتی) با ماگماهای تحول‌نیافته‌ی اولیه (ماگماهای اولترامافیک) به وجود می‌آیند (شکل ۲-۲). به عبارت دیگر دلیل به وجود آمدن کرومیت، تشکیل ماگمای بونینیتی حاصل از آمیزش ماگمای بازالتی و اولترامافیک است. ماگماهای بازالتی بر خلاف ماگماهای اولترامافیک دارای پلاژیوکلاز (به خصوص آنورتیت) هستند. زمانی که پلاژیوکلاز از ماگمای تحول‌یافته با الیوین از ماگمای تحول‌نیافته ترکیب شود اورتوپیروکسن، کلینوپیروکسن و اسپینل تشکیل خواهند شد. اسپینل که تشکیل بشود، تمام کرومیت دو تا ماگما را جذب می‌کند زیرا هیچ جایگاهی بهتر از اسپینل برای حضور کروم وجود ندارد. هم‌چنین، زمانی که یک دایک گابرویی یا دیابازی توالی گوشته‌ای هارزبورژیتی را قطع می‌کند آن را به دونیت تبدیل می‌کند که حاوی کرومیت‌های عدسی‌شکل است. دلیل آن این است که هارزبورژیت، که سنگی متشکل از اورتوپیروکسن و الیوین است، اگر تحت تأثیر حرارت قرار بگیرد، اورتوپیروکسن آن ذوب شده و به الیوین و سیلیس تبدیل می‌شود و بدین ترتیب ماگمای بونینیتی حاصل می‌گردد (شکل ۲-۲). نیکل، کبالت و مس عناصر ردیاب کروم می‌باشند به طوری که مس به وسیله‌ی سولفورها و آلیاژهای فلزی و نیکل و کبالت به وسیله‌ی الیوین حمل می‌شوند (Beqiraj et al., 2000).

۲-۲-۳ مکانیزم بالا آمدن ذخایر کرومیت

همان‌طور که بیان شد در برخی افیولیت‌ها، مانند کمر بند افیولیتی سبزوار، سنگ‌های توالی گوشته‌ای تحت تأثیر محلول‌های هیدروترمال سرپانتینی شده‌اند (Schuiling, 2011). سپس دونیت‌ها و هارزبورژیت‌های سرپانتینی شده به صورت عمودی از توالی گوشته‌ای به موقعیت فعلی‌شان صعود کرده‌اند.

^۱ Tholeiitic magma

در واقع، دونیت‌ها و هارزبورژیت‌ها، که در حال حاضر در بالای کوه‌های منطقه‌ی سبزوار قرار دارند و در اصل پایین‌ترین توالی کمپلکس افیولیتی را نشان می‌دهند، همانند نمک به‌صورت یک دیاپیر^۱ بالا آمده‌اند. صعود دیاپیریک نمک به‌دلیل وزن مخصوص پایین آن نسبت به رسوبات فوقانی می‌باشد. چگالی تقریبی دونیت و هارزبورژیت سرپانتینی شده برابر ۲/۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب است در حالی که چگالی انواع سنگ‌های فوقانی آن (توالی انباشته‌ای، دایک‌های صفحه‌ای دیابازی و گدازه‌های بالشتی) در محدوده‌ی ۲/۸۰ تا ۳/۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد (Schuiling, 2011). علاوه بر این، دونیت و هارزبورژیت بر اثر سرپانتینی شدن ۴۴ درصد افزایش حجم پیدا می‌کنند (Schuiling, 2011). بنابراین، بر خلاف دیاپیریسیم نمک که اختلاف وزن مخصوص تنها عامل نیروی محرک می‌باشد در دیاپیریسیم سرپانتینیت، افزایش حجم نیز مؤثر است به‌طوری‌که افزایش حجم در مقایسه با اختلاف وزن مخصوص، نقش مهم‌تری را در صعود دیاپیریک توده‌های سرپانتینی بازی می‌کند (Schuiling, 2011). در نتیجه، سرپانتینیت در هر حرکت تکتونیکی که بخواهد حوزه‌ی افیولیتی را ببندد نمی‌تواند پایدار بماند و به‌صورت یک دیاپیر نفوذ کرده و تمام مجموعه‌ی افیولیتی را تکه‌تکه می‌کند. به‌همین دلیل، بر روی سطح زمین یک مجموعه‌ی سنگی (رادولاریت‌ها، گدازه‌های بالشتی، دایک‌های صفحه‌ای دیابازی و گابروهای لایه‌ای) دیده می‌شود که قطعه‌قطعه شده و بدون ارتباط با یک‌دیگر در یک زمینه‌ی سرپانتینی قرار گرفته‌اند و افیولیت‌ملائژ (ملائژ افیولیتی) یا آمیزه‌ی رنگین را تشکیل داده‌اند.



شکل ۲-۲: ارتباطات فازی در سیستم الیوین - کوارتز - کرومیت (Irvine, 1977; Zhou, 1994); ماگمای تحول‌نیافته (A) با میزبان‌های هارزبورژیتی و لرزولیتی واکنش می‌دهد که حاصل آن ترکیباتی است که در امتداد خطی مانند A-X قرار گرفته و همگی آن‌ها در حوزه‌ی ثبات کرومیت قرار دارند. ماگمای تفریق‌یافته (Y) در اثر آمیزش با ماگمای اولیه (A) مذاب بونینیتی (B) را تشکیل می‌دهد که آن نیز در حوزه‌ی ثبات کرومیت قرار دارد.

^۱ Diapir

در ملازهای افیولیتی، ذخایر کرومیت در اثر سرپانتینی شدن بخش‌های اولترامافیک و متعاقب آن عمل کرد دیاپیریک توده‌های سرپانتینی به درون مناطق برشی و یا مناطق گسلی درون سرپانتینیت‌ها رانده شده و جایگزین شده‌اند. بنابراین، شیب و امتداد عدسی‌ها و یا لایه‌های محدود کرومیت درون مناطق گسلی و یا مناطق برشی از امتداد و شیب این مناطق و همچنین ساخت صفحه‌ای^۱ در سرپانتینیت‌های هم‌بر کاملاً تبعیت می‌کنند. بنابراین به‌منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی این نوع ذخایر کافی است که عملیات اکتشافی دقیق زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و حفاری در امتداد این مناطق انجام گیرد. در نتیجه در صورت عدم دستیابی به ذخایر مساعد در امتداد این مناطق حداقل از صرف هزینه‌های بیش‌تر حفاری و اکتشافی در سایر نقاط جلوگیری به‌عمل خواهد آمد (حشمت‌بهبزادی، ۱۳۷۱).

در کمر بند افیولیتی سبزوار مناطق گسلی عموماً دو روند اصلی شمال غربی - جنوب شرقی و شمال شرقی - جنوب غربی دارند (شکل ۲-۳-پ). گسل‌های با روند شمال غربی - جنوب شرقی کاملاً از ساخت صفحه‌ای در سرپانتینیت‌ها و روند عمومی کمر بند تبعیت می‌کنند. در واقع، این گسل خوردگی‌ها منطبق با زون‌های برشی درون سرپانتینیت‌ها بوده و از نظر پتانسیل بالقوه‌ی ذخایر کرومیت و جایگزینی^۲ این ذخایر در امتدادشان دارای اهمیت اکتشافی می‌باشند. از طرفی دیگر، گسل‌های با روند شمال شرقی - جنوب غربی نسبت به گسل خوردگی‌های قبلی و همچنین زون‌های برشی درون سرپانتینیت‌ها و روند عمومی کمر بند متقاطع می‌باشند. بنابراین، این گسل خوردگی‌ها هیچ‌گونه ارتباطی با جای‌گزینی ذخایر کرومیت نداشته و اهمیت آن‌ها فقط به‌لحاظ جابه‌جایی^۳ ذخایر کرومیت در نظر گرفته می‌شود. همچنین از روش هندسی آنالیز فرای^۴ به‌منظور اثبات موارد ذکر شده در بالا استفاده شده است.

آنالیز فرای، که مدل‌سازی توزیع مکانی موقعیت‌های دارای ذخیره است، ابزاری مفید جهت فهم ارتباط بین کنترل‌کننده‌های جهت‌دار و جایگزینی کانی‌سازی می‌باشد (Vearncombe and Vearncombe, 1999; Kreuzer et al., 2007; Carranza, 2008, 2009; Lisitsin, 2015; Mohebi et al., 2015; Haddad-Martim et al., 2017). در این روش، برای n موقعیت دارای ذخیره که به‌صورت نقطه در نظر گرفته می‌شود $n(n-1)$ نقطه ایجاد خواهد شد (Vearncombe and Vearncombe, 1999; Genier and Epard, 2007). نتایج حاصل از آنالیز فرای را می‌توان به‌صورت یک دیاگرام گل‌سرخ^۵

^۱ Foliation

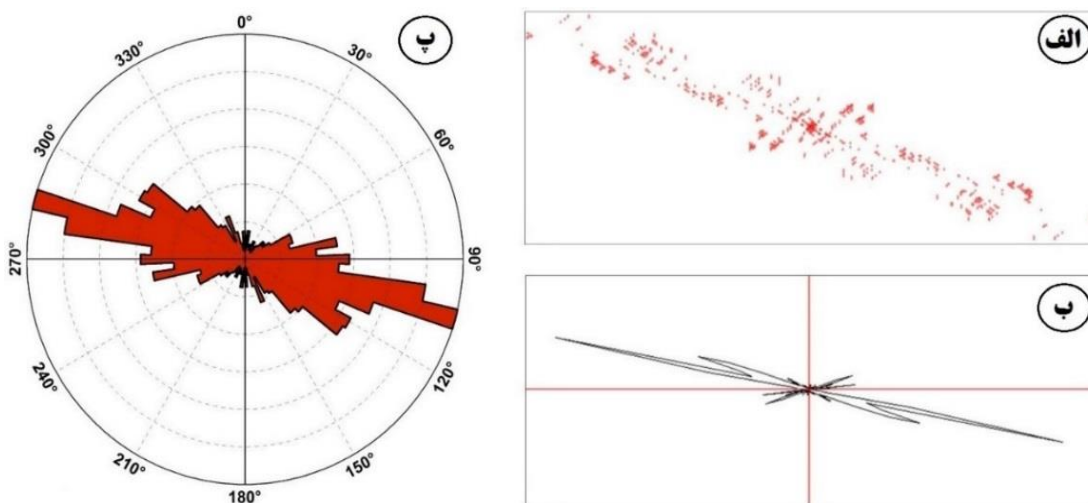
^۲ Emplacement

^۳ Displacement

^۴ Fry analysis

^۵ Rose diagram

نمایش داد که بر روی آن می‌توان روندهایی که منعکس‌کننده‌ی سیمای زمین‌شناسی خاصی هستند را مشاهده کرد. آنالیز فرای می‌تواند نتیجه‌ی قابل تفسیری را با یک مجموعه داده‌ی ۱۴ نمونه‌ای یا بیش‌تر تولید کند. به‌طور کلی، هر چه تعداد نمونه‌ها بیش‌تر باشد نتایج تولیدشده معتبرتر خواهند بود (Vearncombe and Vearncombe, 1999). در این تحقیق برای انجام آنالیز فرای از نرم‌افزار Dotproc استفاده شده است. در شکل ۲-۳-الف، جهت پراکندگی نقاط معدنی کرومیت (۴۶ معدن فعال و متروکه) در کمربند افیولیتی سبزوار با استفاده از روش آنالیز فرای قابل مشاهده است. همچنین برای نمایش بهتر چگونگی جهت‌یافتگی نقاط معدنی کرومیت از دیاگرام گل‌سرخ استفاده شده است (شکل ۲-۳-ب). با توجه به توزیع مکانی نقاط معدنی کرومیت و دیاگرام گل‌سرخ گسل‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعه (شکل ۲-۳) می‌توان انطباق قابل توجهی روند پراکندگی نقاط معدنی کرومیت با روند گسل‌ها را مشاهده کرد. در نتیجه می‌توان پی برد که کنترل‌کننده‌های ساختاری بر روی توزیع نقاط معدنی کرومیت نقش مهمی داشته و با فهم روندهای گسل‌های اصلی در منطقه‌ی مورد مطالعه، پتانسیل‌یابی‌های بعدی معتبرتر بوده و بایاس مکانی^۱ ناشی از توزیع نقاط حفاری به‌منظور شناسایی جهت مناطق کانی‌سازی کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به شکل ۲-۳، گسل‌های با روند شمال غربی - جنوب شرقی از نظر پتانسیل بالقوه‌ی ذخایر کرومیت و جایگزینی این ذخایر در امتدادشان دارای اهمیت اکتشافی هستند. همچنین، گسل‌های با روند شمال شرقی - جنوب غربی به‌لحاظ جابه‌جایی ذخایر کرومیت از اهمیت کم‌تری برخوردار می‌باشند.



شکل ۲-۳: الف) نمایش روند پراکندگی نقاط معدنی کرومیت در کمربند افیولیتی سبزوار با استفاده از روش آنالیز فرای، ب) نمایش روند پراکندگی نقاط معدنی کرومیت در کمربند افیولیتی سبزوار پس از آنالیز فرای با استفاده از دیاگرام گل‌سرخ و پ) دیاگرام گل‌سرخ گسل‌های منطقه‌ی مورد مطالعه

^۱ Spatial bias

۲-۳ استنتاج معیارهای اکتشافی از سیستم کانی‌سازی کرومیت

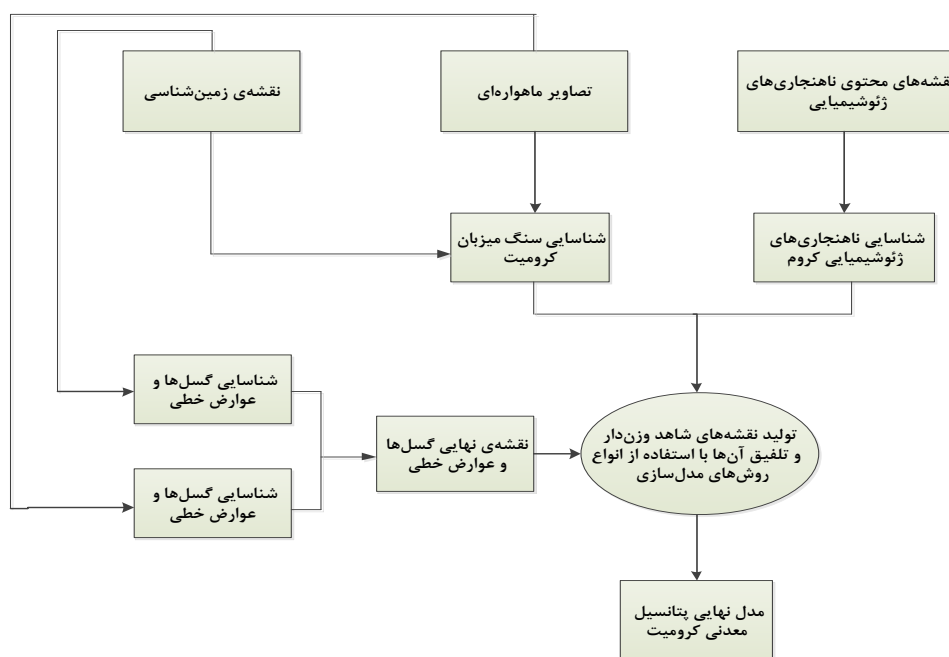
از آنجایی که یکی از اهداف این تحقیق، شناسایی معیارهای اکتشافی و طراحی شبکه‌ی استنتاج برای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در دو مقیاس ناحیه‌ای و محلی است و از طرفی با توجه به این که داده‌های اکتشافی مورد استفاده و هم‌چنین معیارهای شناسایی می‌توانند در این دو مقیاس متفاوت باشند، بنابراین اجرای آن در دو فاز جداگانه (ناحیه‌ای و محلی) انجام می‌گیرد.

۲-۳-۱ استنتاج معیارهای اکتشافی ناحیه‌ای از سیستم کانی‌سازی کرومیت

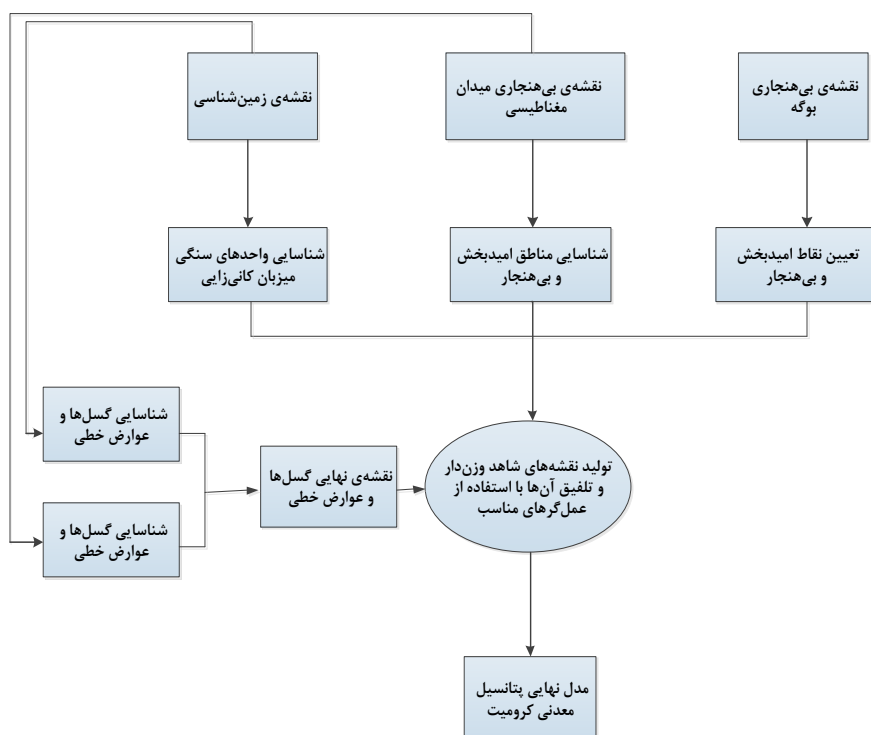
با توجه به سیستم کانی‌سازی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای، معیارهای اکتشافی سنجش از دور، زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی برای تولید نقشه‌های شاهد اکتشافی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره مورد استفاده قرار گرفتند که در فصل سوم نحوه‌ی تولید و وزن‌دهی به آن‌ها به‌طور کامل شرح داده خواهد شد. شکل ۲-۴، شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد اکتشاف ناحیه‌ای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در کمربند افیولیتی سبزوار را نشان می‌دهد.

۲-۳-۲ استنتاج معیارهای اکتشافی محلی از سیستم کانی‌سازی کرومیت

با توجه به سیستم کانی‌سازی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای، معیارهای اکتشافی زمین‌شناسی و ژئوفیزیک برای تولید نقشه‌های شاهد اکتشافی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی کرومیت مورد استفاده قرار گرفته است که نحوه‌ی تولید و وزن‌دهی به آن‌ها به‌طور کامل در فصل پنجم شرح داده شده است. در شکل ۲-۵، شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد اکتشاف محلی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در کمربند افیولیتی سبزوار ارائه شده است.



شکل ۲-۴: شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد ناحیه‌ای به‌منظور شناسایی مناطق هدف برای اکتشاف ذخایر کرومیت در کمربند افیولیتی سبزوار



شکل ۲-۵: شبکه‌ی استنتاج الگوهای شاهد محلی به‌منظور تعیین نقاط حفاری در کمربند افیولیتی سبزوار

فصل ۳: مدل سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در مقیاس
ناحیه ای به منظور تعیین اهداف اکتشافی

۳-۱ مقدمه

در اکتشاف مواد معدنی به منظور تعیین مناطق امیدبخش (هدف)، که باید در مراحل تفصیلی تر مورد توجه قرار گیرند، از مدل سازی استفاده می شود. به منظور مدل سازی پتانسیل معدنی، کلیه ویژگی های تیپ ذخیره ی مورد جستجو که می توان آن ها را به شاخص های اکتشافی قابل نقشه برداری تبدیل نمود، انتخاب، وزن دار و در نهایت تلفیق می شوند. روش های مدل سازی پتانسیل معدنی به طور کلی به چهار دسته تقسیم می شوند که با تنوعی از چالش ها از جمله انواع مختلف عدم قطعیت روبه رو هستند. این تقسیم بندی عمدتاً بر اساس روش های تخصیص وزن به ویژگی های شاهد است، به طوری که ویژگی های شاهد اکتشافی به وسیله ی یکی از روش های دانش محور^۱، داده محور^۲، ترکیبی^۳ (دانش محور و داده محور) و پیوسته^۴ (بر اساس توابع لجستیکی^۵) وزن دار می شوند. در روش های پیوسته، موقعیت رخدادهای معدنی شناخته شده به عنوان نقاط آموزشی مورد استفاده قرار نمی گیرند و مقادیر داده های اکتشافی معرف کانی سازی با استفاده از فواصل دلخواه گسسته سازی^۶ نمی شوند. در نتیجه این روش بر وزن دهی جهت دار^۷ حاصل از سه روش اول غلبه کرده و می تواند عدم قطعیت را به خوبی مدل کند. از آن جایی که در محیط های مختلف زمین شناسی و مناطق مختلف اکتشافی به دلیل وجود پیچیدگی های زمین شناسی^۸، نتایج روش های مختلف تلفیق یکسان نخواهد بود، بنابراین لازم است در هر منطقه دو یا چند مدل پتانسیل با استفاده از روش های مختلف تلفیق، تولید و مورد مقایسه قرار گیرند تا بهترین مدل برای اکتشافات بعدی انتخاب شود. برای این منظور، بر اساس روش وزن دهی به لایه های شاهد و همچنین روش مدل سازی، روش ها یا توابع ریاضیاتی متعددی می توانند به منظور تلفیق نقشه های شاهد مورد استفاده قرار گیرند.

در این فصل، ابتدا نحوه ی تولید و وزن دهی به نقشه های شاهد استنتاج شده از مدل مفهومی کرومیت (فصل دوم) بیان شده و سپس با استفاده از روش های شبکه ی عصبی - فازی (نروفازی) بهبود یافته^۹، توابع ریاضیاتی^{۱۰} و جنگل تصادفی^{۱۱} به مدل سازی ناحیه ای پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در کمربند

^۱ Knowledge-driven

^۲ Data-driven

^۳ Hybrid

^۴ Continuous

^۵ Logistic functions

^۶ Discretization

^۷ Exploration bias

^۸ Geological complexities

^۹ Improved neuro fuzzy network

^{۱۰} Mathematical functions

^{۱۱} Random Forest (RF)

افیولیتی سبزوآر پردآخته شده است. در نهایت مدل‌های پتانسیل تولیدی، با استفاده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی- مساحت^۱ و مشخصه‌ی عملکرد سیستم^۲ مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته و بهترین مدل به منظور انتخاب یک منطقه جهت انجام اکتشافات تفصیلی تر (محلی) مشخص شده است.

۲-۳ تولید نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته

همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، معیارهای اکتشافی سنجش از دور، زمین‌شناسی و ژئوشیمیایی برای تولید نقشه‌های شاهد اکتشافی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصری^۳ مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، به دلیل آن‌که مقادیر پیوسته‌ی نقشه‌های شاهد فضایی حاصل (فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره) در محدوده‌ی مشخص و یکسانی قرار نداشته و در نتیجه اهمیت نسبی آن‌ها به صورت درست و واقعی نمی‌تواند جهت مدل‌سازی پتانسیل معدنی مورد ارزیابی قرار گیرد، از روش وزن‌دهی پیوسته، با استفاده از تابع لجستیکی (رابطه‌ی ۱-۳) (Yousefi and Nykänen, 2016)، برای فازی‌سازی نقشه‌های شاهد استفاده شد.

$$F_E = \frac{1}{1 + \exp[-s(E - i)]} \quad (1-3)$$

که در آن؛ F_E امتیاز فازی تخصیص یافته به E در بازه‌ی صفر و یک، E مقدار عددی شاهد فضایی در بازه‌ی نامحدود و پارامترهای s و i به ترتیب شیب و نقطه‌ی عطف تابع هستند.

بنابراین، شکل تابع و در نتیجه مقدار تابع عضویت فازی به وسیله‌ی شیب و نقطه‌ی عطف تابع تعیین شده و وزن‌ها در دامنه‌ی بین صفر و یک قرار می‌گیرند. پس می‌توان از تابع فوق نقشه‌های شاهد فازی مختلف را تولید نمود و در نهایت با تلفیق آن‌ها با استفاده از یک روش مناسب مدل پتانسیل معدنی را تولید و به شناسایی مناطق امیدبخش و اولویت‌بندی آن‌ها پرداخت. بر اساس تراکم نمونه‌های ژئوشیمیایی، اندازه‌ی هر سلول برای تمامی نقشه‌های شاهد ذکر شده در بالا برابر $70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$ در نظر گرفته شد (Hengl, 2006).

۱-۲-۳ نقشه‌ی شاهد فاصله از سنگ میزبان

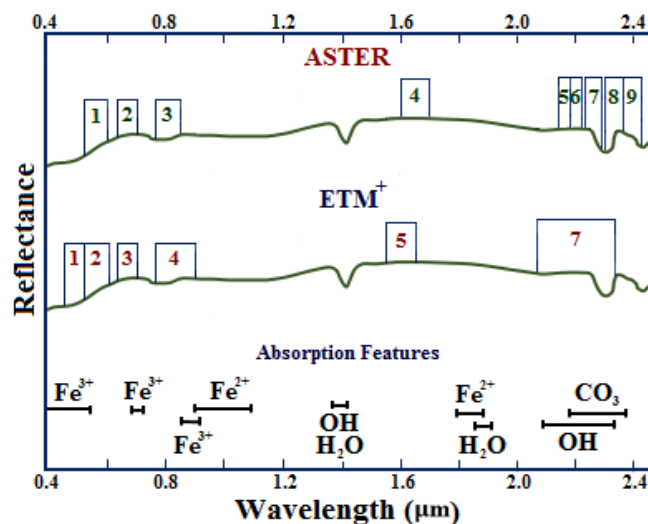
در کمربند افیولیتی سبزوآر، ذخایر کرومیت معمولاً در داخل غلاف‌های دونیتی واقع در یک سنگ میزبان هارزبورژیته تشکیل شده‌اند. این واحدها (دونیت و هارزبورژیت) در سطح وسیعی از منطقه به کانی‌های گروه

^۱ Prediction-area (P-A) plot

^۲ Receiver operating characteristic (ROC)

^۳ Multi-element geochemical signature

سرپانتین تبدیل شده‌اند. بنابراین، شناسایی این واحدهای سنگی و نیز واحدهای دگرسان‌شده‌ی آن‌ها معیاری برای یافتن منابع کرومیت محسوب می‌شود. یکی از راه‌های شناسایی این شاخص‌ها استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پردازش آن‌ها است که در این مطالعه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Landsat ETM⁺ و ASTER به شناسایی آن‌ها در نوار افیولیتی سبزوار پرداخته شده است. با توجه به شکل ۳-۱، سرپانتینیت پاسخ طیفی نسبتاً صافی را نشان می‌دهد. جذب کم عمق در طول موج ۰/۴۵ میکرومتر به دلیل وجود آهن سه ظرفیتی (Fe³⁺) و جذب پهن تر به مرکز تقریباً یک میکرومتر به دلیل وجود آهن دو ظرفیتی (Fe²⁺) می‌باشد. جذب نسبتاً تیز در طول موج ۲/۳ میکرومتر به دلیل فرآیندهای ارتعاشی Mg-OH و هم‌چنین جذب در نزدیکی طول موج ۱/۴ میکرومتر به دلیل اثرات هیدراتاسیون^۱ می‌باشد (Rajendran et al., 2012). همان‌طور که در شکل ۳-۱ مشاهده می‌شود افزایش باندهای طیفی در محدوده‌ی SWIR سنجنده‌ی استر (یک باند طیفی برای لندست در مقابل شش باند طیفی برای استر) قابلیت به نقشه در آوردن واحدهای سنگی سطحی را افزایش می‌دهد. در ادامه نحوه‌ی پیش‌پردازش و پردازش داده‌های ماهواره‌ای منطقه‌ی مورد مطالعه به منظور شناسایی واحدهای سنگ میزبان کرومیت مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت نقشه‌ی شاهد فاصله از سنگ میزبان تولید شد.



شکل ۳-۱: اندازه‌گیری آزمایشگاهی بازتاب طیفی سرپانتینیت (Abrams et al., 1988)

۳-۱-۲-۱-۱ پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های سنجنده ETM⁺ ماهواره‌ی لندست که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند در تاریخ هشتم سپتامبر سال ۲۰۰۰ میلادی برداشت شده و فاقد پوشش ابر هستند. هم‌چنین داده‌های استر مورد استفاده در این مطالعه، تصاویر ۱۴ باندهای سطح IB بوده که در تاریخ اول آگوست سال ۲۰۰۱ میلادی برداشت شده و از آنجایی که تاریخ برداشت آن‌ها به قبل از سال ۲۰۰۵ میلادی بر می‌گردد، نیازی به تصحیح cross-talk نیست.

^۱ Hydration

تصاویر این دو سنجنده در سیستم تصویر متریک (UTM) و سطح بیضوی محاسباتی WGS-84 زمین مرجع شده‌اند. همچنین تصحیح اتمسفری بر روی تصاویر سنجنده ETM⁺ به روش مطلق اتکر^۱ (با استفاده از نرم افزار ERDAS) و بر روی تصاویر استر به روش نسبی میانگین بازتابشی نسبی داخلی^۲ صورت گرفت. در نهایت دو سین تصویر ماهواره‌ای Landsat ETM⁺ و پنج سین تصویر ماهواره‌ای استر برای ایجاد تصویر یک پارچه موزاییک شدند.

۳-۲-۱-۲ پردازش داده‌های ماهواره‌ای

به منظور جدایش سرپانتینیت‌ها به عنوان سنگ میزبان کرومیت، روش پردازش تصویر نسبت بانندی^۳ بر روی داده‌های سنجنده‌ی ETM⁺ اعمال شد. همچنین روش‌های پردازش تصویر تجزیه‌ی مؤلفه‌های اصلی^۴، Log residual و شاخص نینومیا^۵ برای تصاویر سنجنده‌ی استر مورد استفاده قرار گرفت.

▪ روش نسبت بانندی

نسبت بانندی یک روش مناسب برای مطالعات زمین‌شناسی است که به بارزسازی ویژگی‌های طیفی‌ای می‌پردازد که نمی‌توان در باندهای خام مشاهده نمود. این روش جهت افزایش تفاوت‌های طیفی بین باندها و کاهش اثرات توپوگرافی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش برای تهیه‌ی نقشه‌ی واحدهای سنگی و به خصوص به منظور تفکیک واحدهای سنگی مجموعه‌های افیولیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sultan et al., 1986; Sabins, 1999; Gad and Kusky, 2007). در این تحقیق، نسبت بانندی بر روی داده‌های سنجنده‌ی ETM⁺ اعمال شد و با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی یکصد هزار، به نظر می‌رسد که در جدایش هارزبورژیت‌ها و دونیت‌های سرپانتینی شده بسیار مؤثر بوده است. در تصویر نسبت بانندی، هارزبورژیت و دونیت سرپانتینی شده به رنگ بنفش تا سیاه ظاهر شده‌اند (شکل ۳-۲-الف).

▪ روش Log residual

برای اعمال الگوریتم Log residual، داده‌های مورد استفاده طی دو مرحله مورد پردازش شدند. در مرحله‌ی اول، یک باند کمکی به باندهای داده‌های استر اضافه شد. به عنوان مثال، با به کار بردن نه باند ناحیه‌ی مرئی و مادون قرمز طول موج کوتاه، باند جدید دهم تولید می‌شود که میانگین تمام نه باند ورودی است. در مرحله‌ی دوم، با استفاده از فرمول Log residual برای باندهای ناحیه‌ی مرئی و مادون قرمز طول موج

^۱ Atmospheric and topographic correction (ATCOR)

^۲ Internal Average Relative Reflectance

^۳ Band ratio

^۴ Principle component analysis (PCA)

^۵ Ninomiya index

کوتاه مقادیر محاسبه شد که در آن به جای میانگین هندسی از میانگین حسابی استفاده شده است. فرمول Log residual به صورت زیر می باشد:

$$(B1 \times \text{mean}(B2)) / (B2 \times \text{mean}(B1)) \quad (2-3)$$

که در آن $B1$ ، باندهای ناحیه‌ی مرئی و مادون قرمز طول موج کوتاه (۱ تا ۹)، $B2$ ، میانگین نه باند ورودی و mean، میانگین حسابی می باشد (Khan and Mahmood, 2008). شکل ۳-۲، ترکیب رنگی کاذب را برای خروجی الگوریتم Log residual نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود استفاده از الگوریتم از Log residual منجر به ایجاد رزولوشن بهتر برای تفکیک سرپانتینیت ها (صورتی تا سیاه) از سنگ های اطراف در منطقه‌ی مورد مطالعه شده است.

▪ روش شاخص نینومیا

شاخص نینومیا برای پردازش داده های استر مورد استفاده قرار می گیرد و شامل شاخص های کوارتز، کربنات و مافیک است که به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\text{Quartz Index (QI)} = (\text{Band11} \times \text{Band11}) / (\text{Band10} \times \text{Band12}) \quad (3-3)$$

$$\text{Carbonate Index (CI)} = (\text{Band13}) / (\text{Band14}) \quad (4-3)$$

$$\text{Mafic Index (MI)} = (\text{Band12}) / (\text{Band13}) \quad (5-3)$$

از این شاخص های سنگ شناسی می توان به عنوان یک روش مؤثر برای تهیه ی نقشه ی واحدهای سنگی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک استفاده نمود. کمپلکس های افیولیتی غنی از کانی های سیلیکاته هستند که اهداف مهمی در به نقشه در آوردن سنگ شناسی می باشند. سنگ های غنی از کوارتز ویژگی طیفی^۱ مشخصی در ناحیه مادون قرمز حرارتی دارند. در مورد سنجنده ی استر، کانی های سیلیکاته دارای قابلیت نشر بالاتر در باند ۱۱ (طول موج ۸/۶۵ میکرومتر) نسبت به باندهای ۱۰ (طول موج ۸/۳ میکرومتر) و ۱۲ (طول موج ۹/۱ میکرومتر) هستند. لازم به ذکر است که سنگ های غنی از کوارتز و پتاسیم فلدسپات مقادیر QI پایینی دارند و معمولاً برای سنگ های آذرین و به ندرت برای سنگ های رسوبی این حالت ایجاد می شود. شاخص کوارتز برای سنگ های رسوبی غنی از کوارتز به خوبی عمل می کند. کلسیت و دولومیت دو کانی اصلی کربناته بر روی زمین هستند که دارای ویژگی های نشر مشخصی در ناحیه ی مادون قرمز حرارتی هستند. آن ها در سنجنده ی استر دارای یک ویژگی جذب در باند ۱۴ (طول موج ۱۱/۳ میکرومتر) بوده و کانی ها و سنگ های سیلیکاته دارای ویژگی های طیفی منحصر به فردی در ناحیه ی مادون قرمز طیف الکترومغناطیس هستند.

^۱ Spectral feature

بررسی‌ها نشان می‌دهد که طول موج‌های بلندتر دارای حداقل نشر می‌باشند زیرا مقدار SiO_2 سنگ کاهش می‌یابد. علاوه بر این، بیش‌تر سنگ‌های به‌رنگ روشن (گرانیتی) نشر بالاتری را در طول موج‌های بلندتر (باند ۱۳) دارا می‌باشند در حالی که بیش‌تر سنگ‌های اولترامافیکی (پریدوتیتی) نشر بالاتری را در طول موج‌های کوتاه‌تر (باند ۱۲) از خود نشان می‌دهند. انتظار می‌رود که شاخص مافیک به‌عنوان نسبت دو باند که از نوع سنگی فلسیک به اولترامافیکی تغییر پیدا می‌کند، افزایش یابد. این به آن دلیل است که شاخص مافیک رابطه‌ی معکوسی با مقدار SiO_2 موجود در سنگ‌های سیلیکاته دارد. پس با افزایش شاخص مافیک مقدار سیلیس کاهش پیدا می‌کند (Ninomiya, 2005; Pournamdari and Mazlan, 2014). در این تحقیق، قابلیت استفاده از شاخص مافیک به‌منظور تشخیص سنگ‌های پریدوتیتی که ممکن است در بر گیرنده‌ی کرومیت باشند مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۳-۲-۳ پ، ترکیب رنگی کاذب حاصل از سه شاخص مذکور (MI, CI, QI) ارائه شده است. در این شکل، واحدهای سنگی پریدوتیتی با رنگ صورتی تا سیاه نمایش داده شده‌اند.

▪ روش تجزیه‌ی مؤلفه‌های اصلی

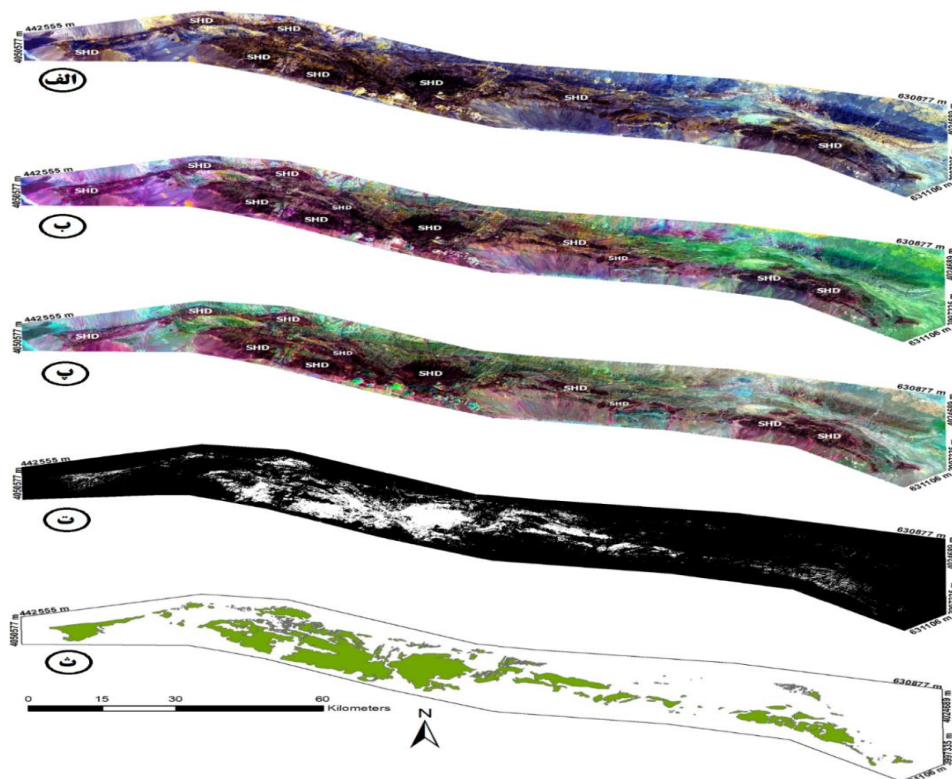
در روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی می‌توان از طریق ماتریس بردار ویژه به روابط بین مقادیر عددی و پاسخ‌های طیفی کانی‌ها یا سنگ‌های یک منطقه پی برد. با استفاده از این روابط می‌توان تعیین نمود که کدام مؤلفه‌ی اصلی (PC) حاوی اطلاعات مربوط به ماده‌ی معدنی مورد نظر است و این که آیا مقادیر رقومی پیکسل‌های مربوط به ماده‌ی معدنی، بالا (روشن) یا پایین (تیره) می‌باشد را می‌توان مشخص نمود. روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای نه باند استر منطقه‌ی مورد مطالعه به کار برده شده است. به‌طور کلی پذیرفته شده است که سه مؤلفه‌ی اصلی اول یا درجه بالا (PC1, PC2, PC3) حاوی بیش از ۹۹ درصد اطلاعات طیفی می‌باشند. بنابراین این سه مؤلفه نسبت به مؤلفه‌های اصلی درجه پایین‌تر (PC4, PC5, ...) که معمولاً حاوی کم‌تر از یک درصد اطلاعات طیفی و نسبت سیگنال به نویز پایینی هستند، به‌طور گسترده‌تری به‌منظور به‌نقشه درآوردن واحدهای سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۳-۲-۳ ت، مؤلفه‌ی اصلی اول (PC1) را نشان می‌دهد که در آن مناطق حاوی دونیت و هارزبورژیت سرپانتینی شده با پیکسل‌های روشن نمایان شده است.

۳-۲-۳-۱-۲-۳ ایجاد لایه‌ی واحد سنگ میزبان

پس از تفکیک کردن هارزبورژیت‌ها و دونیت‌های سرپانتینی شده (SHD)^۱ با چهار روش فوق، این مناطق رقومی گردیده و به‌منظور ایجاد یک لایه‌ی واحد سنگ میزبان، جهت استفاده در پردازش‌های بعدی، با هم‌دیگر ادغام شدند (شکل ۳-۲-۳ ث).

^۱ Serpentinized harzburgites and dunites

پس از ایجاد لایه‌ی واحد سنگ میزبان کرومیت، نقشه‌ی فاصله از سنگ میزبان تولید شد. سپس از عکس فاصله (عدد ۱ تقسیم بر فاصله‌ی هر نقطه در نقشه) برای نمایش میزان مطلوبیت رخداد کرومیت تیپ انبانه‌ای استفاده شده و مناطق نزدیک‌تر به سنگ‌های میزبان از ارزش بالاتری برخوردار شدند. سپس برای انتقال مقادیر عددی به محدوده‌ی صفر و یک در نقشه‌ی معکوس فاصله از تابع فازی سازی Small^۱ استفاده شد و مقادیر عضویت فازی پیوسته تعیین شدند. بنابراین، به کم‌ترین فاصله از سنگ میزبان بالاترین امتیاز فازی و به بیش‌ترین فاصله از سنگ میزبان کم‌ترین امتیاز فازی تخصیص داده شد (شکل ۳-۴-الف).

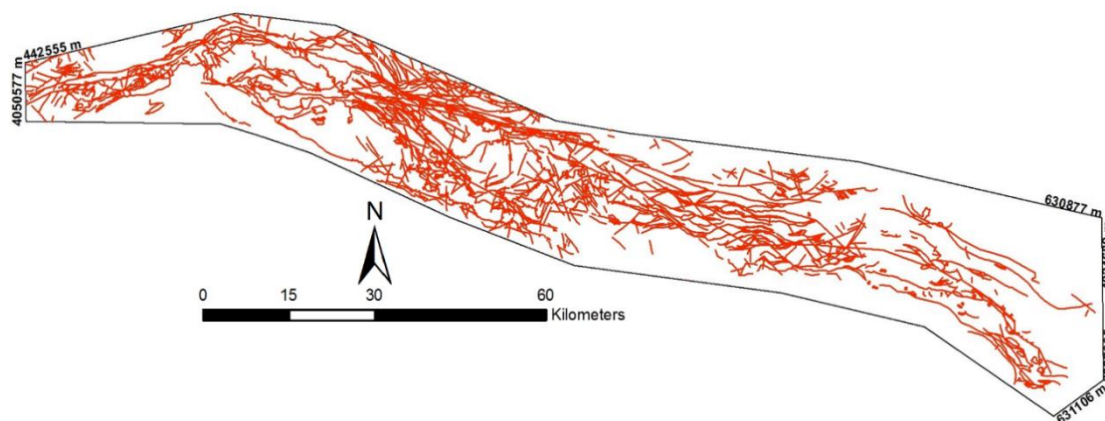


شکل ۳-۴: الف) نسبت بانندی ETM^+ (RGB: 5/3, 5/1, 7/5) محدوده‌ی مورد مطالعه، هارزبورژیت‌ها و دونیت‌های سرپانتینی شده (SHD) به صورت پیکسل‌های بنفش تا سیاه مشخص شده‌اند، ب) نسبت بانندی $Log\ residual$ (RGB: 4/7, 4/1, 2/3×4/3) محدوده‌ی مورد مطالعه، هارزبورژیت‌ها و دونیت‌های سرپانتینی شده (SHD) به صورت پیکسل‌های صورتی تا سیاه مشخص شده‌اند، پ) تصویر RGB (MI, CI, QI) محدوده‌ی مورد مطالعه، هارزبورژیت‌ها و دونیت‌های سرپانتینی شده (SHD) به صورت پیکسل‌های صورتی تا سیاه مشخص شده‌اند، ت) هارزبورژیت‌ها و دونیت‌های سرپانتینی شده (پیکسل‌های روشن) به دست آمده از PC1 و ث) لایه‌ی واحد مناطق سرپانتینیزه‌ی به دست آمده از روش‌های نسبت بانندی، تجزیه‌ی مؤلفه‌ای اصلی، $Log\ residual$ و شاخص نینومیا

^۱ Small fuzzification function

۲-۲-۳ نقشه‌ی شاهد چگالی گسل

در کمربند افیولیتی سبزوار، سنگ‌های سرپانتینی‌شده‌ی مرتبط با کانی‌سازی از لحاظ فضایی (نه ژنتیکی) همراه با ویژگی‌های ساختاری از جمله گسل‌ها هستند که دلیل آن، عملکرد دیاپیریک توده‌های سرپانتینی می‌باشد (Roshanravan et al., 2018a). بنابراین، مقادیر بالای چگالی گسل^۱ دارای مطلوبیت بالاتری از نظر کانی‌سازی کرومیت تیپ انبانه‌ای هستند. در این تحقیق، ابتدا گسل‌های منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat ETM⁺ و نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ شناسایی و رقومی شده (شکل ۳-۳) و سپس نقشه‌ی چگالی گسل ایجاد و به‌روش پیوسته وزن‌دهی گردید (شکل ۳-۴-ب).



شکل ۳-۳: گسل‌های استخراج‌شده‌ی کمربند افیولیتی سبزوار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ETM⁺ و نقشه‌ی زمین‌شناسی

۳-۲-۳ نقشه‌ی شاهد اثر ژئوشیمیایی چندعنصره

نمونه‌های رسوب آبراهه و خاک به‌دلیل ارتباط ژنتیکی نزدیک عناصر کروم، کبالت، نیکل و مس با ذخایر کرومیت، هاله‌های ژئوشیمیایی قابل توجهی را در نزدیکی یا اطراف ذخایر نمایان می‌سازند. بنابراین، این عناصر می‌توانند به‌عنوان عناصر شاخص یا اثرهای ژئوشیمیایی^۲ ذخیره مورد استفاده قرار گیرند (Whittaker, 1986; Yang and Siegel, 1989; Beqiraj et al., 2000; Navidi et al., 2014; Rajabzadeh et al., 2015). در این تحقیق، مقدار عناصر شاخص ۲۱۲۴ نمونه‌ی رسوب آبراهه‌ای جمع‌آوری‌شده توسط سازمان زمین‌شناسی ایران (با تراکم حدود یک نمونه در هر کیلومتر مربع) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمونه‌ها پس از عبور از الک ۱۷۷ میکرومتر و خرد شدن به‌میزان کم‌تر از

^۱ Fault density

^۲ Geochemical signature

۷۴ میکرومتر، با محلول تیزاب سلطانی^۱ هضم گردیده و در نهایت مورد آنالیز چند عنصری با استفاده از طیف‌سنج نوری پلاسما جفت‌شده‌ی القایی^۲ قرار گرفتند. به‌منظور ایجاد نقشه‌ی شاهد اثر ژئوشیمیایی چندعنصره، ابتدا مقادیر عنصری کروم، کبالت، نیکل و مس با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱) فازی شده و سپس عناصر شاخص با اهمیت به‌منظور ایجاد یک نقشه‌ی شاهد چندعنصری با کارایی بالاتر، برای تلفیق با سایر نقشه‌های شاهد، شناسایی شدند (Roshanravan et al., 2018b). برای این منظور از معیارهای چگالی نرمال‌شده^۳ (Mihalasky and Bonham-Carter, 2001; Yousefi and Carranza, 2015a) و مساحت زیر منحنی مشخصه‌ی عملکرد سیستم^۴ (Nykänen et al., 2015) استفاده شد. نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی با مقادیر N_d بالاتر از یک و AUC بالاتر از ۰/۵ به‌منظور تلفیق با سایر نقشه‌های شاهد جهت تولید یک مدل قوی‌تر دارای اهمیت می‌باشند (Mihalasky and Bonham-Carter, 2001; Yousefi and Carranza, 2015a; Nykänen et al., 2015). جدول ۳-۱، مقادیر N_d و AUC را برای نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی کروم، مس، نیکل و کبالت نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، عناصر شاخص کروم، کبالت و نیکل دارای اهمیت بوده و به‌منظور تولید یک نقشه‌ی شاهد ژئوشیمیایی قوی‌تر، با استفاده از عملگر فازی "OR" ترکیب شده‌اند (شکل ۳-۴ - پ).

جدول ۳-۱: پارامترهای تعیین‌شده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت و مشخصه‌ی عملکرد سیستم برای نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی

نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی	نرخ پیش‌بینی (%)	مساحت اشغال‌شده (%)	N_d	AUC
کروم	۵۷	۴۳	۱/۳۳	۰/۵۷
کبالت	۷۳	۲۷	۲/۷۰	۰/۸۳
مس	۴۴	۵۶	۰/۷۹	۰/۴۳
نیکل	۶۲	۳۸	۱/۶۳	۰/۶۹

۳-۳ تولید نقشه‌های شاهد وزن دار گسسته

در این تحقیق، علاوه بر استفاده از روش وزن‌دهی پیوسته از روش‌های وزن‌دهی گسسته که در مدل‌سازی‌های دانش‌محور پتانسیل معدنی به‌طور گسترده کاربرد دارد، استفاده شد. برای این منظور، همانند روش پیوسته، سه نقشه‌ی شاهد فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره

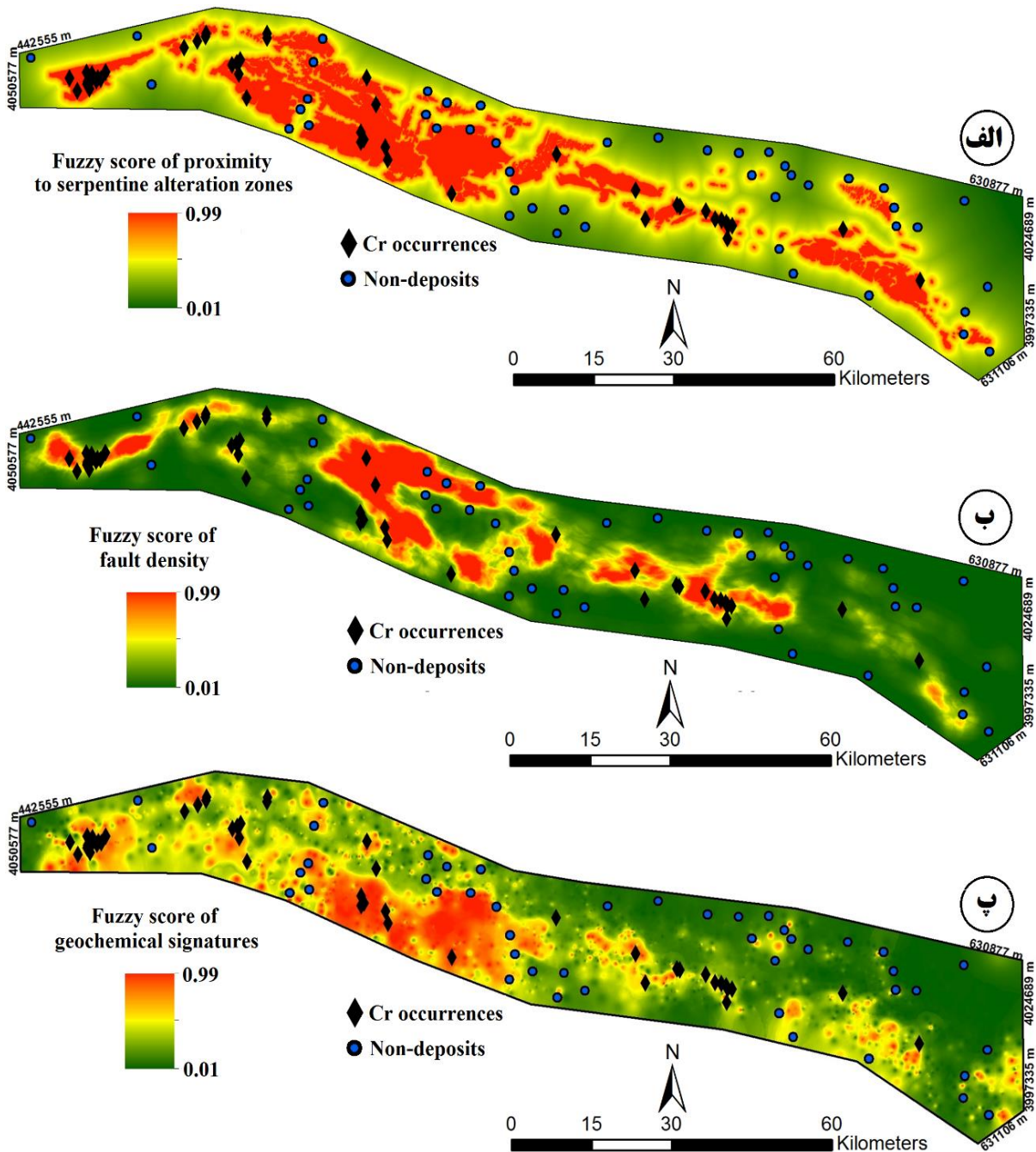
^۱ Aqua regia

^۲ Inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES)

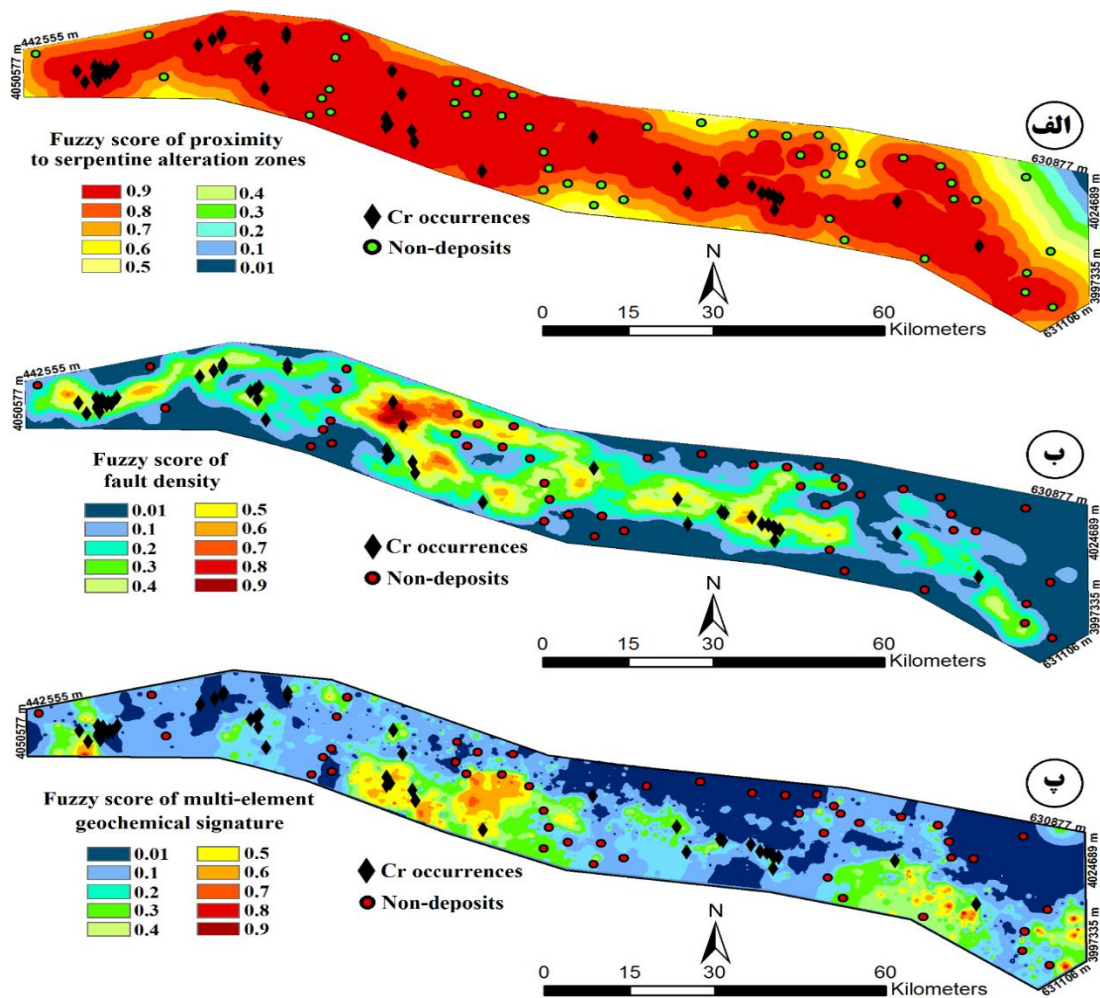
^۳ Normalized density (N_d)

^۴ Area under curve (AUC)

تهیه شد. سپس هر یک از نقشه‌های شاهد به‌طور خطی به کلاس‌های دلخواه طبقه‌بندی شده و در نهایت یک مقدار عضویت فازی (امتیاز فازی) به هر کلاس شاهد با توجه به نقش آن‌ها در پی‌جویی و اکتشاف ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای بر اساس نظر کارشناس اختصاص داده شد (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۴: نقشه‌های شاهد وزن دار بی‌پوسته؛ (الف) فاصله از سنگ میزبان، (ب) چگالی گسل و (پ) اثر ژئوشیمیایی چند عنصره



شکل ۳-۵: نقشه‌های شاهد وزن دار گسسته؛ الف) فاصله از سنگ میزبان، ب) چگالی گسل و پ) اثر ژئوشیمیایی چندعنصره

۳-۴ شبکه‌ی عصبی - فازی بهبودیافته

شبکه‌ی عصبی مصنوعی، یک روش تجربی یا نظارت‌شده‌ی (داده‌محور) مدل‌سازی پتانسیل معدنی است که از موقعیت اندیس‌های شناخته‌شده به‌عنوان نقاط آموزشی استفاده می‌کند (Brown et al., 2000; Porwal et al., 2003, 2004; Skabar, 2007a, b; Oh and Lee, 2010; Tessema, 2017) پوروال و همکاران (۲۰۰۳) با استفاده از شبکه‌ی عصبی آموزش‌دیده بر اساس لایه‌های شاهد دوتایی (باینری) به شناسایی نواحی امیدبخش پرداختند. از آنجایی که لایه‌های شاهد دوتایی اهمیت نسبی مقادیر شاخص مکانی را به‌طور واقعی منعکس نمی‌کنند (Porwal et al., 2004; Carranza, 2008)، پوروال و همکاران (۲۰۰۴) به‌منظور کاهش اثر منفی لایه‌های شاهد دوتایی و همچنین کاهش عدم قطعیت، لایه‌های شاهد مکانی چندکلاسه را به‌جای نقشه‌های دوتایی مورد استفاده قرار دادند و روش

ترکیبی شبکه‌ی عصبی- فازی را توسعه دادند که به‌طور چشم‌گیری برای تعیین اهداف اکتشافی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Porwal et al., 2004; Nykänen, 2008; Oh and Lee, 2010; Tessema, 2017).

در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به‌روشن عصبی- فازی، ابتدا وزن‌های فازی بر اساس قضاوت کارشناس به کلاس‌های مقادیر شاهد مکانی اختصاص می‌یابند و سپس نقشه‌های شاهد فازی‌سازی‌شده، به‌روش داده‌محور با استفاده از موقعیت اندیس‌های شناخته‌شده به‌عنوان نقاط آموزشی تلفیق می‌شوند (Porwal et al., 2004; Abedi and Norouzi, 2012; Tessema, 2017).

عصبی- فازی به‌دلیل استفاده از لایه‌های شاهد چند کلاسه به‌جای نقشه‌های دوتایی از کارایی بالاتری نسبت به مدل‌های پتانسیل تولیدشده به‌وسیله‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی کلاسیک برخوردار هستند، اما هنوز هم به‌دلیل ساده‌سازی مقادیر شاهد مکانی به تعدادی کلاس دارای عدم قطعیت می‌باشند (Yousefi and Nykänen, 2016). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که جهت غلبه بر عدم قطعیت، وزن‌های ویژگی‌های شاهد مکانی دارای ارزش پیوسته می‌توانند بدون کلاسه‌بندی ارزش‌ها اختصاص یابند (Nykänen et al., 2008; Yousefi and Nykänen, 2016).^۱ و لی (۲۰۱۰) یک مجموعه داده‌ی ورودی نرمالایزشده (در محدوده‌ی [۰ و ۱]) مرتبط با مدل وزن‌های نشان‌گر را برای روش مدل‌سازی شبکه‌ی عصبی به‌منظور تعیین اهداف اکتشافی مورد استفاده قرار دادند. از آن‌جایی‌که روش مدل‌سازی وزن‌های نشان‌گر از داده‌های کلاسه‌بندی‌شده استفاده می‌کند، بنابراین دارای عدم قطعیت است. علاوه بر این، بر اساس تحقیقات پژوهشگران (یوسفی و کارانزا، ۲۰۱۵) می‌توان گفت؛ تبدیل خطی داده‌های اکتشافی به محدوده‌ی [۰ و ۱] اهمیت نسبی مقادیر اکتشافی فضایی را به‌صورت واقع‌بینانه منعکس نمی‌کند.

در این تحقیق نشان داده شده است که مدل پتانسیل عصبی- فازی تولیدشده با استفاده از مقادیر شاهد فضایی وزن‌دار پیوسته از عملکرد بهتری نسبت به مدل عصبی- فازی تولیدشده با استفاده از داده‌های شاهد وزن‌دار گسسته برخوردار است. برای این منظور، هر کدام از مجموعه نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته (شکل ۳-۴) و گسسته (شکل ۳-۵) به‌طور جداگانه به‌روش عصبی- فازی و با استفاده از الگوریتم فرابکارایی بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ و نقاط آموزشی یکسان به‌منظور بهینه‌سازی اوزان اتصالات (سیناپس‌ها)^۲ و مدل کردن اهداف اکتشافی تلفیق شدند. در این مورد، از شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه^۳ استفاده شده است زیرا این شبکه به‌طور مؤثری برای انواع مختلفی از مسائل به‌کار می‌رود و یک ابزار تقریب تابع و طبقه‌بندی مناسب برای تعمیم‌دهی متغیرهای با مقدار (برچسب) نامعلوم می‌باشد. به این ترتیب، دو مدل پتانسیل معدنی جهت مقایسه تولید شدند. لازم به‌ذکر است که نحوه‌ی تأثیر استفاده

^۱ Particle swarm optimization (PSO)

^۲ Synapses

^۳ Multilayered perceptron neural network (MLPNN)

از مقادیر شاهد اکتشافی وزن دار پیوسته و گسسته بر روی عملکرد روش مدل‌سازی عصبی- فازی قبلاً مورد بررسی قرار نگرفته است. در ادامه ابتدا کلیاتی در مورد شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بیان شده و سپس نتایج حاصل از روش‌های عصبی- فازی معمولی و عصبی- فازی بهبودیافته ارائه و مقایسه شده‌اند.

۳-۴-۱ شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از روش‌های هوش مصنوعی و برگرفته از شبکه‌های عصبی طبیعی مغز انسان بوده و در سطح وسیعی در علوم مهندسی برای الگوبرداری و تقلید از نحوه‌ی فکر و رفتار مغز انسان به کار گرفته شده است. قابلیت ترکیب شبکه عصبی و فناوری سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی توسط جفری و روسنر (۱۹۸۶) و ریتز و همکاران (۱۹۸۸) و بسیاری از تحقیقات علمی بعدی که بر روی الگوشناسی و طبقه‌بندی خودکار تصاویر سنجش از دور متمرکز بوده‌اند، به رسمیت شناخته شد (Ritter and Hepner, 1990; Brown et al., 2000). بسیاری از این مطالعات نشان می‌دهند که به‌منظور طبقه‌بندی اطلاعات، شبکه‌های عصبی را می‌توان برای تلفیق (ترکیب) تعداد زیادی از داده‌ها استفاده کرد (Benediktsson et al., 1993). اگرچه شبکه‌های عصبی بیش‌تر به‌منظور پردازش و مدل‌سازی داده‌ها برای اکتشاف نفت بکار رفته‌اند ولی مطالعات قابل ملاحظه‌ای هم در مورد کاربرد شبکه‌های عصبی جهت اکتشاف مواد معدنی انجام شده است.

۳-۴-۱-۱ آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی

یادگیری شبکه‌های عصبی به دو گروه نظارت‌شده^۱ و نظارت‌نشده^۲ تقسیم می‌شود (Theodoridis and Koutroumbas, 2008; Hudson and Cohen, 2000).

الف: یادگیری نظارت‌شده

شبکه‌های عصبی در این نوع یادگیری برای حل هر مسأله‌ای از جمله مدل‌سازی پتانسیل معدنی سه مرحله‌ی آموزش^۳ (یادگیری^۴)، تعمیم^۵ و پیش‌بینی^۶ را طی می‌کنند (Zhao et al., 2016). در این نوع یادگیری که در

^۱ Supervised learning

^۲ Unsupervised learning

^۳ Training

^۴ Learning

^۵ Generalization

^۶ Prediction

شبکه‌های عصبی مصنوعی به صورت تطبیقی است، فرآیندی طی می‌شود که بر اساس آن شبکه می‌آموزد تا الگوهای موجود در ورودی‌ها را بشناسد. برای این منظور مجموعه‌ای از ورودی‌ها به همراه خروجی‌های متناظر آن‌ها تحت عنوان نقاط آموزشی به شبکه داده می‌شود و سپس وزن سیناپس‌های شبکه، که بر روی ورودی‌های هر نرون اعمال می‌شود، بروزسانی می‌گردند تا شبکه به وضعیت بهینه (حداقل شدن اختلاف بین خروجی مطلوب و خروجی شبکه) نزدیک شود. از آن جایی که شبکه‌های عصبی از طریق نقاط آموزشی، بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ارتباط برقرار کرده و الگوهای موجود (قوانین کلی) در ورودی‌ها را فرا می‌گیرند از این رو به آن‌ها سیستم‌های هوشمند یا یادگیر گفته می‌شود. به عبارت دیگر، شبکه‌های عصبی سیستم‌هایی هستند که صرفاً با مشاهده‌ی عملکرد خود می‌توانند رفتارشان را جهت دستیابی به هدفی خاص بهبود بخشند. این هدف یا شاخص عملکرد می‌تواند خطای شبکه (اختلاف بین خروجی مطلوب و خروجی شبکه) باشد که از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، که به آن‌ها قوانین یادگیری نیز می‌گویند، برای کمینه کردن خطا استفاده می‌شود (تخم‌چی و همکاران، ۱۳۹۵). تعمیم، توانایی شبکه است برای ارائه‌ی جواب قابل قبول در قبال ورودی‌هایی که در مجموعه‌ی آموزشی نبوده‌اند که تحت عنوان داده‌های اعتبارسنجی نامیده می‌شوند. به عبارت دیگر، بعد از این که شبکه آموزش دید و وزن‌ها تنظیم شدند، یک اعتبارسنجی برای تعیین میزان دقت جواب‌های شبکه انجام می‌شود تا تضمین‌کننده‌ی شناخت الگوهای داده‌های ورودی شبکه باشد. در صورتی که شبکه به خوبی آموزش ببیند و همچنین از عملکرد تعمیم‌دهی مناسبی برخوردار باشد، می‌توان با استفاده‌ی از آن متغیرهای نامعلوم (مانند پتانسیل ماده‌ی معدنی) را پیش‌بینی و نقشه‌های پیش‌گوی مربوط به آن‌ها را تولید کرد (Zhao et al., 2016; Roshanravan et al., 2018a).

ب: یادگیری نظارت‌نشده

در یادگیری نظارت‌نشده که به خوشه‌بندی^۱ نیز معروف است از داده‌های برچسب‌نخورده^۲ استفاده می‌شود. در این حالت، هدف یافتن الگویی بین داده‌هاست که بتواند بر اساس ویژگی‌های مشابه، داده‌ها را گروه‌بندی کند.

۳-۴-۱-۲ ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل‌های محاسباتی توزیع‌شده، موازی و انطباقی^۳ هستند که از رفتار مغز انسان تقلید می‌کنند و شامل تعدادی واحد پردازشی ساده به نام نرون یا گره^۴ است که به وسیله‌ی اتصالاتی^۵، که همراه

^۱ Clustering

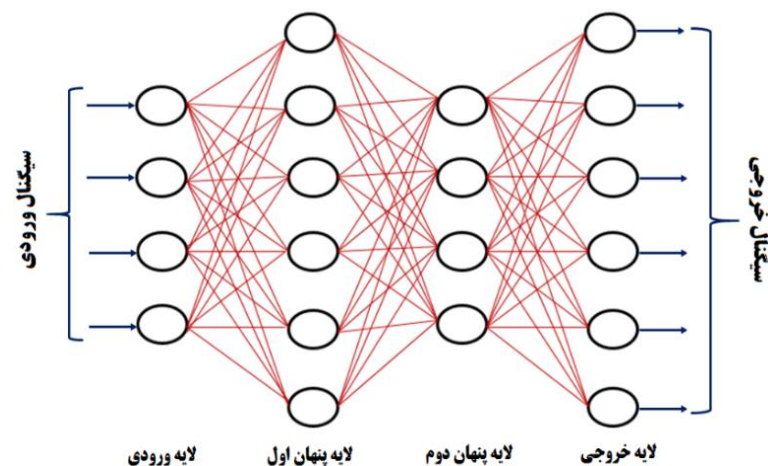
^۲ Unlabeled

^۳ Adaptive

^۴ Node

^۵ Synapses

با ضرایب عددی یا وزن‌هایی هستند که شدت هر اتصال را نشان می‌دهند، با یکدیگر ارتباط دارند (Huang and Williamson, 1996; Müller et al., 2012). در شبکه‌های عصبی مقادیر وزن‌ها به‌طور دائم اصلاح می‌شوند تا هر بردار ویژه ورودی با بردار هدف خروجی مربوط به خود به‌طور صحیح منطبق گردد. به‌طور کلی ساختار شبکه‌ی عصبی^۱ از پنج قسمت عمده (۱) تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های شبکه، (۲) تعداد لایه‌های شبکه، (۳) چگونگی اتصال لایه‌ها به یکدیگر، (۴) تعداد نرون‌های هر لایه و (۵) تابع تحریک^۲ هر لایه تشکیل شده است. شبکه‌های عصبی ساختار لایه‌ای دارند (شکل ۳-۶) که اولین لایه در سمت چپ، لایه‌ی ورودی^۳ یا لایه‌ی صفر است که داده‌ها در آن قرار می‌گیرند و لایه‌ی آخر در سمت راست نیز لایه‌ی خروجی^۴ است که خروجی‌های آن، خروجی‌های نهایی شبکه می‌باشند. در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، لایه‌ی ورودی شامل یک بردار $[X_1, X_2, \dots, X_n]$ است که در آن X_1 تا X_n مجموعه داده‌های ورودی اکتشافی (مانند زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی، سنجش از دور و دیگر مقادیر مکانی مربوط به کانی‌سازی) هستند (Brown et al., 2000; Roshanravan et al., 2018a). همچنین لایه‌ی خروجی شامل برجسب کلاس‌ها یا مقادیر هر نقطه‌ی آموزشی است. لایه‌های بین لایه‌ی ورودی و لایه‌ی خروجی لایه‌های میانی یا پنهان^۵ هستند (در شکل ۳-۶ یک شبکه با دو لایه‌ی پنهان ارائه شده است). به جز لایه‌ی ورودی تمام لایه‌های دیگر شبکه‌ی عصبی در کار پردازش شرکت می‌کنند و در نهایت خروجی نهایی شبکه به‌دست می‌آید. اگر شبکه‌ای دارای N نرون در لایه‌ی ورودی، H_1 نرون در لایه‌ی پنهان اول، H_2 نرون در لایه‌ی پنهان دوم و R نرون در لایه‌ی خروجی باشد آن‌گاه آن را به‌صورت شبکه‌ی $N-H_1-H_2-R$ نشان می‌دهند. شکل ۳-۶ یک شبکه‌ی ۴-۶-۴-۶ را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۶: ساختار شبکه‌ی عصبی مصنوعی ۴-۶-۴-۶ (Altrock, 1995)

^۱ Neural network architecture

^۲ Activation function

^۳ Input layer

^۴ Output layer

^۵ Hidden layer

شبکه‌های عصبی بر اساس نحوه‌ی اتصال نرون‌ها به یکدیگر به دو گروه اصلی شبکه‌های پیش‌خور^۱ و شبکه‌های بازگشتی^۲ تقسیم می‌شوند. شبکه‌های عصبی پیش‌خور، شبکه‌هایی هستند که در آن‌ها بازگشت (فیدبک) وجود ندارد؛ بدین معنی که تنها یک جریان یک‌طرفه از لایه‌ی ورودی به سمت لایه‌ی خروجی موجود است و هیچ مسیر برگشتی وجود ندارد. بنابراین در شبکه‌های پیش‌خور، پردازش درون هر لایه و جریان اطلاعات بین لایه‌ها به ترتیب به صورت موازی و سری است. از انواع شبکه‌های پیش‌خور می‌توان شبکه‌های پرسپترون تک‌لایه^۳، پرسپترون چندلایه و شعاعی^۴ را نام برد. شبکه‌های عصبی بازگشتی، شبکه‌هایی هستند که دارای فیدبک می‌باشند و حداقل یک سیگنال برگشتی از یک نرون به همان نرون یا نرون‌های همان لایه و یا لایه‌های قبل وجود دارد (تخم‌چی و همکاران، ۱۳۹۵). از انواع شبکه‌های بازگشتی می‌توان به شبکه‌های رقابتی^۵، شبکه‌ی کوهنن^۶ و شبکه‌ی هاپفیلد^۷ اشاره کرد.

۳-۴-۱-۳ مدل ریاضی یک نرون بیولوژیک

همان‌طور که گفته شد شبکه‌های عصبی مصنوعی از چندین واحد به نام نرون تشکیل شده‌اند که رفتاری مشابه با نرون‌های بیولوژیک دارند (شکل ۳-۷). این نرون از دو بخش تشکیل شده است که بخش اول آن تابع ترکیب یا انتشار نام دارد و تمام ورودی‌ها را ترکیب و یک عدد تولید می‌کند. مطابق شکل ۳-۷ هر گره با $n+1$ سیناپس به ورودی‌های شبکه مرتبط می‌شود. هر سیناپس یک وزن دارد که باید بهینه شود. ورودی‌ها در وزن‌های مربوطه ضرب و سپس با هم جمع بسته می‌شوند. مجموع حاصل را مجموع وزن دار می‌نامند که رایج‌ترین تابع ترکیب می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b \quad (۳-۶)$$

که در آن؛ s معرف مجموع وزن دار (شامل اریب^۸)، n معرف تعداد متغیرهای ورودی به شبکه، w_i معرف وزن ورودی‌ها (متغیرها) و b معرف اریب است. نقش اریب، افزایش یا کاهش مجموع وزن دار است و به

^۱ Feed-forward networks

^۲ Feed-backward (recurrent) networks

^۳ Single layer perceptron

^۴ Radial basis function neural network (RBFNN)

^۵ Competitive networks

^۶ Kohonen network

^۷ Hopfield network

^۸ Bias (offset)

شبکه کمک می‌کند تا الگوهای موجود را بهتر بشناسد. بخش دوم، تابع تحریک^۱ یا تابع انتقال^۲ گفته می‌شود که مقدار تابع ترکیب (s) به‌عنوان متغیر مستقل وارد آن شده و خروجی حاصل به‌عنوان خروجی نرون منظور می‌شود:

$$y = h(s) \quad (۷-۳)$$

که در آن؛ h همان تابع تحریک است.

۳-۴-۱-۴ انواع توابع تحریک

توابع تحریک (انتقال) رایج که در شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار می‌گیرند در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. از بین توابع تحریک، تابع log-sigmoid و tan-sigmoid از اهمیت خاصی برخوردار بوده و تحقیقات نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد کاربردی مانند این تحقیق عملکرد موفقیت‌آمیزی داشته‌اند که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

الف: تابع انتقال tan-sigmoid

این تابع فعال‌سازی S مانند، که تانژانت هیپربولیک نیز نامیده می‌شود، یک تابع هموار (پیوسته و مشتق‌پذیر) است که به‌طور تدریجی بین دو مقدار مجانب ۱ و -۱ تغییر می‌کند (شکل ۳-۸-ث) و به‌صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود (Bishop, 1997):

$$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}} \quad (۸-۳)$$

▪ تابع انتقال log-sigmoid

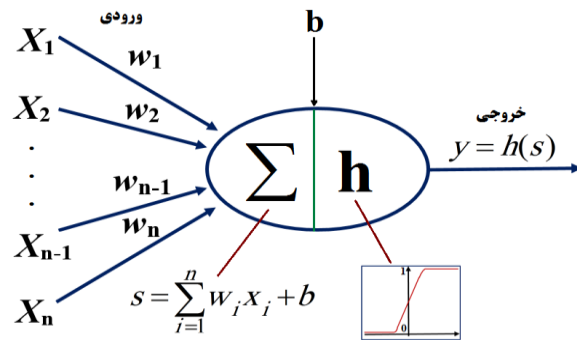
این تابع بین رفتار خطی و غیر خطی به آرامی تغییر می‌کند (شکل ۳-۸-ج) و با رابطه‌ی کلی زیر تعریف می‌شود (مدنی، ۱۳۹۰):

$$a = \frac{1}{1 + \exp(-bn)} \quad (۹-۳)$$

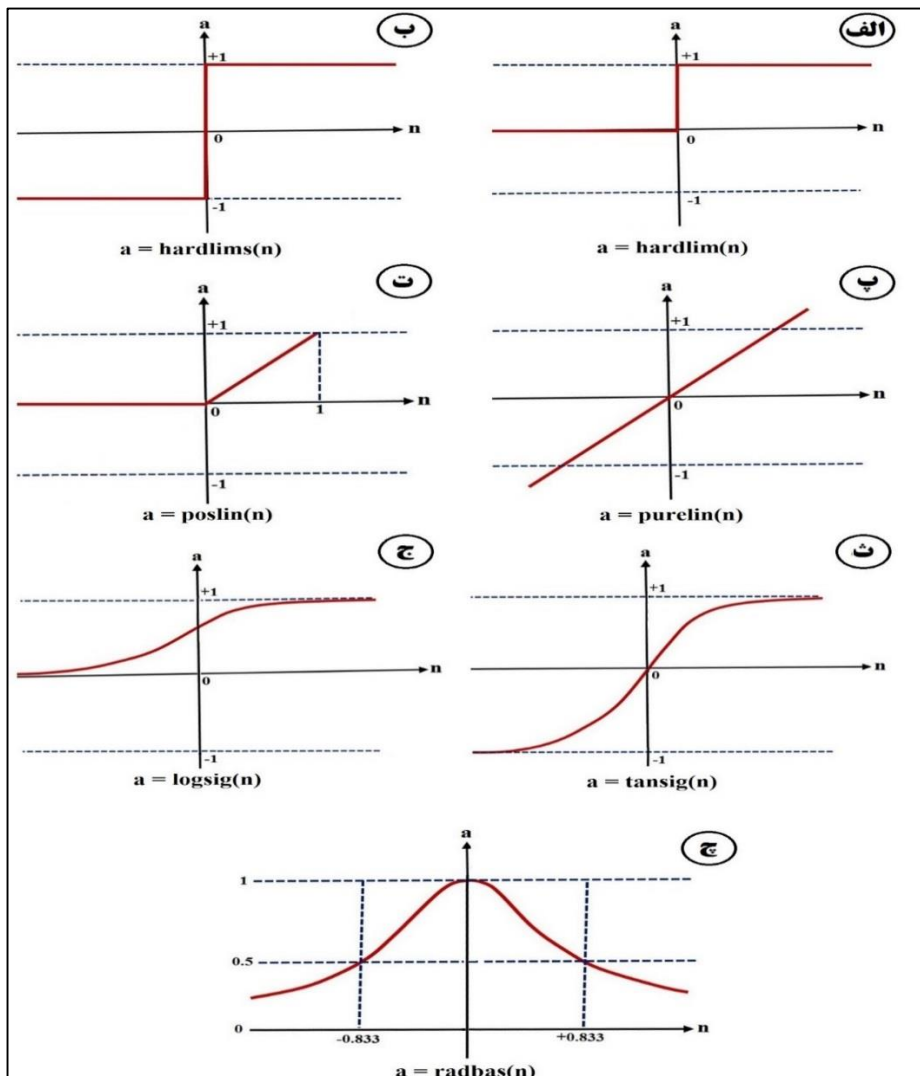
که در آن؛ b پارامتر شیب تابع log-sigmoid است. این تابع خروجی‌ای بین صفر و یک تولید می‌کند.

^۱ Activation function

^۲ Transfer function



شکل ۳-۷: مدل ریاضی یک نرون بیولوژیک



شکل ۳-۸: انواع توابع تحریک؛ (الف) تابع تحریک Hard limit، (ب) تابع تحریک Hard limit متقارن، (پ) تابع تحریک خطی، (ت) تابع تحریک خطی مثبت، (ث) تابع تحریک tan-sigmoid، (ج) تابع تحریک log-sigmoid و (ح) تابع تحریک radial basis که در شبکه‌های RBF استفاده می‌شود (اقتباس از تخم‌چی و همکاران، ۱۳۹۵).

۳-۴-۱-۵ شباهت سلول عصبی بیولوژیکی و مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی از شبکه‌ی عصبی مغز انسان الگو و الهام گرفته‌اند. سیستم عصبی مغز انسان تقریباً از صد میلیارد سلول عصبی تشکیل شده که بین آن‌ها تقریباً صد تریلیون اتصال وجود دارد. بنابراین بعید است که حتی بتوان یک نرون مغز انسان را دقیقاً مدل‌سازی کرد ولی با الهام از آن می‌توان یک مدل بسیار ساده را ارائه داد (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۰). در سیستم عصبی سه نوع نرون وجود دارد: نرون‌های حسی (که اطلاعات را از بافت‌های حسی می‌گیرند)، نرون‌های محرک (که فرمان‌ها را به ماهیچه‌ها و غدد می‌رسانند) و نرون‌های ارتباطی که در میان اعصاب حسی و محرک قرار گرفته‌اند (مدنی، ۱۳۹۰).

هر نرون از جسم سلولی^۱ (سوما^۲)، دندریت^۳ و آکسون^۴ تشکیل شده است (شکل ۳-۹). دندریت‌ها، قسمت‌های شاخه‌درختی‌شکلی هستند که از طریق آن‌ها اطلاعات به‌صورت سیگنال‌های الکتروشیمیایی به عصب می‌رسند. سپس در جسم سلولی، عملیاتی (یک عمل ساده‌ی جمع و مقایسه با یک سطح آستانه) بر روی اطلاعات ورودی انجام می‌گیرد و نتیجه‌ی حاصل به‌وسیله‌ی آکسون به عصب‌های دیگر منتقل می‌شود. سیگنال‌های الکتروشیمیایی در صورتی از جسم سلولی به انتهای آکسون منتقل می‌شوند که عمل تحریک نرون صورت بگیرد. غشای نرون در حالت عادی دارای پتانسیل الکتریکی ۷۰- میلی‌ولت است، اما به‌دلیل ورود اطلاعات از طریق دندریت‌ها ممکن است قادر به ابقای این پتانسیل عادی نباشد. در نتیجه، نرون تحریک شده و بعد از آزادسازی پالس الکتریکی دوباره به وضعیت عادی خود بر می‌گردد. آکسون که طول بیش‌تری دارد سیگنال‌های الکتروشیمیایی دریافتی از جسم سلولی را به عصب‌های دیگر منتقل می‌کند. دندریت‌های یک عصب به‌وسیله‌ی اتصالاتی به‌نام سیناپس به آکسون‌های عصب‌های دیگر متصل می‌شوند. به‌طور معمول در هر نرون بین هزار تا ده‌هزار سیناپس وجود دارد. پیام‌رسانی سیناپسی، فرآیند الکتریکی و شیمیایی بسیار پیچیده‌ای است. بنابراین می‌توان بین سلول عصبی مصنوعی و نرون بیولوژیک شباهت‌هایی را در نظر گرفت که عبارت‌اند از: (۱) یک نرون مصنوعی می‌تواند ورودی‌هایش را از چندین نرون دیگر دریافت کند. این ورودی‌های چندگانه را می‌توان شبیه دندریت‌ها یا سیناپس‌ها در نرون بیولوژیک دانست، (۲) مشابه نرون‌های بیولوژیک، هر نرون مصنوعی یک خروجی تولید می‌کند که با آکسون قابل مقایسه است، (۳) در محاسبه‌ی خروجی، به اطلاعات ورودی وزن مثبت یا منفی داده می‌شود که این وزن‌ها معادل اثر تحریک یا جلوگیری از تحریک نرون است و (۴) در نرون‌ها فقط در

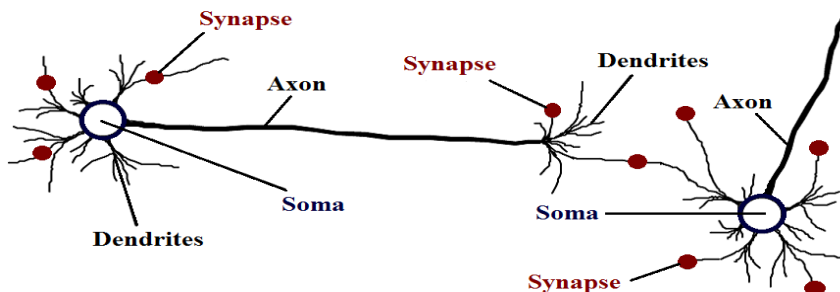
^۱ Cell body

^۲ Soma

^۳ Dendrite

^۴ Axon

صورتی که ولتاژ از آستانه‌ی خاصی فراتر رود خروجی تولید می‌شود که این عمل با تابع تحریک در نرون‌های مصنوعی قابل مقایسه است (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۰).



شکل ۳-۹: اجزای تشکیل‌دهنده‌ی یک سلول عصبی بیولوژیکی

۳-۴-۱-۶ شیوه‌ی آموزش شبکه‌ی عصبی

آموزش شبکه‌ی عصبی با استفاده از دو روش ترتیبی^۱ و دسته‌ای^۲ انجام می‌گیرد. در روش ترتیبی، وزن‌ها و بایاس‌ها پس از ارائه‌ی تک‌تک مثال‌های آموزشی تغییر می‌یابند. اگر N نقطه‌ی آموزشی به صورت $\{(X_1, y_1), (X_2, y_2), \dots, (X_N, y_N)\}$ وجود داشته باشد اولین جفت از نقاط یعنی (X_1, y_1) به شبکه داده می‌شود و اوزان سیناپس‌ها و بایاس‌ها به دست می‌آیند. سپس جفت دوم یعنی (X_2, y_2) به شبکه داده می‌شود و وزن‌ها و بایاس‌ها دقیق‌تر تنظیم می‌شوند. این عمل تا آخرین جفت ادامه می‌یابد. در روش دسته‌ای، تنظیم وزن‌ها و بایاس‌ها پس از ارائه‌ی تمام نقاط آموزشی به شبکه انجام می‌شود. تابع هزینه^۳ یا تابع خطا^۴ به صورت میانگین مربعات خطا^۵ (MSE) تعریف می‌شود (حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۰):

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^M e_j^2(n) \quad (۱۰-۳)$$

که در آن؛ $e_j(n)$ مربوط به سلول خروجی j برای مثال n ام است که از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (۱۱-۳)$$

که در آن؛ $d_j(n)$ خروجی مطلوب و $y_j(n)$ خروجی شبکه می‌باشد.

^۱ Sequential

^۲ Batch

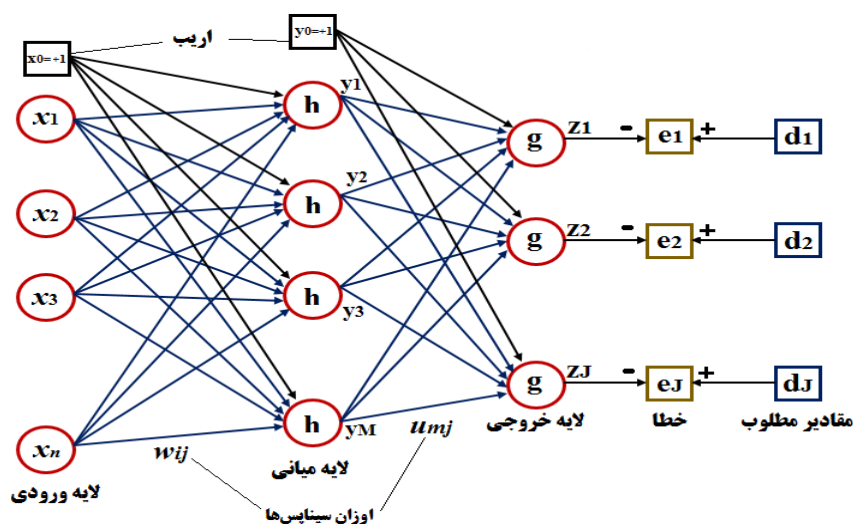
^۳ Cost function

^۴ Error function

^۵ Mean squared error (MSE)

۳-۴-۲ شبکه‌ی عصبی پرسپترون چندلایه

شبکه‌ی عصبی پرسپترون یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین شبکه‌های عصبی پیش‌خور است که ممکن است به صورت تک‌لایه یا چندلایه باشد. شبکه‌ی عصبی پرسپترون تک‌لایه که در سال ۱۹۸۵ میلادی معرفی شد، تنها دارای دو لایه (ورودی و خروجی) است و به همین دلیل تنها در حل مسائل خطی به کار می‌رود. پس از آن، شبکه‌های پرسپترون چندلایه توسعه یافتند که شامل سه یا تعداد بیش‌تری لایه می‌باشند. این شبکه‌ها قادر هستند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و نرون‌ها به حل اکثر مسائل پیچیده بپردازند. در شبکه‌ی پرسپترون، هر نرون در هر لایه به تمام نرون‌های لایه‌ی قبل متصل است و به همین دلیل به این نوع شبکه‌ها، شبکه‌های کاملاً مرتبط^۱ نیز می‌گویند (شکل ۳-۱۰). مطابق این شکل؛ خروجی‌های لایه‌ی اول، بردار ورودی لایه‌ی دوم را تشکیل می‌دهند و به همین ترتیب بردار خروجی لایه‌ی دوم، ورودی‌های لایه‌ی سوم را می‌سازند و خروجی‌های لایه‌ی سوم، پاسخ نهایی شبکه را تشکیل می‌دهند. به عبارتی دیگر روند جریان سیگنالی در شبکه در یک مسیر پیش‌خور صورت می‌گیرد (از چپ به راست و از لایه‌ای به لایه‌ی دیگر). در شبکه‌ی عصبی MLP تعیین اوزان سیناپس‌ها با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری انجام می‌شود. در این تحقیق از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی ازدحام ذرات به منظور تنظیم خودکار مقادیر وزن‌ها و حداقل کردن اختلاف بین نتایج محاسبه‌شده و خروجی‌های مطلوب استفاده شده است.



شکل ۳-۱۰: ساختار شماتیک یک شبکه‌ی عصبی پرسپترون سه لایه (اقتباس از تخم‌چی و همکاران، ۱۳۹۵)

شبکه‌ی عصبی MLP ابزار خوبی برای تخمین و طبقه‌بندی است. بهترین وضعیت برای این شبکه زمانی است که تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها بین صفر و یک باشند. حتی اگر متغیری وجود داشته باشد که

^۱ Fully-connected

مقادیرش قبل از نرمالایزکردن در محدوده‌ی بین صفر و یک (مثلاً ۰/۵ تا ۰/۸) قرار داشته باشد بهتر آن است که باز هم عمل نرمالایزکردن بر روی آن انجام شود تا بتواند تمام مقادیر بین صفر و یک را اختیار کند. بنابراین در شبکه‌ی عصبی MLP ابتدا باید داده‌ها را به روش‌هایی نرمالایز کرد که در یکی از مهم‌ترین آن‌ها این کار با کم کردن حد پایین از مقدار متغیر و تقسیم آن بر دامنه‌ی تغییرات صورت می‌گیرد (Bishop, 1997):

$$X_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (12-3)$$

که در آن؛ X_i مقدار نرمالایز شده‌ی یک داده، x_i مقدار واقعی همان داده و x_{\max} و x_{\min} به ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین مقدار در مجموعه داده‌ی ورودی می‌باشند. دلیل این‌که ورودی‌ها باید در محدوده‌ی [۰ و ۱] باشند این است که توابع تحریک نمی‌توانند بین مقادیر خیلی بزرگ فرقی قائل شوند و این امر آموزش شبکه را با مشکل روبه‌رو می‌سازد. بنابراین مهم‌ترین دلیل آن کمک به آموزش شبکه است. از طرفی دیگر، این کار سبب می‌شود که خروجی‌ها و ورودی‌های تمام لایه‌های بعدی در محدوده‌ی [۰ و ۱] قرار گیرند و شبکه را در شناخت الگوها کمک کنند. بنابراین تأثیر زیادی بر کیفیت نتایج شبکه‌ی عصبی می‌گذارد (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۰). در شبکه‌ی عصبی MLP، نرون‌های لایه‌ی ورودی بر خلاف نرون‌های لایه‌های خروجی و پنهان هیچ‌گونه پردازشی انجام نمی‌دهند و تنها وظیفه‌ی انتقال سیگنال‌های ورودی به سایر واحدهای پردازشی (نرون‌ها) را بر عهده دارند (Brown et al., 2000).

۳-۴-۱- بهینه‌سازی تعداد لایه‌های میانی

اگر از شبکه‌ی MLP به منظور طبقه‌بندی استفاده شود، ثابت شده که تنها با یک لایه‌ی میانی می‌توان عمل طبقه‌بندی را با هر دقتی انجام داد. البته در این حالت ممکن است تعداد نرون‌های لایه‌ی میانی افزایش یابد. در صورتی‌که از شبکه‌ی MLP به منظور تخمین استفاده شود باید نسبت به بهینه‌سازی تعداد لایه‌های میانی اقدام شود. شیوه‌ی بهینه‌سازی تعداد لایه‌های میانی به این ترتیب است که ابتدا مسئله با یک لایه‌ی میانی و ضمن بهینه‌سازی تعداد نرون‌ها حل می‌شود. سپس نسبت به افزایش تعداد لایه‌های میانی به دو و بهینه‌سازی توأم تعداد نرون‌های لایه‌های اول و دوم اقدام می‌شود. از مقایسه‌ی دقت پاسخ بهینه در حالتی که یک و دو لایه‌ی میانی وجود دارند، پاسخ بهتر انتخاب می‌شود. اگر پاسخ بهتر، مربوط به شبکه‌ی با یک لایه‌ی میانی باشد آن‌گاه همین پاسخ نهایی خواهد بود؛ اما اگر پاسخ بهتر، مربوط به شبکه‌ی با دو لایه‌ی میانی باشد باید نسبت به افزایش تعداد لایه‌های میانی به سه و سپس بهینه‌سازی تعداد نرون‌های سه لایه و رسیدن به پاسخ بهینه و مقایسه‌ی آن با پاسخ بهینه‌ی دو لایه‌ی میانی اقدام

کرد. افزایش تعداد لایه‌های میانی تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شبکه‌ی با تعداد لایه‌های کم‌تر، پاسخ مطلوب‌تری داشته باشد (تخم‌چی و همکاران، ۱۳۹۵).

۳-۴-۲-۲ تعداد نرون‌های لایه‌ی خروجی

اگر از شبکه‌ی MLP به‌منظور طبقه‌بندی استفاده شود تعداد نرون‌های لایه‌ی خروجی برابر با تعداد کلاس‌ها است. اما اگر از شبکه‌ی MLP به‌منظور تخمین استفاده شود، تعداد نرون‌های لایه‌ی خروجی برابر با تعداد متغیرهایی خواهد بود که تخمین می‌خورند. به‌عنوان مثال، اگر هدف استفاده از شبکه، تخمین امتیاز پتانسیل باشد تعداد نرون‌های لایه‌ی خروجی برابر با یک خواهد بود.

۳-۴-۲-۳ تعیین زمان توقف آموزش

داده‌های آموزشی به‌طور تصادفی به سه مجموعه داده تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: آموزش، آزمون و اعتبارسنجی که معمولاً سهم آن‌ها از نقاط آموزشی به ترتیب ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد است (Brown et al., 2000). مجموعه داده‌ی آموزشی^۱ به‌منظور تعدیل وزن‌ها و بایاس‌های شبکه به‌کار می‌رود و از مجموعه داده‌ی آزمون^۲ برای تعیین زمان توقف آموزش استفاده می‌شود. مجموعه داده‌ی اعتبارسنجی^۳ هیچ نقشی را در آموزش بازی نمی‌کند و زمانی که داده‌های جدید پردازش می‌شوند به‌منظور ارزیابی عمل کرد تعمیم شبکه به‌کار می‌رود.

در هر بار آموزش مقدار میانگین مربعات خطا^۴ از یک روند کاهشی پیروی می‌کند و به‌صورت مجانب به صفر نزدیک می‌شود. هر چند یادگیری بیش از حد می‌تواند منجر به پدیده‌ی بیش‌برازش^۵ شود، اما تعمیم آن با نتایج ضعیفی همراه است که دلیل آن وجود نوفه در مجموعه داده‌ها است. شبکه‌ای که بیش از حد آموزش دیده است می‌تواند برازش خیلی خوبی را با نمونه‌های آموزشی داشته باشد و ممکن است از نظر میانگین مربعات خطا بهینه باشد ولی در عین حال با تعمیم خیلی ضعیفی همراه باشد (Roshanravan et al., 2018b). با استفاده از داده‌های آزمون، یک دستورالعمل که تحت عنوان توقف زودهنگام^۶ نام دارد برای جلوگیری از آموزش بیش از حد به‌کار می‌رود (Wang et al., 1994; Brown et al., 2000). اگرچه خطای آموزش در طی فرآیند یادگیری (آموزش) کاهش می‌یابد اما خطای آزمون

^۱ Train dataset

^۲ Test dataset

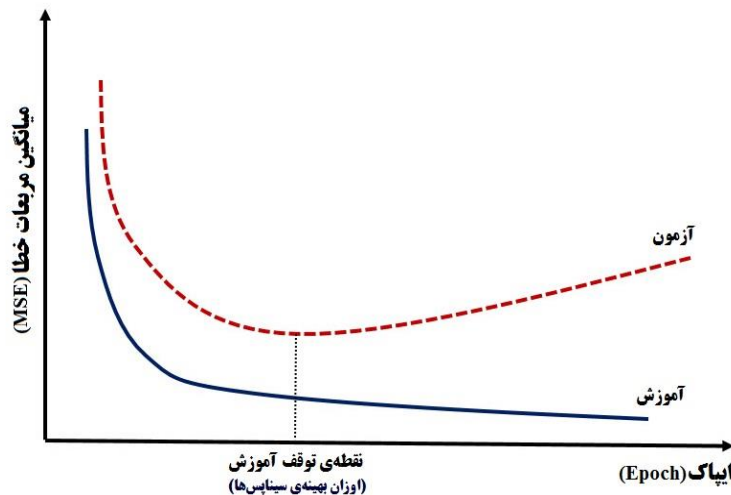
^۳ Validation dataset

^۴ Mean squared error (MSE)

^۵ Over fitting

^۶ Early stopping

ابتدا به یک مقدار کمینه رسیده و سپس با ادامه‌ی فرآیند آموزش شروع به افزایش می‌کند. آموزش در نقطه‌ای که در آن مقدار MSE برای داده‌های آزمون به یک مقدار کمینه می‌رسد متوقف می‌شود و وزن‌های مربوط به تکرار^۱ (ایپاک^۲) بهینه، ذخیره و برای پردازش‌های بعدی به کار می‌روند (شکل ۳-۱۱).



شکل ۳-۱۱: تعیین زمان توقف آموزش؛ زمان افزایش خطای تخمین یا طبقه‌بندی داده‌های آزمون به‌عنوان شرط توقف در نظر گرفته شده است (Demuth and Beale, 1998).

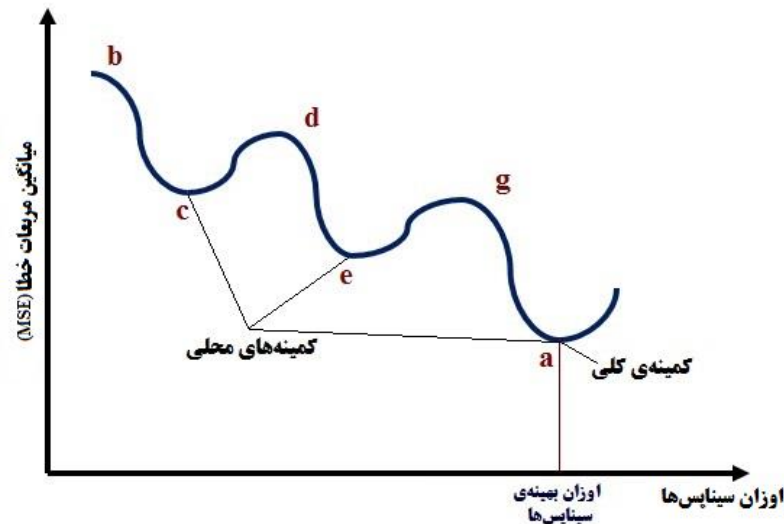
۳-۴-۲-۴ عدم قطعیت عمل کرد شبکه

از آنجایی که فرآیند آموزش (بهینه‌سازی اوزان سیناپس‌ها) در شبکه‌ی عصبی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی صورت می‌گیرد لذا بسته به مقادیر تصادفی ابتدایی اوزان سیناپس‌ها، حتی اگر ساختار شبکه‌ی MLP ثابت باشد، عملکرد شبکه با عدم قطعیت همراه است. در این حالت اگر شبکه در چندین مرحله آموزش ببیند مقادیر MSE در زمان توقف آموزش مقادیر متفاوتی خواهد بود که معرف عدم قطعیت عملکرد شبکه است. به‌عنوان مثال اگر در شکل ۳-۱۲، منظور از بهینه، همان نقطه‌ی کمینه باشد، در یک الگوریتم بهینه‌سازی کلی، بدون شک نقطه‌ی a به‌عنوان نقطه‌ی کمینه معرفی خواهد شد؛ اما در یک الگوریتم بهینه‌سازی محلی، اگر نقطه‌ی b ، نقطه‌ی آغاز الگوریتم باشد، نقطه‌ی c ، که یک کمینه‌ی محلی است، به‌عنوان نقطه‌ی بهینه تلقی خواهد شد. این در حالی است که اگر نقطه‌ی d ، نقطه‌ی آغاز الگوریتم باشد، نقطه‌ی e ، به‌عنوان کمینه‌ی محلی نهایی معرفی خواهد شد. بدیهی است در این دو حالت اخیر، اختلاف فاحشی بین کمینه‌ی کلی و کمینه‌های محلی مشاهده خواهد شد؛ اما اگر به‌طور تصادفی در یک الگوریتم بهینه‌سازی، g ، نقطه‌ی آغاز باشد، a ، کمینه‌ی محلی معرفی خواهد شد که اتفاقاً بر کمینه‌ی کلی نیز منطبق است. بنابراین بهتر است که در عمل، هر شبکه با ساختار یکسان را چندین

^۱ Iteration

^۲ Epoch

مرتبۀ آموزش داد تا در نهایت عدم قطعیت‌های حاصل از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گیرند (تخم‌چی و همکاران، ۱۳۹۵).



شکل ۳-۱۲: مفهوم کمینه‌های محلی و کلی در بهینه‌سازی (Fletcher, 1980)

۳-۴-۳ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یکی از روش‌های بهینه‌سازی بر مبنای جمعیت است که از رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته است (Eberhart and Kennedy, 1995; Talbi, 2009). الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای اولین بار توسط ابره‌ارت و کندی (۱۹۹۵) به‌عنوان یک روش جستجوی قطعی برای مسائل بهینه‌سازی معرفی شد. ابره‌ارت و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که این الگوریتم از نرخ هم‌گرایی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی برخوردار است. سادگی، کم‌بودن پارامترهای کنترلی و نرخ هم‌گرایی بالای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باعث گسترش کاربرد آن در حوزه‌های مختلف علوم از جمله زمین‌شناسی شده است (Singh and Biswas, 2016). در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، جواب‌های ممکن در یک مسأله‌ی بهینه‌سازی به‌صورت ذراتی بدون حجم در نظر گرفته شده و در واقع موقعیت‌هایی فرضی در فضای مدل (جستجو) هستند. این ذرات در یک فضای n بعدی جابه‌جا شده و در هر موقعیت مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و در نهایت در نقطه‌ی بهینه متمرکز شده و آن را ارائه می‌کنند. هر ذره دارای یک بردار مکان در فضای مدل و هم‌چنین یک بردار سرعت است که به تعیین موقعیت ذره در تکرار بعدی کمک می‌کند (Shi and Eberhart, 1999; Zheng et al., 2003; Singh and Biswas, 2016). الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات از بردار سرعت و هم‌چنین موقعیت بهترین مقادیر محلی و عمومی جهت بروزرسانی محل فعلی هر ذره و یافتن مقدار تابع هزینه در محل

جدید استفاده می‌کند. در یک فضای جستجوی^۱ n بعدی S دارای m ذره، بردارهای مکان و سرعت برای i امین ذره در K امین تکرار به ترتیب با رابطه‌های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) بیان می‌شوند (Liang and Kang, 2016):

$$X_i^k = (x_{i1}^k, x_{i2}^k, \dots, x_{in}^k) \in S \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (۳-۱۳)$$

$$V_i^k = (v_{i1}^k, v_{i2}^k, \dots, v_{in}^k) \in S \quad (۳-۱۴)$$

سپس، سرعت و مکان جدید برای i امین ذره به ترتیب با رابطه‌های (۳-۱۵) و (۳-۱۶) به دست می‌آیند:

$$V_{in}^{k+1} = wV_{in}^k + c_1 r_{1i}^k (P_{best}^k - X_{in}^k) + c_2 r_{2i}^k (G_{best}^k - X_{in}^k) \quad (۳-۱۵)$$

$$X_{in}^{k+1} = X_{in}^k + V_{in}^{k+1} \quad (۳-۱۶)$$

که در آن؛ P_{best}^k ، موقعیت بهینه شخصی i امین ذره از اولین تا k امین تکرار (بهترین موقعیتی که تا آن لحظه ذره موفق به رسیدن آن شده)؛ G_{best}^k ، موقعیت بهینه گروهی i امین ذره از اولین تا k امین تکرار؛ W ، ضریب اینرسی^۲ (برای موازنه‌ی بین جستجوهای عمومی و محلی)؛ r_{1i}^k و r_{2i}^k ، اعداد تصادفی در محدوده‌ی [۰ و ۱] برای تکرار K و c_1 و c_2 ، ثابت‌های مثبت شتاب (فاکتورهای یادگیری)^۳ هستند.

اولین جزء رابطه‌ی (۳-۱۵)، wV_{in}^k ، مؤلفه‌ی اینرسی^۴ است که از انحراف ذره از مسیر حرکت تکرار قبلی جلوگیری می‌نماید. دومین جزء رابطه‌ی (۳-۱۵)، $c_1 r_{1i}^k (P_{best}^k - X_{in}^k)$ ، مؤلفه‌ی شناختی^۵ نام دارد که خودتصمیم‌گیری ذره را نشان می‌دهد و در نهایت سومین جزء رابطه‌ی (۳-۱۵)، $c_2 r_{2i}^k (G_{best}^k - X_{in}^k)$ ، مؤلفه‌ی گروهی^۶ بوده که بیان‌گر تبادل اطلاعات و همکاری می‌باشد (Kennedy, 2007; Liang and Kang, 2016; Singh and Biswas, 2016).

همان‌طور که بیان شد، پارامتر ضریب اینرسی، W ، ضریب وزن‌دهنده‌ای است که از انحراف ذره از مسیر حرکت قبلی جلوگیری می‌نماید و به دلیل این‌که تمایل به حفظ حرکت قبلی را اعمال می‌کند به آن ضریب اینرسی نیز می‌گویند (Eberhart and Kennedy, 1995; Fernández-Martínez et al., 2008).

^۱ Search space

^۲ Inertia weight

^۳ Learning factors

^۴ Inertia component

^۵ Cognitive component

^۶ Social component

از آن جایی که این ضریب موازنه‌ی بین جستجوی‌های عمومی و محلی را بر عهده دارد بنابراین در عملکرد الگوریتم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Clerc and Kennedy, 2002). در رابطه‌ی (۳-۱۵) اگر ضریب اینرسی صفر باشد، بهترین ذره در هر تکرار، در تکرار بعد ثابت می‌ماند و احتمال سکون کلی آن و سوق پیدا کردن سایر ذرات به سمت آن وجود دارد. همچنین اگر این ضریب بزرگ باشد و به‌مرور در تکرارهای بعدی کوچک نشود، احتمال واگرایی مسأله و جستجوی بدون هم‌گرایی نهایی وجود دارد. بنابراین، تعیین این ضریب و رابطه‌ی تحلیل رفتن آن در تکرارهای بالا نقش مهمی در هم‌گرایی و نیز به‌دام نیفتادن در کمینه‌های محلی دارد (Eberhart and Shi, 2000). هرچه ضریب اینرسی بزرگ‌تر باشد، جستجوی عمومی افزایش می‌یابد و هرچه کوچک‌تر باشد، جستجو به سمت جستجوی محلی خواهد رفت. در برخی تحقیقات از انتخاب ضریب اینرسی بین ۰/۴ تا ۰/۹ به‌عنوان گزینه‌ی مطلوب یاد شده، به‌طوری که این ضریب در حین اجرای الگوریتم از مقدار بزرگ‌تر به کوچک‌تر کاهش می‌یابد تا در آغاز اجرای الگوریتم ویژگی جستجوگری و در پایان ویژگی تمایل به هم‌گرایی تأمین گردد (Zheng et al., 2003). رابطه‌ی (۳-۱۷) تغییرات دینامیکی ضریب اینرسی را در هر تکرار نشان می‌دهد (Shi and Eberhart, 1998).

$$w = w_{\max} - \left(\frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \right) \times k \quad (3-17)$$

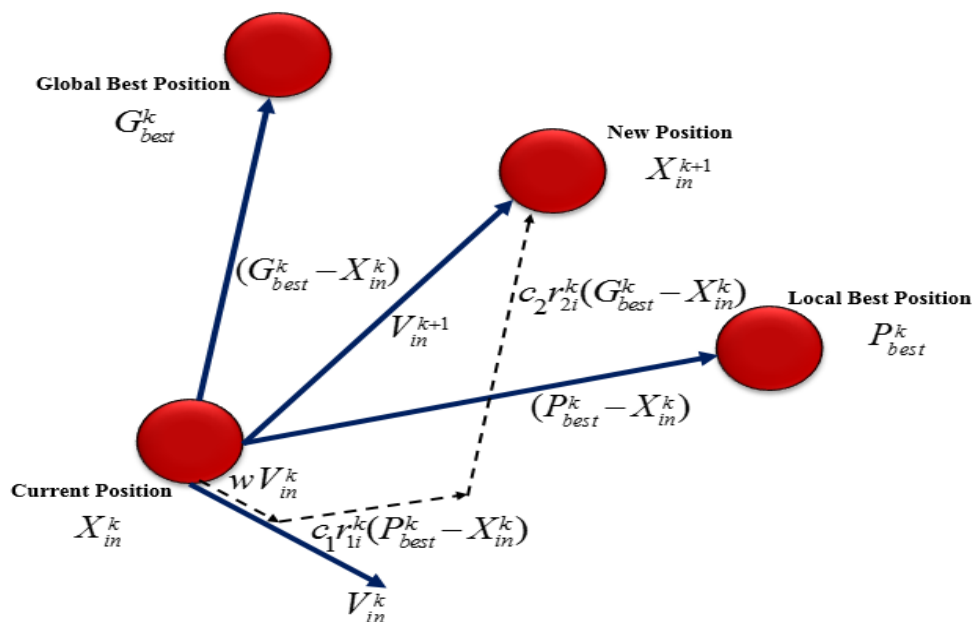
که در آن؛ w_{\max} و w_{\min} به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه ضریب اینرسی، k_{\max} ، بیشینه تکرار پیش‌بینی‌شده‌ی چرخه‌ی الگوریتم و k ، شماره‌ی هر تکرار در چرخه‌ی الگوریتم است. بر اساس شکل ۳-۱۳ شروع اجرای الگوریتم بدین صورت است که گروهی از ذرات (پرنده‌گان) به صورت تصادفی به وجود می‌آیند. سپس با استفاده از رابطه‌ی (۳-۱۶)، الگوریتم به بروزرسانی و جابه‌جایی ذرات در فضای مدل می‌پردازد تا راه حل بهینه را یافت نماید. در واقع در هر گام (تکرار)، هر ذره با حرکت تصادفی و تمایل به سمت دو موقعیت بهینه‌ی شخصی و گروهی به‌روز می‌شود. اولین مورد، بهترین موقعیتی است که تاکنون ذره موفق به رسیدن به آن شده و با P_{best} نشان داده می‌شود. موقعیت مذکور شناسایی و ذخیره می‌گردد. مورد دوم (بهترین موقعیت گروهی) بهترین موقعیتی است که تاکنون توسط ذرات گروه یافت شده و با G_{best} نشان داده می‌شود. فرآیند جذب شدن اعضا به سمت G_{best} یا همان بهترین نتیجه‌ی به دست آمده در واقع حلقه‌ی اصلی ارتباطی و تبادل اطلاعاتی بین ذرات موجود در یک همسایگی است که هم‌گرایی الگوریتم را نیز تأمین می‌نماید (He et al., 2004). جهت شناخت بهتر از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات، فلوچارت الگوریتم استاندارد بهینه‌سازی ازدحام ذرات در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.

باید توجه داشت که علاوه بر موقعیت‌های بهینه‌ی شخصی و گروهی، مقدار c_1 ، c_2 و w نیز در بروزسانی ذرات تأثیرگذار هستند. ثابت‌های مثبت شتاب، c_1 و c_2 ، باید طوری انتخاب شوند که سرعت حرکت ذره در فضای جستجو بهینه باشد. اگر ضریب c_2 برابر صفر قرار داده شود ذرات قادر به استفاده از تجربیات یکدیگر نخواهند بود و هر کدام به صورت یک حرکت رفت و برگشتی تصادفی در فضای مدل حرکت کرده و ممکن است هرگز به هم‌گرایی نرسند (Zheng et al., 2003; Liang and Kang, 2016). سیستم به نقطه‌ی بهینه هم‌گرا می‌شود اگر شرایط زیر برقرار باشند (Perez and Behdinan, 2007):

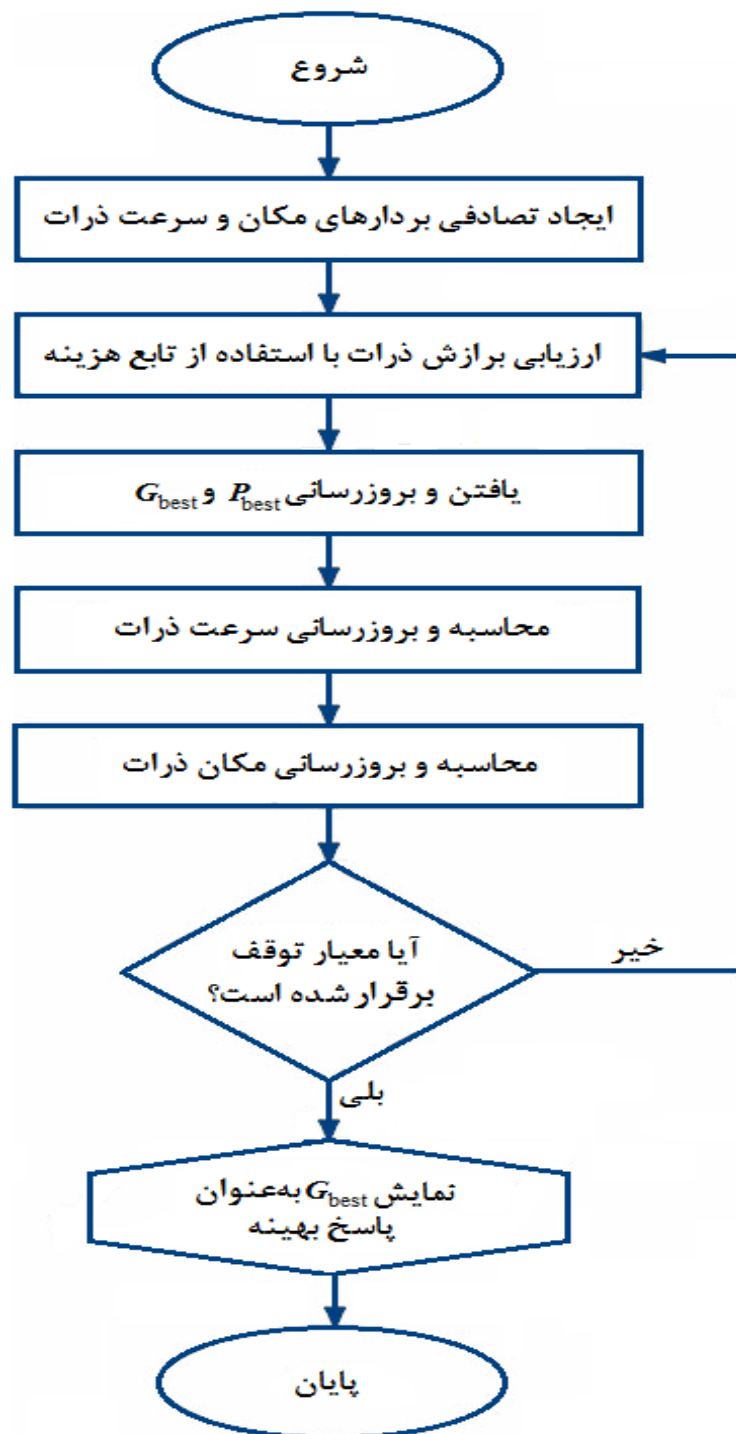
(۱۸-۳)

$$0 < c_1 + c_2 < 4$$

$$\left(\frac{c_1 + c_2}{2}\right) - 1 < w < 1 \quad (۱۹-۳)$$



شکل ۳-۱۳: چگونگی تعیین جهت و بزرگی بردار حرکت ذرات در هر موقعیت (Alatas et al., 2009)



شکل ۳-۱۴: فلوچارت الگوریتم استاندارد بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۳-۴-۴ تولید مدل‌های پتانسیل عصبی - فازی در کمر بند افیولیتی سبزوار

پس از این که مقدمه‌ای در خصوص شبکه‌ی عصبی و کاربردهای آن گفته شد، جهت تولید مدل‌های پتانسیل معدنی لازم است نقشه‌های شاهد تهیه شود. برای تعیین اهداف اکتشافی و تهیه‌ی نقشه‌ی مطلوب می‌توان نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته و گسسته‌ی تولیدشده در این تحقیق (شکل‌های ۲-۴ و ۲-۵) را با استفاده از توابع مختلفی تلفیق نمود. در این تحقیق، برای شناسایی اهداف اکتشافی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای و تعیین مناطق مناسب، از شبکه‌ی عصبی MLP با الگوریتم یادگیری PSO استفاده شد. برای این منظور، دو مدل پتانسیل متناظر با دو نوع از نقشه‌های شاهد وزن دار ورودی با استفاده از شبکه‌ی عصبی - فازی با نقاط آموزشی و الگوریتم یادگیری یکسان طبق سه مرحله‌ی زیر تولید شدند:

الف - استخراج نمونه‌های آموزشی و اعتبارسنجی: برای آموزش شبکه‌ی عصبی مصنوعی

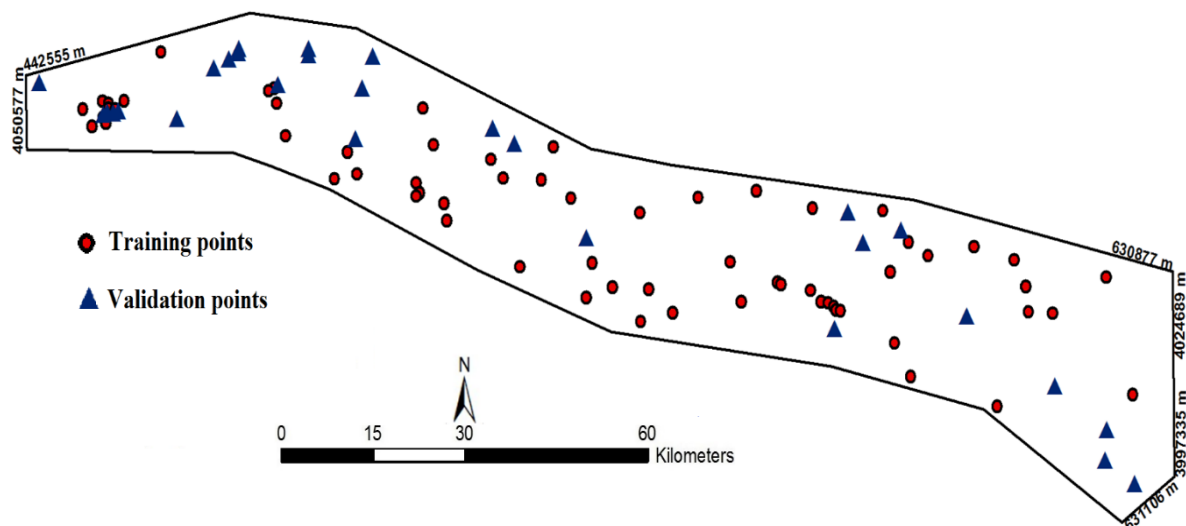
لازم است چندین موقعیت برای اندیس‌های معدنی معلوم و شناخته‌شده (MDLs) و چندین محل فاقد کانی‌زایی کرومیت (NDLs) روی نقشه وجود داشته می‌باشد. تعداد موقعیت‌های فاقد ذخیره باید با تعداد اندیس‌های شناخته‌شده برابر باشد زیرا الگوریتم یادگیری، میانگین مربعات خطا (MSE) را بر روی کل الگوهای موجود در مجموعه داده‌ی آموزشی کمینه می‌کند (Brown et al., 2000). از آنجایی که در منطقه‌ی مورد مطالعه، ۴۶ اندیس شناخته‌شده‌ی کرومیت وجود دارد بنابراین ۴۶ موقعیت فاقد ذخیره ایجاد شد. موقعیت‌های فاقد ذخیره با توجه به سه اصل زیر ایجاد گردیدند (Nykanen et al., 2015; Carranza and Laborte, 2016a, b, c): (۱) بایستی به صورت تصادفی توزیع شده باشند، (۲) بایستی دور از اندیس‌های شناخته‌شده قرار گرفته باشند تا ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی آن‌ها با اندیس‌های شناخته‌شده متفاوت باشد و (۳) باید خارج از سنگ‌های میزبان کانی‌سازی مورد نظر قرار گرفته باشند. سپس، مجموعه داده‌ی اصلی (شامل بردارهای ویژه‌ی مربوط به MDLs و NDLs) بر اساس مطالعات انجام‌شده‌ی پژوهشگران زیادی (Oh and Lee, 2010; Zhao et al., 2016; Tessema, 2017) به دو بخش آموزشی و اعتبارسنجی با نسبت ۷۰:۳۰ درصد تقسیم شد. توزیع مکانی نقاط تعیین‌شده‌ی آموزشی و اعتبارسنجی در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.

ب - انتخاب ساختار بهینه: مقادیر نقشه‌های شاهد شبکه‌بندی شده^۱ در هر پیکسل از منطقه‌ی

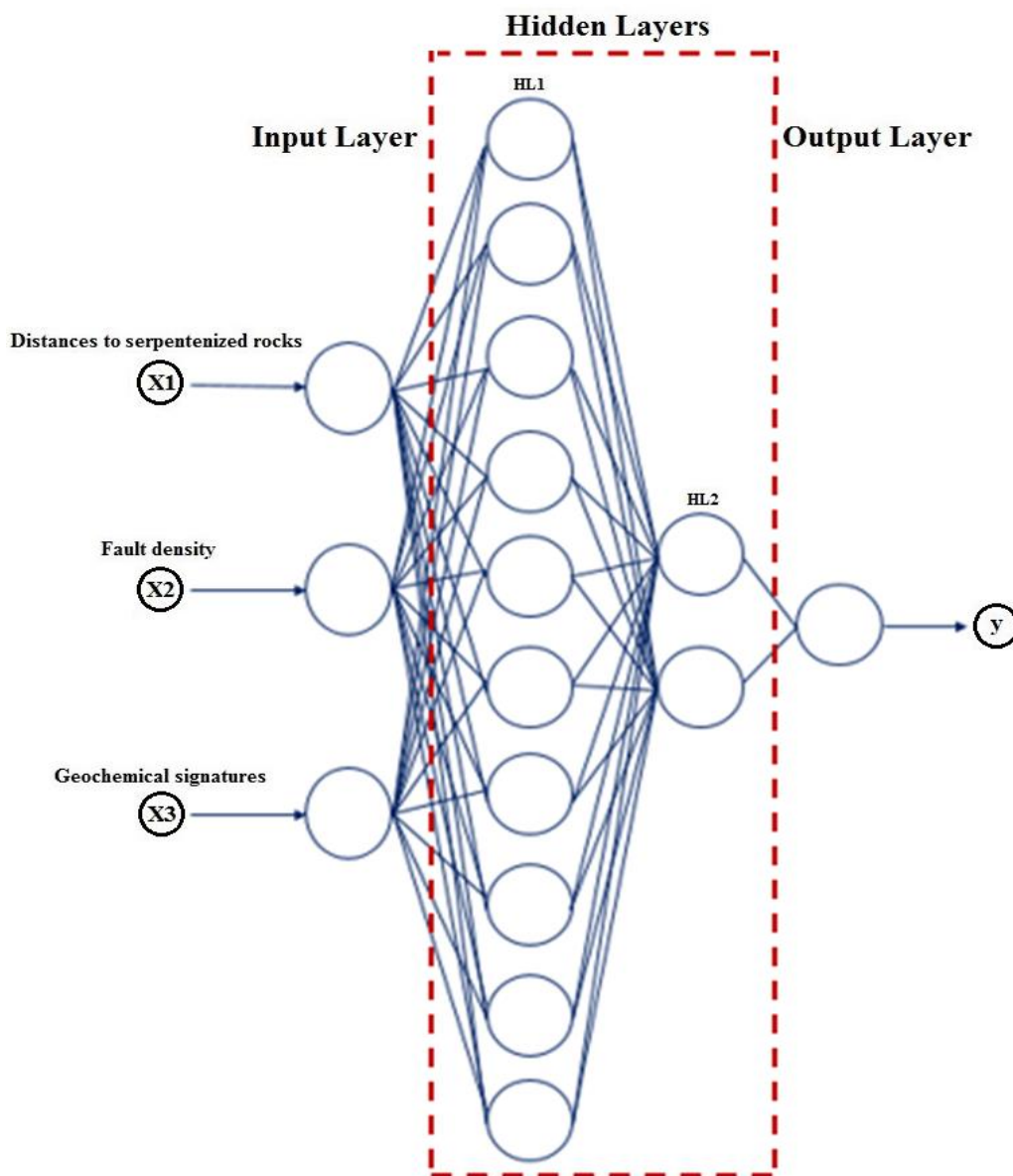
مورد مطالعه به منظور تشکیل بردارهای ویژگی با یکدیگر ترکیب شدند. هم‌چنین، واحد پردازش منفرد خروجی با اختصاص دادن ارزش یک به موقعیت اندیس‌های شناخته‌شده و ارزش صفر به موقعیت‌های فاقد ذخیره کدگذاری شد. تعداد گره‌های لایه‌ی ورودی شبکه‌ی عصبی بر اساس تعداد نقشه‌های شاهد

^۱ Gridded

وزن دار سه تا و تعداد لایه‌های میانی و نرون‌های مربوط به آن‌ها به صورت تجربی (Brown et al., 2000; Oh and Lee, 2010; Abedi and Norouzi, 2012) تعیین شد که به ترتیب منجر به ایجاد توپولوژی‌های ۱-۲-۱ و ۱-۲-۱-۱۸ برای مدل‌های پتانسیل عصبی-فازی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته و گسسته شد. به این منظور، توابع تحریک tan-sigmoid و log-sigmoid به ترتیب در نرون‌های لایه‌های میانی و خروجی استفاده شدند. برای همی شبکه‌ها، جمعیت اولیه‌ی ذرات، فاکتورهای یادگیری (c_1 و c_2) و مقادیر ضریب اینرسی (w_{max} , w_{min}) به ترتیب برابر ۳۰، ۱/۹۸ و (۰/۴، ۰/۹) تنظیم شدند. علاوه بر این، بیش‌برازش یک مسئله‌ی مهم است که منجر به عملکرد ضعیف تعمیم‌دهی شبکه‌ی عصبی مصنوعی می‌گردد. برای غلبه بر این مشکل، دو مدل پتانسیل عصبی-فازی تولید شده، با استفاده از ده مجموعه‌ی تصادفی از وزن‌های اولیه برای هر کدام از ایپاک‌های ۱۰، ۲۰-۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰-۱۰۰۰ آموزش دیدند. در هر ایپاک، وزن‌های اولیه برای هر ۱۰ اجرای آموزشی ذخیره گردیده و سپس به منظور تعمیم‌دهی مجموعه‌ی اعتبارسنجی به کار رفتند. در نهایت، از بین ده مقدار تعمیم‌یافته، کوچک‌ترین آن برای هر ایپاک انتخاب شد (جدول ۳-۲). ساختار بهینه‌ی مدل پتانسیل عصبی-فازی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته در شکل ۳-۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۵: توزیع مکانی نقاط تعیین‌شده‌ی آموزشی و اعتبارسنجی



شکل ۳-۱۶: شبکه‌ی عصبی- فازی به‌منظور پیش‌گویی ذخایر کرومیت

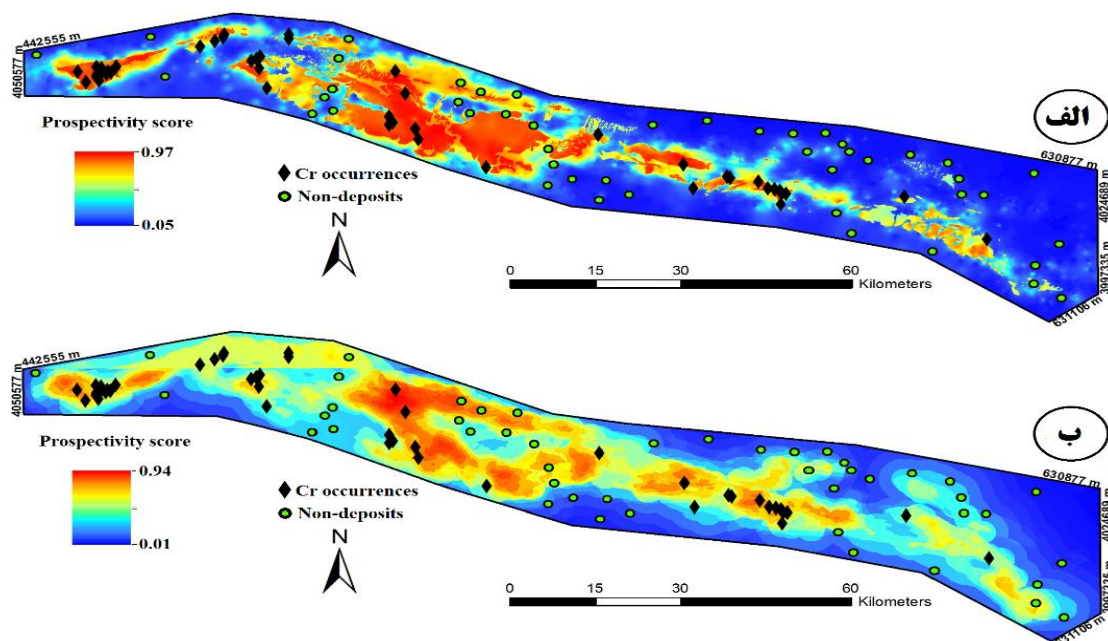
ج- **پیش‌گویی**: شبکه‌هایی که بهترین عملکرد تقریب تابع^۱، کوچک‌ترین مقدار MSE، را برای نمونه‌ی اعتبارسنجی ارائه دادند، به‌منظور پردازش بردارهای ویژگی^۲ مربوط به کل‌گرید کمر بند افیولیتی سبزوار مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین، مدل پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در کمر بند افیولیتی سبزوار با استفاده از شبکه‌های ۹ و ۱۲ در جدول ۳-۲ تهیه شد (شکل ۳-۱۷). شکل ۳-۱۸ منحنی‌های خطای آموزش را برای دو شبکه‌ی مذکور نشان می‌دهد.

^۱ Function approximation

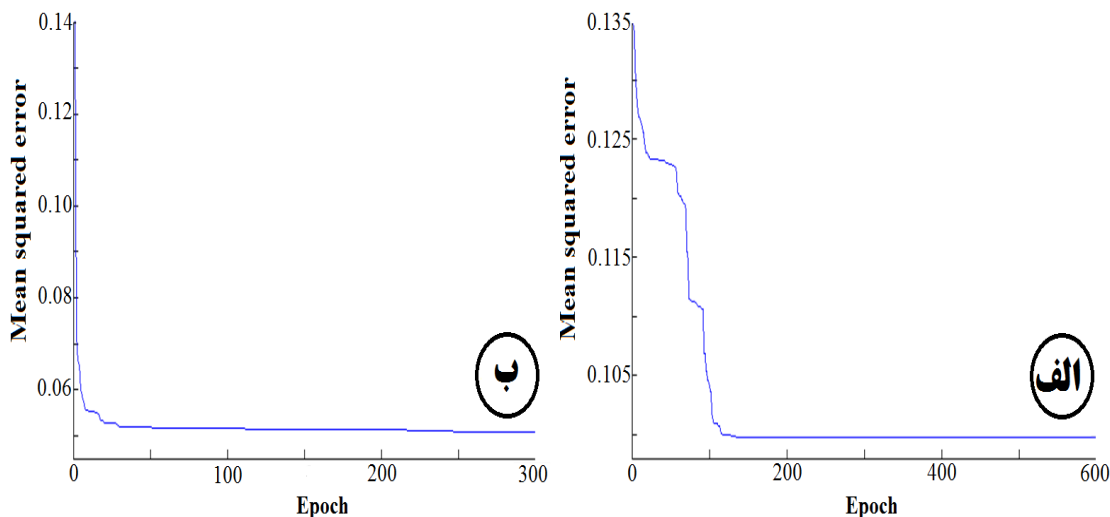
^۲ Feature vectors

جدول ۳-۲: کوچک ترین مقدار میانگین مربعات خطای مجموعه‌ی اعتبارسنجی برای هر ایپاک به منظور ایجاد مدل های پتانسیل تولید شده با استفاده از نقشه های شاهد وزن دار پیوسته و گسسته

با استفاده از نقشه های شاهد وزن دار گسسته		با استفاده از نقشه های شاهد وزن دار پیوسته		ایپاک	شبکه
MSE (train)	MSE (validation)	MSE (train)	MSE (validation)		
۰/۱۰۵۶	۰/۲۰۰۳	۰/۰۶۱۱	۰/۲۲۵۴	۵	۱
۰/۰۹۶۹	۰/۲۰۲۵	۰/۰۵۴۴	۰/۲۳۲۸	۱۰	۲
۰/۱۰۱۶	۰/۱۹۹۷	۰/۰۴۳۱	۰/۲۱۴۱	۲۰	۳
۰/۰۸۷۶	۰/۲۰۸۴	۰/۰۸۱۱	۰/۲۲۶۸	۳۰	۴
۰/۰۸۹۶	۰/۲۲۰۳	۰/۰۶۳۸	۰/۲۰۵۹	۴۰	۵
۰/۰۷۹۸	۰/۲۰۷۸	۰/۰۷۸۱	۰/۲۳۴۱	۵۰	۶
۰/۰۹۰۳	۰/۲۰۰۶	۰/۰۸۲۹	۰/۲۰۳۲	۱۰۰	۷
۰/۰۷۵۶	۰/۲۲۰۸	۰/۰۵۱۳	۰/۲۱۲۰	۲۰۰	۸
۰/۱۰۹۸	۰/۲۰۳۴	۰/۰۵۰۸	۰/۱۹۹۵	۳۰۰	۹
۰/۰۹۵۴	۰/۲۰۸۷	۰/۰۶۴۴	۰/۲۱۹۸	۴۰۰	۱۰
۰/۱۰۲۵	۰/۱۹۵۶	۰/۰۵۳۴	۰/۲۱۷۶	۵۰۰	۱۱
۰/۰۹۹۸	۰/۱۹۴۵	۰/۰۵۶۴	۰/۲۰۸۸	۶۰۰	۱۲
۰/۱۰۰۸	۰/۱۹۸۷	۰/۰۶۴۵	۰/۱۹۹۸	۷۰۰	۱۳
۰/۰۷۸۹	۰/۱۹۶۱	۰/۰۸۳۲	۰/۲۰۷۶	۸۰۰	۱۴
۰/۱۰۰۶	۰/۲۰۹۸	۰/۰۵۴۳	۰/۲۱۰۴	۹۰۰	۱۵
۰/۰۹۲۳	۰/۲۱۶۴	۰/۰۴۸۱	۰/۲۲۷۸	۱۰۰۰	۱۶



شکل ۳-۱۷: مدل های پتانسیل عصبی - فازی تولید شده با استفاده از نقشه های شاهد وزن دار پیوسته و گسسته؛ الف) با استفاده از نقشه های شاهد وزن دار پیوسته و ب) با استفاده از نقشه های شاهد وزن دار گسسته



شکل ۳-۱۸: روند تکاملی منحنی میانگین مربعات خطا برای داده‌های شاهد اکتشافی وزن دار پیوسته و گسسته به منظور ایجاد مدل‌های پتانسیل عصبی- فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد پیوسته و گسسته. الف) منحنی مربوط به داده‌های شاهد اکتشافی وزن دار گسسته. ب) منحنی مربوط به داده‌های شاهد اکتشافی وزن دار پیوسته

۳-۴-۵ ارزیابی و مقایسه‌ی مدل‌های پتانسیل عصبی- فازی

در مدل‌سازی پتانسیل معدنی وزن اختصاص یافته به یک شاهد فضایی بایستی منعکس‌کننده‌ی رابطه‌ی بین شاهد فضایی و کانی‌سازی تیپ ذخیره‌ی مورد جستجو باشد. بنابراین می‌توان از موقعیت اندیس‌های شناخته‌شده و همچنین موقعیت‌های فاقد ذخیره در منطقه‌ی مورد مطالعه جهت ارزیابی مدل‌های پتانسیل معدنی استفاده نمود. در این تحقیق نیز به منظور ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل‌های تولیدشده از ۴۶ موقعیت دارای ذخیره و همچنین ۴۶ موقعیت فاقد ذخیره‌ی کرومیت در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شده است (شکل ۳-۱۵). لازم به ذکر است که از موقعیت‌های واجد و فاقد ذخیره صرفاً جهت ارزیابی مدل‌ها استفاده شده و در تخصیص وزن و تولید مدل پتانسیل معدنی دخالتی نداشته‌اند. برای ارزیابی مدل‌های تولیدشده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی- مساحت و مشخصه‌ی عملکرد سیستم (ROC) استفاده شده است (شکل ۳-۱۹).

در نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت، دو منحنی وجود دارد که در مقابل کلاس‌های مختلف مدل پتانسیل معدنی رسم می‌شوند. اولین منحنی مربوط به نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته‌شده‌ی متناظر با کلاس‌های مدل پتانسیل معدنی بوده و منحنی دیگر مساحت تحت پوشش هر کلاس از مدل پتانسیل معدنی نسبت به کل مساحت منطقه‌ی مورد مطالعه است (Yousefi and Carranza, 2015b). در این نمودار، نقطه‌ی تقاطع^۱ دو منحنی نرخ پیش‌بینی و مساحت معیاری برای ارزیابی مدل پتانسیل معدنی است و هر چه نقطه‌ی تقاطع دو منحنی بالاتر باشد مدل از کارایی بالاتری برخوردار خواهد بود زیرا اندیس‌های شناخته‌شده در سطوح کوچک‌تری

^۱ Intersection point

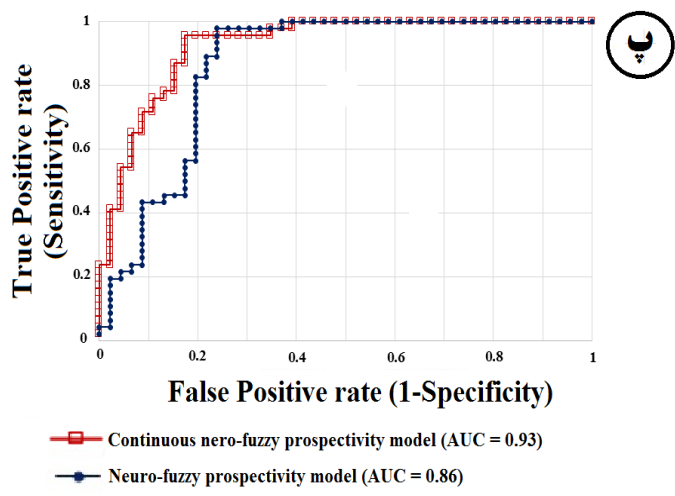
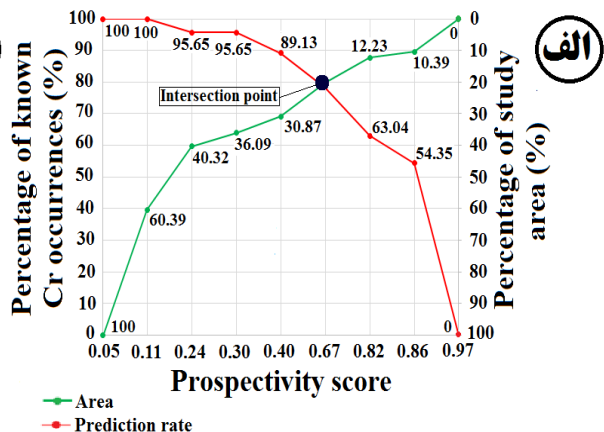
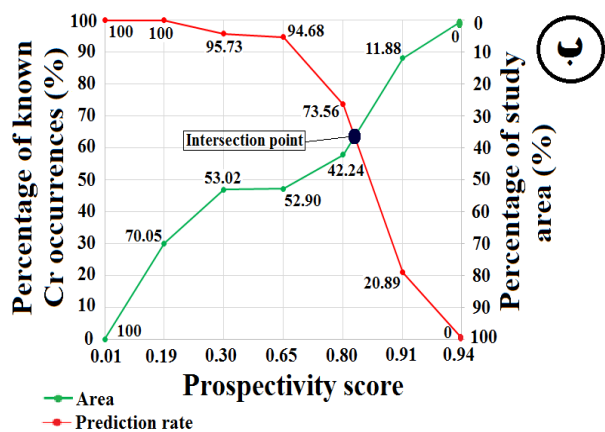
از منطقه‌ی مورد مطالعه قرار گرفته و در نتیجه احتمال رخداد ذخایر معدنی در این سطوح بالاتر است. همان‌طور که بیان شد برای رسم نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت نیاز به طبقه‌بندی مدل‌های پتانسیل معدنی است. در این تحقیق، از روش فرکتالی عیار - مساحت برای تعیین حد آستانه‌ای جوامع مختلف استفاده شده است و سپس مدل‌های پتانسیل تولیدشده، بر اساس حدود آستانه‌ای حاصل از روش فرکتالی طبقه‌بندی شدند. در نهایت، با توجه به مدل‌های پتانسیل معدنی طبقه‌بندی‌شده، تعداد اندیس‌های پیش‌بینی‌شده در هر کلاس و مساحت متناظر کلاس‌ها، نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت به‌منظور ارزیابی و مقایسه‌ی مدل‌ها رسم شده‌اند (شکل ۳- ۱۹).

برای رسم نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم علاوه بر موقعیت اندیس‌های شناخته‌شده به موقعیت مناطقی که فاقد اندیس معدنی مورد نظر باشند، نیاز است (Chauhan et al., 2010; Chen, 2015; Nykänen et al., 2015). محور عمودی این نمودار، «حساسیت»^۱ و محور افقی آن، «اختصاصی‌بودن»^۲ است (شکل ۳- ۱۹ - پ). «حساسیت» بیان‌گر مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی مثبت درست در مقابل تمام خروجی‌های مثبت و «اختصاصی‌بودن» بیان‌گر مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی منفی درست در مقابل تمام خروجی‌های منفی می‌باشد. سطح زیر منحنی مشخصه‌ی عملکرد سیستم به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های پتانسیل معدنی استفاده می‌شود. مقدار AUC بین صفر و یک است به‌طوری که هر چه مقدار AUC بالاتر باشد مدل از کارایی بالاتری برخوردار خواهد بود.

همان‌طور که در شکل ۳- ۱۹ مشاهده می‌شود در مورد مدل پتانسیل عصبی - فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته، ۷۹ درصد ذخایر معدنی در مساحتی حدود ۲۱ درصد از منطقه‌ی مورد مطالعه (شکل ۳- ۱۹ - الف) و همچنین در مورد مدل پتانسیل عصبی - فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته، ۶۳ درصد ذخایر معدنی در مساحتی حدود ۳۷ درصد از منطقه‌ی مورد مطالعه (شکل ۳- ۱۹ - ب) پیش‌بینی شده‌اند. همچنین، مقدار AUC برای مدل‌های پتانسیل عصبی - فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته و گسسته به‌ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۸۶ می‌باشد (شکل ۳- ۱۹ - پ). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل پتانسیل عصبی - فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته عملکرد بهتری نسبت به مدل پتانسیل عصبی - فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته دارد.

^۱ Sensitivity

^۲ 1-Specificity



شکل ۳-۱۹: نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت و مشخصه‌ی عمل‌کرد سیستم برای مدل‌های پتانسیل عصبی - فازی؛ الف) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای مدل پتانسیل عصبی - فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته، ب) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای مدل پتانسیل عصبی - فازی با تولیدشده استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته و پ) نمودار برای مشخصه‌ی عمل‌کرد سیستم مدل‌های پتانسیل عصبی - فازی تولیدشده

۳-۵ تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از توابع ریاضیاتی

برای تلفیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته‌ی تولیدشده در این تحقیق (شکل ۳-۴) جهت تعیین اهداف اکتشافی، می‌توان از توابع مختلف ریاضیاتی استفاده کرد (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008; Nykänen et al., 2015; Yousefi and Carranza, 2015b). در این تحقیق، نقشه‌های شاهد پیوسته، به‌منظور تولید مدل پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در کمربند افیولیتی سبزوار، با استفاده از توابع گامای فازی، میانگین هندسی و شاخص هم‌پوشانی داده‌محور ترکیب شده و سپس به‌وسیله‌ی رسم نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت و مشخصه‌ی عملکرد سیستم مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند.

۳-۵-۱ تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از عملگر گامای فازی

از آنجایی که در این تحقیق وزن دهی به مقادیر نقشه‌های شاهد با استفاده از تابع لجستیکی صورت گرفته و این وزن‌ها در محدوده‌ی [۰ و ۱] قرار دارند، بنابراین می‌توان آن‌ها را به‌عنوان نقشه‌های شاهد فازی در نظر گرفت و با استفاده از عملگرهای فازی با یکدیگر ترکیب نمود. برای این منظور، هر یک از عملگرهای فازی را می‌توان با توجه به نوع کانی‌سازی مورد جستجو و هدف تلفیق مورد استفاده قرار داد. از آنجایی که مناطق هدف برای اکتشافات تفصیلی‌تر ذخایر کرومیت تپ انبانه‌ای باید نشان‌دهنده‌ی ویژگی‌های شاهد مکمل باشند که فعل و انفعالات شرایط مساعد برای تشکیل ذخایر معدنی را نشان می‌دهند، در نتیجه چنین مناطقی باید دارای ارزش بالای اکتشافی باشند. برای نیل به این هدف، از عملگر گامای فازی جهت تلفیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته طبق رابطه‌ی زیر استفاده شده است.

$$\mu_C = [1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)]^\gamma \times [\prod_{i=1}^n \mu_i]^{1-\gamma} \quad (3-20)$$

که در آن؛ μ_C ، مقدار نهایی پتانسیل برای هر سلول (پیکسل) واحد، μ_i ، امتیاز فازی سلول i امین نقشه‌ی شاهد و γ ، پارامتری در محدوده‌ی [۰ و ۱] است. از آنجایی که برای اهداف پتانسیل‌یابی، مقادیر گامای ۰/۹ به بالا منجر به تولید مدل‌های کارآمدتری می‌شود (Bonham-Carter, 1994)، در این تحقیق نیز از گامای ۰/۹ به‌منظور تولید مدل پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت انبانه‌ای استفاده شد (شکل ۳-۲۰-الف). مقادیر N_d (شکل ۳-۲۰-ب) و AUC (شکل ۳-۲۰-پ) برای مدل پتانسیل تولیدشده به‌ترتیب برابر با ۳ و ۹۳ هستند که عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهند.

۳-۵-۲ تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از عملگر میانگین هندسی

عملگر میانگین هندسی، یک تابع تصمیم‌گیری چند معیاره است که به‌منظور تلفیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار برای تولید مدل پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملگر میانگین هندسی برای تلفیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار به‌صورت زیر نوشته می‌شود (Yousefi and Carranza, 2015b):

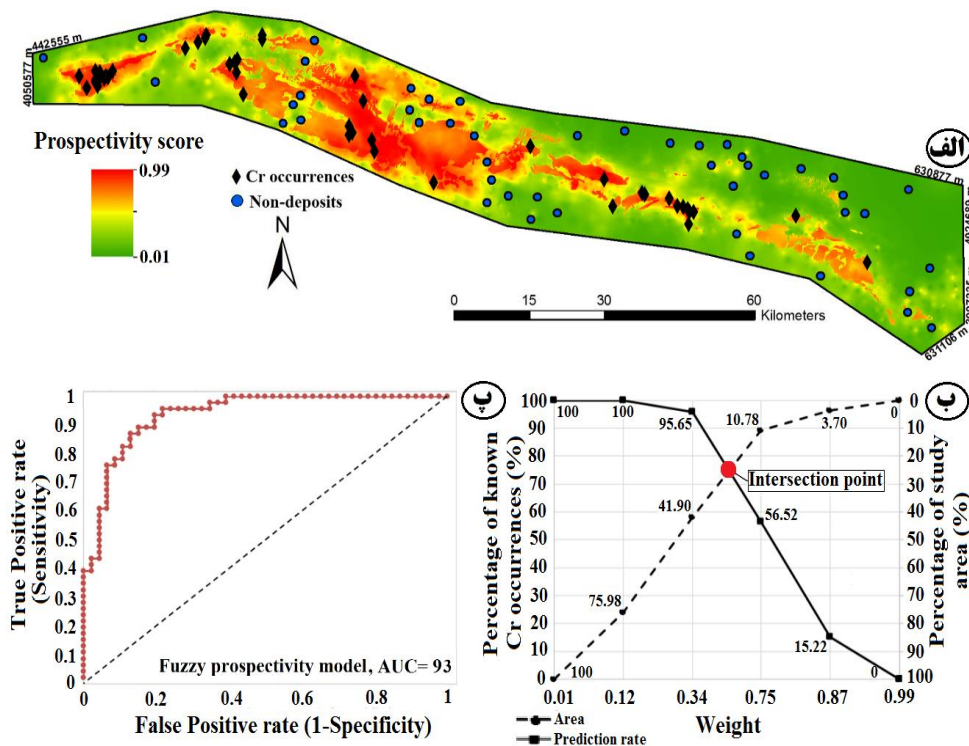
$$G_A(F_1, F_2, \dots, F_n) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n F_i} = \sqrt[n]{F_1 F_2 \dots F_n} \quad (3-21)$$

این رابطه برای هر سلول از منطقه‌ی مورد مطالعه بوده که در آن؛ G_A میانگین هندسی مجموعه داده‌های اکتشافی، F_i مقدار عددی وزن نقشه‌ی شاهد i ام در سلول مورد نظر و n تعداد نقشه‌های

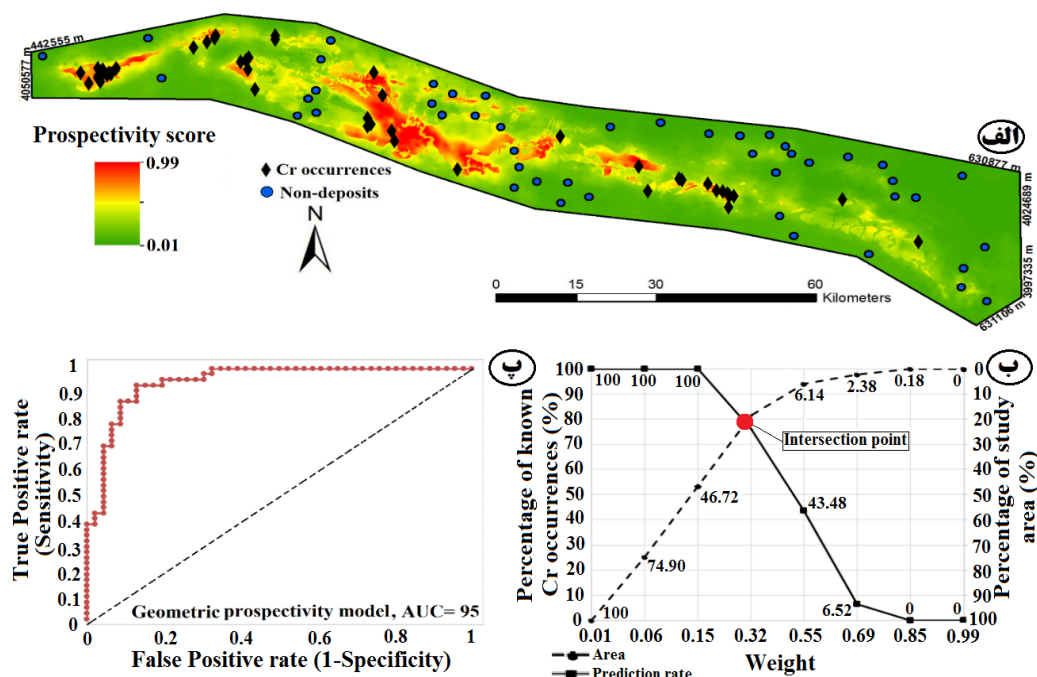
شاهد است. در این تحقیق، رابطه‌ی میانگین هندسی برای کانی‌سازی کرومیت تیپ انبانه‌ای در هر سلول از منطقه‌ی مورد مطالعه با توجه به نقشه‌های شاهد مورد استفاده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$G_{Chromite}(F_{HR}, F_{FD}, F_{GS}) = \sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 F_i} = \sqrt[3]{F_{HR} F_{FD} F_{GS}} \quad (22-3)$$

که در آن؛ F_{HR} ، F_{FD} و F_{GS} به ترتیب امتیاز فازی وزن دار مقادیر داده‌های اکتشافی متناظر با نقشه‌های شاهد فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره می‌باشند. پس از محاسبه‌ی مقادیر $G_{Chromite}$ برای هر پیکسل در منطقه‌ی مورد مطالعه، این مقادیر به منظور تولید مدل پتانسیل معدنی کانی‌سازی کرومیت تیپ انبانه‌ای به نقشه تبدیل شدند (شکل ۳-۲۱-الف). مقادیر N_d (شکل ۳-۲۱-ب) و AUC (شکل ۳-۲۱-پ) برای مدل پتانسیل تولیدشده به ترتیب برابر با $3/76$ و $0/95$ می‌باشند که عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهند.



شکل ۳-۲۰: الف) مدل پتانسیل معدنی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته‌ی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره (شکل ۳-۴) برای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای، ب) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای مدل پتانسیل فازی، پ) نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم برای مدل پتانسیل تولیدشده



شکل ۳-۲۱: الف) مدل پتانسیل معدنی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته‌ی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره (شکل ۳-۴) برای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای، ب) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای مدل پتانسیل میانگین هندسی و پ) نمودار مشخصه‌ی عمل کرد سیستم برای مدل پتانسیل تولیدشده

۳-۵-۳ تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از روش شاخص هم‌پوشانی داده‌محور

روش هم‌پوشانی شاخص چندکلاسه^۱ یک روش مدل‌سازی دانش‌محور است که در آن نقشه‌های شاهد به کلاس‌های دلخواه طبقه‌بندی شده و سپس با توجه به وزن‌های تخصیص داده‌شده به هر نقشه‌ی شاهد بر اساس قضاوت و نظر کارشناسی، تلفیق می‌شوند. هر یک از Z امین الگوها (کلاس‌ها) از نقشه‌ی شاهد i ام دارای یک وزن S_{ij} به‌منظور نمایش میزان وابستگی به ذخیره‌ی مورد جستجو می‌باشند. اهمیت نسبی یک نقشه‌ی شاهد در مقایسه با دیگر نقشه‌های شاهد به‌وسیله‌ی تخصیص وزن‌های W_i کنترل می‌شود. نقشه‌های شاهد وزن دار سپس با استفاده از معادله‌ی (۴-۱۹) با هم ترکیب می‌شوند که در واقع میانگین وزن‌ها (\bar{S}) را برای هر پیکسل محاسبه می‌کند (Bonham-Carter, 1994):

$$\bar{S} = \frac{\sum_i^n S_{ij} W_i}{\sum_i^n W_i} \quad (3-23)$$

^۱ Multi-class index overlay

رابطه‌ی (۳-۲۳) در مدل‌سازی دانش‌محور پتانسیل معدنی جهت تلفیق نقشه‌های شاهد کلاسه‌بندی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Bonham-Carter, 1994; Carranza, 2008). در این تحقیق، تخصیص وزن به مقادیر پیوسته‌ی نقشه‌های شاهد، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته‌شده و همچنین بدون گسسته‌سازی مقادیر داده‌های اکتشافی معرف کانی‌سازی به فواصل دلخواه صورت گرفته است (شکل ۳-۴). علاوه بر این، وزن‌های تخصیص یافته به هر یک از نقشه‌های شاهد، با توجه به قابلیت آن‌ها در پیش‌گویی اندیس‌های شناخته‌شده بر اساس نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت است. بنابراین، اگرچه انتخاب مجموعه داده‌ها و توابع ریاضیاتی همیشه به صورت دانش‌محور است، اما معادله‌ی (۳-۲۳) می‌تواند به صورت زیر به مدل هم‌پوشانی شاخص چندکلاسه‌ی داده‌محور تبدیل شود (Yousefi and Carranza, 2016):

(۳-۲۴)

$$DM_{IO} = \frac{\sum_i^n W_{vi} W_i}{\sum_i^n W_i}$$

برای مطالعه‌ی حاضر، معادله‌ی (۳-۲۴) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$DM_{IO} = \frac{WV_{HR}W_{HR} + WV_{FD}W_{FD} + WV_{GS}W_{GS}}{W_{HR} + W_{FD} + W_{GS}} \quad (۳-۲۵)$$

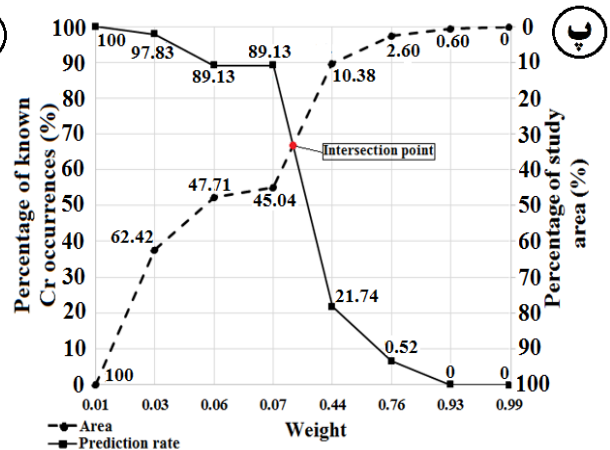
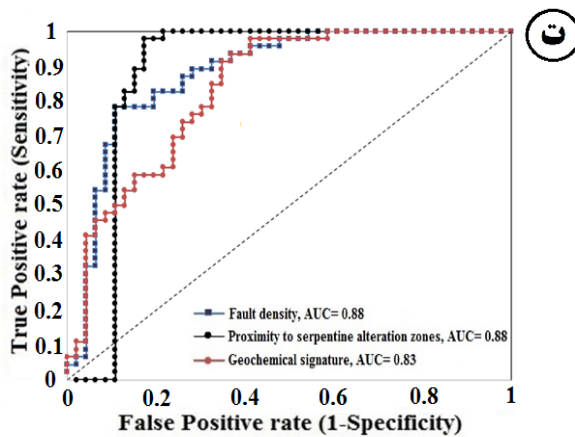
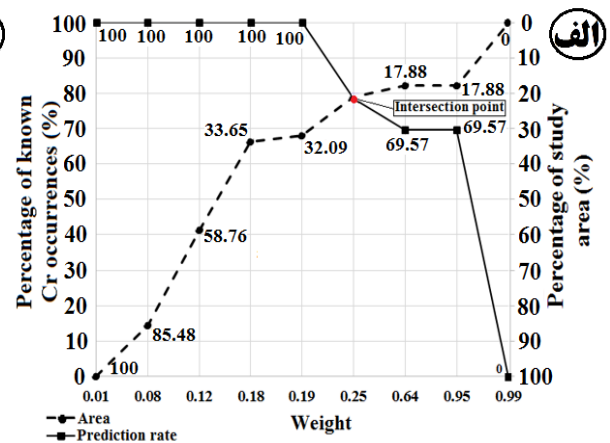
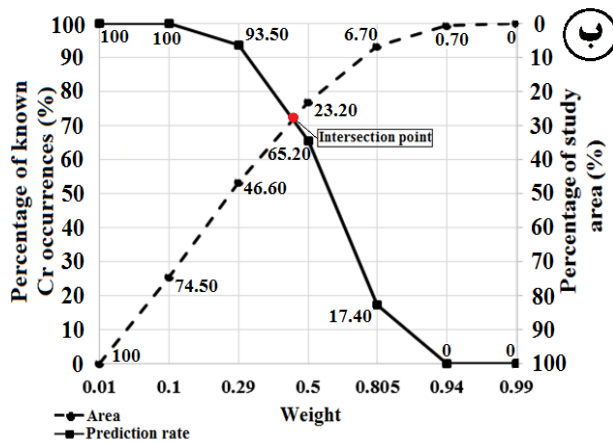
که در آن؛ W_{HR} ، W_{FD} و W_{GS} به ترتیب وزن‌های مربوط به نقشه‌های شاهد فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره هستند که بر اساس نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت مربوط به آن‌ها تخصیص داده می‌شوند (شکل ۳-۲۲). همچنین WV_{HR} ، WV_{FD} و WV_{GS} ، وزن‌های مقادیر شاهد پیکسل‌ها در نقشه‌های شاهد مربوطه می‌باشند که به صورت پیوسته تخصیص داده شده‌اند.

مدل پتانسیل هم‌پوشانی شاخص چندکلاسه‌ی داده‌محور تولیدشده با استفاده از معادله‌ی (۳-۲۵) برای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در شکل ۳-۲۳ نشان داده شده است. همچنین، پارامترهای مستخرج از نمودارهای نرخ پیش‌بینی-مساحت و مشخصه‌ی عملکرد سیستم مربوط به هر یک از نقشه‌های شاهد و همچنین مدل پتانسیل تولیدشده در جدول ۳-۳ نشان داده شده است. بر اساس این جدول، مقادیر N_d و AUC مربوط به همه‌ی نقشه‌های شاهد به ترتیب بالاتر از ۱ و ۰/۵ می‌باشند. بنابراین همه‌ی آن‌ها به عنوان شاخص‌های با اهمیت محسوب شده و می‌توان آن‌ها را برای هدف تلفیق مورد استفاده قرار داد. علاوه بر این، در مدل پتانسیل تولیدشده مقادیر N_d و AUC به ترتیب برابر ۳/۵۴ و ۰/۹۲ بوده که

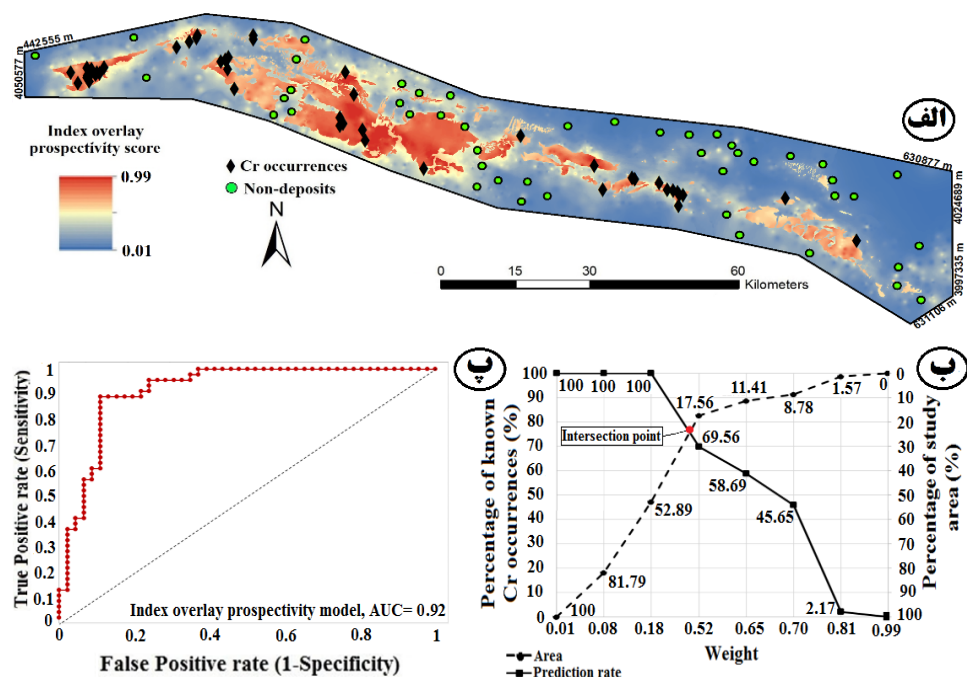
نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای مدل پتانسیل تولیدشده است و در نتیجه می‌تواند برای انتخاب مناطق هدف به‌منظور اکتشافات تفصیلی‌تر ذخایر کرومیت تپ انبانه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۳-۳: پارامترهای تعیین‌شده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت و مشخصه‌ی عملکرد سیستم برای نقشه‌های شاهد و مدل پتانسیل تولیدشده

نقشه‌های شاهد و مدل پتانسیل	نرخ پیش‌بینی (%)	مساحت اشغال‌شده (%)	N _d	وزن (W)	AUC
فاصله از سنگ میزبان	۷۸	۲۲	۳/۵۴	۱/۲۶	۰/۸۸
چگالی گسل	۷۲	۲۸	۲/۵۷	۰/۹۴	۰/۸۳
اثر ژئوشیمیایی چندعنصره	۶۶	۳۴	۱/۹۴	۰/۶۶	۰/۸۸
مدل پتانسیل	۷۸	۲۲	۳/۵۴	۱/۲۶	۰/۹۲



شکل ۳-۲۲: (الف) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای نقشه‌ی شاهد فاصله از سنگ میزبان، (ب) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای نقشه‌ی شاهد چگالی گسل، (پ) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای نقشه‌ی شاهد اثر ژئوشیمیایی چندعنصره و (ت) نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم برای نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته



شکل ۳-۲۳: الف) مدل پتانسیل هم‌پوشانی شاخص چندکلاسه‌ی داده‌محور تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته‌ی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره (شکل ۳-۴) برای ذخایر کرومیت تیپ انبان‌های، ب) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای مدل پتانسیل هم‌پوشانی شاخص چند کلاسه‌ی داده‌محور و پ) نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم برای مدل پتانسیل تولیدشده

۳-۶ روش جنگل تصادفی

درخت تصمیم^۱، یکی از ابزارهای کارآمد به‌منظور طبقه‌بندی الگوها و یا تخمین متغیرهای هدف است ولی از آن جایی که مستعد برازش اضافی بوده و قدرت تصمیم‌گیری کمی دارد از روش جنگل تصادفی استفاده می‌شود. روش جنگل تصادفی که توسط براینمن (۲۰۰۱) ارائه شد، ترکیبی از درخت‌های تصمیم هرس‌نشده است که در آن هر درخت به‌وسیله‌ی مجموعه‌ی متفاوتی از الگوهای موجود ایجاد می‌شود. به‌عبارت دیگر برای ایجاد هر درخت از تکنیک کیسه‌بندی بوت‌استرپ استفاده می‌شود. تکنیک کیسه‌بندی بوت‌استرپ برای ایجاد نمونه‌های آموزشی به‌کار می‌رود که در آن نمونه‌گیری مجدد تصادفی و همراه با جای‌گذاری از مجموعه‌ی بردارهای ویژه انجام می‌گیرد. بنابراین، به‌کار بردن این تکنیک سبب می‌شود که از تطابق درخت‌های مختلف جلوگیری به‌عمل آمده و دقت مدل نیز افزایش یابد (Breiman, 2001). از طرفی دیگر، روش جنگل تصادفی برای ایجاد یک درخت از بهترین متغیرها یا نقاط تقسیم در داخل زیرمجموعه‌های متغیرها استفاده می‌کند که سبب پایین آوردن

^۱ Decision tree

میزان تطابق درخت‌های مختلف و کاهش خطای کلی مدل می‌شود. الگوریتم ساخت یک مدل جنگل تصادفی با n درخت از یک نمونه‌ی آموزشی^۱ با N مشاهده و M متغیر پیش‌گو به این صورت است:

الف) مجموعه داده‌ی اصلی به دو قسمت نمونه‌ی آموزشی و نمونه‌ی اعتبارسنجی^۲ تقسیم‌بندی می‌شود. سپس، از نمونه‌ی آموزشی یک نمونه‌ی تصادفی با جای‌گذاری (نمونه‌ی بوت‌استرپ) به حجم N انتخاب می‌شود که دو سوم این نمونه‌ی تصادفی ($N' = \frac{2}{3}N$) به عنوان نمونه‌ی یادگیری^۳ (LS) و بقیه به عنوان نمونه‌ی خارج از کیسه^۴ (OOB) جدا می‌گردد. درخت‌ها با مشاهدات LS ساخته می‌شوند و از OOB برای پیش‌بینی (سنجش ناخالصی درخت) استفاده می‌شود.

ب) برای نمونه‌ی بوت‌استرپ انتخاب‌شده یک درخت طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)^۵ با استفاده از الگوریتم افزایشی بازگشتی ایجاد می‌شود که برای انشعاب در هر گره‌ی این درخت، تنها یکی از m متغیر انتخاب‌شده به صورت تصادفی استفاده می‌شود.

ج) الگوریتم افزایشی بازگشتی آن‌قدر ادامه می‌یابد تا درخت به بزرگ‌ترین اندازه‌ی خود برسد بدون آن‌که درخت هرس شود.

د) مراحل ۱ تا ۳، n بار تکرار می‌شوند تا یک جنگل تصادفی ساخته شود (Breiman, 2001). تعداد درخت‌ها (n) و تعداد متغیرها (m) دو پارامتر مهم جنگل تصادفی هستند که قابل تغییر بوده و توسط کاربر تعیین می‌شوند. انتخاب رایج برای n ، ۱۰۰۰ درخت و برای m ، $\frac{M}{3}$ (برای مدل رگرسیونی) و \sqrt{M} (برای مدل طبقه‌بندی) می‌باشد (Breiman, 2001). روند کلی الگوریتم جنگل تصادفی در شکل ۳-۲۴ ارائه شده است. در این روش نمونه‌ی تصادفی S_n که مستقل از نمونه‌های تصادفی S_1, \dots, S_{n-1} است برای درخت n ام تولید می‌شود. سپس، درخت‌های رگرسیونی $1, 2, \dots, n$ با استفاده از نمونه‌های بوت‌استرپ رشد می‌کنند. زمانی که درخت‌ها ساخته شدند، نمونه‌های OOB در درخت‌های ساخته‌شده قرار گرفته و عمل پیش‌بینی انجام می‌پذیرد. خطای پیش‌بینی بر اساس نمونه‌های OOB به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{y}(X_i) - y_i]^2 \quad (۳-۲۶)$$

^۱ Training data

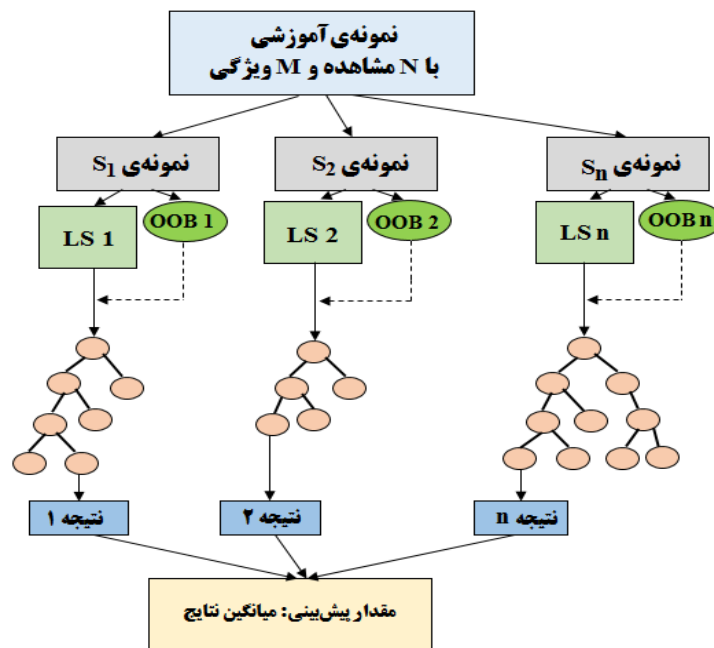
^۲ Validation data

^۳ Learning sample (LS)

^۴ Out-of-bag (OOB)

^۵ Classification and regression tree (CART)

که در آن؛ X بردار ویژگی، $\hat{Y}(X_i)$ نتایج محاسباتی، y_i نتایج مشاهداتی و N تعداد مشاهدات نمونه‌ی OOB است. هم‌چنین با توجه به شکل ۳-۲۴، با ورود یک بردار ویژگی X به‌داخل جنگل تصادفی، این بردار وارد تمامی درخت‌ها شده و در گره‌های پایانی (برگ‌ها) قرار می‌گیرد. سپس، بردار ورودی X در هر کدام از درخت‌ها مقداری را به‌خود اختصاص می‌دهد. در نهایت، میانگین همه‌ی این مقادیر اختصاص یافته، مقدار پیش‌بینی جنگل تصادفی برای بردار ورودی X خواهد بود (Breiman, 2001).



شکل ۳-۲۴: روند کلی الگوریتم RF برای مدل رگرسیونی (Guo et al., 2011)

در مدل جنگل تصادفی، تعیین اهمیت متغیرهای پیش‌گو^۱ یکی از مهم‌ترین مسائلی است که با استفاده از شاخص‌های مختلف انجام می‌گیرد. در این تحقیق از شاخص اهمیت جای‌گشتی^۲ به‌منظور رتبه‌بندی متغیرهای پیش‌گو بر اساس اهمیت آن‌ها در اثرگذاری روی پاسخ استفاده شده است. محاسبه‌ی این شاخص با استفاده از نمونه‌های OOB انجام می‌شود. بدین صورت که در هر درخت ابتدا اندازه‌ی ناخالصی روی مشاهدات OOB محاسبه و سپس مقادیر متغیر پیش‌گوی m_i در مشاهدات OOB به‌طور تصادفی جابه‌جا^۳ شده و اندازه‌ی ناخالصی درخت روی مقادیر جابه‌جاشده محاسبه می‌شود. اندازه‌ی اهمیت متغیر m_i در هر درخت، اختلاف بین این دو اندازه‌ی ناخالصی است و میانگین این مقادیر، شاخص اهمیت جای‌گشتی است. بنابراین اگر m_i متغیر بااهمیتی باشد جابه‌جاشدن مقادیر آن به‌طور تصادفی منجر به افزایش ناخالصی درخت می‌شود در حالی که اگر متغیر تأثیرگذاری نباشد، تغییری در ناخالصی ایجاد نمی‌شود (نوری و همکاران، ۱۳۹۰).

^۱ Predictive variable importance

^۲ Permutation importance index

^۳ Permute

۳-۶-۱ تولید مدل پتانسیل جنگل تصادفی در کمر بند افیولیتی سبزوار

در این تحقیق، مدل پتانسیل جنگل تصادفی با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته‌ی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره (شکل ۳-۴) طبق سه مرحله‌ی زیر تهیه شد:

الف- استخراج نمونه‌های آموزشی و اعتبارسنجی: در روش جنگل تصادفی برای

آموزش لازم است که موقعیت اندیس‌ها و معادن موجود در منطقه و همچنین تعدادی منطقه‌ی فاقد کانی‌زایی و ذخیره مشخص باشد. تعداد موقعیت‌های فاقد ذخیره باید با تعداد اندیس‌های شناخته‌شده برابر باشد (Carranza and Laborte, 2016a, b, c; Nykanen et al., 2015). برای این منظور درست از همان نقاط مستخرج برای مدل‌های پتانسیل عصبی- فازی استفاده شد که شامل دو بخش آموزشی و اعتبارسنجی با نسبت ۳۰:۷۰ درصد می‌باشند (شکل ۳-۱۵). نمونه‌ی اعتبارسنجی هیچ نقشی در آموزش جنگل تصادفی ندارد و فقط به منظور ملاک ارزیابی عملکرد تعمیم‌دهی جنگل تصادفی، زمانی که داده‌های جدیدی پردازش می‌شوند، مورد استفاده قرار گرفته است.

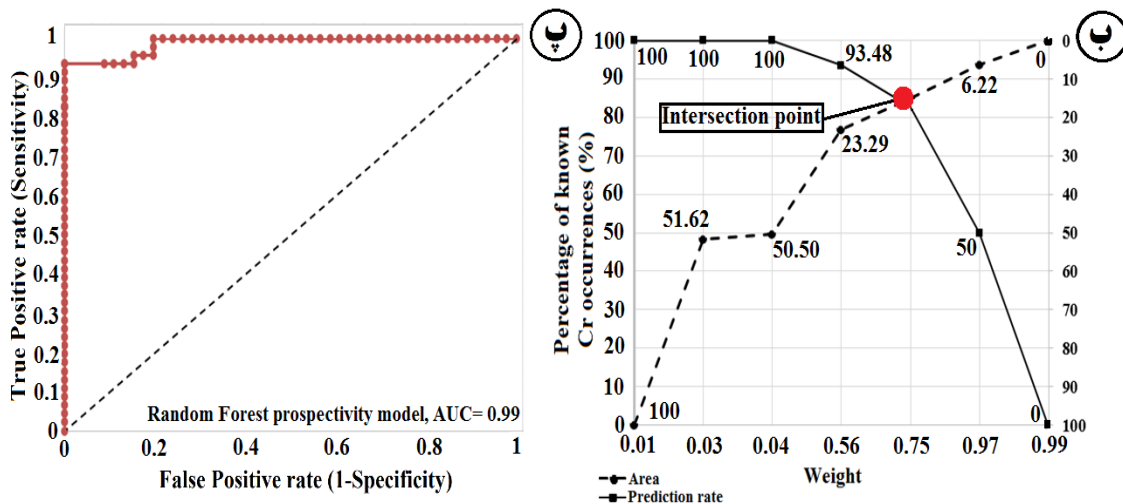
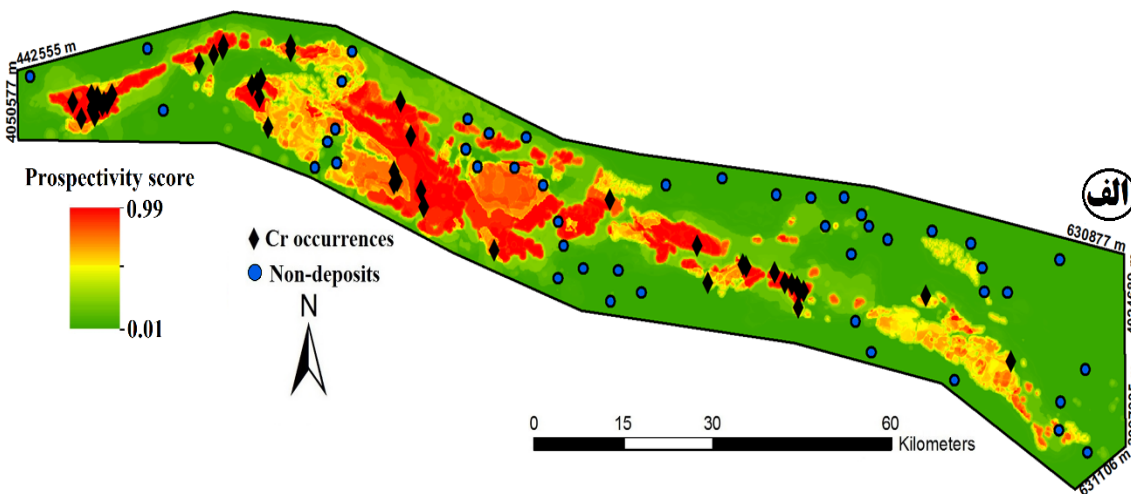
ب- تعیین پارامترهای بهینه: مقادیر نقشه‌های شاهد شبکه‌بندی شده در هر پیکسل از منطقه‌ی

مورد مطالعه به منظور تشکیل بردارهای ویژگی با یکدیگر ترکیب شدند. همچنین، متغیر هدف با اختصاص دادن ارزش یک به موقعیت اندیس‌های شناخته‌شده و ارزش صفر به موقعیت‌های فاقد ذخیره کدگذاری شده‌اند. علاوه بر این، بیش‌برازش یک مسئله‌ی مهم می‌باشد که منجر به عملکرد ضعیف تعمیم‌دهی جنگل تصادفی می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، برای جنگل‌های ۱ تا ۱۰، الگوریتم جنگل تصادفی ده مرتبه تکرار و در هر تکرار مقدار MSE برای نمونه‌ی اعتبارسنجی محاسبه شد. سپس از بین ده مقدار محاسبه‌شده برای MSE، کوچک‌ترین آن برای هر جنگل انتخاب شد (جدول ۳-۴).

ج- پیش‌گویی: جنگلی که بهترین عملکرد تقریب تابع، کوچک‌ترین مقدار MSE را برای

نمونه‌ی اعتبارسنجی ارائه دهد، به منظور پردازش بردارهای ویژگی مربوط به کل گرید کمر بند افیولیتی سبزوار استفاده شد. بنابراین، مدل پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در کمر بند افیولیتی سبزوار با استفاده از جنگل شماره‌ی ۳ تهیه شد (شکل ۳-۲۵-الف). مقادیر N_d و AUC برای مدل پتانسیل تولیدی به ترتیب برابر با ۵/۶۷ و ۰/۹۹ می‌باشند که عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهند. شکل ۳-۲۶-الف، نمودار خطای MSE در برابر تعداد درخت‌های تصمیم را برای جنگل شماره‌ی ۳ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود میزان خطای مدل‌سازی با افزایش درخت‌های تصمیم کاهش می‌یابد، به نحوی که در درخت تصمیم اولی میزان خطای

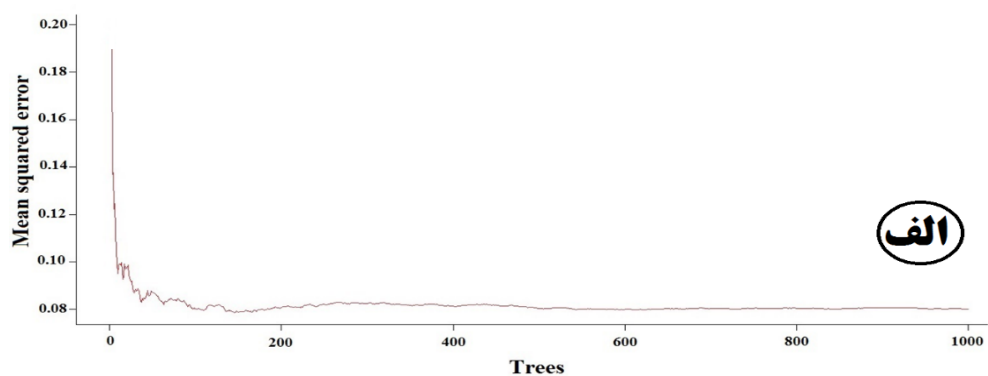
MSE برابر با ۰/۱۸۸ و هنگامی که تعداد درخت‌های تصمیم برابر با ۱۰۰۰ می‌گردد، میزان خطا برابر با ۰/۰۸ می‌شود. هم‌چنین شکل ۳-۲۶-ب، اهمیت متغیرهای پیش‌گو را بر اساس شاخص اهمیت جای‌گشتی برای جنگل شماره‌ی ۳ نشان می‌دهد. بر اساس این شاخص، فاصله‌ی از سنگ میزبان و چگالی گسل به ترتیب به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای پیش‌گو تعیین شدند. در این تحقیق، کلیه‌ی تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار R (R development core team, 2008) و به‌کمک بسته‌ی randomForest (Liaw and Wiener, 2002) انجام گرفت.



شکل ۳-۲۵: مدل پتانسیل جنگل تصادفی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته‌ی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره (شکل ۳-۴) برای ذخایر کرومیت تیب انبانه‌ای، نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت برای مدل پتانسیل جنگل تصادفی و (پ) نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم برای مدل پتانسیل تولیدشده

جدول ۳-۴: کوچک‌ترین مقدار میانگین مربعات خطای مجموعه‌ی اعتبارسنجی برای هر جنگل با تعداد متغیرها و درخت‌های متفاوت به‌منظور ایجاد مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته

مقدار خطا (MSE)	تعداد درخت‌ها (n)	تعداد متغیرها (m)	جنگل
۰/۱۴۳۸	۵۰۰	۲	۱
۰/۱۵۵۳	۵۰۰	۳	۲
۰/۱۴۱۳	۱۰۰۰	۲	۳
۰/۱۵۲۲	۱۰۰۰	۳	۴
۰/۱۴۶۴	۱۵۰۰	۲	۵
۰/۱۵۰۸	۱۵۰۰	۳	۶
۰/۱۴۳۰	۲۵۰۰	۲	۷
۰/۱۴۳۴	۵۰۰۰	۲	۸
۰/۱۴۳۴	۷۵۰۰	۲	۹
۰/۱۴۳۸	۱۰۰۰۰	۲	۱۰

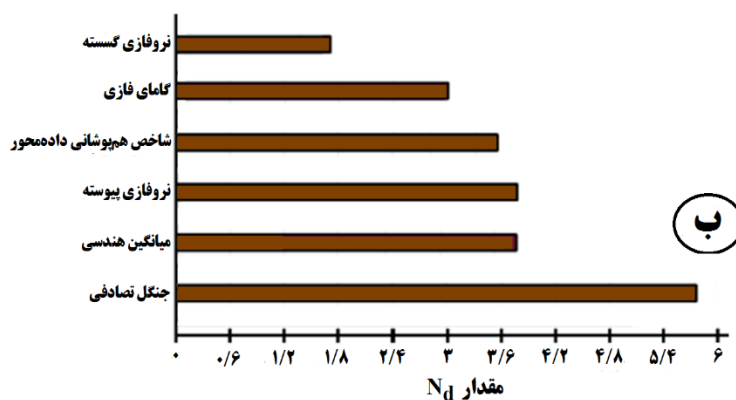
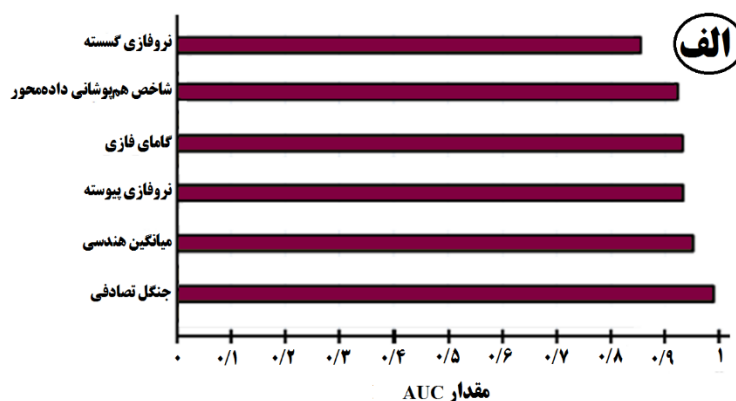


شکل ۳-۲۶: روند تکاملی منحنی میانگین مربعات خطا برای داده‌های شاهد اکتشافی وزن‌دار پیوسته به‌منظور ایجاد مدل پتانسیل جنگل تصادفی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد پیوسته؛ (ب) اهمیت هر متغیر در پیش‌بینی مدل پتانسیل

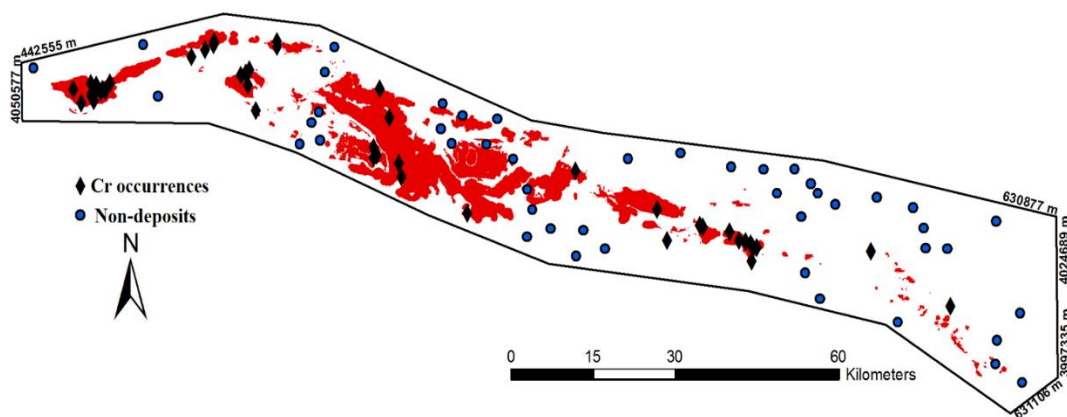
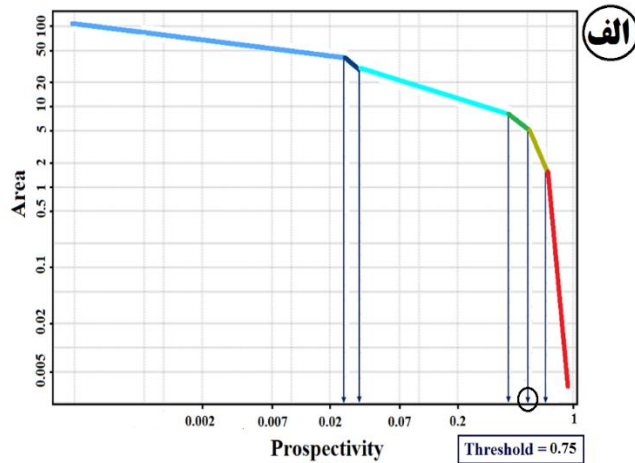
۷-۳ مقایسه‌ی مدل‌ها و تعیین مرز اهداف اکتشافی

در این تحقیق به روش‌های مختلف (شکل ۳-۲۷) مدل پتانسیل معدنی کانی‌زایی کرومیت در منطقه‌ی سبزوار تهیه شد. برای تعیین بهترین مدل پتانسیل معدنی منطقه جهت ادامه‌ی فعالیت‌های اکتشافی، مقادیر AUC و N_d برای همه‌ی روش‌های به‌کار رفته محاسبه شد (شکل ۳-۲۷). مطابق این شکل، همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل پتانسیل معدنی حاصل از روش جنگل تصادفی با اختصاص بیش‌ترین مقادیر AUC و N_d به‌عنوان مناسب‌ترین مدل جهت تهیه‌ی نقشه‌ی پتانسیل مطلوب انتخاب شد.

برای تفسیر نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام‌شده، و به‌منظور کلاسه‌بندی نتایج مدل پتانسیل جنگل تصادفی به دو کلاس امیدبخش و غیرمطلوب از نمودار فرکتالی عیار- مساحت (Cheng et al., 1994) استفاده شد. شکل ۳-۲۸ الف نمودار مذکور را برای مدل پتانسیل جنگل تصادفی نشان می‌دهد که بر اساس آن یک حد آستانه‌ای برای تعیین اهداف اکتشافی مشخص شد. بر این مبنا نقشه‌ی اهداف اکتشافی کمربند افیولیتی سبزوار تهیه شد (شکل ۳-۲۸ ب).

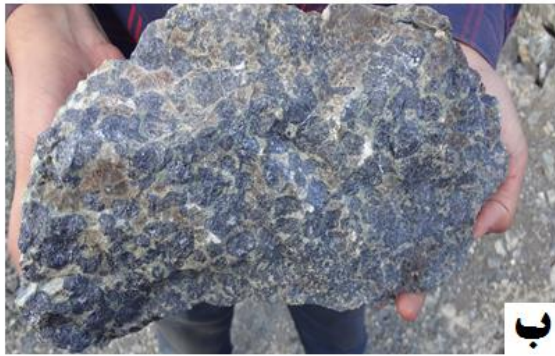


شکل ۳-۲۷ الف) سطح زیر نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم (AUC) برای مدل‌های مختلف، ب) مقدار چگالی نرمال شده (N_d) برای مدل‌های مختلف



شکل ۳- ۲۸: الف) نمودار فرکتالی عیار- مساحت که بر اساس آن حد آستانه‌ای برای تعیین اهداف اکتشافی مشخص شد و ب) اهداف اکتشافی تعیین شده برای انجام اکتشافات تفصیلی تر ذخایر کرومیت انبانه‌ای؛ پلی‌گون‌های قرمز نمایان‌گر اهداف اکتشافی هستند.

پس از انجام مطالعات نرم‌افزاری و تهیه نقشه‌ی نهایی امیدبخش معدنی، پیمایش‌های صحرایی در چند منطقه‌ی کمربند افیولیتی سبزوار انجام شد. بازدیدهای صحرایی از منطقه‌ی غربی (فرومد)، میانی (جغتای) و شرقی (سبزوار و شرق آن) صورت گرفت. کانی‌سازی در مناطق بازدیدشده مؤید کانی‌زایی کرومیت در مناطق مذکور بوده است. در شکل ۳-۲۹- ب، کانی‌زایی کرومیت به صورت بیضوی‌هایی در یک زمینه‌ی سرپانتینی دیده می‌شود. هم‌چنین در شکل ۳-۲۹- ت، کانی‌زایی کرومیت در داخل دونیت سرپانتینی‌شده‌ی منطقه‌ی چشمه‌پلنگان جغتای مشاهده شده است.



شکل ۳-۲۹: الف) رخنمون آمیزه‌ی رنگین در منطقه‌ی سبزوار، ب) توده‌های چگال بیضوی شکل کرومیت در یک زمینه‌ی سرپانتینی، پ) واحدهای پریدوتیتی سرپانتینیزه، ت) کانی‌سازی کرومیت در داخل دونیت سرپانتینی‌شده، ث) عدسی کرومیت گسل‌خورده، ج) عدسی کرومیت واقع در گسل معکوس، چ) کانی‌سازی تکتونیزه کرومیت در سنگ میزبان آن و ح) کرومیت، دونیت و دونیت سرپانتینیزه واقع شده در یک منطقه‌ی گسلش

فصل ۴: توسعه نمودار نرخ پیش بینی - مساحت بهبود یافته

برای ارزیابی مدل های پتانسیل معدنی

۴-۱ مقدمه

در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، از موقعیت‌های ذخایر شناخته‌شده (معادن فعال و اندیس‌های معدنی) برای ارزیابی عملکرد مدل‌های پتانسیل استفاده می‌شود که این کار به وسیله‌ی قراردادن موقعیت‌های ذخایر شناخته‌شده بر روی نقشه‌ی پتانسیل معدنی کلاسه‌بندی شده صورت می‌گیرد. بنهام کارتر و همکاران (۱۹۸۹)، نسبت نرخ پیش‌بینی نقاط معدنی به وسیله‌ی هر کلاس شاهد به مساحت دربرگیرنده توسط آن کلاس، با توجه به مساحت کل منطقه، را به منظور اندازه‌گیری احتمال کشف ذخایر معدنی به کار بردند. یوسفی و کارانزا (۲۰۱۵) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت را توسعه دادند که در آن از درصد ذخایر معدنی پیش‌بینی شده توسط کلاس‌های پتانسیل و مساحت‌های دربرگیرنده توسط هر یک از کلاس‌های پتانسیل به منظور کمی کردن اهمیت نسبی مدل‌های پتانسیل مختلف استفاده می‌شود. با توسعه‌ی نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت، نرخ پیش‌بینی و مساحت دربرگیرنده‌ی اهداف اکتشافی در ارزیابی مدل‌های پتانسیل مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین، اگر دو مدل پتانسیل مختلف با مساحت‌های دربرگیرنده‌ی متفاوت اما با امتیاز پتانسیل یکسان اهداف اکتشافی را مشخص سازند در این صورت کارایی مدلی که دارای مناطق هدف کوچک‌تر می‌باشد، بالاتر است.

موضوع دیگری که در ارزیابی نقشه‌های شاهد مکانی و مدل‌های پتانسیل وجود دارد، مشارکت نقاط فاقد ذخیره می‌باشد. بنابراین، مناطق هدف تولیدشده با روش مدل‌سازی پتانسیل معدنی باید انطباق کم‌تری با موقعیت‌های فاقد ذخیره، که نهشته‌شدن ذخایر معدنی در آن‌ها به دلیل محیط‌های نامناسب زمین‌شناسی و فقدان شاخص‌های اکتشافی غیرمحمول است، داشته باشند. در این رابطه، محققان نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم را توسعه دادند. در نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم، هر چند ارتباط مکانی نقاط معدنی کرومیت و نقاط فاقد ذخیره با اهداف اکتشافی تولیدشده، به منظور ارزیابی عملکرد کلی مدل‌های پتانسیل در تعیین دقیق مناطق اکتشافی، در نظر گرفته شده است، اما مساحت دربرگیرنده‌ی اهداف اکتشافی، که یک موضوع مهم بوده و باید در ارزیابی مدل‌های پتانسیل در نظر گرفته شود، نادیده گرفته شده است. در این تحقیق، به منظور غلبه بر نقطه‌ضعف‌های ذکر شده در بالا، نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته^۱ توسعه داده شد. این نمودار یک روش بهبودیافته را در مقایسه با سایر روش‌های موجود ارزیابی کارایی نقشه‌های شاهد مکانی و مدل‌های پتانسیل، مانند نمودار مشخصه‌ی عملکرد سیستم، نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت و منحنی‌های نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی، پیشنهاد می‌دهد. مزیت نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته نسبت به روش‌های موجود در این است که این

^۱Improved prediction-area plot

نمودار به‌طور هم‌زمان سه معیار مهم نرخ پیش‌بینی مناطق کانی‌زایی، نرخ پیش‌بینی مناطق فاقد کانی‌زایی و مساحت دربرگیرنده به‌وسیله‌ی اهداف اکتشافی را ارائه می‌دهد.

در این فصل، نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته به‌منظور بررسی کارایی و مقایسه‌ی مدل‌های پتانسیل به‌دست آمده از ویژگی‌های شاخص حاصل از الف) ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی (۱:۱۰۰/۰۰۰) و ب) نقشه‌ی زمین‌شناسی (۱:۱۰۰/۰۰۰) برای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در کمربند افیولیتی سبزوار مورد استفاده قرار گرفته است. برای این‌منظور، ویژگی‌های شاخص گسل و سنگ میزبان کرومیت به‌صورت مجزا از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه جهت تهیه‌ی نقشه‌های شاهد وزن‌دار چگالی گسل و فاصله از سنگ میزبان، تهیه شدند. سپس نقشه‌های شاهد وزن‌دار حاصل از الف) ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی و ب) فقط نقشه‌ی زمین‌شناسی، به‌صورت مجزا با استفاده از عملگر میانگین هندسی تلفیق شدند. بنابراین اثربخشی استفاده از ویژگی‌های شاخص بیش‌تر حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، که در نقشه‌های زمین‌شناسی متوسط‌مقیاس به تصویر کشیده نشده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با مقایسه‌ی دو مدل پتانسیل، مناطق هدف با احتمال کانی‌زایی زیاد برای ادامه‌ی فعالیت‌های اکتشافی هدف مورد جستجو مشخص شدند.

۴-۲ تولید مدل‌های پتانسیل ترکیبی و زمین‌شناسی

کارایی مدل‌های پتانسیل به کیفیت و دقت داده‌های شاهد مکانی ورودی مدل بستگی دارد. بر اساس تحقیقات پژوهشگران (Mohebi et al., 2015; Porwal et al., 2015; Zuo et al., 2015; Campos et al., 2017; Mutele et al., 2017) در مدل‌سازی ناحیه‌ای پتانسیل معدنی^۱، معمولاً از اطلاعات موجود در نقشه‌های کوچک تا میان‌مقیاس (۱:۱۰۰/۰۰۰) جهت استخراج ویژگی‌های شاخص ذخیره‌ی معدنی هدف اکتشافی و تهیه‌ی نقشه‌های شاهد وزن‌دار استفاده می‌شود. البته نمایش ویژگی‌های شاخص زمین‌شناسی بر روی این نقشه‌ها کامل نبوده و منجر به از دست‌دادن شواهد می‌شود، در نتیجه به‌طور نامطلوبی بر شناسایی مناطق هدف در مدل‌سازی پتانسیل معدنی تأثیر می‌گذارد. جهت تقویت^۲ اطلاعات مستخرج از نقشه‌های میان‌مقیاس، پژوهشگران زیادی از داده‌های سنجش از دور جهت تفکیک واحدهای سنگی و تهیه‌ی نقشه‌ی زمین‌شناسی و استخراج سایر ویژگی‌ها و پدیده‌های زمین‌شناسی مثل دگرسانی

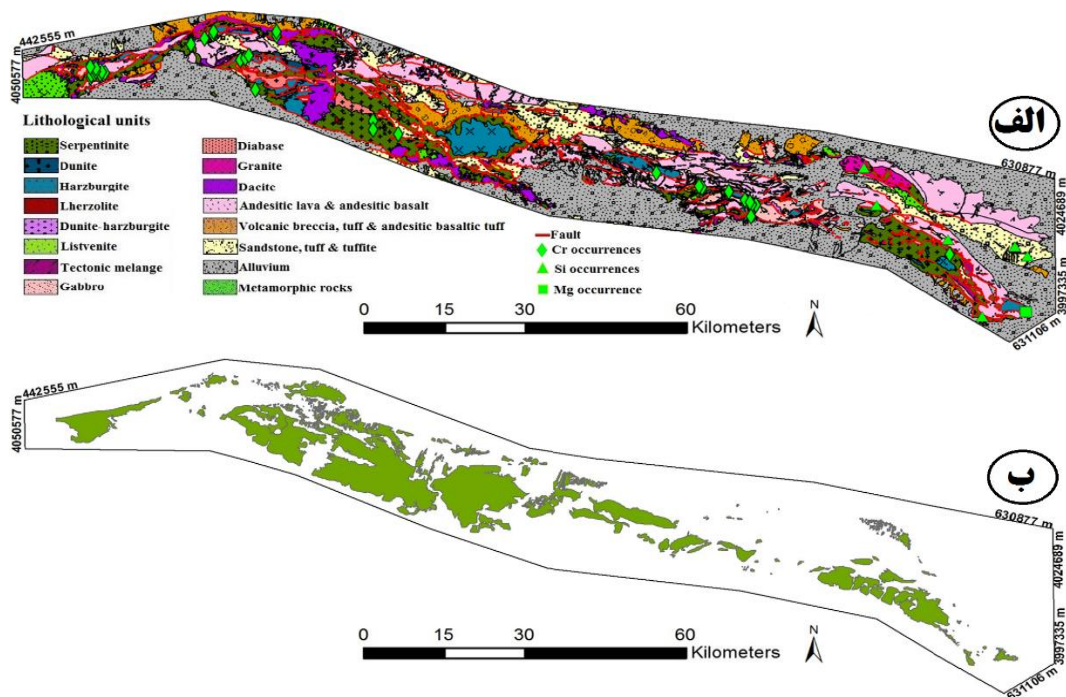
^۱ Regional-scale MPM

^۲ Augmenting

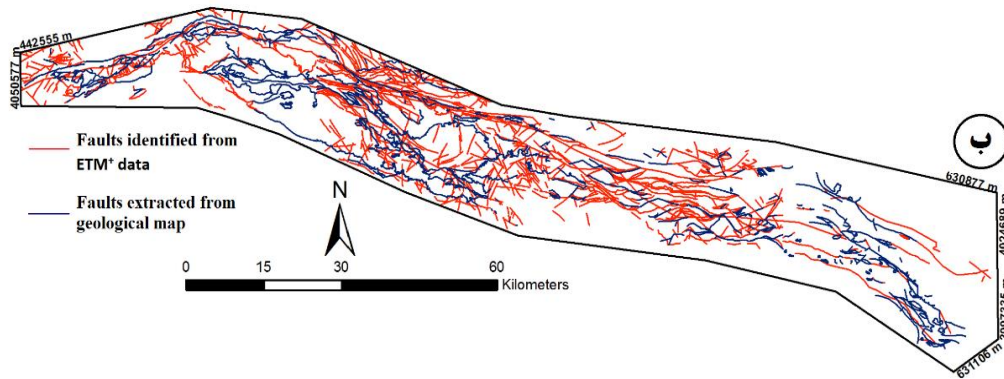
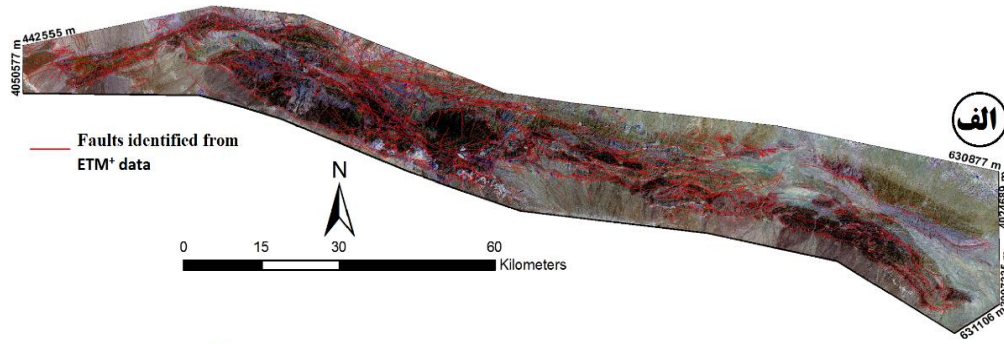
و گسل خوردگی استفاده کرده‌اند (Crosta et al., 2003; Ninomiya, 2003; van der Meer et al., 2012; Mohebi et al., 2015; Ninomiya and Fu, 2018).

در این رساله، نقشه‌ی سنگ میزبان کرومیت (شکل ۴-۱) و نقشه‌ی گسل‌ها (شکل ۴-۲) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌های زمین‌شناسی یکصد هزار موجود در منطقه ایجاد و سپس نقشه‌های شاهد وزنی چگالی گسل و فاصله از سنگ میزبان تهیه شدند. برای این کار ابتدا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های ETM^+ و استر استفاده شد. برای این کار ابتدا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و تهیه‌ی ترکیب رنگی کاذب ETM^+ RGB (۱,۳,۵) گسل‌ها شناسایی (شکل ۴-۲-الف) و سپس با گسل‌های از روی نقشه‌های زمین‌شناسی مقایسه و تکمیل شده و لایه‌ی رقومی کنترل‌کننده‌ی ساختاری تهیه شد (شکل ۴-۲-ب).

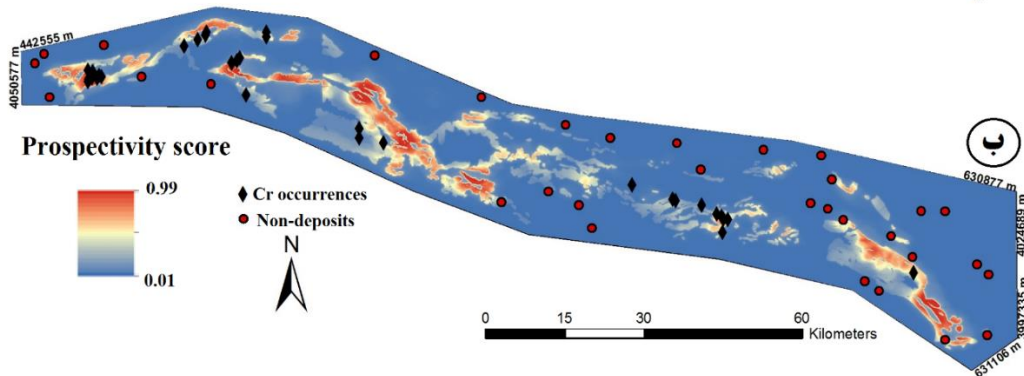
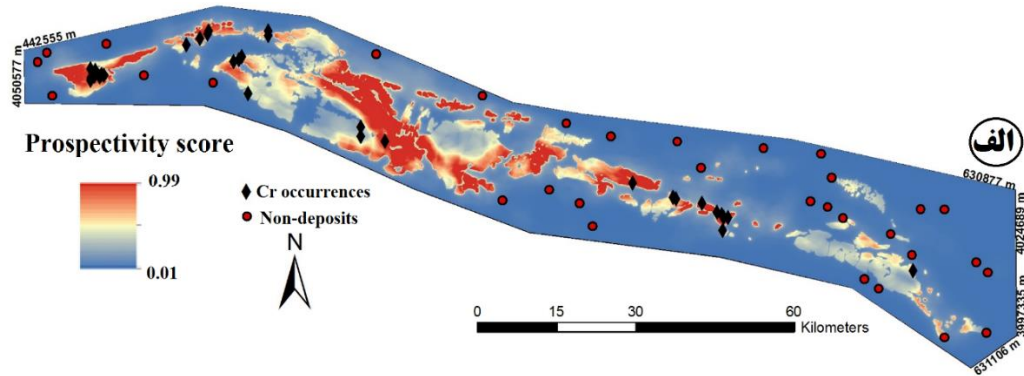
هم‌چنین واحدهای سنگی به‌ویژه واحدهای مرتبط با کانی‌زایی کرومیت نیز مشخص و نقشه‌ی واحدها تهیه و سپس لایه‌ی رقومی سنگ میزبان به‌صورت مجزا ساخته شد (شکل ۴-۱-ب). در نهایت، نقشه‌های شاهد فاصله از سنگ میزبان و چگالی گسل به‌صورت مجزا برای لایه‌های حاصل از الف) ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی و ب) فقط نقشه‌ی زمین‌شناسی، تهیه و وزن‌دار و با استفاده از عملگر میانگین هندسی تلفیق شدند (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۱: الف) نقشه‌ی ساده‌سازی‌شده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه که واحدهای سنگ میزبان کرومیت (هارزبورژیت، دونیت و سرپانتینیت) بر روی آن نشان داده شده‌اند و ب) لایه‌ی واحد سنگ میزبان حاصل از پردازش داده‌های ماهواره‌ای



شکل ۴-۲: الف) گسل‌های شناسایی شده با استفاده از ترکیب رنگی (1,3,5) ETM^+ و ب) لایه‌ی کنترل ساختاری حاصل از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی



شکل ۴-۳: الف) مدل پتانسیل میانگین هندسی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار به‌دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی ب) مدل پتانسیل میانگین هندسی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار به‌دست آمده از نقشه‌ی زمین‌شناسی

۴-۳ نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبود یافته

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، به‌منظور غلبه بر نقطه‌ضعف‌های مربوط به روش‌های نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت (مانند نادیده‌گرفتن نقاط فاقد ذخیره) و منحنی مشخصه‌ی عملکرد سیستم (مانند نادیده‌گرفتن مساحت دربرگیرنده‌ی اهداف اکتشافی) و همچنین در نظر گرفتن مزیت‌های هر دو روش، به بهبود نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت، با اضافه‌کردن منحنی نرخ پیش‌بینی موقعیت‌های فاقد ذخیره به آن، پرداخته شده است. بنابراین، در نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبود یافته سه منحنی وجود دارد که در مقابل کلاس‌های مختلف مدل پتانسیل معدنی رسم می‌شوند. اولین منحنی مربوط به نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته‌شده‌ی متناظر با کلاس‌های مدل پتانسیل معدنی، دومین منحنی مربوط به مساحت تحت پوشش هر کلاس از مدل پتانسیل معدنی نسبت به کل مساحت منطقه‌ی مورد مطالعه و سومین منحنی مربوط به نرخ پیش‌بینی نقاط فاقد ذخیره متناظر با کلاس‌های مدل پتانسیل معدنی است. در نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبود یافته مربوط به یک مدل پتانسیل معین، برخلاف نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت مرسوم، دونقطه‌ی تقاطع وجود دارد. نقطه‌ی اول از تقاطع منحنی‌های نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته‌شده و مساحت دربرگیرنده، که مقادیرشان در محورهای عرضی چپ و راست به ترتیب با P_m و O_m نشان داده می‌شوند، به دست می‌آید. همچنین، نقطه‌ی دوم از تقاطع منحنی‌های نرخ پیش‌بینی نقاط فاقد ذخیره و مساحت دربرگیرنده، که مقادیرشان در محورهای عرضی چپ و راست به ترتیب با P_n و O_n نشان داده می‌شوند، به دست می‌آید. در نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبود یافته، مقدار نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته‌شده (P_m) در واقع درصد اندیس‌های شناخته‌شده که به درستی به وسیله‌ی مدل پتانسیل مربوطه پیش‌بینی شده‌اند، است. P_m با H hits در روش ROC قابل مقایسه است. در نتیجه، درصد اندیس‌های شناخته‌شده‌ی باقی‌مانده ($100 - P_m$) همان M misses در روش ROC می‌باشد. مقدار نرخ پیش‌بینی نقاط فاقد ذخیره (P_n) در واقع درصد نقاط فاقد ذخیره که به اشتباه به وسیله‌ی مدل پتانسیل مربوطه پیش‌بینی شده‌اند، است. بنابراین P_n با F false alarms در روش ROC قابل مقایسه است. در نتیجه، درصد نقاط فاقد ذخیره‌ی باقی‌مانده ($100 - P_n$) همان C correct rejections در روش ROC می‌باشد. بنابراین، همانند روش ROC، «اختصاصی بودن-۱» یا «نرخ مثبت کاذب»^۱ برابر با مقدار نقاط فاقد ذخیره که به اشتباه به‌عنوان رخداد کانی‌سازی شناسایی شده‌اند ($F/F+C$) است. «حساسیت» یا «نرخ مثبت واقعی»^۲ برابر با مقدار نقاط معدنی که به درستی به‌عنوان رخداد کانی‌سازی مدل شده‌اند ($H/H+M$) است (Swets, 1996; Zou et al., 2007). بر خلاف

^۱ False positive rate (FP_r)

^۲ True positive rate (TP_r)

روش مشخصه‌ی عملکرد سیستم که در آن مقادیر متفاوتی برای «حساسیت» و «اختصاصی بودن-۱»، که به حد آستانه‌های مختلف مربوط می‌شوند، وجود دارند در نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت بهبودیافته تنها یک مقدار برای هر کمیت وجود دارد، زیرا این کمیت‌ها بر اساس پارامترهای مستخرج از دو نقطه‌ی تقاطع موجود در نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت بهبودیافته به صورت زیر محاسبه می‌شوند (Roshanravan et al., 2018c):

$$TP_r = \frac{H}{H + M} = \frac{P_m}{100} \quad (1-4)$$

$$FP_r = \frac{F}{F + C} = \frac{P_n}{100} \quad (2-4)$$

اگر یک مدل پتانسیل دارای مقادیر TP_r بالا و FP_r پایین باشد در این صورت می‌تواند مناطق هدف مطلوب‌تری را برای اکتشافات بعدی ذخیره‌ی معدنی مورد جستجو نسبت به مدل پتانسیل دارای مقادیر TP_r پایین و FP_r بالا تولید نماید. در نتیجه، عملکرد کلی^۱ مدل‌های پتانسیل را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

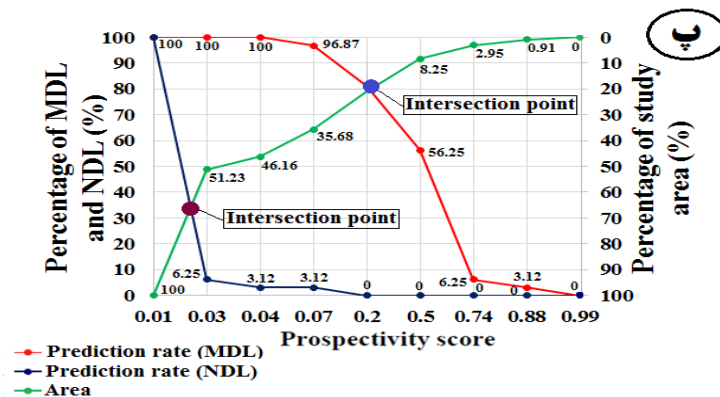
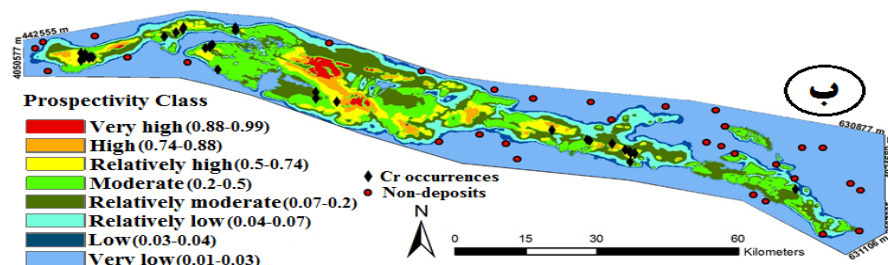
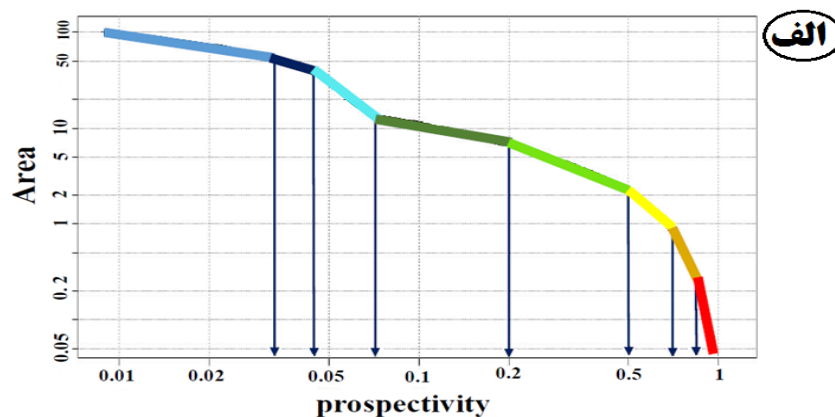
$$O_e = TP_r - FP_r \quad (3-5)$$

که در آن؛ O_e معرف کارایی کلی مدل پتانسیل است که از -۱ تا +۱ تغییر می‌کند و می‌توان از آن برای ارزیابی و مقایسه‌ی مدل‌های پتانسیل مختلف برای انتخاب مدل دقیق‌تر استفاده کرد. علاوه بر این، هرچه مقدار مثبت O_e بالاتر باشد مدل پتانسیل از عملکرد بهتری برخوردار است. مقادیر مثبت و منفی O_e به ترتیب نمایان‌گر مدل‌های پتانسیل قابل اعتماد و غیر قابل اعتماد خواهد بود.

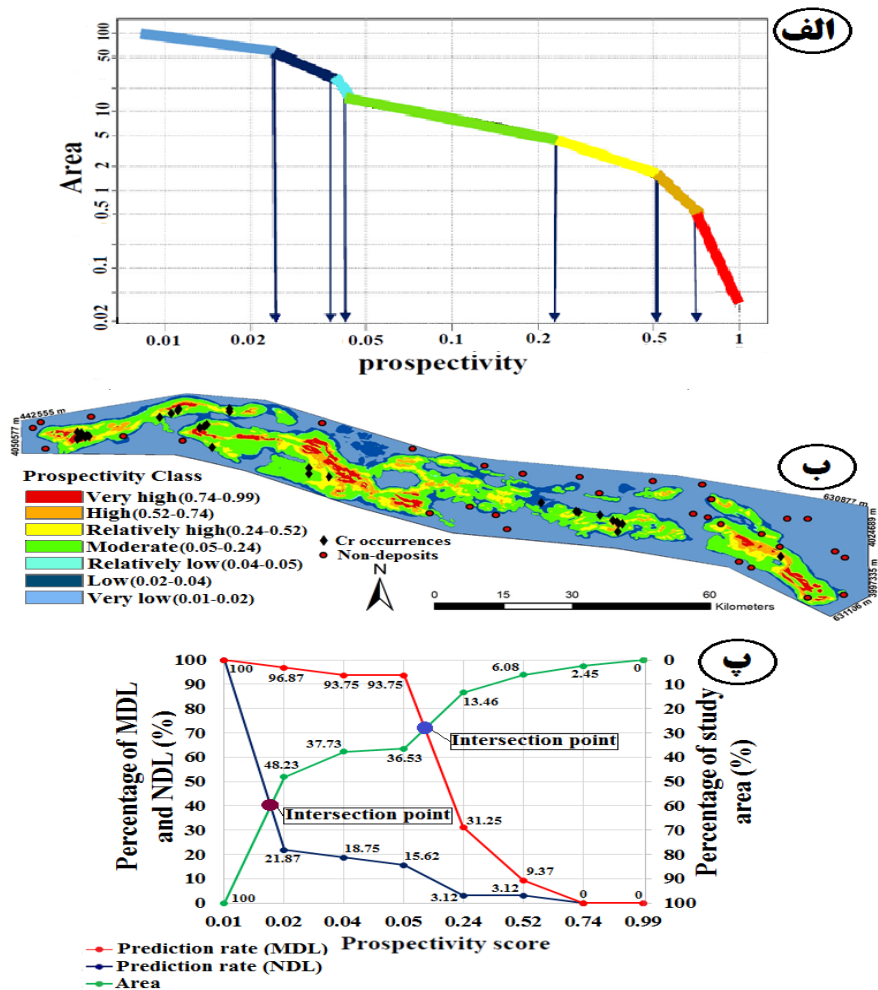
به منظور ایجاد یک نمودار نرخ پیش‌بینی-مساحت بهبودیافته، بایستی نقاط فاقد ذخیره تعریف شوند. در این پژوهش همان‌طور که گفته شد (فصل سوم) برای تعریف نقاط فاقد کانی‌زایی و ذخیره سه اصل رعایت شده است. علاوه بر این، طبق پیشنهاد نیکان و همکاران (۲۰۱۵) از موقعیت‌های مکانی انواع دیگر ذخایر معدنی موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه (رخدادهای سیلیس و منیزیم نشان داده شده در شکل ۴-۱-الف) به عنوان نقاط فاقد ذخیره استفاده شده است. بنابراین، به طور کلی ۳۲ نقطه‌ی فاقد

^۱ Overall performance

ذخیره (برابر با تعداد رخدادهای کرومیت) انتخاب شدند که در شکل ۴-۳ نشان داده شده‌اند. همچنین به منظور تولید نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته، مقادیر پتانسیل باید کلاسه‌بندی شوند که در این تحقیق از مدل فرکتالی عیار- مساحت برای به دست آوردن حد آستانه‌ای کلاس‌ها (شکل‌های ۴-۴-الف و ۴-۵-الف) به منظور تولید مدل‌های پتانسیل طبقه‌بندی شده (شکل‌های ۴-۴-ب و ۴-۵-ب) استفاده شد. همچنین نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته‌ی مربوط به دو مدل پتانسیل تولید شده رسم شدند (شکل‌های ۴-۴-پ و ۴-۵-پ). به منظور مقایسه‌ی کارایی نمودارهای ROC، نرخ پیش‌بینی - مساحت و نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته با یکدیگر، نمودارهای ROC مربوط به دو مدل پتانسیل تولید شده نیز رسم شدند (شکل ۴-۶).



شکل ۴-۴: الف) مدل فرکتالی عیار- مساحت برای مقادیر پتانسیل حاصل از ویژگی‌های شاخص مستخرج از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی، ب) نقشه‌ی پتانسیل کلاسه‌بندی شده و پ) نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته برای مدل پتانسیل تولید شده با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی (شکل ۴-۳-الف)



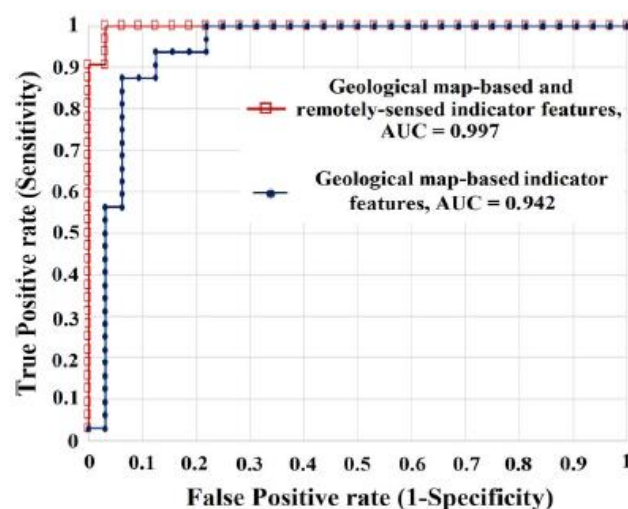
شکل ۴-۵: الف) مدل فرکتالی عیار- مساحت برای مقادیر پتانسیل حاصل از ویژگی‌های شاخص مستخرج از نقشه‌ی زمین‌شناسی، ب) نقشه‌ی پتانسیل کلاسه‌بندی شده و پ) نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت بهبودیافته برای مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از نقشه‌ی زمین‌شناسی (شکل ۴-۳- ب)

پارامترهای مربوط به نقاط تقاطع نمودارهای نرخ پیش‌بینی- مساحت بهبودیافته در جدول ۵-۱ نشان داده شده است. بر اساس این جدول، مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از ترکیب داده‌های سنجش از دور و نقشه‌ی زمین‌شناسی (با نرخ پیش‌بینی ۸۰ درصد از اندیس‌های شناخته‌شده) از عملکرد بهتری نسبت به مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از فقط نقشه‌ی زمین‌شناسی (با نرخ پیش‌بینی ۷۲ درصد از اندیس‌های شناخته‌شده) برخوردار است. این ارزیابی نمی‌تواند به اندازه‌ی کافی کارایی مدل‌های پتانسیل را منعکس کند که دلیل آن، این است که نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت فقط نرخ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته‌شده را در ارزیابی مدل پتانسیل در نظر می‌گیرد و موقعیت‌های فاقد ذخیره در ارزیابی مدل مشارکت ندارند. علاوه بر این، با توجه به نمودارهای ROC (شکل ۴-۶) مقدار AUC برای مدل‌های پتانسیل تولیدشده با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی و فقط نقشه‌ی

زمین‌شناسی، به ترتیب برابر با ۰/۹۹۷ و ۰/۹۴۲ می‌باشد که اختلاف خیلی کمی (۰/۰۵۵) را بین دو مدل نشان می‌دهد. این ارزیابی نادرست به دلیل نادیده گرفتن مساحت دربرگیرنده‌ی اهداف اکتشافی در نمودار ROC است. از طرفی دیگر، مقدار O_e برای مدل‌های پتانسیل تولیدشده با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی و فقط نقشه‌ی زمین‌شناسی، به ترتیب برابر با ۰/۴۷ و ۰/۳۲ می‌باشد که نشان می‌دهد مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی از عملکرد خیلی بهتری، به لحاظ تولید اهداف اکتشافی با احتمال کانی‌زایی بالای کرومیت، نسبت به مدل دیگر برخوردار است. در نتیجه، این یک ارزیابی قابل اعتمادتر است زیرا در نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته هر سه معیار مهم ذکر شده در بالا در عمل ارزیابی مدل پتانسیل مشارکت دارند.

جدول ۴-۱: پارامترهای تعیین‌شده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته برای مدل‌های پتانسیل تولیدشده

پارامترها	مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی	مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از نقشه‌ی زمین‌شناسی
$P_m(H)$	۸۰	۷۲
$P_n(F)$	۳۳	۴۰
$100 - P_m(M)$	۲۰	۲۸
$100 - P_m(C)$	۶۷	۶۰
TP_r	۰/۸۰	۰/۷۲
FP_r	۰/۳۳	۰/۴۰
O_e	۰/۴۷	۰/۳۲



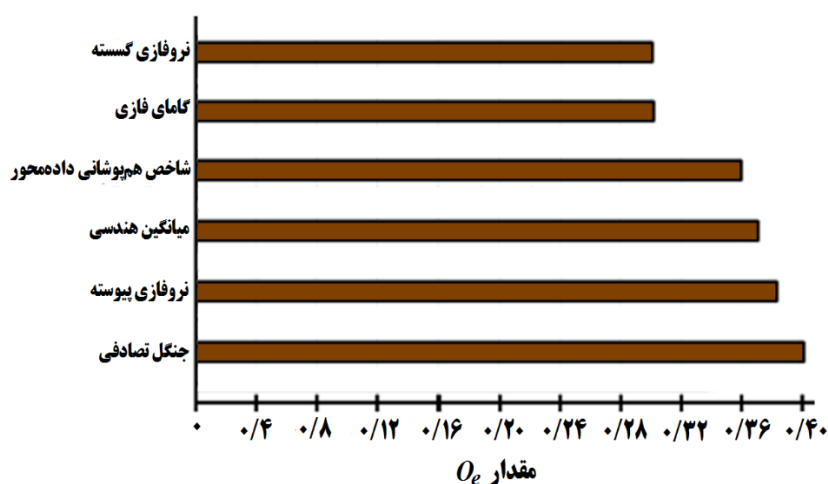
شکل ۴-۶: منحنی‌های مشخصه‌ی عمل‌کرد سیستم برای مدل‌های پتانسیل تولیدشده

۳-۱-۴ ارزیابی و مقایسه‌ی مدل‌های پتانسیل معدنی

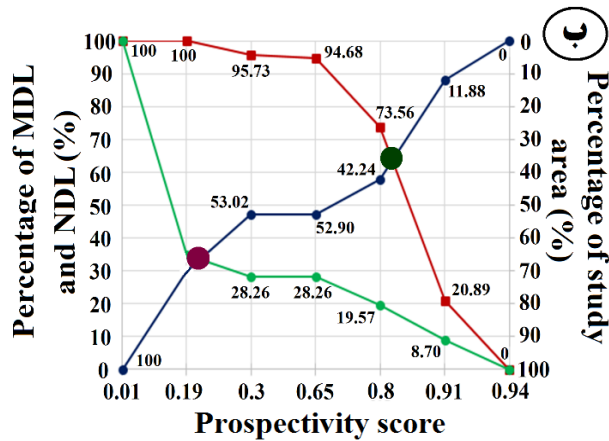
برای مقایسه‌ی عملکرد هر یک از روش‌ها در تولید مدل پتانسیل معدنی در منطقه‌ی مورد مطالعه، نمودار نرخ پیش‌بینی- مساحت بهبودیافته برای آن‌ها رسم شد (شکل ۴-۷). پارامترهای مربوط به نقاط تقاطع نمودارهای نرخ پیش‌بینی- مساحت بهبودیافته در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. بر اساس این جدول، مدل پتانسیل جنگل تصادفی (با دارا بودن بیش‌ترین مقدار O_e) از عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های پتانسیل دیگر برخوردار است (شکل ۴-۷) و در نتیجه می‌توان از این روش جهت تهیه‌ی مدل پتانسیل معدنی یک منطقه و تعیین مناطق امیدبخش برای فعالیت اکتشافی بعدی استفاده نمود.

جدول ۴-۲: پارامترهای تعیین‌شده از نمودارهای نرخ پیش‌بینی- مساحت بهبودیافته برای مدل‌های پتانسیل مختلف

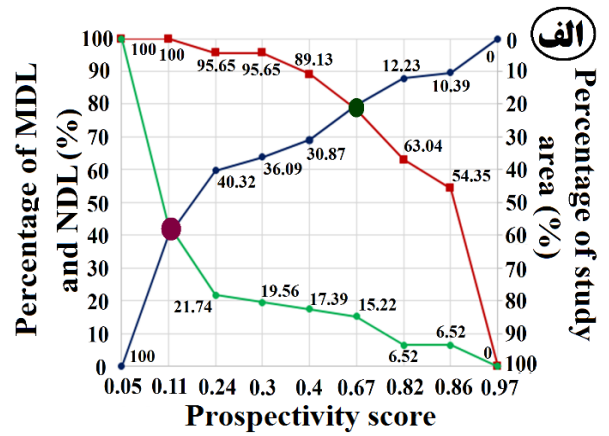
پارامترها	عصبی- فازی پیوسته	عصبی- فازی گسسته	گامای فازی	میانگین هندسی	هم‌پوشانی شاخص داده‌محور	جنگل تصادفی
$P_m(H)$	۷۹	۶۳	۷۵	۷۹	۷۸	۸۵
$P_n(F)$	۴۱	۳۳	۴۵	۴۲	۴۲	۴۵
$100-P_m(M)$	۲۱	۳۷	۲۵	۲۱	۲۲	۱۵
$100-P_n(C)$	۵۹	۶۷	۵۵	۵۸	۵۸	۵۵
TP_r	۰/۷۹	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۷۹	۰/۷۸	۰/۸۵
FP_r	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۵
O_e	۰/۳۸	۰/۳۰	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۴۰



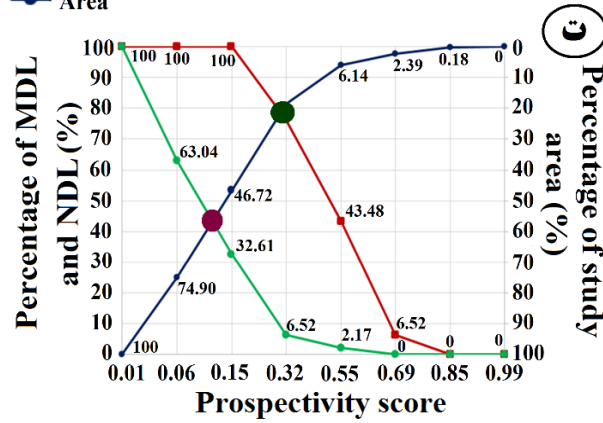
شکل ۴-۷: عملکرد کلی (O_e) مدل‌های پتانسیل مختلف



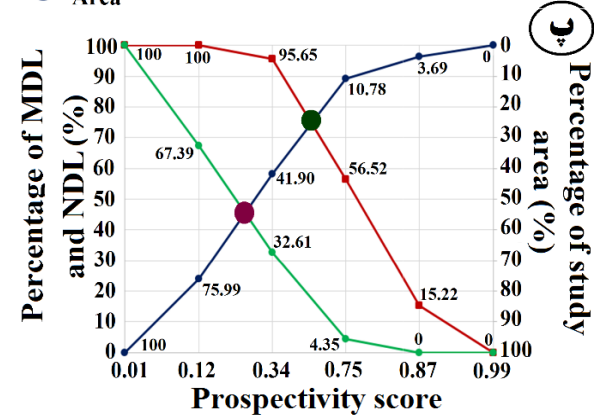
■ Prediction rate (MDL)
 ● Prediction rate (NDL)
 ◆ Area



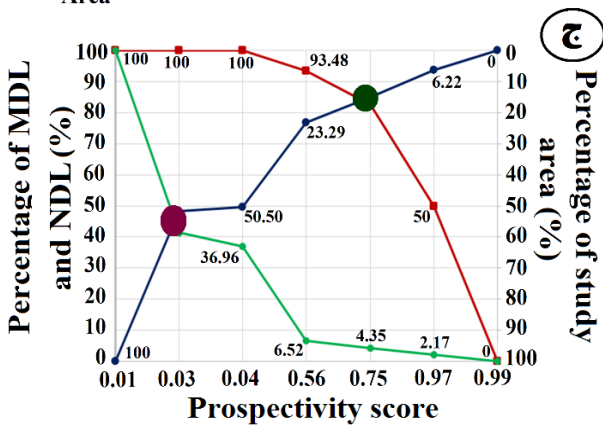
■ Prediction rate (MDL)
 ● Prediction rate (NDL)
 ◆ Area



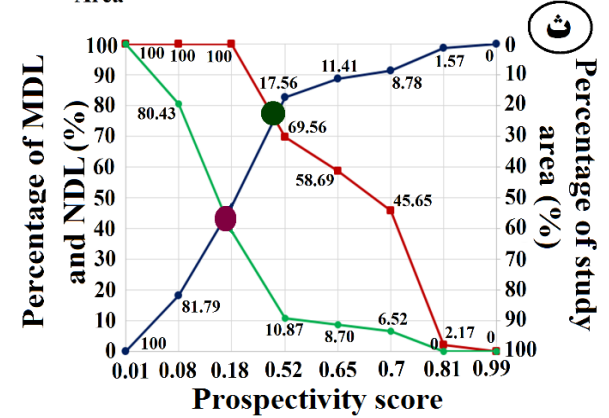
■ Prediction rate (MDL)
 ● Prediction rate (NDL)
 ◆ Area



■ Prediction rate (MDL)
 ● Prediction rate (NDL)
 ◆ Area



■ Prediction rate (MDL)
 ● Prediction rate (NDL)
 ◆ Area



■ Prediction rate (MDL)
 ● Prediction rate (NDL)
 ◆ Area

شکل ۴-۸: نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته برای مدل‌های پتانسیل مختلف. الف) عصبی - فازی پیوسته، ب) عصبی - فازی گسسته، پ) گامای فازی، ت) میانگین هندسی، ث) هم‌پوشانی شاخص داده‌محور (وج) جنگل تصادفی

فصل ۵: مدل سازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در مقیاس محلی

۵-۱ مقدمه

اکتشاف محلی ذخایر کرومیت در مناطق مختلف افیولیتی کشور از دیرباز به وسیله پیمایش‌های میدانی توسط زمین‌شناسان و بومیان منطقه انجام می‌شده است. علاوه بر این، تاکنون مطالعات متعددی در نقاط مختلف دنیا و به‌ویژه ایران برای اکتشاف محلی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای به‌منظور تعیین نقاط حفاری با استفاده از روش‌های مختلف اکتشافی مانند زمین‌شناسی و ژئوفیزیک انجام گرفته است اما با این‌وجود، مدل‌سازی پتانسیل معدنی این نوع ذخایر هنوز انجام نگرفته و مدل اکتشافی دقیقی از این ذخایر به‌دست نیامده است. از طرفی دیگر، اگرچه روش‌های اکتشافی سنتی مانند حفر گمانه، چاهک و ترانشه‌ی نامنظم منجر به کشف تعدادی از ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در مقیاس محلی شده است، اما این روش‌ها، انرژی‌بر، زمان‌بر و دارای هزینه می‌باشند. بنابراین، شناخت فرآیندهای ته‌نشست و حفظ ماده‌ی معدنی (سیستم کانی‌سازی ذخیره) و تبدیل آن‌ها به نقشه‌های شاهد مکانی وزن‌دار دوبعدی و در نهایت تولید مدل پتانسیل محلی، امری ضروری و مهم است.

در این فصل، ابتدا به معرفی محدوده‌ی مورد مطالعه (یکی از مناطق هدف شناسایی‌شده در فاز ناحیه‌ای) پرداخته و سپس نحوه‌ی تولید و وزن‌دهی به نقشه‌های شاهد استنتاج‌شده از سیستم کانی‌سازی کرومیت بیان شده است. در نهایت، با استفاده از عملگرهای گامای فازی و میانگین هندسی به مدل‌سازی محلی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت در محدوده‌ی مورد مطالعه به‌منظور پیشنهاد نقاط حفاری پرداخته شده است.

۵-۲ محدوده‌ی مورد مطالعه

همان‌طور که در فصل سوم بیان شد از بین مدل‌های پتانسیل تولیدشده، مدل پتانسیل جنگل تصادفی به‌عنوان بهترین مدل جهت انجام اکتشافات تفصیلی‌تر (محلی) معرفی شد. بنابراین با توجه به نقشه‌ی اهداف اکتشافی تعیین‌شده (شکل ۳-۲۸) و همچنین قابلیت دسترسی به نقشه‌ی زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس، محدوده‌ی چشمه‌پلنگان جهت انجام اکتشافات محلی انتخاب شد. محدوده‌ی مورد مطالعه با مساحت تقریبی ۷ کیلومتر مربع در برگه‌ی ۱:۱۰۰/۰۰۰ باشتین واقع شده است (شکل ۵-۱-الف). مطالعات اکتشافی انجام‌شده در محدوده‌ی مورد مطالعه عبارت‌اند از: الف) مطالعات زمین‌شناسی و تکتونیکی و ب) مطالعات ژئوفیزیکی (گرانی - مغناطیس).

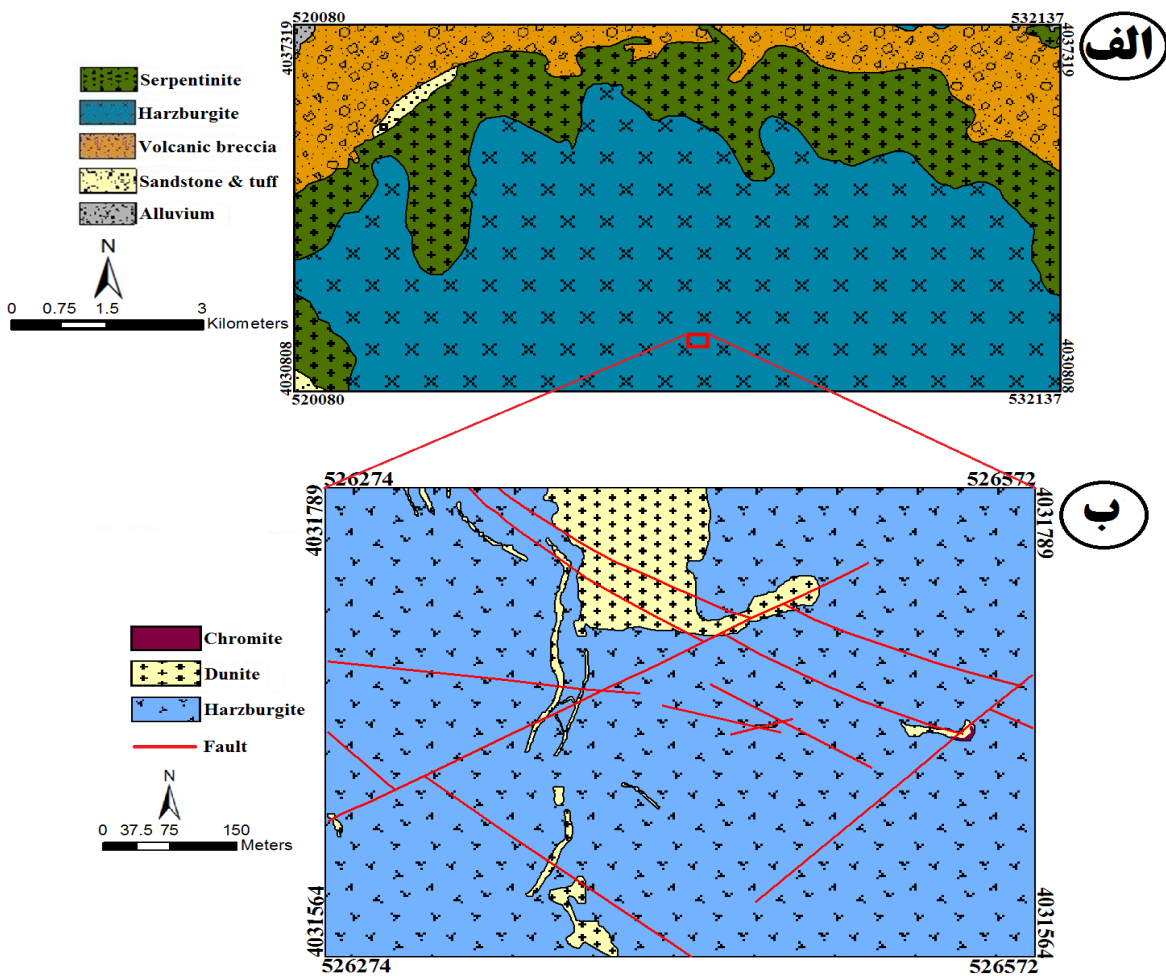
الف: مطالعات زمین‌شناسی و تکتونیکی

این مطالعات توسط شرکت کرومیت کاوندگان بنا صورت گرفته و بر اساس آن نقشه‌ی زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس محدوده تهیه شد (شکل ۵-۱-ب). واحدهای سنگی که در محدوده‌ی مورد مطالعه برون‌زد

دارند، هارزبورژیت و دونیت می‌باشند که در بعضی نقاط سرپانتینی شده‌اند (شکل ۵-۱-ب). همچنین در محدوده‌ی مورد مطالعه، برون‌زدگی‌هایی از رگه‌های کرومیت در میان سنگ میزبان دونیت وجود دارد.

ب: مطالعات ژئوفیزیکی (گرانی - مغناطیس)

در این محدوده جهت شناسایی نقاط بی‌هنجاری و کانی‌زایی کرومیت، از دو روش ژئوفیزیکی گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی استفاده شده است. بنابراین در ابتدا خلاصه‌ای از برداشت این دو روش توضیح داده می‌شود و سپس داده‌های برداشت‌شده تصحیح و پردازش شده و نتایج حاصل از آن‌ها در مدل‌سازی استفاده شده است.



شکل ۵-۱: الف) نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده‌شده‌ی برگه‌ی ۱:۱۰۰/۰۰۰ باشتین و ب) نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ مورد مطالعه

۵-۳ مطالعات گرانی‌سنجی جهت تهیه نقشه‌ی شاهد گرانی

روش گرانی‌سنجی طی قرن گذشته برای اهداف مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. اگرچه این روش فاقد وضوح، کنترل عمق و قابلیت تصویربرداری زیرزمینی نسبت به روش‌های دیگر، به‌خصوص بازتاب لرزه‌ای و رادار نفوذی به زمین، است اما نقش مهمی را در مراحل اولیه‌ی اکتشاف ماده‌ی معدنی و مسائل تخصصی محلی دارا است. زمانی که این روش با داده‌های ژئوفیزیکی دیگر و اطلاعات زمین‌شناسی در دسترس تلفیق می‌شود، نتیجه‌ی نهایی موفقیت‌آمیزتر بوده و در نتیجه ابهام ذاتی حاصل از آن به حداقل می‌رسد.

روش گرانی‌سنجی، یک روش اکتشافی غیرفعال^۱ است که بر اساس میدان طبیعی و پایدار نیروی گرانش استوار است. برخلاف اغلب روش‌های اکتشافی الکتریکی و لرزه‌ای، این روش نیاز به منبع فعال انرژی ندارد و این خود یک مزیت است، اما دارای یک عیب نیز می‌باشد و آن این است که میدان نمی‌تواند با هدف مناسب‌بودن برای یک کاربرد خاص اصلاح‌پذیر باشد. اگرچه میدان گرانش زمین^۲ پایدار است، اما از نظر مکانی و زمانی متغیر بوده و باعث انحراف در مقادیر اندازه‌گیری شده می‌شود و برای این که این مقادیر قابل تفسیر باشند باید تصحیحاتی روی داده‌های گرانی صورت گیرد. به‌منظور برداشت داده‌های گرانی ابتدا بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی موجود و روند رخنمون‌ها یا کانی‌زایی‌ها، شبکه‌ی حفاری طراحی و سپس داده‌ها برداشت شدند.

۵-۳-۱ اندازه‌گیری میدان گرانی

دو کمیت قابل توجه در گرانی‌سنجی، G و g هستند که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ثابت گرانش و شتاب گرانی می‌باشند. اندازه‌گیری میدان گرانی از دیرباز توسط متخصصان ژئوفیزیک و ژئودزی انجام گرفته است. متخصصان ژئوفیزیک آن را برای پیش‌بینی تغییرات زیرسطحی زمین و مطالعه‌ی پدیده‌های ژئوفیزیکی اندازه‌گیری می‌کنند. اندازه‌گیری‌های گرانی ممکن است به صورت مطلق یا نسبی انجام گیرند. اندازه‌گیری‌های مطلق گرانی به دلیل این که برای اهداف اکتشافی غیر ضروری بوده و نسبت به اندازه‌گیری‌های نسبی دشوارتر و وقت‌گیرتر هستند به صورت محدود انجام می‌گیرند. با این حال، با استفاده از گرانی‌سنج‌های مطلق می‌توان گرانی مطلق را در عرض چند دقیقه بر حسب میلی‌گال به دست آورد. مقادیر مطلق گرانی برای کارهای ژئودزی، کالیبراسیون اندازه‌گیری‌های نسبی و مطالعات زمانی میدان زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای اغلب اهداف، مشاهدات نسبی گرانی کاملاً مطلوب

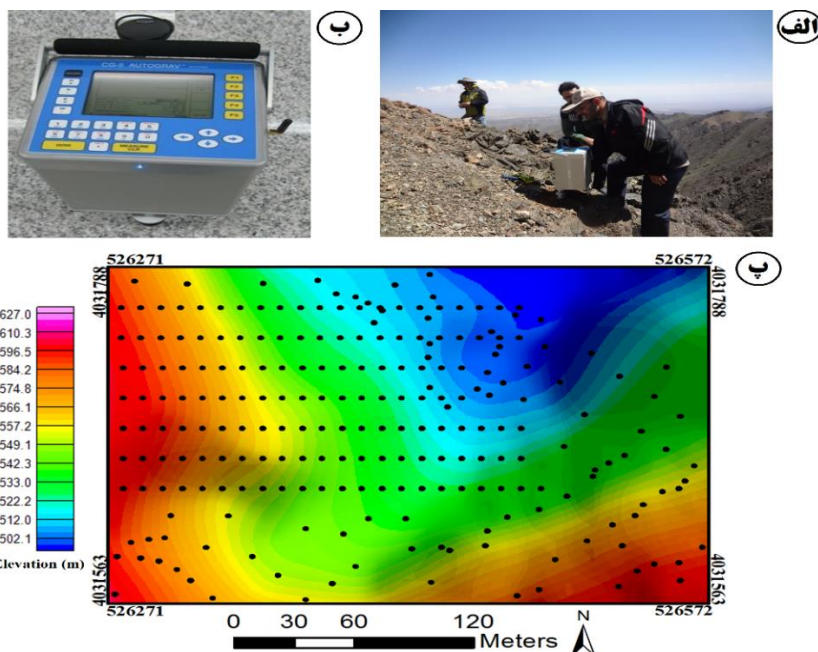
^۱ Passive

^۲ Earth's gravity field

هستند. اندازه‌گیری‌های نسبی گرانی به وسیله‌ی گرانی‌سنج‌ها انجام می‌شوند. با گسترش فناوری، انواع مختلفی از این دستگاه‌ها توسعه یافته‌اند که شامل طیف گسترده‌ای از طرح‌ها به منظور بزرگ‌تر کردن تغییر طول فنر برای دستیابی به دقت مورد نیاز است. دستگاه گرانی‌سنج CG5 یکی از دقیق‌ترین دستگاه‌های گرانی‌سنج موجود در ایران است. در این تحقیق از دستگاه گرانی‌سنج CG5 دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است.

۵-۳-۲ جمع‌آوری داده‌های گرانی‌سنجی

طراحی شبکه برداشت و جمع‌آوری داده‌ها، اولین مرحله از یک کار اکتشافی ژئوفیزیکی است. در برداشت‌های میکروگرانی مسائلی از قبیل شبکه‌بندی محدوده‌ی برداشت، فاصله‌ی ایستگاه‌ها، طول خطوط برداشت و غیره مدنظر است. در این تحقیق پس از تعیین نقاط ایستگاهی از روی نقشه‌ی مبنا، ایستگاه‌های برداشت گرانی با استفاده از یک دستگاه GPS گارمین بر روی زمین مشخص گردیده و سپس ارتفاع و مختصات دقیق نقاط ایستگاهی به منظور انجام (پیش) پردازش‌های لازم با استفاده از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن تعیین شد. اندازه‌گیری‌های گرانی‌سنجی با استفاده از دستگاه گرانی‌سنج CG5 (ساخت شرکت سینترکس کانادا؛ شکل ۵-۲-ب) انجام گرفت (شکل ۵-۲-الف) و از آنجایی که توپوگرافی محدوده‌ی مورد مطالعه بسیار ناهموار و خشن است شبکه‌ی برداشت داده‌ها کاملاً منظم طراحی نشد و داده‌ها در بخش‌هایی به صورت نامنظم برداشت شدند (شکل ۵-۲-پ).



شکل ۵-۲: الف) عملیات برداشت داده‌ها در محدوده‌ی مورد مطالعه، ب) دستگاه گرانی‌سنج CG5 و پ) شبکه‌ی برداشت داده‌های گرانی روی نقشه‌ی توپوگرافی

۵-۳-۳ پیش پردازش (تصحیح) داده‌های گرانی سنجی

قبل از تفکیک بی‌هنجاری‌های محلی از ناحیه‌ای بسته به نیاز و ضرورت باید تصحیحات دریافت (رانه) دستگاه^۱، عرض جغرافیایی^۲، هوای آزاد^۳، تخته‌ی بوگه^۴، جزر و مد^۵ و توپوگرافی^۶ بر روی مقادیر گرانی اندازه‌گیری شده اعمال شوند.

۵-۳-۳-۱ تصحیح دریافت دستگاه

گرانی‌سنج‌ها از موادی ساخته شده‌اند که معمولاً به تنش‌های مکانیکی و حرارتی حساس بوده و سبب تولید کرنش‌های الاستیکی و غیرالاستیکی می‌شوند. بنابراین جابه‌جایی دستگاه گرانی‌سنج از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر و هم‌چنین تغییرات درجه‌ی حرارت سبب تغییراتی در مقدار گرانی قرائت‌شده در یک نقطه در چند زمان متفاوت خواهند شد (Telford et al., 1990) که ناشی از خطای دستگاه یعنی دریافت یا رانه‌ی دستگاه است و وابسته‌ی به زمان می‌باشد (Dobrin and Savit, 1988). برای اعمال تصحیح دریافت دستگاه ابتدا مقدار گرانی در ایستگاه اصلی (مبنای محلی) اندازه‌گیری و سپس ایستگاه‌های فرعی برداشت می‌شوند و در نهایت مجدداً به ایستگاه اصلی رفته و مقدار گرانی اندازه‌گیری می‌شود. این عمل معمولاً هر دو ساعت یک بار انجام می‌شود. سپس طبق رابطه‌ی زیر مقدار نرخ دریافت دستگاه به دست می‌آید:

$$DR = \frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1} \quad (1-5)$$

که در آن؛ g_1 مقدار گرانی قرائت‌شده‌ی مربوط به ایستگاه اصلی در زمان t_1 ، g_2 مقدار گرانی قرائت‌شده‌ی مربوط به ایستگاه اصلی در زمان t_2 و DR نرخ دریافت بر حسب میلی‌گال بر ساعت است. در نهایت، مقدار دریافت دستگاه برای سایر ایستگاه‌ها طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\delta_{dc(i)} = DR \times (t_i - t_1) \quad (2-5)$$

^۱ Drift Correction

^۲ Latitude Correction

^۳ Free air Correction

^۴ Bouger Correction

^۵ Tide Correction

^۶ Terrain Correction

که در آن؛ $\delta_{dc(i)}$ ، مقدار دریافت دستگاه برای هر ایستگاه (بر حسب میلی گال) و t_i ، زمان قرائت ایستگاه‌های گرانی است. مقدار دریافت دستگاه که بدین ترتیب به دست می‌آید می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی باشد و به وسیله‌ی فرمول زیر از داده‌ها کسر می‌شود.

$$g_{dc} = g_{obs} - \delta g_{dc} \quad (3-5)$$

که در آن؛ g_{dc} مقدار گرانی اندازه‌گیری شده پس از حذف اثر رانه‌ی دستگاه، g_{obs} مقدار گرانی اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی دستگاه و δg_{dc} مقدار اثر رانه‌ی دستگاه است. در جدول ۵-۱ بخشی از داده‌های تصحیح‌شده‌ی مربوط به منطقه‌ی مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۵-۱: بخشی از داده‌های برداشت‌شده و تصحیح اثر رانه‌ی دستگاه بر روی آن‌ها به‌روش خطی

Station	Xcoord	Ycoord	Elevation	Gravity Obs.	S.D.	Time	Drift Rate	Elapsed Time	Drift Correction	Corrected Gravity
Base	526434.98	4031670.18	2519.414	5339.313	0.004	09:13:54	-0.1363	0.0000	0.0000	5339.313
1	526405.22	4031670.05	2513.781	5340.419	0.005	09:19:46	-0.1363	0.0978	-0.0133	5340.432
2	526404.54	4031709.64	2511.479	5341.154	0.007	09:24:53	-0.1363	0.1831	-0.0249	5341.179
3	526393.82	4031732.23	2514.650	5340.445	0.007	09:30:07	-0.1363	0.2703	-0.0368	5340.482
4	526389.07	4031761.75	2516.774	5339.053	0.003	09:33:02	-0.1363	0.3189	-0.0435	5339.096
5	526366.96	4031776.67	2518.704	5339.369	0.005	09:36:13	-0.1363	0.3719	-0.0507	5339.420
6	526340.05	4031793.45	2525.047	5337.926	0.008	09:39:40	-0.1363	0.4294	-0.0585	5337.985
7	526346.47	4031822.68	2525.359	5337.869	0.008	09:44:29	-0.1363	0.5097	-0.0695	5337.938
8	526351.90	4031836.32	2524.829	5337.843	0.010	09:48:21	-0.1363	0.5742	-0.0782	5337.921
9	526345.65	4031854.54	2525.641	5337.459	0.012	09:53:49	-0.1363	0.6653	-0.0907	5337.550
10	526336.07	4031874.27	2532.451	5335.072	0.008	09:57:24	-0.1363	0.7250	-0.0988	5335.171
11	526318.04	4031882.40	2537.560	5334.446	0.023	10:03:04	-0.1363	0.8194	-0.1117	5334.558
12	526350.88	4031884.94	2521.359	5338.170	0.010	10:12:42	-0.1363	0.9800	-0.1335	5338.304
13	526365.14	4031894.12	2511.308	5340.472	0.025	10:17:15	-0.1363	1.0558	-0.1439	5340.616
14	526363.89	4031914.89	2497.263	5343.843	0.006	10:26:13	-0.1363	1.2053	-0.1642	5344.007
15	526376.48	4031901.92	2500.853	5343.111	0.008	10:28:57	-0.1363	1.2508	-0.1704	5343.281
16	526377.54	4031874.54	2500.906	5343.114	0.007	10:32:49	-0.1363	1.3153	-0.1792	5343.293
17	526381.71	4031857.55	2499.604	5343.431	0.006	10:35:53	-0.1363	1.3664	-0.1862	5343.617
18	526386.84	4031841.51	2499.571	5343.442	0.012	10:38:46	-0.1363	1.4144	-0.1927	5343.635
19	526389.00	4031823.91	2498.726	5343.640	0.004	10:42:00	-0.1363	1.4683	-0.2001	5343.840
20	526382.01	4031804.22	2498.821	5343.443	0.011	10:44:55	-0.1363	1.5169	-0.2067	5343.650
21	526397.45	4031787.71	2500.225	5343.251	0.017	10:48:41	-0.1363	1.5797	-0.2153	5343.466
22	526413.86	4031772.99	2501.161	5343.162	0.013	10:50:12	-0.1363	1.6050	-0.2187	5343.381
23	526412.75	4031763.50	2501.691	5342.993	0.009	10:52:44	-0.1363	1.6472	-0.2245	5343.217
24	526412.38	4031736.21	2502.440	5342.665	0.005	10:55:45	-0.1363	1.6975	-0.2313	5342.896
25	526413.97	4031727.60	2502.936	5342.543	0.020	10:57:56	-0.1363	1.7339	-0.2363	5342.779
26	526417.43	4031704.77	2505.276	5342.023	0.017	11:01:29	-0.1363	1.7931	-0.2443	5342.267
27	526416.73	4031683.16	2507.982	5341.272	0.007	11:04:16	-0.1363	1.8394	-0.2506	5341.523
28	526435.51	4031690.96	2509.958	5340.952	0.004	11:07:08	-0.1363	1.8872	-0.2572	5341.209
Base	526434.98	4031670.18	2519.414	5339.044	0.004	11:12:21	-0.1363	1.9742	-0.2690	5339.313

۵-۳-۲ تصحیح عرض جغرافیایی

اگر زمین به صورت همگن هم فرض شود، باز هم شتاب گرانی در نقاطی که دارای عرض جغرافیایی مختلف هستند، متفاوت است. این بدین دلیل است که شتاب گرانی زمین از دو مؤلفه‌ی شتاب ناشی از جرم زمین و شتاب حاصل از نیروی گریز از مرکز زمین تشکیل شده است. مقدار شتاب گریز از مرکز، که در خلاف جهت شتاب ناشی از جرم زمین قرار دارد، در استوا بیشینه و در قطبین کمینه است. این عوامل سبب می‌شوند که شتاب گرانی از ۹۷۸ گال در استوا تا ۹۸۳ گال در قطبین تغییر کند (Blakely, 1996). در کارهای اکتشافی می‌توان از فرمول ساده‌ی زیر جهت محاسبه‌ی تغییرات شتاب گرانی در جهت شمال- جنوب استفاده کرد:

$$\delta g_{\varphi} = 0.818 \Delta y \times \sin(2\varphi) \quad (۴-۵)$$

که در آن؛ δg_{φ} تغییر شتاب گرانی در جهت شمال- جنوب (بر حسب میلی‌گال)، φ عرض جغرافیایی مربوط به خط مبنا و Δy مقدار اختلاف عرض جغرافیایی نقطه‌ی مشاهده‌ای و خط مبنا (بر حسب کیلومتر) است. مقداری که بدین ترتیب به دست می‌آید، از مقدار گرانی ایستگاه اندازه‌گیری واقع در شمال ایستگاه مبنا کم و در حالت عکس به مقدار گرانی ایستگاه اندازه‌گیری اضافه می‌شود. در این تحقیق، کوچک‌ترین عرض جغرافیایی مربوط به ایستگاه‌های اندازه‌گیری ($\varphi = 36.4292$) به عنوان خط مبنا انتخاب شد و سپس مقدار δg_{φ} برای هر کدام از ایستگاه‌ها محاسبه و در نهایت از مقدار گرانی مربوط به آن‌ها (ایستگاه‌ها) کم گردید.

۵-۳-۳ تصحیح جزر و مد

گرانی‌سنج‌هایی که برای اهداف اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گیرند خیلی حساس هستند به طوری که می‌توانند اثرات جاذبه‌ی ماه و خورشید، که در خلاف جهت جاذبه‌ی زمین عمل می‌کنند، را نیز ثبت نمایند. این اثرات به نام تغییرات جزر و مدّی گرانی معروف هستند. اثر جزر و مدّی کره‌ی ماه تقریباً بیش از دو برابر اثر خورشید است. کشش خورشید و ماه در حدی است که می‌تواند بر گرانی اندازه‌گیری شده تا حد ۰/۳ میلی‌گال تأثیر داشته باشد. تصحیح جزر و مدّ تابعی از طول و عرض جغرافیایی و تطابق زمانی^۱ است که به روش‌های مختلفی قابل محاسبه می‌باشد. دستگاه‌های گرانی‌سنجی جدید به طور خودکار با داشتن مقدار طول و عرض جغرافیایی نقطه‌ی اندازه‌گیری توانمندی محاسبه‌ی مقدار اثر جزر و مد را دارند و مقدار تصحیح مربوط به جزر و مدّ را از مقادیر اندازه‌گیری شده حذف می‌کنند.

^۱ Universal coordinate time

۵-۳-۴ تصحیح ارتفاعی (هوای آزاد + تخته‌ی بوگه)

معمولاً ایستگاه‌های گرانی بر روی نقاط با ارتفاع‌های مختلف قرار دارند و این اختلاف ارتفاع موجب تغییر در میزان گرانی اندازه‌گیری شده خواهد شد. با انجام تصحیح ارتفاعی کلیه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده به یک سطح مبنا انتقال داده می‌شوند. تصحیح ارتفاعی دارای دو مؤلفه‌ی تصحیح هوای آزاد و تصحیح تخته‌ی بوگه است. مقدار تصحیح هوای آزاد از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\delta g_{FA} = 0.3086h \quad (۵-۵)$$

که در آن؛ δg_{FA} ، مقدار تصحیح هوای آزاد (بر حسب میلی‌گال) و h ، ارتفاع ایستگاه‌های اندازه‌گیری نسبت به سطح مبنا (بر حسب متر) است. با اعمال این تصحیح تمام ایستگاه‌های اندازه‌گیری به یک سطح مبنا انتقال می‌یابند. اگر ایستگاه اندازه‌گیری بالاتر از سطح مبنا باشد، مقدار تصحیح هوای آزاد به مقدار گرانی قرائت‌شده اضافه شده و اگر ایستگاه اندازه‌گیری پایین‌تر از سطح مبنا باشد، این مقدار از عدد قرائت‌شده‌ی گرانی کم می‌شود.

با توجه به شکل ۵-۳ ایستگاه‌های اندازه‌گیری S_1 و S_2 ، که ارتفاع آن‌ها از سطح دریا به ترتیب برابر h_1 و h_2 می‌باشد، به اندازه‌ی h با یک‌دیگر اختلاف ارتفاع دارند. بر خلاف ایستگاه S_1 ، ایستگاه S_2 بر روی تپه قرار داشته و زیر آن جرم سنگ‌ها قرار دارند که به نوبه‌ی خود می‌تواند شتابی در جهت شتاب گرانی زمین بر گرانی‌سنج اعمال نماید. به چنین شتابی اصطلاحاً اثر گرانی تخته‌ی بوگه گفته می‌شود که مقدار آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

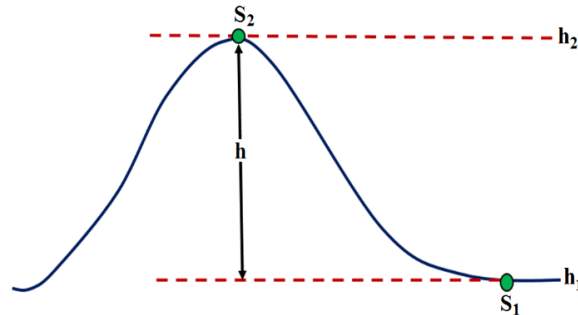
$$\delta g_B = 2\pi G\rho h = 0.0419\rho h \quad (۶-۵)$$

که در آن؛ δg_B مقدار تصحیح تخته‌ی بوگه (بر حسب میلی‌گال)، ρ چگالی متوسط سنگ‌های تشکیل‌دهنده‌ی تپه (بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب) و h اختلاف ارتفاع دو ایستگاه S_1 و S_2 (بر حسب متر) است. اگر ایستگاه اندازه‌گیری بالاتر از سطح مبنا باشد، مقدار تصحیح بوگه از مقدار گرانی قرائت‌شده کم شده و اگر ایستگاه اندازه‌گیری پایین‌تر از سطح مبنا باشد، این مقدار به عدد قرائت‌شده‌ی گرانی اضافه می‌شود.

در این تحقیق، با توجه به این که همه‌ی نقاط اندازه‌گیری در محدوده‌ی اکتشافی دارای ارتفاعی بیش‌تر از سطح مبنا هستند، بنابراین مقادیر δg_{FA} و δg_B برای هر یک از ایستگاه‌ها محاسبه و سپس به ترتیب به مقادیر گرانی ایستگاه‌ها اضافه و از آن‌ها کم شدند. بنابراین آنومالی بوگه‌ی ساده به صورت زیر برای هر

ایستگاه به دست آمد:

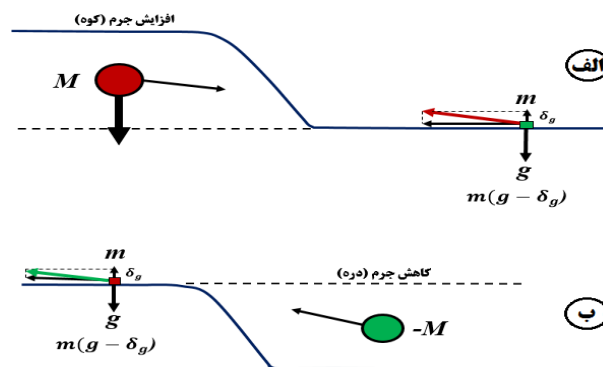
$$\Delta g_{SB} = g_{obs} + \delta_{DC} - \delta g_{\phi} + \delta g_{FA} - \delta g_B \quad (7-5)$$



شکل ۵-۳: تصحیح تختی بوگه. S1 و S2 به ترتیب ایستگاه‌های اندازه‌گیری در پای دامنه و بالای تپه می‌باشند.

۵-۳-۳-۵ تصحیح اثر توپوگرافی

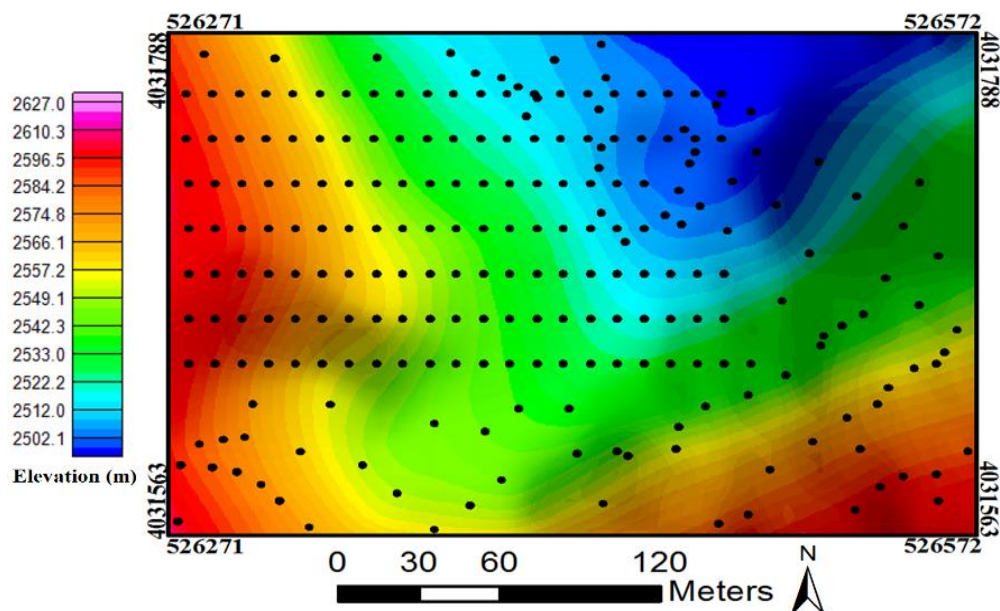
عامل جرم یکی از عوامل تأثیرگذار بر روی داده‌های گرانی اندازه‌گیری شده است که بخشی از آن به وسیله‌ی اثر تختی بوگه تصحیح می‌گردد. علاوه بر این، از آنجایی که مقدار شتاب گرانی اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه تحت تأثیر جرم‌های ناشی از تپه‌ها و دره‌های اطراف آن قرار می‌گیرد (شکل ۵-۴) بنابراین علاوه بر تصحیح تختی بوگه به تصحیح دیگری تحت عنوان تصحیح اثر توپوگرافی (زمینگان) نیاز است تا اثرات این بی‌نظمی‌ها بر روی ایستگاه اندازه‌گیری محاسبه شده و از داده‌های مشاهده‌ای حذف شوند. تصحیح توپوگرافی همواره مثبت بوده و به گرانی قرائت شده در هر ایستگاه اضافه می‌گردد (Blakely, 1996; Reynolds, 1997).



شکل ۵-۴: اثر توپوگرافی بر میزان گرانی اندازه‌گیری شده؛ الف) اثر کوه و ب) اثر دره (Reynolds, 1997)

قدیمی‌ترین و مرسوم‌ترین روش برای تصحیح توپوگرافی استفاده از چارت و جدول هامر^۱ (۱۹۳۹) است که روشی وقت‌گیر می‌باشد. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و توسعه‌ی مدل‌های رقومی ارتفاعی^۲، روش‌های جدیدی ارائه شده که تصحیح توپوگرافی را با سرعت و دقت بیش‌تری انجام می‌دهند. به این ترتیب که برای محاسبه‌ی اثر توپوگرافی تپه‌ها و دره‌های واقع در نقاط دور یا نزدیک به نقاط ایستگاهی از دو نقشه‌ی رقومی ارتفاعی استفاده می‌شود. از نقشه‌ی رقومی ارتفاعی بزرگ‌مقیاس برای تعیین اثر زون نزدیک توپوگرافی و از نقشه‌ی رقومی ارتفاعی کوچک‌مقیاس برای تعیین اثر زون دور توپوگرافی استفاده می‌شود. در این تحقیق، ابتدا نقشه‌های رقومی ارتفاعی بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس به ترتیب با استفاده از نقاط ارتفاعی برداشت‌شده در حین عملیات گرانی‌سنجی با دوربین توتال استیشن و تصاویر ماهواره‌ای استر تهیه شدند (اشکال ۵-۵ و ۵-۶). سپس مقدار تصحیح توپوگرافی با استفاده از نرم‌افزار Oisis montaj بر اساس روش‌های شبکه‌بندی، داده‌های رقومی و فرمول‌های مورد نیاز برای همه‌ی ایستگاه‌ها محاسبه و به مقدار گرانی مربوط به ایستگاه‌ها اضافه شد. بنابراین آنومالی بوگه‌ی کامل به صورت زیر برای هر ایستگاه به دست آمد:

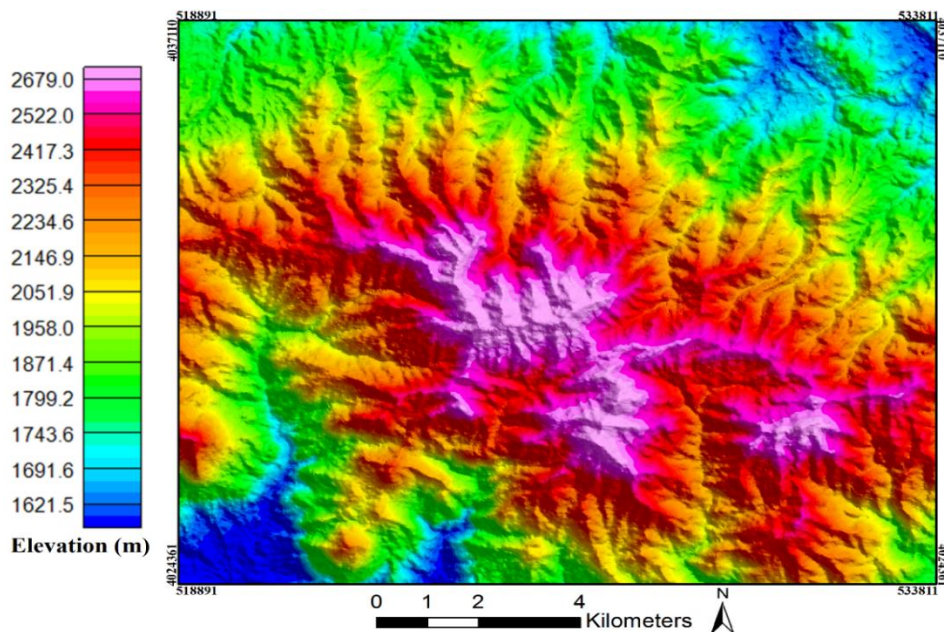
$$\Delta g_{CB} = \Delta g_{CB} + \delta_{TC} \quad (۸-۵)$$



شکل ۵-۵: نقشه‌ی رقومی ارتفاعی محدوده‌ی مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری گرانی‌سنجی (زون نزدیک)

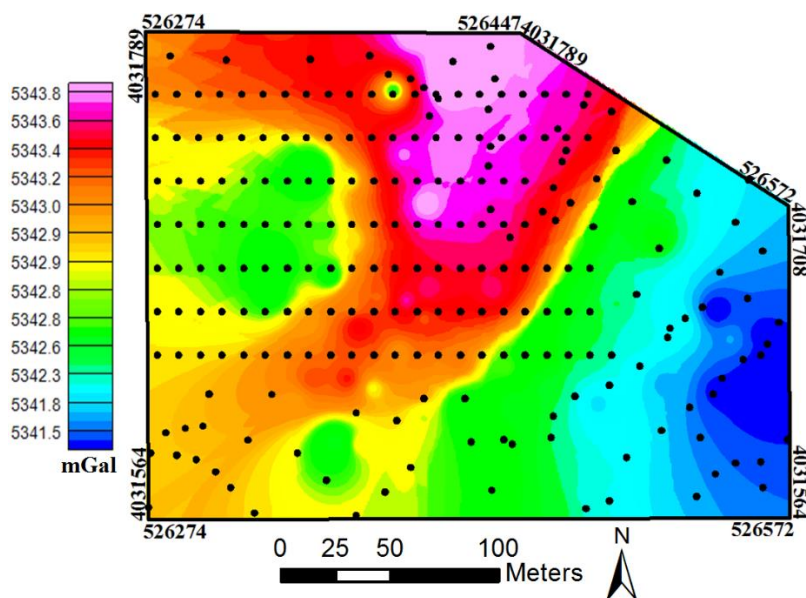
^۱ Hammer

^۲ Digital elevation model (DEM)



شکل ۵-۶: نقشه‌ی رقومی ارتفاعی منطقه‌ی اطراف محدوده‌ی چشمه‌پلنگان برای تصحیح اثر زون دور توپوگرافی

شکل ۵-۷، نقشه‌ی آنومالی بوگه را برای محدوده‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد. در این نقشه، یک روند تغییر مقادیر آنومالی گرانی از سمت شرق به غرب ناحیه کاملاً مشهود است به طوری که در بخش شرقی محدوده مقادیر گرانی با یک روند شمالی-جنوبی کاهش یافته و در شمال مرکزی محدوده مقادیر گرانی به حداکثر می‌رسند که می‌تواند نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی احتمالی مرتبط با کانی‌سازی کرومیت باشد.



شکل ۵-۷: نقشه‌ی آنومالی بوگه‌ی کامل (مقدار اثر گرانی بر حسب میلی‌گال)

۵-۳-۶ تخمین چگالی متوسط محدوده‌ی مورد مطالعه

در تصحیح داده‌های گرانی و حذف اثرات جرمی، برای تصحیح مقدار اثر تخته‌ی بوگه و توپوگرافی و همچنین انجام مدل‌سازی داده‌های گرانی دانستن مقدار چگالی متوسط^۱ محدوده ضروری است. برای تخمین مقدار چگالی از روش‌های مستقیم مانند: تعیین چگالی از روی نمونه‌های دستی، روش‌های غیرمستقیم مانند: نقشه‌های زمین‌شناسی و تعیین چگالی با استفاده از جداول (جدول ۵-۲)، تخصیص یک چگالی متوسط و استاندارد که برابر ۲/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و روش‌های صحرایی مانند: روش پروفیل چگالی نتلتون^۲ استفاده می‌شود. در این تحقیق، برای تعیین مقدار چگالی متوسط محدوده‌ی مورد مطالعه برای حذف اثرات جرمی در تصحیح توپوگرافی و تخته‌ی بوگه از روش نتلتون استفاده شد که مقدار متوسط آن ۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب تخمین زده شد (شکل ۵-۸).

جدول ۵-۲: چگالی برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها (Telford et al., 1990)

نوع سنگ	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	چگالی متوسط (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
سنگ‌های اسیدی	۲/۳۰ تا ۳/۱۱	۲/۶۱
سنگ‌های بازی	۲/۰۹ تا ۳/۱۷	۲/۷۹
گابرو	۲/۷۰ تا ۳/۵۰	۳/۰۳
دیاباز	۲/۵۰ تا ۳/۲۰	۲/۹۱
پریدوتیت	۲/۷۸ تا ۳/۳۷	۳/۱۵
سرپانتین	۲/۴ تا ۳/۱۰	۲/۷۸
کرومیت	۴/۳ تا ۴/۶	۴/۳۶

۵-۳-۴ پردازش داده‌های گرانی و تفکیک بی‌هنجاری‌ها

از آنجایی که برداشت‌های میدان پتانسیل برای اهداف مختلفی از جمله تعیین ساخت‌های زمین‌شناسی زیرسطحی، شناسایی گسل‌های بزرگ و عمیق، بررسی پی‌سنگ منطقه و کشف منابع بی‌هنجاری مربوط به توده‌های معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند و از طرفی، نقشه‌های بی‌هنجاری تهیه‌شده از برداشت‌های گرانی‌سنجی از اثرات کلیه‌ی توده‌ها و ساختارهایی به‌وجود آمده‌اند که در اعماق مختلف واقع بوده و دارای چگالی‌های متفاوتی هستند، بنابراین بسته به هدف و همچنین مقیاس برداشت داده‌های میدان پتانسیل، بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و یا باقی‌مانده به‌کار گرفته می‌شوند (Grant and West, 1965; Blakely, 1996; Reynolds, 1997). در نقشه‌های میدان پتانسیل، تأثیرات سنگ بستر که بی‌هنجاری ناحیه‌ای نامیده

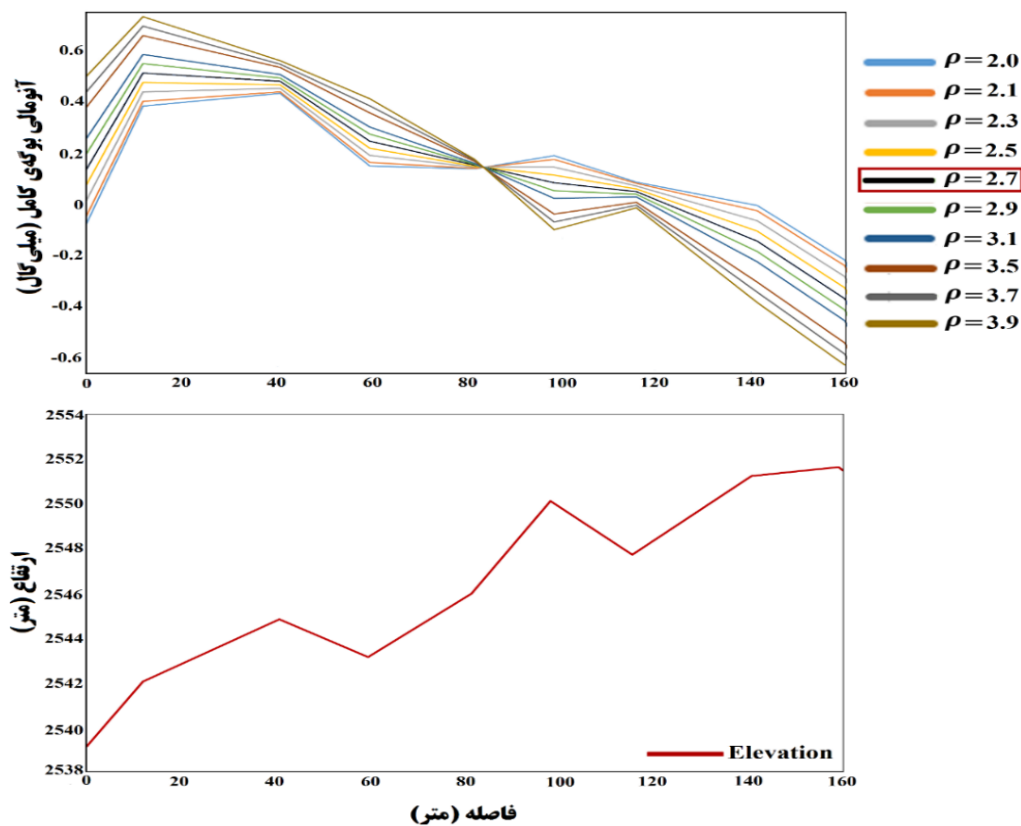
^۱ Average density

^۲ Nettelton

می‌شود، با تغییرات ملایم و خطی مشخص می‌شوند. این بی‌هنجاری‌ها دارای فرکانس پایین و طول موج بلند هستند. در حالی که بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده‌ی ناشی از منابع سطحی کم‌عمق که از کم کردن بی‌هنجاری مشاهده‌ای (بوگه) از بی‌هنجاری ناحیه‌ای به دست می‌آیند، دارای فرکانس بالا و طول موج کوتاه می‌باشد (Nettleton, 1976). طبق رابطه‌ی زیر، داده‌های برداشت‌شده در یک منطقه، طیفی از بی‌هنجاری‌های سطحی یا باقی‌مانده تا بی‌هنجاری‌های عمیق یا ناحیه‌ای (توده‌ها و منابع معدنی در اعماق مختلف) را شامل می‌شوند؛ بنابراین لازم است این دو دسته بی‌هنجاری از یکدیگر تفکیک شوند تا بدین ترتیب بی‌هنجاری‌های مورد نظر آشکارسازی شوند.

$$g_{Res} = g_{Obs} - g_{Reg} \quad (9-5)$$

که در آن؛ g_{Res} بی‌هنجاری باقی‌مانده، g_{Obs} بی‌هنجاری گرانی بوگه و g_{Reg} بی‌هنجاری ناحیه‌ای می‌باشد. روش‌های مختلفی برای جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و محلی از یکدیگر وجود دارند؛ که یکی از آن‌ها، روش ادامه فراسو می‌باشد که در آن می‌توان با برآورد ارتفاع بهینه، بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده و ناحیه‌ای را به‌طور مطلوبی از یکدیگر تفکیک کرد. در این تحقیق از روش ادامه فراسوی میدان گرانی و روش روند سطحی جهت تفکیک بی‌هنجاری‌های محلی از بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای استفاده شد.



شکل ۵-۸: نتایج حاصل از روش نتلتون برای تعیین مقدار چگالی متوسط محدوده‌ی چشمه‌پلنگان

۵-۳-۴-۱ برآورد ارتفاع بهینه‌ی ادامه فراسو به منظور تولید نقشه‌ی شاهد گرانی سنجی

یکی از روش‌های تفسیر کیفی داده‌های میدان پتانسیل محاسبه‌ی مقادیر داده‌های میدان پتانسیل بر اساس روابط ریاضی در یک سطح ارتفاعی دیگر است. در این فرآیند پردازشی اگر داده‌ها به سطح بالاتری منتقل شوند، ادامه فراسو و اگر در سطح پایین‌تری محاسبه شوند، ادامه فراسو میدان پتانسیل گفته می‌شود (Bhattacharyya, 1977; Jacobsen, 1987). اگر $U(x, y, z_0)$ میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده در سطح $z = z_0$ باشد آن‌گاه برای انتقال میدان پتانسیل به سطح $z = z_0 - \Delta z$ (جهت مثبت محور z به سمت داخل زمین در نظر گرفته شده است) از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود (Blakely, 1996):

$$U_{UP}(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{-\Delta z}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{U_{obs}(x', y', z_0) dx' dy'}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + h^2]^{3/2}}, \quad \Delta z > 0 \quad (10-5)$$

در حوزه‌ی فرکانس برای محاسبه‌ی مقادیر ادامه‌یافته به سطوح بالاتر از تبدیل فوریه به‌جای حل رابطه‌ی انتگرالی (۱۰-۵) استفاده می‌شود:

$$F[U_{UP}] = F[U_{obs}(x, y)] \exp(-h |k|) \quad (11-5)$$

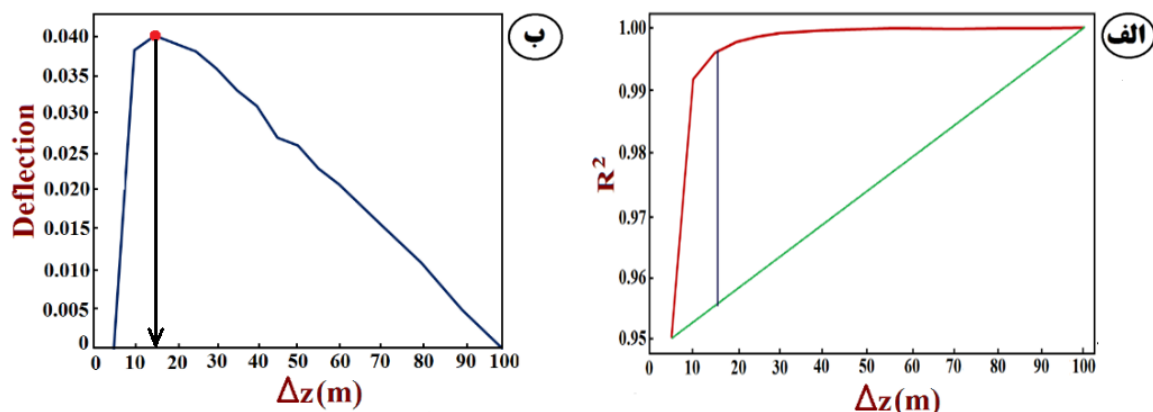
که در آن؛ $F[U_{UP}]$ تبدیل فوریه‌ی میدان پتانسیل محاسبه‌ای در ارتفاع $z = z_0 - \Delta z$ ، $F[U_{obs}(x, y)]$ تبدیل فوریه‌ی میدان پتانسیل اندازه‌گیری شده در ارتفاع $z = z_0$ و k ، عدد موج است. در واقع فیلتر ادامه فراسو یک تبدیل ریاضی است که سبب تضعیف بی‌هنجاری‌های با طول موج کوتاه می‌شود و میزان این تضعیف به مقدار ارتفاع ادامه فراسو بستگی دارد (Blakely, 1996; Gupta and Ramani, 1980). در این روش انتخاب ارتفاع بهینه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است؛ زیرا ارتفاع‌های کم‌تر و بیش‌تر از مقدار بهینه به ترتیب سبب باقی‌ماندن اثر بی‌هنجاری‌های محلی و تضعیف مضاعف اثر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای در داده‌های میدان پتانسیل می‌شوند.

در این تحقیق برای محاسبه‌ی ارتفاع مناسب و بهینه از روش ارائه‌شده توسط زنگ و هم‌کاران (۲۰۰۷) استفاده شده است. به این منظور ابتدا با استفاده از رابطه‌ی (۱۲-۵) هم‌بستگی عرضی میان دو ادامه فراسو برای دو ارتفاع متوالی محاسبه می‌شود (Abdelrahman et al., 1989):

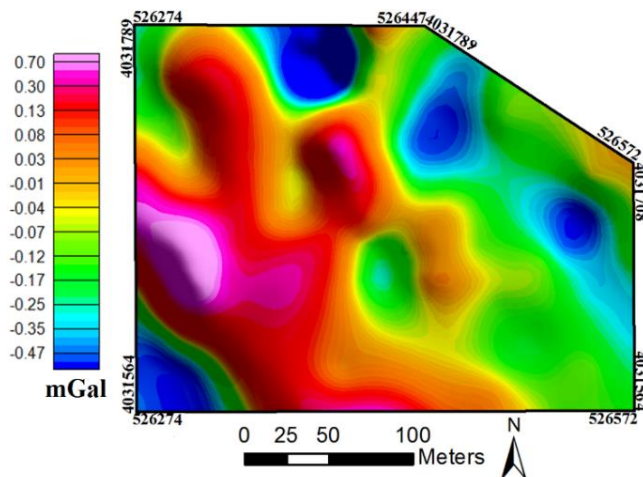
$$R_{(\Delta g_1, \Delta g_2)} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_1(x_i, y_j) \Delta g_2(x_i, y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_1^2(x_i, y_j) \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta g_2^2(x_i, y_j)}} \quad (12-5)$$

که در آن؛ Δg_1 و Δg_2 ، نتایج دو ادامه فراسو برای دو ارتفاع متوالی معین و M و N به ترتیب تعداد نمونه‌ها در راستاهای x و y است. سپس مقادیر هم‌بستگی عرضی بر حسب تغییرات ارتفاع رسم می‌شوند. در نمودار حاصله، مقادیر هم‌بستگی با افزایش ارتفاع به یک مقدار حدی هم‌گرا می‌شوند که بیش‌ترین انحراف از خط واصل بین نقطه‌ی ابتدا و انتها در نقطه‌ی بهینه اتفاق می‌افتد. در واقع بیشینه‌ی انحراف مربوط به ارتفاعی است که اثرات بی‌هنجاری‌های محلی در نتیجه‌ی ادامه فراسو تضعیف شده و در مقابل اثر بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای به‌خوبی نمایان می‌شود.

در این تحقیق، ادامه فراسو روی داده‌های برداشت‌شده برای ارتفاع‌های صفر تا ۱۰۰ متر با گام ۵ متر اعمال و سپس نمودار هم‌بستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی بر حسب تغییرات ارتفاع رسم شد (شکل ۵-۹-الف). هم‌چنین، مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه‌ی ابتدایی و انتهایی نمودار رسم شد (شکل ۵-۹-ب). همان‌طور که در شکل‌های ۵-۱۵-الف و ب مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی مقدار انحراف در ارتفاع ۱۵ متر دیده می‌شود که برابر همان ارتفاع بهینه است. به این ترتیب با محاسبه‌ی اثرات ناحیه‌ای میدان گرانی، یعنی مقدار ادامه فراسوی میدان گرانی با استفاده از ارتفاع بهینه‌ی ۱۵ متری؛ و کم کردن آن از داده‌های میدان گرانی بوگه، مقدار بی‌هنجاری گرانی باقی‌مانده محاسبه و نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده یا محلی تهیه شد (شکل ۵-۱۰).



شکل ۵-۹: الف) نمودار هم‌بستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی بر حسب تغییرات ارتفاع و ب) مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه‌ی ابتدایی و انتهایی و بیشینه‌ی مقدار انحراف (نقطه‌ی صورتی)



شکل ۵-۱۰: نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی به‌دست آمده از روش ادامه فراسو و ارتفاع بهینه‌ی ۱۵ متر

۵-۴ مطالعات مغناطیس‌سنجی جهت تهیه‌ی نقشه‌ی شاهد مغناطیسی

روش مغناطیس‌سنجی اولین روش ژئوفیزیکی در اکتشافات معدنی به‌ویژه کانی‌های فلزی بوده که برای شناسایی تغییرات مغناطیسی لایه‌ها و سنگ‌های زیر سطح زمین استفاده شده است. در این روش تغییرات میدان مغناطیسی، که به‌علت تفاوت در خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها ایجاد می‌شوند، در هر نقطه به‌وسیله‌ی دستگاه مغناطیس‌سنج اندازه‌گیری شده و بدین ترتیب بی‌هنجاری‌های میدان مغناطیسی در راستای یک پروفیل یا در یک شبکه مشخص می‌شوند.

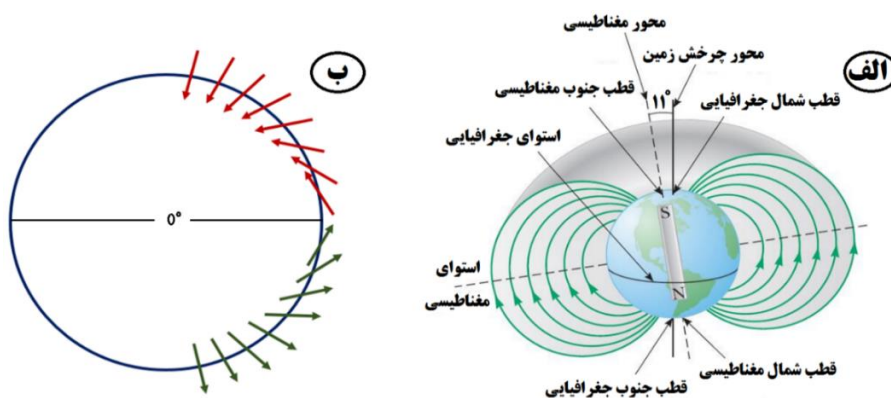
در اثر فعالیت‌های هسته‌ی خارجی زمین، در اطراف زمین و حتی در فواصل بسیار دورتر از سطح زمین، میدان مغناطیسی وجود دارد و مگنتوسفر زمین را شکل می‌دهد. خطوط این میدان از نیم‌کره‌ی جنوبی زمین خارج شده و در نیم‌کره‌ی شمالی وارد زمین می‌شود (شکل ۵-۱۱-الف). در نتیجه در هر عرض جغرافیایی خطوط میدان مغناطیسی با سطح افقی زمین زاویه‌ای می‌سازد (شکل ۵-۱۱-ب) در پیمایش‌های مغناطیسی معمولاً واحد اندازه‌گیری میدان مغناطیسی برحسب نانو تسلا یا گاما بیان می‌شود (Telford et al., 1990).

بیش‌تر کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی سنگ‌ها نه‌تنها خاصیت مغناطیسی پایینی دارند، بلکه تمایلی برای مغناطیس‌شدن نیز از خود نشان نمی‌دهند. اما کانی‌های دارای اکسید آهن و تیتانیوم مانند مگنتیت (Fe_3O_4) و اولواسپینل (Fe_2TiO_4)، به‌علت دارا بودن خاصیت قوی مغناطیسی، بی‌هنجاری‌های مغناطیسی زیادی ایجاد می‌کنند. بنابراین در بررسی‌های مغناطیس‌سنجی، به‌دلیل آن‌که سنگ‌های دارای این کانی‌ها دارای خاصیت مغناطیسی ذاتی هستند، می‌توان آن‌ها را با این روش مورد بررسی قرار داد. شدت مغناطیسی‌شدن سنگ‌ها (I) با قرار گرفتن در یک میدان مغناطیسی خارجی با استفاده از رابطه‌ی

زیر به دست می آید:

$$I = KH \cos \theta \quad (۱۳-۵)$$

که در آن؛ H میدان مغناطیسی خارجی، K خودپذیری مغناطیسی^۱ ماده‌ی معدنی یا سنگ و θ زاویه‌ی بین گشتاور میدان خارجی با خط عمود بر سطح توده‌ی مغناطیس شونده است. خودپذیری مغناطیسی ضریب بدون واحدی است که بستگی به خواص فیزیکی مواد دارد و مقادیر آن می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در روش مغناطیس‌سنجی، K یک پارامتر فیزیکی است که نقش مهمی در پی‌بردن به ماهیت مواد دارد. در جدول (۳-۵) خودپذیری مغناطیسی برخی از مواد معدنی و سنگ‌های مرتبط با کانی‌زایی کرومیت ارائه شده است.



شکل ۵-۱۱: الف) خطوط شار میدان مغناطیسی زمین؛ خطوط میدان در استوا و قطب‌های مغناطیسی به ترتیب به صورت افقی و عمودی هستند، ب) زاویه‌ی میل میدان مغناطیسی در عرض‌های جغرافیایی مختلف

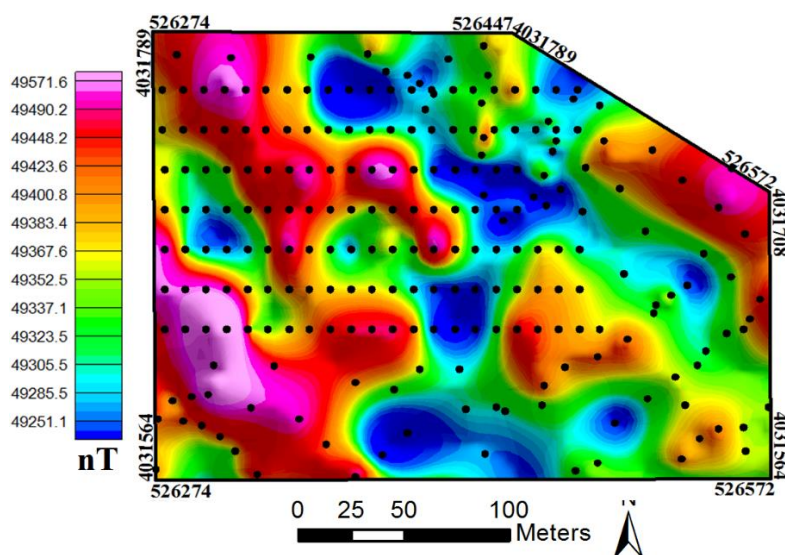
جدول ۳-۵: خودپذیری مغناطیسی برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها (Telford et al., 1990)

نوع سنگ	خودپذیری مغناطیسی در سیستم SI ($\times 10^3$)	متوسط خودپذیری مغناطیسی در سیستم SI ($\times 10^3$)
گابرو	۱ تا ۹۰	۷۰
دیاباز	۱ تا ۱۶۰	۵۵
پریدوتیت	۹۰ تا ۲۰۰	۱۵۰
سرپانتین	۳ تا ۱۷	-
کرومیت	۳ تا ۱۱۰	۷
ایلمنیت	۳۰۰ تا ۳۵۰۰	۱۸۰۰
مگنتیت	۱۲۰۰۰ تا ۱۹۲۰۰	۶۰۰۰

^۱ Magnetic susceptibility

۵-۴-۱ اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در محدوده‌ی چشمه‌پلنگان

همان‌طور که در بخش مطالعات گرانی‌سنجی بیان شد، پس از طراحی شبکه‌ی برداشت داده‌های ژئوفیزیکی و همزمان با داده‌های گرانی، داده‌های مغناطیسی نیز برداشت شد. اندازه‌گیری‌های مغناطیسی‌سنجی درست در همان ایستگاه‌های برداشت داده‌های گرانی (شکل ۵-۲-پ) انجام شد. در برداشت نقاط از یک دستگاه مگنتومتر پروتون استفاده شد که دقت اندازه‌گیری آن در حدود ۰/۱ نانو تسلا است. برخلاف مگنتومتر فلاکس‌گیت، این نوع از مگنتومترها بزرگی میدان کلی مغناطیسی زمین را اندازه‌گیری می‌کنند. شکل ۵-۱۲، شبکه‌ی برداشت داده‌های مغناطیسی را بر روی نقشه‌ی شدت کل میدان مغناطیسی^۱ محدوده‌ی مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۲: شبکه‌ی برداشت داده‌های مغناطیسی محدوده‌ی چشمه‌پلنگان و نقشه‌ی شدت کل میدان مغناطیسی

۵-۴-۲ پیش‌پردازش (تصحیح) داده‌های مغناطیسی‌سنجی

همانند روش گرانی‌سنجی، قبل از هر گونه پردازش و تفسیر روی داده‌های میدان مغناطیسی برداشت‌شده، ضروری است تصحیحات عرض جغرافیایی، تغییرات روزانه^۲، ارتفاعی^۳ و توپوگرافی بر روی مقادیر مغناطیسی اندازه‌گیری‌شده اعمال شوند.

^۱ Total magnetic intensity (TMI)

^۲ Diurnal variation correction

^۳ Elevation correction

۵-۴-۲-۱ تصحیح ارتفاعی

گرادیان تغییرات میدان مغناطیسی در قطب ۰/۰۳- نانوتسلا بر متر و در استوا ۰/۰۱۵- نانوتسلا بر متر می‌باشد. بنابراین اگر تغییرات ارتفاع در یک عملیات ژئومغناطیس اکتشافی به ۱۰۰ متر برسد آن‌گاه این میزان تغییر ارتفاع، در قطب حدود ۳- نانوتسلا و در استوا حدود ۱- نانوتسلا بر روی داده‌ها تأثیر می‌گذارد. با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان گرادیان تغییرات میدان مغناطیسی را بر حسب نانوتسلا بر متر محاسبه نمود:

$$F_e = 0.047f \times 10^{-5} \quad (۱۴-۵)$$

که در آن؛ f شدت میدان مغناطیسی میانگین (بر حسب نانوتسلا) می‌باشد. در این تحقیق، تصحیح ارتفاعی بر روی داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده اعمال نشده است که دلیل آن، حساسیت کم میدان به تغییرات ارتفاع می‌باشد.

۵-۴-۲-۲ تصحیح توپوگرافی

تصحیح توپوگرافی زمانی اعمال می‌شود که دره‌ای با دیواره‌هایی از سنگ‌های آذرین که خاصیت مغناطیسی بالایی دارند وجود داشته باشد و یا این که هدف، یافتن یک توده‌ی غیرمغناطیده در سنگ‌های دارای خاصیت مغناطیسی باشد. تصحیح توپوگرافی با استفاده از روش هندرسن انجام می‌گیرد. در این روش، داده‌ها به یک سطح ارتفاعی بالاتر منتقل شده و بدین ترتیب اثرات پیچیده‌ی توپوگرافی حذف می‌شوند. در این تحقیق، از آن جایی که برای تفکیک آنومالی‌های محلی از ناحیه‌ای از روش ادامه فراسوی با ارتفاع بهینه استفاده شده است بنابراین می‌توان گفت که اثرات توپوگرافی به‌نوعی حذف شده‌اند.

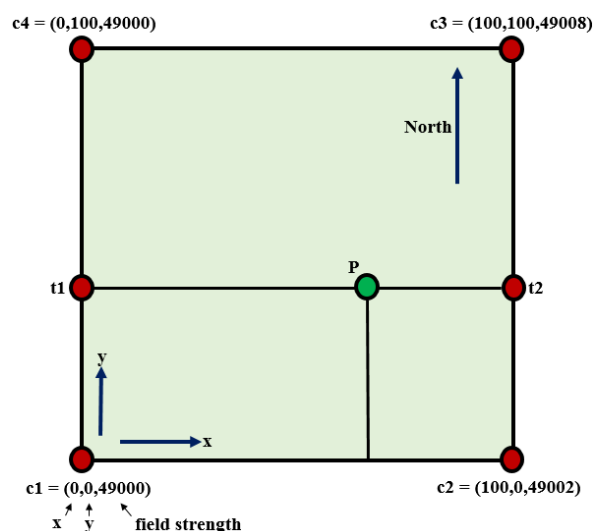
۵-۴-۲-۳ تصحیح تغییرات روزانه

میدان مغناطیسی زمین در یک نقطه در طول یک شبانه روز ثابت نیست و به‌میزان قابل توجهی تغییر می‌کند به‌طوری که مقدار متوسط تغییرات روزانه را می‌توان ۳۰ نانوتسلا در نظر گرفت. در شرایط طوفان مغناطیسی شاید این مقدار به حدود ۱۰۰۰ نانوتسلا هم برسد. اندازه‌ی تغییرات روزانه تا حد زیادی به عرض جغرافیایی محل بستگی دارد و از آن‌جا که دوره‌ی تناوب آن با چرخش زمین مطابقت می‌کند بنابراین تصور می‌شود که عامل اصلی این دسته تغییرات، خورشید باشد. نحوه‌ی انجام این تصحیح بدین ترتیب است که یک مگنتومتر را در ایستگاه مبنا مستقر کرده و به‌صورت پیوسته میدان مغناطیسی را قرائت می‌نمایند. سپس مقادیر مغناطیسی اندازه‌گیری شده در هر یک از ایستگاه‌ها را بر اساس تغییرات روزانه‌ی ثبت شده در ایستگاه مبنا تصحیح می‌نمایند. بنابراین در عملیات مغناطیس‌سنجی حداقل به دو

دستگاه مگنتومتر نیاز است. در این تحقیق، با استفاده از دو دستگاه مگنتومتر اندازه‌گیری‌ها انجام شد و سپس تصحیح تغییرات روزانه با استفاده از نرم‌افزار Oasis montaj بر روی داده‌های مغناطیسی برداشت‌شده از محدوده‌ی مورد مطالعه اعمال شد.

۵-۴-۲-۴ تصحیح عرض جغرافیایی

میدان مغناطیسی زمین به طول و عرض جغرافیایی وابسته است اما تغییرات عرضی میدان بسیار بیش‌تر از تغییرات طولی بوده به‌طوری‌که مقدار آن از ۲۵۰۰۰ نانوتسلا در استوا تا ۶۹۰۰۰ نانوتسلا در قطب متغیر می‌باشد. در دو حالت اهمیت انجام این تصحیح زیاد می‌شود یکی زمانی که در یک منطقه اندازه‌گیری‌های مغناطیس‌سنجی در راستای غالب شمالی- جنوبی انجام شوند و دیگری زمانی که برداشت‌ها در یک منطقه‌ی وسیعی مانند برداشت‌های هوابرد انجام شوند. یکی از معمول‌ترین روش‌هایی که برای مواجهه با این تغییرات مکانی به کار گرفته می‌شود، استفاده از مدل‌های میدان مغناطیسی اصلی زمین است که یکی از مشهورترین آن‌ها، مدل مرجع جهانی ژئومغناطیس (IGRF)^۱ می‌باشد. به کمک این مدل می‌توان شدت میدان مغناطیسی هسته‌ی زمین را در نقاط مختلف روی آن محاسبه نمود. یکی از روش‌های مورد استفاده در این زمینه، که در این تحقیق نیز به کار برده شده، آن است که با استفاده از درون‌یابی خطی، مقادیر محاسبه‌شده در رئوس منطقه را می‌توان به سایر نقاط مورد برداشت نسبت داد (شکل ۵-۱۳).



شکل ۵-۱۳: درون‌یابی خطی در یک برداشت دوبعدی

^۱ International geomagnetic reference field

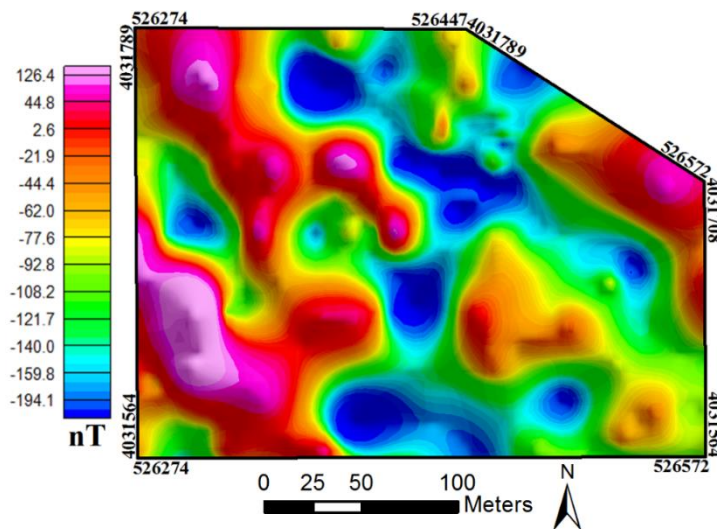
مطابق این شکل، بزرگی میدان مغناطیسی اصلی زمین به وسیله‌ی مدل IGRF برای چهار گوشه‌ی منطقه‌ی موردنظر مانند: C1، C2، C3 و C4 محاسبه می‌گردد. سپس برای تخمین بزرگی میدان در نقطه‌ای مانند p، ابتدا دو میان‌یابی خطی در جهت محور y برای رسیدن به نقطه‌ی t1 و t2 انجام شده و پس از آن با میان‌یابی خطی بین دو نقطه‌ی t1 و t2 جواب نهایی به دست خواهد آمد که همان نقطه‌ی p است.

۵-۴-۳ بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده‌ی مغناطیسی و فیلتر برگردان به قطب

بخش عمده‌ی شدت کل میدان مغناطیسی که در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود ناشی از هسته‌ی زمین است. با توجه به رابطه‌ی (۵-۱۵)، شدت کل میدان مغناطیسی (F_{Total}) اندازه‌گیری شده در سطح زمین ناشی از میدان مغناطیسی هسته‌ی زمین (F_{IGRF})، میدان یونسفر ($F_{Ionosphere}$) و میدان محلی (F_{Local}) است.

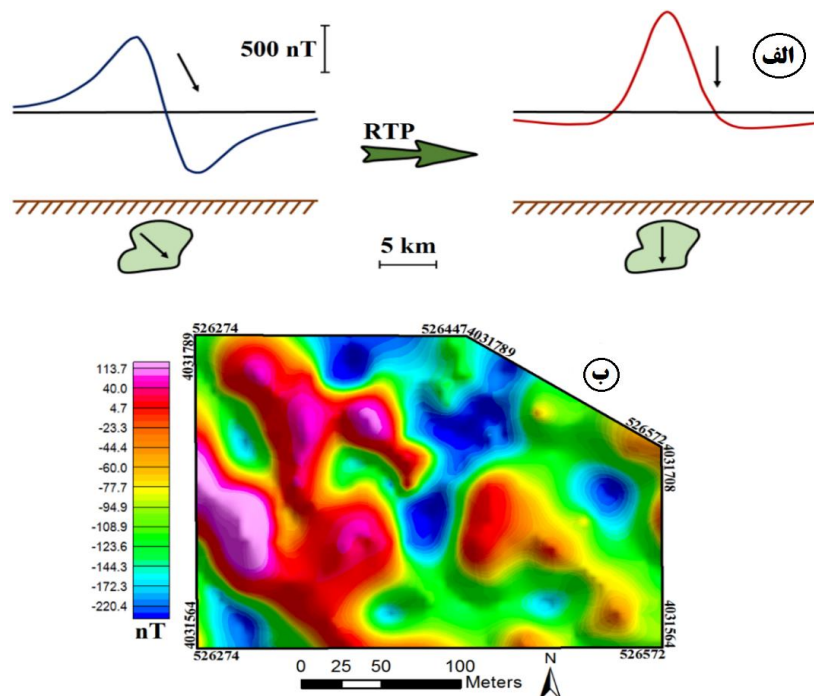
$$F_{Total} = F_{IGRF} + F_{Ionosphere} + F_{Local} \quad (۵-۱۵)$$

از آنجایی که در اکتشافات ژئومغناطیسی مواد معدنی، هدف به دست آوردن میدان محلی است، بنابراین میدان هسته‌ی زمین با تصحیح IGRF و میدان یونسفری با تصحیح تغییرات روزانه حذف می‌شوند. در نتیجه آنچه باقی می‌ماند میدان محلی یا همان میدان باقی‌مانده است که مقادیر شدت میدان مغناطیسی حاصل از جرم‌های آنومال مغناطیسی را نشان می‌دهد. در شکل (۵-۱۴)، نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی مغناطیسی در محدوده‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۴: نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی مغناطیسی در محدوده‌ی مورد مطالعه

بی‌هنجاری‌های مغناطیسی بر خلاف بی‌هنجاری‌های گرانی، که فقط تابعی از خاصیت فیزیکی چگالی مواد زیرسطحی می‌باشند، هم به خاصیت فیزیکی خودپذیری مغناطیسی مواد زیرسطحی (عامل اسکالر) و هم به جهت میدان مغناطیسی زمین (عامل برداری) وابسته می‌باشند. به عبارتی دیگر، شکل یک آنومالی مغناطیسی فقط به ابعاد و خاصیت فیزیکی توده بستگی ندارد، بلکه به جهت پلاریزاسیون مغناطیسی توده و جهت میدان اصلی نیز وابسته است (Hinze et al., 2013). به همین دلیل، شکل بی‌هنجاری‌های مغناطیسی متقارن نبوده و منشأ ایجادکننده‌ی بی‌هنجاری تقریباً در وسط دو قطب قرار می‌گیرد (شکل ۵-۱۵-الف) که این پدیده باعث پیچیدگی تحلیل نقشه‌های مغناطیسی می‌گردد. برای حل این مشکل فیلتر برگردان به قطب (RTP)^۱ ارائه شده است. در قطب شمال مغناطیسی زمین، جهت میدان ناحیه‌ای و پلاریزاسیون مغناطیسی به صورت قائم است که این سبب می‌شود که قطب مثبت رشد کرده و درست در بالای منشأ ایجادکننده‌ی خود قرار بگیرد و در مقابل قطب منفی تحلیل رفته و به حواشی بی‌هنجاری منتقل می‌شود (شکل ۵-۱۵-ب). بنابراین با اعمال این فیلتر می‌توان نامتقارنی‌های ایجادشده به وسیله‌ی میدان ناحیه‌ای و پلاریزاسیون مغناطیسی غیر قائم را حذف نمود (Dobrin and Savit, 1988). در شکل ۵-۱۵-ب، نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی مغناطیسی برگردانده‌شده به قطب در محدوده‌ی مورد مطالعه نشان داده شده است.

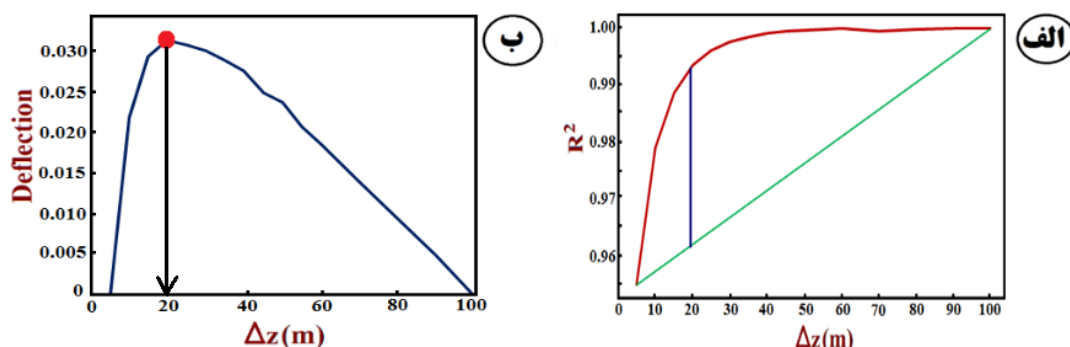


شکل ۵-۱۵: الف) تغییر شکل بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی مغناطیسی بعد از اعمال فیلتر برگردان به قطب (Blakely, 1996)، ب) نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی مغناطیسی برگردانده‌شده به قطب

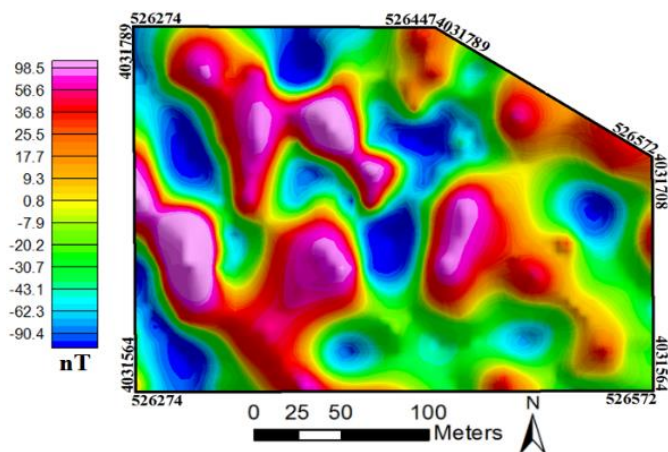
^۱ Reduction to the pole

۴-۴-۵ پردازش داده‌های ژئومغناطیسی و تفکیک بی‌هنجاری‌ها

در این تحقیق، همانند روش گرانی‌سنجی از روش ادامه فراسوی با ارتفاع بهینه و روش روند سطحی به‌منظور تفکیک بی‌هنجاری‌های سطحی (باقی‌مانده) و عمیق (ناحیه‌ای) از یکدیگر استفاده شده است. برای این کار، علاوه بر استفاده از روش روند سطحی و تعیین چندجمله‌ای مناسب برای محاسبه‌ی اثر بی‌هنجاری ناحیه‌ای، از روش ادامه فراسوی با ارتفاع بهینه نیز استفاده شد. بنابراین ابتدا ادامه فراسوی روی داده‌های برداشت‌شده برای ارتفاع‌های صفر تا ۱۰۰ متر با گام ۵ متر اعمال و سپس نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی بر حسب تغییرات ارتفاع رسم شد (شکل ۵-۱۶-الف). هم‌چنین، مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه‌ی ابتدایی و انتهایی نمودار رسم شد (شکل ۵-۱۶-ب). مطابق شکل‌های (۵-۱۶-الف و ب) بیشینه‌ی مقدار انحراف در ارتفاع ۲۰ متر دیده می‌شود که برابر همان ارتفاع بهینه است. بنابراین مقادیر گسترش و ادامه‌ی میدان به ارتفاع ۲۰ متر محاسبه و به‌عنوان مقادیر ناحیه‌ای انتخاب و اختلاف آن با مقادیر مشاهده‌ای میدان مغناطیسی جهت تهیه‌ی نقشه‌ی بی‌هنجاری محلی (نقشه‌ی شاهد بی‌هنجاری‌های ژئومغناطیسی) محاسبه شد (شکل ۵-۱۷).



شکل ۵-۱۶: نمودار همبستگی عرضی میان دو ادامه فراسوی متوالی بر حسب تغییرات ارتفاع، (ب) مقدار انحراف از خط واصل بین دو نقطه‌ی ابتدایی و انتهایی و بیشینه‌ی مقدار انحراف (نقطه‌ی صورتی)



شکل ۵-۱۷: بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی به‌دست‌آمده از روش ادامه فراسوی و ارتفاع بهینه‌ی ۲۰ متر

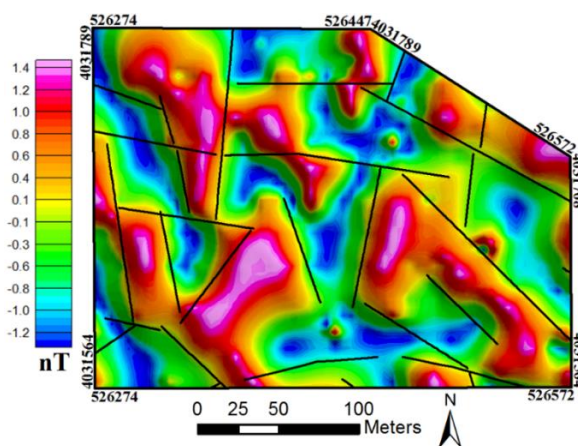
۵-۴-۵ شناسایی گسل‌ها و خطواره‌های مغناطیسی

یکی از کاربردهای روش‌های میدان پتانسیل، شناسایی خطواره‌ها و گسل‌های احتمالی است. در این تحقیق به منظور آشکارسازی لبه‌های حاصل از خطواره‌های موجود، فیلترهای مختلفی روی داده‌های گرانی و مغناطیسی اعمال شد. از فیلترهای معمول در این خصوص می‌توان به فیلتر زاویه‌ی تمایل^۱ اشاره کرد که به صورت زیر تعریف شده است (Miller and Singh; 1994):

(۱۶-۶)

$$TA = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial f}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}} \right)$$

که در آن، f میدان گرانی یا مغناطیس، TA زاویه‌ی تمایل و $\frac{\partial f}{\partial x}$ ، $\frac{\partial f}{\partial y}$ و $\frac{\partial f}{\partial z}$ به ترتیب مشتق‌های میدان مغناطیسی یا گرانی نسبت به راستاهای x ، y و z هستند. در صورتی که زاویه‌ی میل میدان مغناطیسی ۹۰ درجه باشد آن‌گاه مقدار زاویه‌ی تمایل بر روی مرز خطواره یا گسل صفر است. از آن‌جایی که مقدار زاویه‌ی تمایل از محل گسل در جهت شیب، منفی است، بنابراین می‌توان تا حدودی به جهت شیب گسل نیز پی برد (Verduzco et al., 2004). در شکل ۵-۱۸، نقشه‌ی زاویه‌ی تمایل داده‌های ژئومغناطیسی محدوده‌ی مورد مطالعه ارائه شده است که در آن گسل‌ها و خطواره‌های مغناطیسی با خطوط سیاه مشخص شده‌اند.



شکل ۵-۱۸: نقشه‌ی گسل‌ها و خطواره‌های مغناطیسی به دست آمده به کمک نقشه‌ی زاویه‌ی تمایل برگردان به قطب در محدوده‌ی اکتشافی چشمه پلنگان جغتای

^۱ Tilt angle

۵-۵ تولید نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته

همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، معیارهای اکتشافی زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی برای تولید نقشه‌های شاهد اکتشافی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و بی‌هنجاری‌های گرانی و ژئومغناطیسی مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، به دلیل آن که مقادیر پیوسته‌ی نقشه‌های شاهد فضایی حاصل (فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و بی‌هنجاری‌های گرانی و ژئومغناطیسی) در محدوده‌ی مشخص و یکسانی قرار نداشته و در نتیجه اهمیت نسبی آن‌ها به صورت درست و واقعی نمی‌تواند به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی مورد ارزیابی قرار گیرد، از روش وزن‌دهی پیوسته (رابطه‌ی ۳-۱ و تابع فازی‌سازی Small) برای فازی‌سازی نقشه‌های شاهد استفاده شد.

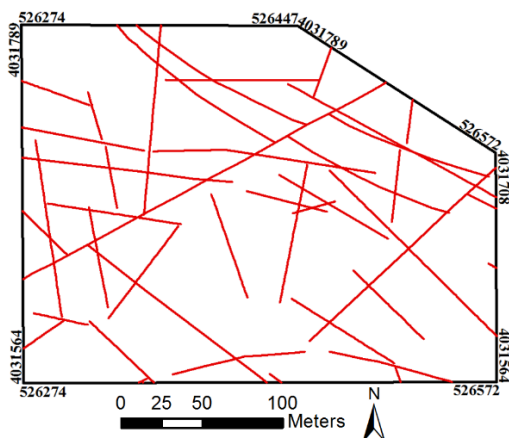
۵-۵-۱ نقشه‌ی شاهد فاصله از سنگ میزبان

از آن‌جایی که در محدوده‌ی مورد مطالعه، کرومیت دارای یک پیوند ذاتی با سنگ دونیت است، بنابراین یک روش معمول اکتشافی به نقشه درآوردن دونیت‌ها و دونیت‌های سرپانتینیزه است. زیرا کرومیت هم در بخش انباشته‌ای و هم در بخش گوشته‌ای در اصل با دونیت همراه بوده و سپس طی پدیده‌ی دی‌پایریسم بالا آمده و پراکنده شده است. در نتیجه، کرومیت هم در حالت اولیه (هنگام تشکیل در اعماق) و هم در حالت فعلی (ملانژ افیولیتی) در داخل دونیت‌ها و دونیت‌های سرپانتینیزه قرار دارد. در این تحقیق ابتدا واحدهای سنگی دونیتی و هم‌چنین رخنمون‌های کرومیت از نقشه‌ی ۱:۱۰۰۰ محدوده‌ی مورد مطالعه استخراج و سپس نقشه‌ی فاصله از آن‌ها به روش پیوسته وزن‌دهی شد (شکل ۵-۲۰-الف).

۵-۵-۲ نقشه‌ی شاهد چگالی گسل

بر اساس مطالعات صورت گرفته در کمربند افیولیتی سبزوار (تهیه‌ی نقشه‌ی زمین‌شناسی توسط شرکت کاوندگان بنا، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهرداد سلیمانی، ۱۳۸۳) و مشاهدات صحرائی، وابستگی همراهی کانی‌زایی کرومیت با گسل‌خوردگی واحدهای سنگی منطقه محرز است. بنابراین با توجه به ارتباط فضایی بین گسل‌ها و وضعیت کانی‌زایی کرومیت، مقادیر بالای چگالی گسل از نظر کانی‌سازی کرومیت دارای اهمیت بیش‌تری است. در این تحقیق، ابتدا گسل‌ها و خطواره‌های محدوده‌ی چشمه‌پلنگان با استفاده از نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰ (شکل ۵-۱-ب) و داده‌های ژئومغناطیسی (شکل ۵-۱۸)

شناسایی و رقمی شده (شکل ۵-۱۹) و سپس نقشه‌ی چگالی گسل ایجاد و به‌روش پیوسته وزن‌دهی شد (شکل ۵-۲۰-ب).



شکل ۵-۱۹: گسل‌ها و خطواره‌های استخراج‌شده‌ی محدود‌ی مورد مطالعه با استفاده از نقشه‌ی زمین‌شناسی و داده‌های ژئومغناطیسی

۵-۵-۳ نقشه‌ی شاهد بی‌هنجاری‌های گرانی

روش گرانی‌سنجی موثرترین روش ژئوفیزیکی به‌منظور اکتشاف ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای است. متوسط چگالی کان‌سنگ کرومیت برابر $4/36$ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که به‌طور نسبی به‌میزان قابل توجهی از چگالی متوسط پیردوتیت و سرپانتینیت که به ترتیب برابر $3/15$ و $2/78$ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد، بیش‌تر است (Telford, 1990). بنابراین، مقادیر بالای شتاب گرانی از نظر کانی‌سازی کرومیت دارای اهمیت بیش‌تری است. روش گرانی‌سنجی کارآمد است اما نمی‌تواند به‌تنهایی برای تعیین نقاط حفاری مورد استفاده قرار گیرد. زیرا بی‌هنجاری‌های به‌دست‌آمده ممکن است ناشی از اختلاف چگالی اولیه‌ی سنگ‌ها و یا حاصل فرآیند سرپانتینیت‌شدن باشند. در نتیجه، برای دستیابی به نتیجه‌ی مطلوب باید این روش را با سایر روش‌های اکتشافی دیگر تلفیق نمود. در این تحقیق، نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی به‌دست‌آمده از روش ادامه فراسو (شکل ۵-۱۰) به‌روش پیوسته وزن‌دهی شد (شکل ۵-۲۰-پ) و برای تلفیق با سایر لایه‌ها آماده شد.

۵-۵-۴ نقشه‌ی شاهد بی‌هنجاری‌های ژئومغناطیسی

ماهیت مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها به‌وسیله‌ی خاصیت خودپذیری مغناطیسی آن‌ها مشخص می‌شود. لایه‌های محدود کرومیتی واقع در بخش انباشته‌ای از خاصیت مغناطیسی بیش‌تری نسبت به توده‌های کرومیتی واقع در بخش گوشته‌ای برخوردار است که به‌دلیل همراهی اولیه‌ی ایلمنیت و

مگنتیت با گابرو در ردیف انباشته‌ای است. در اغلب معادن کرومیت یک کانی به‌رنگ بنفش یافت می‌شود که کامریت (کلریت کروم‌دار) نام دارد که در اثر مهاجرت کروم به‌داخل سرپانتینیت‌ها تشکیل شده است. هنگام مهاجرت کروم به‌داخل سرپانتینیت‌ها، اطراف عدسی‌های کرومیت از مگنتیت (ثانویه) غنی می‌شود و با توجه به این‌که ماتریکس، دونیت یا دونیت سرپانتینیزه است، بنابراین بی‌هنجاری با شدت میدان مغناطیسی حداکثر ممکن است مربوط به توده‌ی کرومیتی باشد. در این تحقیق، نقشه‌ی بی‌هنجاری باقی‌مانده‌ی به‌دست‌آمده از روش ادامه فراسو (شکل ۵-۱۷) به‌روش پیوسته وزن‌دهی شد (شکل ۵-۲۰-ت) و برای تلفیق با سایر لایه‌ها آماده شد.

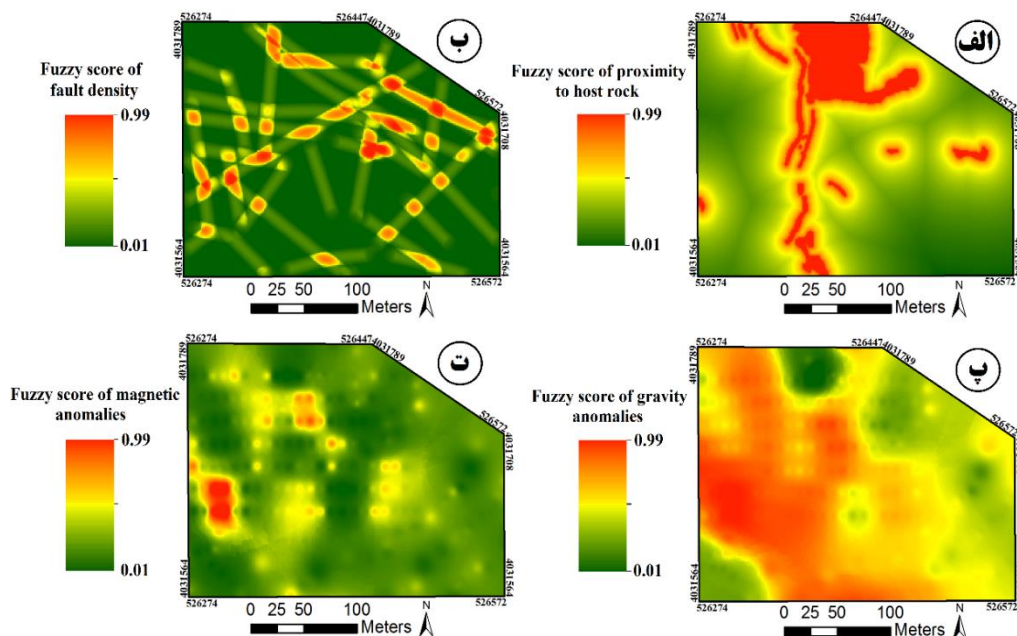
۵-۶ تولید مدل محلی پتانسیل معدنی

برای تهیه و تولید مدل پتانسیل معدنی محلی (همان‌طور که قبلاً بیان شده است)، لازم است که لایه‌های تهیه‌شده و مؤثر در این بحث در محیط GIS با هم تلفیق شوند. از آن‌جایی که در محدوده‌های مختلف اکتشافی به‌دلیل وجود پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، نتایج روش‌های مختلف تلفیق دارای تفاوت‌هایی خواهد بود، بنابراین لازم است در هر محدوده دو یا چند مدل پتانسیل با استفاده از روش‌های مختلف تلفیق شوند و سپس نتایج با هم مقایسه شده تا بهترین مدل برای تعیین نقاط هدف و حفاری انتخاب شود. در این تحقیق، نقشه‌های شاهد پیوسته (شکل ۵-۲۰) با استفاده از عملگرهای گامای فازی (گامای ۰/۹، شکل ۵-۲۱-الف) و میانگین هندسی (شکل ۵-۲۱-ب) تلفیق شد و نقشه‌ی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در محدوده‌ی اکتشافی چشمه‌پلنگان تهیه شد. برای ارزیابی نقشه‌های پتانسیل تولیدی در محدوده‌ی مورد مطالعه تنها از یک ترانشه و یک تونل استخراجی (که به کرومیت برخورد کرده بودند) استفاده شده است که تطابق مناسبی با مناطق پرتانسیل از خود نشان داده‌اند (شکل ۵-۲۱). لازم به‌ذکر است در محدوده‌ی مورد مطالعه تاکنون هیچ‌گونه عملیات اکتشافی انجام نشده است.

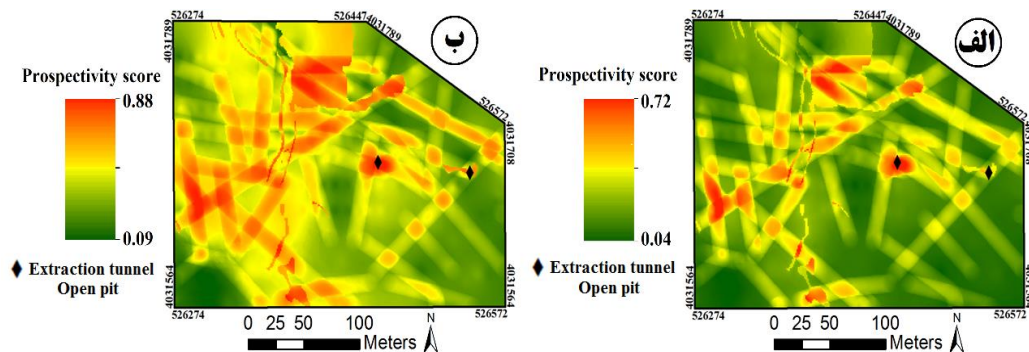
۵-۶-۱ مقایسه‌ی مدل‌ها و تعیین مرز نواحی مستعد کانی‌زایی

با توجه به این‌که نواحی امیدبخش کانی‌زایی کرومیت در مدل میانگین هندسی محدودتر بوده و وسعت کم‌تری را در بر می‌گیرند، بنابراین احتمال برخورد حفاری‌ها به کرومیت در نواحی پرتانسیل حاصل از این مدل بالاتر است. همان‌طور که در فصل سوم اشاره شد، نقشه‌های پیوسته‌ی پتانسیل معدنی نیازمند تفسیر و گسسته‌سازی می‌باشند. بنابراین در این تحقیق به‌منظور کلاسه‌بندی مدل میانگین هندسی به دو کلاس مطلوب و غیرمطلوب از روش‌های فرکتالی عیار-مساحت (Cheng et al.,

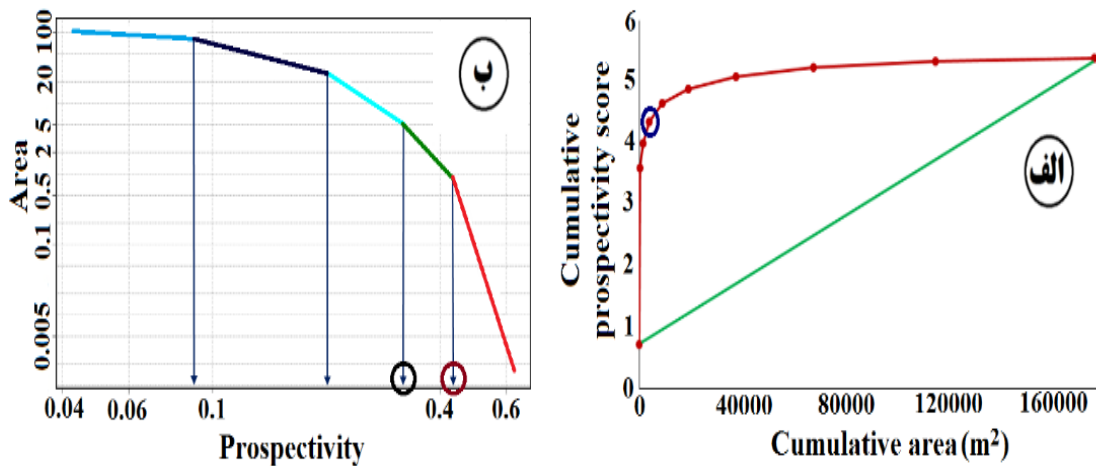
(1994) و برگردان فازی (Porwal et al., 2003) استفاده شد. در روش برگردان فازی بعد از تعیین مساحت مربوط به هر یک از مقادیر عضویت فازی، نمودار مقادیر تجمعی عضویت فازی در مقابل مساحت تجمعی رسم می‌شود (شکل ۵-۲۲-الف). در این نمودار با افزایش مقدار تجمعی مساحت، نرخ افزایش مقدار عضویت تجمعی کاهش یافته و بیش‌ترین انحراف از خط واصل بین نقطه‌ی ابتدا و انتها به‌عنوان حد آستانه‌ای در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵-۲۲-الف). هم‌چنین شکل ۵-۲۲-ب، نمودار فرکتالی عیار- مساحت را برای مدل پتانسیل میانگین هندسی نشان می‌دهد که بر اساس آن دو حد آستانه‌ای برای تعیین نواحی امیدبخش کانی‌زایی مشخص شدند. اشکال ۵-۲۳-الف، ب و پ، نقشه‌ی نواحی مستعد کانی‌زایی تعیین‌شده را نشان می‌دهند.



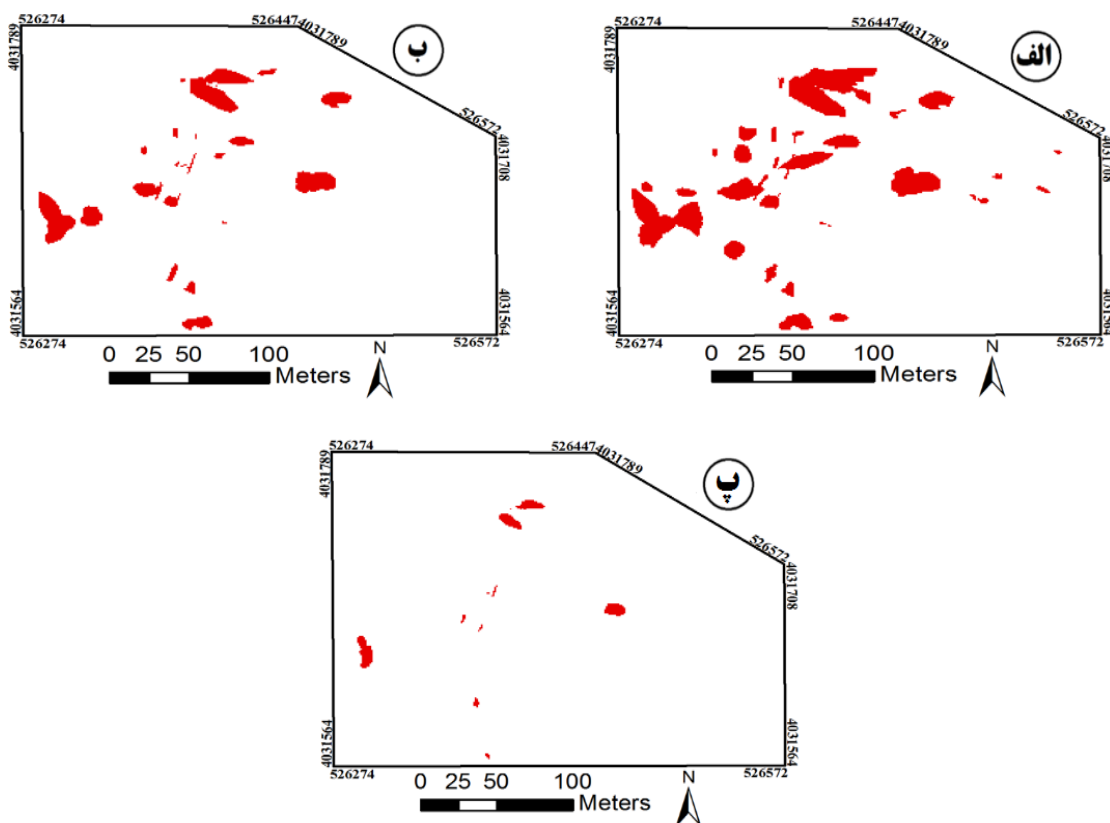
شکل ۵-۲۰: نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته؛ الف) فاصله از سنگ میزبان، ب) چگالی گسل، پ) بی‌هنجاری‌های گرانی و ت) بی‌هنجاری‌های ژئومغناطیسی



شکل ۵-۲۱: مدل‌های پتانسیل معدنی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته. الف) مدل گامای فازی. ب) مدل میانگین هندسی



شکل ۵-۲۲: الف) منحنی مساحت تجمعی در مقابل مقادیر تجمعی عضویت فازی که بر اساس آن حد آستانه‌ای برای تعیین نواحی مستعد کانی‌زایی مشخص شد و ب) نمودار فرکتالی عیار- مساحت که بر اساس آن حدود آستانه‌ای برای تعیین نواحی مستعد کانی‌زایی مشخص شدند.



شکل ۵-۲۳: الف) نواحی مستعد کانی‌زایی تعیین شده با استفاده از روش برگردان فازی (حد آستانه‌ای ۰/۳): پلیگون‌های قرمز نمایان‌گر اهداف اکتشافی هستند، ب) نواحی مستعد کانی‌زایی تعیین شده با استفاده از روش فرکتال (حد آستانه‌ای ۰/۳۵) و پ) نواحی مستعد کانی‌زایی تعیین شده با استفاده از روش فرکتال (حد آستانه‌ای ۰/۴۴)

فصل ۶: بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱ بحث و نتیجه‌گیری

کمر بند افیولیتی سبزوار به دلیل توزیع پراکنده‌ی رخدادهای معدنی شناخته‌شده و همچنین شرایط مساعد زمین‌شناسی، یکی از مناطق پر پتانسیل جهت اکتشاف ذخایر کرومیت انبانه‌ای است. به منظور شناسایی مناطق امیدبخش کانی‌زایی می‌توان از روش‌های مختلف مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده کرد. از آنجایی که روش‌های دانش‌محور، داده‌محور و ترکیبی آن‌ها دارای خطاها و عدم قطعیت‌های تصادفی و نظام‌مند ناشی از قضاوت کارشناس و تخصیص اوزان اریب می‌باشند، بنابراین در این مطالعه به منظور غلبه بر این خطاها و کاهش عدم قطعیت‌ها و در نتیجه افزایش کارایی مدل‌های ناحیه‌ای و محلی پتانسیل معدنی، از روش‌های داده‌محور بهبودیافته و پیوسته استفاده شد. در این راستا، معیارهای اکتشافی و نوع داده‌های مورد نیاز و در نتیجه الگوهای شاهد اکتشافی ناحیه‌ای و محلی ذخایر کرومیت انبانه‌ای با استفاده از تحلیل سیستم کانی‌سازی این ذخایر شناسایی و استخراج شدند.

در مقیاس ناحیه‌ای، شبکه‌های عصبی نظارت‌شده توسط پژوهشگران به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده شده است که در آن‌ها از نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته استفاده کرده‌اند. همان‌طور که در این مطالعه نشان داده شد داده‌های اکتشافی مکانی گسسته به دلیل ساده‌سازی اطلاعات زمین‌شناسی و عدم دانش کافی در مورد فرآیندهای زمین‌شناسی دارای عدم قطعیت هستند. طبقه‌بندی داده‌های اکتشافی مکانی بدین معنی است که ارزش‌های مکانی زیادی به منظور تناسب با کلاس‌های ریاضیاتی مشخص، ساده‌سازی می‌شوند. بنابراین ساده‌سازی داده‌ها و فرآیندهای زمین‌شناسی پیچیده و بسیار متغیر منجر به تولید مدل‌هایی می‌شود که زمین را همگن فرض می‌کنند، در صورتی که زمین یک محیط همگن نیست. از این‌رو، تابع لجستیکی غیرخطی به منظور کاهش وجود عدم قطعیت که به‌طور نامطلوبی بر مدل‌سازی عصبی- فازی اثر می‌گذارد، مورد استفاده قرار گرفت و نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته تولید شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل پتانسیل عصبی- فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد پیوسته به لحاظ پیش‌گویی نقاط معدنی کرومیت از عملکرد بهتری نسبت به مدل عصبی- فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد گسسته برخوردار است. بنابراین، مدل پتانسیل عصبی- فازی تولیدشده با استفاده از نقشه‌های شاهد پیوسته، پیشگوی مناسب‌تری بوده و در نتیجه می‌توان از آن در منطقه‌ی مورد مطالعه برای انتخاب مناطق هدف به منظور اکتشافات تفصیلی‌تر ذخیره‌ی مورد جستجو استفاده کرد. این موضوع ممکن است در مورد کمر بندها و ذخایر معدنی دیگر نیز صادق باشد، اما نیاز به بررسی دارد. علاوه بر این، روش‌های جنگل تصادفی (با استفاده از نقشه‌های شاهد پیوسته) و توابع ریاضیاتی (بر اساس تابع لجستیکی) به منظور مدل‌سازی ناحیه‌ای پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت استفاده شدند. از بین تمامی مدل‌های پتانسیل تولیدشده، مدل پتانسیل جنگل تصادفی با دارا بودن بهترین عملکرد برای انتخاب یک

محدوده جهت انجام اکتشافات تفصیلی تر (محلی) استفاده شد.

تعیین اثربخشی مدل‌های پتانسیل و نقشه‌های شاهد اکتشافی یکی از کارهای مهم در مدل‌سازی پتانسیل معدنی است. به‌همین دلیل، پژوهشگران روش‌هایی را برای ارزیابی مدل‌های پتانسیل معدنی یا نقشه‌های شاهد توسعه و بهبود داده‌اند که می‌توان به منحنی نرخ پیش‌گویی، منحنی نرخ موفقیت و نمودارهای نرخ پیش‌بینی - مساحت و مشخصه‌ی عملکرد سیستم اشاره نمود. منحنی نرخ پیش‌گویی عملکرد مدل‌های اکتشافی را تنها از نظر پیش‌بینی نقاط معدنی و بدون توجه به نقاط فاقد ذخیره و مساحت دربرگیرنده‌ی اهداف اکتشافی ارزیابی می‌نماید. در منحنی مشخصه‌ی عملکرد سیستم علاوه بر نرخ پیش‌بینی نقاط معدنی، نرخ پیش‌بینی نقاط فاقد ذخیره‌ی معدنی نیز در نظر گرفته می‌شود، اما مساحت دربرگیرنده‌ی اهداف اکتشافی نادیده گرفته می‌شود. در نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت و منحنی نرخ موفقیت، نرخ پیش‌بینی نقاط معدنی و مساحت دربرگیرنده‌ی اهداف اکتشافی در نظر گرفته شده است، اما نرخ پیش‌بینی نقاط فاقد ذخیره نادیده گرفته شده است. روش جدید ارائه‌شده در این تحقیق که نمودار نرخ پیش‌بینی - مساحت بهبودیافته است، هر سه معیار مهم و مؤثر در تصمیم‌گیری را به‌طور هم‌زمان در ارزیابی مدل‌های اکتشافی مد نظر قرار می‌دهد. بنابراین، این روش می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب در شناسایی نقشه‌های شاهد اکتشافی با اهمیت برای تولید مدل پتانسیل معدنی و همچنین انتخاب مدل‌های پتانسیل معتبرتر برای تعیین مناطق هدف مورد استفاده قرار گیرد. در آنالیز پتانسیل ناحیه‌ای و محدوده‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی کوچک و میان‌مقیاس به‌منظور استخراج ویژگی‌های شاخص کانی‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتیجه‌ی تحقیق حاضر نشان داد که عمل‌کرد کلی مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از ترکیب ویژگی‌های شاخص حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین - شناسی بهتر از مدل پتانسیل تولیدشده با استفاده از ویژگی‌های شاخص رقومی‌شده از نقشه‌ی زمین - شناسی میان‌مقیاس به‌تنهایی است. بنابراین، مناطق هدف تولیدشده با مدل حاصل از ترکیب تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌ی زمین‌شناسی وابستگی‌های فضایی قوی‌تری با نقاط کانی‌زایی کرومیت و وابستگی‌های فضایی ضعیف‌تری با نقاط فاقد ذخیره دارند و در نتیجه می‌توان از این مدل برای اکتشافات تفصیلی‌تر ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در منطقه‌ی مورد مطالعه بهره جست. این موضوع نشان می‌دهد که دورسنجی زمین‌شناسی به‌نقشه در آوردن ویژگی‌های ساختاری و سنگ‌شناسی و همچنین کارایی مدل‌های پتانسیل را در بررسی‌های اکتشافی کوچک و میان‌مقیاس بهبود می‌بخشد.

هم‌چنین در این تحقیق برای مدل‌سازی محلی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت انبانه‌ای، برای تعیین نقاط حفاری، در یکی از مناطق هدف شناسایی‌شده در فاز ناحیه‌ای پرداخته شد. در این راستا نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته با استفاده از عملگرهای گامای فازی و میانگین هندسی به‌منظور تعیین نواحی

امیدبخش کانی‌زایی تلفیق شدند. از آن‌جایی که نواحی امیدبخش کانی‌زایی در مدل میانگین هندسی محدودتر بوده و وسعت کم‌تری را در بر می‌گیرند، بنابراین احتمال برخورد حفاری‌ها به کرومیت در نواحی پر پتانسیل حاصل از این مدل بالاتر است.

۶-۲ پیشنهادات

- با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق موارد زیر به عنوان اهداف مطالعاتی آتی پیشنهاد می‌شود:
- بررسی تأثیر استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تکاملی مختلف، مانند الگوریتم‌های ژنتیک و رقابت استعماری، در خروجی مدل‌سازی پتانسیل معدنی
 - از آن‌جایی که روش‌های مدل‌سازی داده‌محور یا نظارت‌شده دارای وزن‌دهی جهت‌دار ناشی از به‌کار بردن نقاط آموزشی هستند، بنابراین بررسی قابلیت پیش‌گویی نقاط معدنی کرومیت‌دار با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی غیرنظارت‌شده و روش‌های یادگیری ماشین پیشنهاد می‌شود.
 - با توجه به اینکه از داده‌های چندطیفی سنجش از دور برای استخراج پدیده‌های زمین‌شناسی استفاده شده است، پیشنهاد می‌شود که برای این منظور از داده‌های ابرطیفی به‌منظور شناسایی بهتر ویژگی‌های زمین‌شناسی در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شود.
 - تمرکز عملیات اکتشاف تفصیلی در اهداف اکتشافی تعیین مرز شده (شکل ۳-۲۸)
 - با توجه به این‌که گونه‌ی شور شرقی (*Salsola orientalis*) در محیط‌هایی با نیکل بالا (مانند خاک‌های دونیتی) رشد می‌کند می‌توان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای این گیاه را شناسایی و به‌عنوان یک لایه‌ی اکتشافی وارد مرحله‌ی تلفیق نمود.
 - به نظر می‌رسد استفاده از روش AMS و فابریک سنگ و مطالعات مینرالوگرافی بتواند به عنوان یک شاخص در لایه‌های شاهد نقش مؤثری در ارائه نتایج بهتر داشته باشد.
 - تمرکز عملیات حفاری در مناطق مستعد کانی‌زایی تعیین مرز شده (شکل ۵-۲۹)

منابع و مراجع

مراجع فارسی

- آقاجانی، ح. (۱۳۹۱) "انجام پیمایش و مطالعات ثقل‌سنجی در محدوده‌ی اکتشافی کرومیت شرق سبزوار"، طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی شاهرود، صفحه ۶۳.
- آزاد، م.ر.، کنشلو، م.، و کامکار روحانی، ا. (۱۳۹۲) "به‌کارگیری روش آنالیز کریجینگ فاکتوری در فیلتر کردن ساختارهای داده‌های گرانی‌سنجی منطقه‌ی معدنی کرومیت فاریاب"، مجله‌ی علمی-پژوهشی فیزیک زمین و فضا، دوره‌ی ۳۹، شماره‌ی ۴، ص ۶۱ تا ۷۲.
- امانیان، م. (۱۳۹۰) "مطالعات ژئوفیزیک معدن کرومیت ایرندگان با استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR)"، مهندسی مشاور زمین فیزیک پویا، صفحه ۴۸.
- امیری رودبار، ا. (۱۳۹۲) "تهیه‌ی نقشه‌ی پتانسیل مطلوب ذخایر کرومیت در ورقه‌ی ۱:۱۰۰/۰۰۰ زمین‌شناسی میناب با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- بازآمد، م.، و میرنژاد، ح. (۱۳۹۴) "ژئوشیمی و شکل‌گیری کرومیت‌های مناطق دروازه چنار (نیریز) و فاریاب"، مجله‌ی بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و سوم، شماره‌ی ۱، ص ۱۳۵ تا ۱۴۶.
- پشنگ، ع. (۱۳۹۱) "تهیه نقشه پتانسیل مطلوب ذخایر معدنی کرومیت در شمال تربت حیدریه"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- تخم‌چی، ب.، لطفی، م.، صیفی، ح.، و سادات حسینی، م. (۱۳۹۵) "ترکیب اطلاعات، رویکردی نوین جهت تصمیم‌گیری در زمین‌شناسی، مهندسی معدن و نفت"، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر.
- تقی‌پور، ب.، مصطفی نژاد، ح.، مکی‌زاده، م.ع.، نقره‌بیان، م.، و رحیمی، پ. (۱۳۹۴) "کانی‌شناسی و زمین‌شیمی کرومیت‌های چشمه‌بید (نیریز) به‌منظور تعیین جایگاه زمین‌ساختی"، مجله‌ی علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره‌ی ۹۵، ص ۶۳ تا ۷۴.
- حسنی‌پاک، ع.ا.، و شرف‌الدین، م. (۱۳۹۰) "تحلیل داده‌های اکتشافی"، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.
- حشمت‌بهزادی، ک. (۱۳۷۱) "بررسی مکانیسم تشکیل و جای‌گزینی ذخایر کرومیت انبانی موجود در آمیزه‌ی افیولیتی بافت"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- خاوری، ل.، بیابانگرد، ح.، میرنژاد، ح.، نیرومند، ش.، و سلوکی، ح.ر. (۱۳۹۴) "بررسی ژئوشیمی و خاستگاه کرومیت‌های گلاب در شرق سربیشه، خراسان جنوبی"، مجله‌ی بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و سوم، شماره‌ی ۴، ص ۷۰۹ تا ۷۲۲.
- داودی، ز.، رهگشای، م.، و منصف، ا. (۱۳۹۳) "ژئوشیمی و پتروژنز پریدوتیت‌های مجموعه افیولیتی نیریز (جنوب‌غرب ایران)"، فصلنامه پترولوژی، سال پنجم، شماره‌ی نوزدهم، ص ۵۳ تا ۶۶.
- روشندل کاهو، ا.، نجاتی کلاته، ع. (۱۳۹۳) "برآورد ارتفاع بهینه در ادامه فراسو داده‌های گرانی به‌منظور

اکتشاف کرومیت در استان هرمزگان"، مجله‌ی ژئوفیزیک ایران، جلد ۸، شماره‌ی ۲، ص ۱ تا ۹.

روشندل کاهو، ا.، و نجاتی کلاته، ع. (۱۳۹۴) "طراحی فیلتر داده‌مبنا به‌منظور تفکیک بی‌هنجاری‌های داده‌های گرانی‌سنجی"، نشریه‌ی علمی - پژوهشی مهندسی معدن، دوره‌ی دهم، شماره‌ی ۲۶، ص ۴۵ تا ۵۳.

سلیمانی منفرد، م. (۱۳۸۳) "ارائه‌ی یک مدل ژنتیکی ریاضی و ژئوشیمیایی برای ذخایر کرومیت در زون سبزوار"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

شایسته‌فر، م.ر.، محمدی، م.، رضایی، ع.، و رنجبر، ح. (۱۳۹۳) "اکتشاف کرومیت با استفاده از آنالیز داده‌های مغناطیس‌سنجی هوایی ۱:۵۰۰۰۰ آبدشت، اسفندقه کرمان"، مجله‌ی علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره‌ی ۹۴، ص ۵۱ تا ۵۸.

شمسی‌پور دهکردی، ر. (۱۳۹۰) "بررسی منشا کرومیت و عناصر گروه پلاتین در افیولیت شمال نائین"، مجله‌ی زمین‌شناسی اقتصادی، جلد ۳، شماره ۲، ص ۱۱۱ تا ۱۲۵.

شهبازی، س.ا. (۱۳۹۲) "گسترش میدان به سمت بالای توسعه‌یافته و تخمین ارتفاع بهینه‌ی آن برای تفکیک آنومالی‌های گرانی حاصل از کانسار کرومیت چشمه سیر سبزوار"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

عرفانی، ح. (۱۳۵۱) "مطالعه تیپ کانسارهای کرومیت ایران"، نشریه شماره ۲۴ دانشکده فنی تهران.

علی‌پور، ا.، محمدیان سروندانی، م.ح.، خالدزاده، م.، و آقاجانی، ح. (۱۳۹۳) "مقایسه‌ی روش‌های طیف توان شعاعی و اویلر دیکانولوشن برای تخمین عمق ساختارهای زیرسطحی کرومیت"، اولین همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، کرمان.

قوی‌اندام امام‌وردی‌خان، ب. (۱۳۸۹) "بررسی و مطالعه‌ی روش پردازش تصویر در اکتشاف کانسارهای کرومیت (مطالعه موردی کانسار کرومیت فاریاب)"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کاشفی، ا. (۱۳۹۴) "پتانسیل‌یابی ذخایر کرومیت-مس در منطقه‌ی تربت‌حیدریه (رباط‌سفید) با استفاده از تلفیق داده‌های ژئوشیمی، دورسنجی، ژئوفیزیک هوایی و زمین‌شناسی در محیط GIS"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

کامکار روحانی، ا.، و بیکی، م. (۱۳۸۸) "پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌هوایی به‌منظور پی‌جویی ذخایر کرومیت در منطقه‌ی سبزوار"، مجله‌ی علمی - پژوهشی فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۵، شماره‌ی ۳، ص ۱۳ تا ۳۴.

کریمی، م.، حسینی، ز.، و نوری‌خانکهدانی، ک. (۱۳۹۵) "توزیع ژئوشیمیایی عناصر اصلی، جزئی و کمیاب در گستره‌ی کرومیت‌های توده‌ی افیولیتی نیریز"، مجله‌ی بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و چهارم، شماره‌ی ۱، ص ۴۵ تا ۵۶.

کوثری، ش. (۱۳۹۵) "تفسیر داده‌های میدان پتانسیل محدوده اکتشافی کرومیت شرق سبزوار به روش گرادیان کل نرمال و مدل‌سازی مستقیم و معکوس داده‌ها"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

محمدزاده، ز.، ابراهیمی نصرآبادی، خ.، و مظاهری، س.ا. (۱۳۹۲) "بررسی سنگ‌نگاری، ژئوشیمی و ژنز کانسار کرومیت کوهی (افیولیت ملانژ رباطسفید) - شمال شرق ایران"، مجله‌ی بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و یکم، شماره‌ی ۴، ص ۷۶۵ تا ۷۷۶.

مدنی، ح. (۱۳۹۰) "مبانی اکتشاف مواد معدنی"، چاپ اول، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر.

نوری، س.، نوری جلیانی، ک.، محمد، ک.، نیک‌نام، م.ح.، محمودی، م.، آندونیان، ل.، و اکبری، آ. "آنالیز جنگل‌های تصادفی: یک روش آماری مدرن برای غربالگری در مطالعات با بعد بالا و کاربرد آن در یک مطالعه همبستگی ژنتیکی جمعیت-پایه"، نشریه‌ی دانشگاه علوم پزشکی خراسان شمالی، شماره‌ی ۵، ص ۹۳ تا ۱۰۱.

نویدی قاضیانی، ا. (۱۳۹۱) "توسعه‌ی روش زونالیت‌ه ژئوشیمیایی با استفاده از مدل‌سازی مولتی‌فرکتالی جهت اکتشافات منابع فلزی (مطالعه موردی ذخایر کرومیت شرق ایران)"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

وطن‌پور، ح.ر.، خاکزاد، ا.، قادری، م. (۱۳۸۸) "کاربرد عناصر گروه پلاتین در اکتشاف و ارزیابی اقتصادی در کانسارهای کرومیت کمربند افیولیتی سبزوار"، مجله‌ی علوم زمین، سال هجدهم، شماره‌ی ۷۱، ص ۹ تا ۱۲.

مراجع انگلیسی

- Abdelrahman, E. M., Bayoumi, A. I., Abdelhady, Y. E., Gobashy, M. M., and El-Araby, H. M. (1989) "Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies", *Geophysics*, 54, 1614-1621.
- Abedi, M., and Norouzi, G.H. (2012) "Integration of various geophysical data with geological and geochemical data to determine additional drilling for copper exploration", *Journal of Applied Geophysics*, 83, 35-45.
- Alatas, B., Akin, E., and Ozer, A. B. (2009) "Chaos embedded particle swarm optimization algorithms" *Chaos, Solitons and Fractals*, 40, 1715-1734.
- Ali, M., and Jahangir Khan, M. (2013) "Geophysical hunt for chromite in ophiolite" *Int. J. Econ. Environ. Geol*, 4, 22-28.
- Allen, J. E. (1941) "Geological investigation of the chromite deposits of California", *California Journal of Mines and Geology*, 37, 101-167.
- Altrock, C.V. (1995) "Fuzzy logic and neurofuzzy applications explained", Prentice-Hall.
- Asci, M., and Bayat, C. (2015) "Chrome mine exploration by microgravity method in Fenk plateau, In: EGU General Assembly Conference Abstracts, Turkey.
- Bayrak, M. (2002) "Exploration of chrome ore in Southwestern Turkey by VLF-EM", *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 5, 35-46.
- Benediktsson J.A., Swain P.H. and Ersoy O.K. (1993) "Conjugate-gradient neural networks in classification of multisource and very-high dimensional remote sensing data", *International Journal of Remote Sensing* 14, 2883-2903.
- Beqiraj, A., Masi, U., and Violo, M. (2000) "Geochemical characterization of podiform chromite ores from the ultramafic massif of Bulqiza (Eastern Ophiolitic Belt, Albania) and hints for exploration", *Exploration and Mining Geology*, 9, 149-156.
- Bhattacharyya, B. K., and Chan, K. C. (1977) "Reduction of magnetic and gravity data on an arbitrary surface acquired in a region of high topographic relief", *Geophysics*, 42, 1411-1430.
- Bhattacharya, B. B., Mallick, K., and Roy, A. (1969) "Gravity prospecting for chromite at Sukinda and Sukrangi, Cuttack District, Orissa (India)", *Geoexploration*, 7, 201-240.
- Bishop, C. M. (1997) "Neural networks for pattern recognition", Oxford university press.
- Blakely, R. J. (1996) "Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications", Cambridge university press.
- Bonham-Carter, G.F. (1994) "Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling With GIS", Amsterdam: Elsevier.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., and Wright, D.F. (1989) "Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential", *Statistical applications in the*

earth sciences, 89, 171-183.

- Breiman, L. (2001) "Random forests", *Machine learning*, 45, 5-32.
- Brown, W. M., Gedeon, T. D., Groves, D. I., and Barnes, R. G. (2000) "Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping", *Australian journal of earth sciences*, 47, 757-770.
- Campos, L.D., de Souza, S.M., de Sordi, D.A., Tavares, F.M., Klein, E.L., and dos Santos Lopes, E.C. (2017) "Predictive Mapping of Prospectivity in the Gurupi Orogenic Gold Belt, North–Northeast Brazil: An Example of District-Scale Mineral System Approach to Exploration Targeting", *Natural Resources Research*, 26, 509-534.
- Carranza, E.J.M. (2008) "Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS", Amsterdam: Elsevier.
- Carranza, E.J.M. (2009) "Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features", *Ore Geology Reviews*, 35, 383-400.
- Carranza, E.J.M., and Laborte, A.G. (2016a) "Data-driven predictive mapping of gold prospectivity, Baguio district, Philippines: Application of Random Forests algorithm", *Ore Geology Reviews*, 71, 777-787.
- Carranza, E.J.M., and Laborte, A.G. (2016b) "Random forest predictive modeling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra (Philippines)", *Computers & Geosciences* 74, 60-70.
- Carranza, E.J.M., and Laborte, A.G. (2016c) "Data-driven predictive modeling of mineral prospectivity using Random Forests: A case study in Catanduanes Island (Philippines)", *Natural Resources Research* 25, 35-50.
- Carranza, E.J.M., Woldai, T., and Chikambwe, E.M. (2005) "Application of data-driven evidential belief functions to prospectivity mapping for aquamarine-bearing pegmatites, Lundazi District, Zambia", *Natural Resources Research*, 14, 48–63.
- Chauhan, S., Sharma, M., Arora, M.K., and Gupta, N.K. (2010) "Landslide susceptibility zonation through ratings derived from artificial neural network", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 340-350.
- Chen, Y. (2015), "Mineral potential mapping with a restricted Boltzmann machine", *Ore Geology Reviews*, 71, 749-760.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., and Ballantyne, S.B. (1994) "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods", *Journal of Geochemical Exploration*, 51, 109-130.
- Clerc, M., and Kennedy, J. (2002) "The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 58-73.
- Crosta, A. P., Souza Filho, C.R.D., Azevedo, F., and Brodie, C. (2003) "Targeting key

- alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis”, *International journal of Remote sensing*, 24, 4233-4240.
- Davis, W. E., Jackson, W. H., and Richter, D. H. (1957) “Gravity prospecting for chromite deposits in Camaguey province, Cuba”, *Geophysics*, 22, 848-869.
- Demuth, H. B., and Beale, M. (1998) “Users’ guide for the neural network toolbox for MATLAB”, The Mathworks.
- Dickey, J. S. (1975) “A hypothesis of origin for podiform chromite deposits”, *Geochim. Cosmochim. Acta*. 39, 1061-1074.
- Dobrin, M.B., and Savit, C.H. (1988) “Introduction to geophysical prospecting”, McGraw-Hill, New York, USA.
- Eberhart, R. C., and Kennedy, J. (1995) “Particle swarm optimization”, In: proceeding of IEEE International Conference on Neural Network, 1942-1948, Australia.
- Eberhart, R. C., and Shi, Y. (2000) “Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization”, In: Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation, 84-88, IEEE.
- Eberhart, R. C., Shi, Y., and Kennedy, J. (2001) “Swarm intelligence”, Elsevier.
- Fernández-Martínez, J. L., García-Gonzalo, E., and Fernández-Alvarez, J. P. (2008) “Theoretical analysis of particle swarm trajectories through a mechanical analogy”, *International Journal of Computational Intelligence Research*, 4, 93-104.
- Fletcher, R. (1980) “Practical Methods of Optimization, Volume 1. Unconstrained Optimization”, John Wiley & Sons.
- Gad, S., and Kusky, T. (2007) “ASTER spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian–Nubian shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt”, *Gondwana Research*, 11, 326-335.
- Genier, F., and Epard, J. L. (2007) “The Fry method applied to an augenorthogneiss: Problems and results”, *Journal of structural geology*, 29, 209-224.
- Guo, L., Chehata, N., Mallet, C., and Boukir, S. (2011), “Relevance of airborne lidar and multispectral image data for urban scene classification using Random Forests”, *Journal of Photogramm Remote Sensing* 66, 56–66.
- Gupta, V. K., and Ramani, N. (1980) “Some aspects of regional-residual separation of gravity anomalies in a Precambrian terrain”, *Geophysics*, 45, 1412-1426.
- Grant, F.S., and West, G.F. (1965) "Interpretation Theory in Applied Geophysics", McGraw-Hill Book Company.
- Greenbaum, D. (1977) “The chromitiferous rocks of the Troodos ophiolite complex, Cyprus”, *Economic Geology*, 72, 1175–1194.
- Haddad-Martim, P.M., de Souza Filho, C.R., and Carranza, E.J.M. (2017) “Spatial analysis

- of mineral deposit distribution: A review of methods and implications for structural controls on iron oxide-copper-gold mineralization in Carajás, Brazil”, *Ore Geology Reviews* 81, 230-244.
- Hagemann, S. G., Lisitsin, V. A., and Huston, D. L. (2016) “Mineral system analysis: Quo vadis”, *Ore Geology Reviews*, 76, pp. 504-522.
- He, S., Wu, Q. H., Wen, J. Y., Saunders, J. R., and Paton, R. C. (2004) “A particle swarm optimizer with passive congregation”, *Biosystems*, 78, 135-147.
- Hengl, T. (2006) “Finding the right pixel size”, *Computers & Geosciences*, 32, 1283-1298.
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R., and Saad, A. H. (2013) “Gravity and magnetic exploration: Principles, practices, and applications”, Cambridge University Press.
- Hronsky, J.M. and Groves, D.I. (2008) “Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement”, *Australian Journal of Earth Sciences*, 55, 3-12.
- Huang, Z., and Williamson, M. A. (1996) “Artificial neural network modelling as an aid to source rock characterization”, *Marine and Petroleum Geology*, 13, 277–290.
- Hudson, D. L., and Cohen, M. E. (2000) “Neural networks and artificial intelligence for biomedical engineering”, IEEE press.
- Irvine, T. N. (1977) “Origin of chromitite layers in the Muskox intrusion and other stratiform intrusions: A new interpretation”, *Geology*, 5, 273-277.
- Jacobsen, B. H. (1987) “A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps”, *Geophysics*, 52, 1138-1148.
- Jannessary, M. R., Melcher, F., Lodziak, J., and Meisel, T. C. (2012) “Review of platinum-group element distribution and mineralogy in chromitite ores from southern Iran”, *Ore Geology Reviews*, 48, 278–305.
- Kennedy, J. (2007) “Review of Engelbrecht's fundamentals of computational swarm intelligence”, *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 8, 107-109.
- Khan, S. D., and Mahmood, K. (2008) “The application of remote sensing techniques to the study of ophiolites”, *Earth-Science Reviews*, 89, 135-143.
- Kospiri, A., Kosho, P., and Vuksaj, N. (1999) “Case histories of the application of geophysical methods to chromite exploration in the Balkans”, In: Second Balkan Geophysical Congress and Exhibition, Istanbul.
- Kreuzer, O.P., Blenkinsop, T.G., Morrison, R.J., and Peters, S.G. (2007) “Ore controls in the Charters Towers goldfield, NE Australia: Constraints from geological, geophysical and numerical analyses”, *Ore Geology Reviews* 32, 37-80.
- Lago, B.L., Rabinowich, M., and Nicolas, A. (1982) “Podiform chromite ore bodies—A genetic model”, *Journal of Petrology*, 23, 103–125.
- Liang, H. T., and Kang, F. H. (2016) “Adaptive mutation particle swarm algorithm with

- dynamic nonlinear changed inertia weight”, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127, 8036-8042.
- Liaw, A., and Wiener, M. (2002) “Classification and regression by randomForest”, *R news* 2, 18-22.
- Lisitsin, V. (2015) “Spatial data analysis of mineral deposit point patterns: applications to exploration targeting”, *Ore Geology Reviews* 71, 861-881.
- Lisitsin, V. A., González-Álvarez, I., and Porwal, A. (2013) “Regional prospectivity analysis for hydrothermal-remobilised nickel mineral systems in western Victoria, Australia”, *Ore Geology Reviews*, 52, 100–112.
- McCuaig, T.C., Beresford, and S., Hronsky, J. (2010) “Translating the mineral systems approach into an effective targeting system”, *Ore Geology Reviews*, 38, pp. 128–138.
- Mihalasky, M. J., and Bonham-Carter, G. F. (2001) “Lithodiversity and its spatial association with metallic mineral sites, Great Basin of Nevada”, *Natural Resources Research*, 10, 209-226.
- Miller, H. G., and Singh, V. (1994) “Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources”, *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213-217.
- Mohanty, W. K., Mandal, A., Sharma, S. P., Gupta, S., and Misra, S. (2011) “Integrated geological and geophysical studies for delineation of chromite deposits: A case study from Tangarparha, Orissa”, *Geophysics*, 76, 173-185.
- Mohebi, A., Mirnejad, H., Lentz, D., Behzadi, M., Dolati, A., Kani, A., and Taghizadeh, H. (2015) “Controls on porphyry Cu mineralization around Hanza Mountain, south-east of Iran: An analysis of structural evolution from remote sensing, geophysical, geochemical and geological data”, *Ore Geology Reviews*, 69, 187-198.
- Mosier, D.L., Singer, D.A., Moring, B.C., and Galloway, J.P. (2012) “Podiform chromite deposits—database and grade and tonnage models”, US Geological Survey.
- Müller, B., Reinhardt, J., and Strickland, M. T. (2012) “Neural networks: an introduction”, Springer Science & Business Media.
- Mutele, L., Billay, A., and Hunt, J.P. (2017) “Knowledge-Driven Prospectivity Mapping for Granite-Related Polymetallic Sn–F–(REE) mineralization, Bushveld Igneous Complex, South Africa”, *Natural Resources Research*, 26, 535-552.
- Navidi, A., Ziaii, M., Afzal, P., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., and Foster, P. (2014) “Determination of Chromites Prospects Using Multifractal Models and Zonality Index in the Parang 1: 100000 Sheet, Iran”, *Universal Journal of Geoscience*, 2, 133-139.
- Nettleton, L. L. (1976) "Gravity and magnetics in oil prospecting", McGraw-Hill Book Company.
- Ninomiya, Y. (2003), “A Stabilized Vegetation Index and Several Mineralogic Indices Defined for ASTER VNIR and SWIR Data”, In: Proceedings of the IEEE International

Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1552–1554, France.

- Ninomiya, Y., and Fu, B. (2018) “Thermal infrared multispectral remote sensing of lithology and mineralogy based on spectral properties of materials”, *Ore Geology Reviews*, DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.03.012.
- Ninomiya, Y., Fu, B., and Cudahy, T. J. (2005) “Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor” data”, *Remote Sensing of Environment*, 99, 127-139.
- Nykänen, V., Groves, D. I., Ojala, V. J., Eilu, P., and Gardoll, S. J. (2008) “Reconnaissance scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modeling for iron oxide copper—Gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland”, *Australian Journal of Earth Sciences*, 55, 25–38.
- Nykänen, V., Lahti, I., Niiranen, T., and Korhonen, K. (2015) “Receiver operating characteristics (ROC) as validation tool for prospectivity models—A magmatic Ni–Cu case study from the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Finland”, *Ore Geology Reviews*, 71, 853-860.
- Oh, H. J., and Lee, S. (2010) “Application of artificial neural network for gold–silver deposits potential mapping: a case study of Korea”, *Natural Resources Research*, 19, 103-124.
- Paktunc, A.D. (1990) “Origin of podiform chromite deposits by multistage melting, melt segregation and magma mixing in the upper mantle”, *Ore Geology Reviews*, 5, pp. 211–222.
- Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M. (2017) “An improved data-driven fuzzy mineral prospectivity mapping procedure; cosine amplitude-based similarity approach to delineate exploration targets”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 58, 157-167.
- Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M., and Sadeghi, M. (2016a) “Recognition of significant multi-element geochemical signatures of porphyry Cu deposits in Noghdouz area, NW Iran”, *Journal of Geochemical Exploration* 165, 111-124.
- Parsa, M., Maghsoudi, A., Yousefi, M., and Sadeghi, M. (2016b) “Prospectivity modeling of porphyry-Cu deposits by identification and integration of efficient mono-elemental geochemical signatures”, *Journal of African Earth Sciences* 114, 228-241.
- Parsa, M., Maghsoudi, A., and Yousefi, M. (2018) “Spatial analyses of exploration evidence data to model skarn-type copper prospectivity in the Varzaghan district, NW Iran”, *Ore Geology Reviews*, 92, 97-112.
- Perez, R. E., and Behdinan, K. (2007) “Particle swarm approach for structural design optimization”, *Computers & Structures*, 85, 1579–1588.
- Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2003) “Artificial neural networks for mineral-

- potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India”, *Natural resources research*, 12, 155-171.
- Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2004) “A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping”, *Mathematical geology*, 36, 803-826.
- Porwal, A.K., Das, R.D., Chaudhary, B., Gonzalez-Alvarez, I., and Kreuzer, O.P. (2015) “Fuzzy inference systems for prospectivity modeling of mineral systems and a case-study for prospectivity mapping of surficial Uranium in Yeelirrie Area, Western Australia”, *Ore Geology Reviews*, 71, 839-852.
- Porwal, A.K., and Kreuzer, O.P. (2010) “Introduction to the special issue: mineral prospectivity analysis and quantitative resource estimation”, *Ore Geology Reviews*, 38, 121–127.
- Pournamdari, M., and Mazlan, H. (2013) “Detection of Chromite bearing mineralized zones in Abdastophiolite complex using ASTER and ETM+ remote sensing data”, *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 1973-1983.
- Pournamdari, M., Mazlan, H., and Beiranvand Pour, A. (2014) “Spectral transformation of ASTER and Landsat TM bands for lithological mapping of Soghanophiolite complex, south Iran”, *Journal of Advances in Space Research*, 54, 694-709.
- R Development Core Team R. (2010) “A language and environment for statistical computing”, R Foundation for Statistical Computing, Austria.
- Rajendran, S., Al-Khirbash, S., Pracejus, B., Nasir, S., Al-Abri, A. H., Kusky, T. M., and Ghulam, A. (2012) “ASTER detection of chromite bearing mineralized zones in Semail Ophiolite Massifs of the northern Oman Mountains: Exploration strategy”, *Ore geology reviews*, 44, 121-135.
- Rajabzadeh, M.A., Ghasemkhani, and E., Khosravi, A. (2015) “Biogeochemical study of chromite bearing zones in Forumad area, Sabzevar ophiolite, Northeastern Iran”, *Journal of Geochemical Exploration*, 151, 41-49.
- Reynolds, J.M. (1997) "An introduction to applied and environmental geophysics", John Wiley & Sons.
- Ritter N.D., and Hepner G.F. (1990) “Application of an artificial neural network to land-cover classification of thematic mapper imagery”, *Computers and Geosciences* 16, 873–880.
- Rodriguez-Galiano, V., Sanchez-Castillo, M., Chica-Olmo, M., and Chica-Rivas, M. (2015) “Machine learning predictive models for mineral prospectivity: An evaluation of neural networks, random forest, regression trees and support vector machines”, *Ore Geology Reviews* 71, 804-818.
- Roshanravan, B., Aghajani, H., Yousefi, M., and Kreuzer, O. (2018a) “Particle Swarm Optimization Algorithm for Neuro-Fuzzy Prospectivity Analysis Using Continuously Weighted Spatial Exploration Data”, *Natural Resources Research*, DOI:

10.1007/s11053-018-9385-4.

- Roshanravan, B., Aghajani, H., Yousefi, M., and Kreuzer, O. (2018b) "Generation of a Geochemical Model to Prospect Podiform Chromite Deposits in North of Iran", In: 80th EAGE Conference and Exhibition, Denmark, DOI: 10.3997/2214-4609.201800909.
- Roshanravan, B., Aghajani, H., Yousefi, M., and Kreuzer, O. (2018c) "An Improved Prediction-Area Plot for Prospectivity Analysis of Mineral Deposits", *Natural Resources Research*, DOI: 10.1007/s11053-018-9439-7.
- Sabins, F. F. (1999) "Remote sensing for mineral exploration", *Ore Geology Reviews*, 14, 157-183.
- Schuiling, R. D. (2011) "Troodos: a giant serpentinite diaper", *International Journal of Geosciences*, 2, 98.
- Shafaii Moghadam, H., Rahgooshay, M., and Forouzesh, V. (2010) "Geochemical investigation of the nodular chromites in the Forumad ophiolite, NE of Iran", *Iranian Journal of Sciences and Technology*, 43, 235–245.
- Shi, Y., and Eberhart, R. (1998) "A modified particle swarm optimizer", In: IEEE international conference on evolutionary computation, 69–73, Piscataway, NJ: IEEE Press.
- Shi, Y., and Eberhart, R. C. (1999) "Empirical study of particle swarm optimization", In: Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation, 1945-1950.
- Shirzadi A., Masoudi F., and Rahimzadeh B. (2013) "Nature of Chromite parent magma In Sabzevarophiolite (North-East of Iran)", *Iranian Journal of Crystallography And Mineralogy*, 21, 49-58.
- Singer, D.A. (1993) "Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources", *Nonrenewable Resources*, 2, 69-81.
- Singer, D.A. (2010) "Progress in integrated quantitative mineral resource assessments", *Ore Geology Reviews* 38, 242–250.
- Singh, A., and Biswas A. (2016) "Application of Global Particle Swarm Optimization for Inversion of Residual Gravity Anomalies Over Geological Bodies with Idealized Geometries", *Natural Resources Research* 25, 297–314.
- Skabar, A. (2007a) "Mineral potential mapping using Bayesian learning for multilayer perceptrons", *Mathematical Geology*, 39, 439-451.
- Skabar, A. (2007b) "Modeling the spatial distribution of mineral deposits using neural networks", *Natural Resource Modeling*, 20, 435-450.
- Soleimani, M., and Shokri, B. J. (2016) "Intrinsic geological model generation for chromite pods in the Sabzevar ophiolite complex, NE Iran", *Ore Geology Reviews*, 78, 138-150.
- Stöcklin, J. (1974) "Possible ancient continental margins in Iran", In: The geology of continental margins", Berlin: Springer.
- Sultan, M., Arvidson, R. E., and Sturchio, N. C. (1986) "Mapping of serpentinites in the Eastern Desert of Egypt by using Landsat thematic mapper data", *Geology*, 14, 995-999.

- Swets, J. A. (1996) "Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: Collected papers", Psychology Press.
- Talbi, E. G. (2009) "Metaheuristics: from design to implementation, Hoboken: Wiley.
- Tangestani, M. H., Jaffari, L., Vincent, R. K., and Sridhar, B. M. (2011) "Spectral characterization and ASTER-based lithological mapping of an ophiolite complex: A case study from Neyriz ophiolite, SW Iran", *Remote Sensing of Environment*, 115, 2243-2254.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E. (1990), "Applied geophysics", Cambridge university press.
- Tessema, A. (2017) "Mineral Systems Analysis and Artificial Neural Network Modeling of Chromite Prospectivity in the Western Limb of the Bushveld Complex, South Africa", *Natural Resources Research*, 26, 465-488.
- Thayer, T.P. (1960) "Some critical differences between alpine-type and stratiform peridotite-gabbro complexes", International Geologic Congress Report, Norden, 13, 247-259.
- Thayer, T.P. (1961) "Application of geology in chromite exploration and mining", In: Symposium on chrome ore, 197-223, Turkey.
- Thayer, T.P. (1964) "Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guleman-Soridag District, Turkey", *Economic Geology*, 59, pp. 1497-1524.
- Theodoridis, S., and Koutroumbas, K. (2008) "Pattern recognition", IEEE Transactions on Neural Networks.
- Uysal, I., Zaccarini, F., Sadiklar, M.B., Tarkian, M., Thalhammer, O.A.R., and Garuti, G. (2009) "The podiform chromitites in the Dagüplü and Kavak mines, Eskisehir ophiolite (NW Turkey)—Genetic implications of mineralogic and geochemical data", *Geologica Acta*, 7, 351-362.
- Van der Meer, F., Van der Werff, H. M., Van Ruitenbeek, F. J., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., Van Der Meijde, M., Carranza, E.J.M., De Smeth, J.B., and Woldai, T. (2012) "Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14, 112-128.
- Vearncombe, J., Vearncombe, S. (1999) "The spatial distribution of mineralization; applications of Fry analysis", *Economic Geology*, 94, 475-486.
- Verduzco, B., Fairhead, J. D., Green, C. M., and MacKenzie, C. (2004) "New insights into magnetic derivatives for structural mapping", *The Leading Edge*, 23, 116-119.
- Wang, C., Venkatesh, S. S., and Judd, J. S. (1994) "Optimal stopping and effective machine complexity in learning", In: Advances in neural information processing systems, 303-310, USA.
- Whittaker, P. J. (1986) "Chromite deposits in Ontario", Ontario Ministry of Northern Development and Mines.

- Wyborn, L. A. I., Heinrich, C. A., and Jaques, A. L. (1994) "Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria", In The AusIMM Annual Conference, 109-115, Australia.
- Yaghubpur, A., and Hassannejad, A.A. (2006) "The Spatial Distribution of Some Chromite Deposits in Iran, Using Fry Analysis", *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran* 17, 147-152.
- Yang, W., and Siegel, F. R. (1989) "Geochemical exploration for chromite deposits, piedmont upland province, maryland, USA", *Journal of Geochemical Exploration*, 32, 299-300.
- Yigit, O. (2008) "Mineral deposits of Turkey in relation to Tethyan metallogeny Implications for future mineral exploration", *Economic Geology*, 104, pp. 19-51.
- Yousefi, M., and Carranza, E.J.M. (2015a) "Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling", *Computers & Geosciences*, 79, 69–81.
- Yousefi, M., and Carranza, E.J.M. (2015b) "Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping", *Computers & Geosciences*, 83, 72–79.
- Yousefi, M., and Carranza, E.J.M. (2016) "Data-driven index overlay and Boolean logic mineral prospectivity modeling in greenfields exploration", *Natural Resources Research*, 25, 3-18.
- Yousefi, M., and Nykänen, V. (2016) "Data-driven logistic-based weighting of geochemical and geological evidence layers in mineral prospectivity mapping", *Journal of Geochemical Exploration*, 164, 94-106.
- Zhao, J., Chen, S., and Zuo, R. (2016) "Identifying geochemical anomalies associated with Au–Cu mineralization using multifractal and artificial neural network models in the Ningqiang district, Shaanxi, china", *Journal of Geochemical Exploration*, 164, 54-64.
- Zheng, Y. L., Ma, L. H., Zhang, L. Y., and Qian, J. X. (2003) "On the convergence analysis and parameter selection in particle swarm optimization", In: International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 1802–1807.
- Zhou, M. F., Robinson, P. T., and Bai, W. J. (1994) "Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle", *Mineralium Deposita*, 29, 98-101.
- Zou, K.H., O'Malley, A.J., and Mauri, L. (2007) "Receiver-operating characteristic analysis for evaluating diagnostic tests and predictive models", *Circulation*, 115, 654-657.
- Zuo, R., Zhang, Z., Zhang, D., Carranza, E.J.M., and Wang, H. (2015) "Evaluation of uncertainty in mineral prospectivity mapping due to missing evidence: a case study with skarn-type Fe deposits in Southwestern Fujian Province, China", *Ore Geology Reviews*, 71, 502-515.

Abstract

Due to the presence of several small to large chromite mines and its favorable geological makeup, the Sabzevar Ophiolitic Belt is one of the best endowed chromite belts in Iran. This study used and adapted mineral prospectivity mapping technology to better define and understand the spatial distribution of podiform chromite mineralization at the regional and local scales. The first step in achieving these aims was to translate all features related to chromite mineralization into separate data layers and combine these in the geographical information systems environment using a variety of techniques. Since random and systematic errors resulting from expert judgment and exploration bias cause uncertainty and low reliability of prospectivity models, this study adopted continuous and improved data-driven methods to identify exploration targets. To this end, regional and local exploration criteria were identified based on a mineral systems analysis of the podiform-type chromite deposits as well as a review of the available exploration data. Next, the predictive patterns related to chromite mineralization were elicited and weighted continuously. At the regional scale, receiver operating characteristics curves and prediction-area plots were employed to measure the degree of spatial association between continuously-weighted evidence maps and chromite mineralization. The results indicated that the evidential maps used in this study are significant predictors and play an important role in the generation of the overall mineral prospectivity model. In addition, the predictive patterns related to chromite mineralization were weighted discretely, for comparison with continuously-weighted predictive patterns, and evaluated after integration of the layers. Data-driven neuro-fuzzy network and random forest methods as well as mathematical functions were utilized to integrate continuously-weighted evidence maps at the regional scale. Moreover, discretely-weighted spatial evidence values were also integrated using a neuro-fuzzy network approach. The results of this study demonstrate that the performance of the neuro-fuzzy targeting model, generated with continuously weighted spatial evidence values, is superior to that of the neuro-fuzzy model, generated with discretely weighted exploration evidence data. Amongst the regional scale prospectivity models, the random forest model performed best and, thus, was deemed most appropriate for selecting a chromite district for detailed prospectivity mapping at the local scale. Last but not least, an improved prediction-area plot was developed for evaluating the performance of spatial evidence maps and prospectivity models. The advantage of this new performance evaluation tool over existing methods is its capability to simultaneously consider three important input criteria, including (1) prediction rate of mineral deposit locations, (2) prediction rate of non-deposit locations, and (3) area occupied by exploration targets in the evaluation scheme. In this study, fuzzy gamma and geometric average operators were utilized to integrate continuously-weighted evidence maps for determining the best suitable collar locations for borehole testing of identified local-scale targets. Since chromite prospective tracts derived from the geometric average prospectivity model are smaller than those derived from the fuzzy model, the probability of boreholes intercepting chromite mineralization is higher in the geometric average than fuzzy model.

Keywords: Sabzevar Ophiolite Belt, Podiform-type chromite, Mineral prospectivity mapping, Improved prediction-area plot, Mineral system analysis, Neuro-fuzzy network, Random forest.



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D. Thesis in Mineral Exploration

Modeling of chromite deposits in regional and local scales using continuously-weighted evidences into neural network

By: Bizhan Roshanravan

Supervisor:

Dr. Hamid Aghajani

Advisors:

Dr. Mahyar Yousefi

Dr. Oliver Kreuzer

January, 2019