

## مدلسازی پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته در کمربند افیولیتی سبزوار

بیژن روشن‌روان<sup>۱</sup>، حمید آقاجانی<sup>۲\*</sup>، مهیار یوسفی<sup>۳</sup>، الیور کروزر<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ملایر

۴- مرکز تحقیقات زمین‌شناسی اقتصادی (EGRU)، دانشکده علوم زمین و علوم محیطی، دانشگاه جیمز کوک، QLD 4811، Townsville، استرالیا

(دریافت ۱۳۹۷/۰۷/۲۱، پذیرش ۱۳۹۷/۰۸/۳۰)

### چکیده

در اکتشافات ناحیه‌ای به منظور معرفی محدوده‌های پتانسیل‌دار معدنی برای اکتشاف تفصیلی از ویژگی‌ها و شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود. برای نیل به این هدف، شاخص‌های یک ذخیره معدنی مانند ویژگی‌های طیفی واحدهای سنگی، چینه‌شناسی و الگوهای ساختاری حاصل از اطلاعات ماهواره‌ای، تنوع واحدهای سنگی و زمین‌شناسی ساختاری حاصل از نقشه‌های زمین‌شناسی و هم‌چنین اطلاعات حاصل از داده‌های ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی استخراج شده و پس از تجزیه و تحلیل به صورت نقشه‌های شاهد وزن‌دار تهیه و برای تلفیق به محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی وارد می‌شوند. در این تحقیق که در محدوده کمربند کرومیت‌زایی سبزوار- فرومد انجام شده است، نقشه‌های شاهد سنگ میزبان و کنترل‌کننده‌های ساختاری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل 2B و نقشه‌های زمین‌شناسی موجود استخراج شده است. این نقشه‌ها به همراه نقشه آنومالی ژئوشیمیایی مربوط به ذخایر کرومیت تیپ انبانه-ای به روش‌های پیوسته (بر اساس تابع لجستیکی) و دانش‌محور (طبقه‌بندی داده‌های شاهد مکانی به فواصل دلخواه و اختصاص وزن به هر طبقه بر اساس نظر کارشناس)، وزن‌دار شده و برای تولید مدل پتانسیل معدنی به وسیله عملگرهای گامای فازی و میانگین‌هندسی با یکدیگر تلفیق شدند. ارزیابی عملکرد مدل‌های پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از نمودارهای مشخصه عملکرد سیستم و آهنگ پیش‌بینی- مساحت بررسی شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل‌های پتانسیل معدنی تولید شده به روش پیوسته، پیشگوه‌های مناسب‌تری است و مناطق هدف اکتشاف تفصیلی آرایه شده از آن برای ادامه فعالیت‌های اکتشافی قابل اعتماد است.

### کلمات کلیدی

اکتشاف کرومیت، نقشه شاهد، مدل پتانسیل معدنی، گامای فازی، میانگین‌هندسی.

## ۱- مقدمه

بهترین ابزار برای شناخت معیارهای اکتشافی و استخراج الگوهای پیش‌گوی ماده معدنی مورد اکتشاف است.

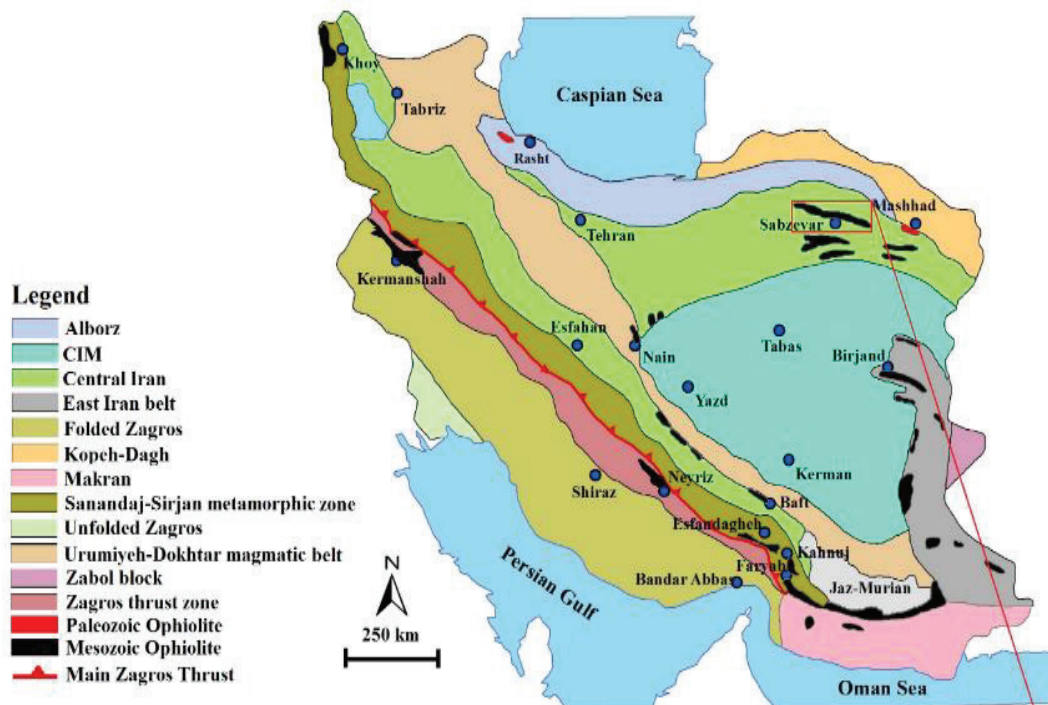
بنابراین، برای تهیه مدل پتانسیل معدنی یک ذخیره معین از نوع مورد جستجو در یک منطقه مشخص، مجموعه داده‌های اکتشافی مورد استفاده، بر اساس مدل مفهومی آن نوع ذخیره است، سپس نقشه‌های شاهد مانند مجموعه داده‌های اکتشافی تولید و وزن‌دار و در نهایت برای شناسایی مناطق هدف تلفیق می‌شوند. به این منظور، معمولاً چهار روش دانش‌محور، داده‌محور، ترکیبی و پیوسته (بر اساس تابع لجستیکی) برای تخصیص وزن‌ها به داده‌های اکتشافی و تولید نقشه‌های شاهد وجود دارد [۱۸-۱۳]. در روش‌های پیوسته، موقعیت رخداد‌های معدنی شناخته شده به عنوان نقاط آموزشی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و مقادیر داده‌های اکتشافی معرف کانی‌سازی با استفاده از فواصل دلخواه گسسته‌سازی نمی‌شوند. در نتیجه این روش بر وزن‌دهی جهت‌دار حاصل از سه روش اول غلبه کرده و می‌تواند عدم قطعیت را به خوبی مدل کند [۱۹]. هدف از این تحقیق، تولید مدل پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در کمر بند افیولیتی سبزوار با استفاده از تلفیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته سنگ میزبان و کنترل‌کننده ساختاری مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای به روش میانگین هندسی است.

## ۲- محدوده مورد مطالعه

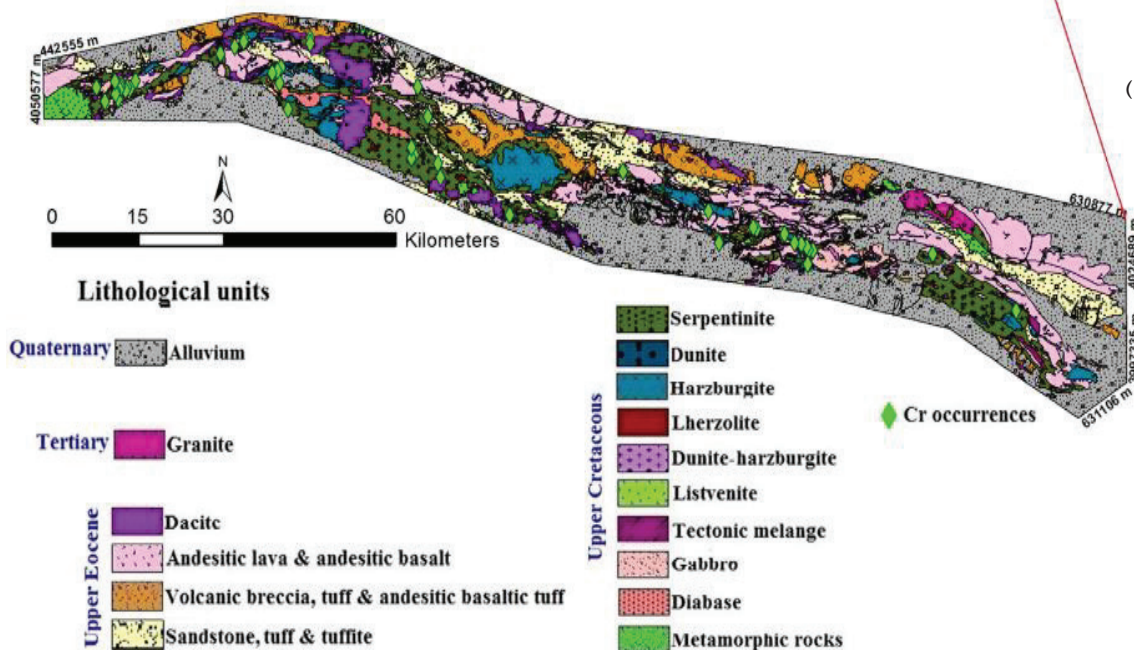
محدوده مورد مطالعه با مساحت تقریبی ۴۲۰۰ کیلومتر مربع در کمر بند افیولیتی سبزوار (شمال شرق ایران) واقع شده است (شکل ۱- الف). از نظر تکتونیکی، این کمر بند بخش محلی کوچکی از اقیانوس نئوتتیس در اطراف خرد قاره ایران مرکزی است [۲۰، ۲۱]. کمر بند افیولیتی سبزوار دارای روند شرقی- غربی، طول تقریبی ۲۰۰ و عرض تا ۳۰ کیلومتر است [۲۱]. انواع مختلفی از سنگ‌های آذرین، دگرگونی، رسوبی و آتشفشانی- رسوبی در منطقه مورد مطالعه وجود دارند [۲۰-۲۲]. واحدهای اولترامافیکی و مافیکی که عمدتاً در منطقه برون‌زد دارند، شامل هارزبورژیت، دونیت، سرپانتین، گابرو و میکروگابرو و دایک‌های دیابازی‌اند (شکل ۱- ب). با وجود این‌که افیولیت سبزوار به شدت غسل‌خورده و دگرسان شده اما نمونه شاخصی از افیولیت‌ها در ایران است زیرا تمامی بخش‌های تشکیل‌دهنده یک کمپلکس افیولیتی را دارد [۲۳]. منطقه 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.

ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای، منبع اولیه‌ای برای کروم عیار بالا و آلومینیوم عیار پایین در کاربردهای متالورژی و همچنین کروم عیار پایین و آلومینیوم عیار بالا برای استفاده در فرآورده‌های نسوز است [۲، ۱]. این ذخایر در افیولیت‌های نوع آلی که در پوسته اقیانوسی تشکیل شده‌اند، یافت می‌شوند و از نظر تکتونیکی همانند افیولیت‌ها در امتداد حاشیه قاره‌ای تمرکز یافته‌اند [۳]. کمپلکس‌های افیولیتی ایران قسمتی از کمر بند افیولیتی تتیس در خاورمیانه‌اند که به دیگر افیولیت‌های آسیایی مانند پاکستان در شرق و هم‌چنین افیولیت‌های ناحیه مدیترانه مانند ترکیه، قبرس، یونان و اروپای شرقی در غرب متصل می‌شوند. بر اساس سن و فراوانی، افیولیت‌های ایران به گروه‌های سنی پالئوزوئیک و مزوزوئیک تقسیم می‌شوند (شکل ۱- الف) [۴]. در ایران افیولیت‌های مزوزوئیک به مراتب فراوان‌تر از افیولیت‌های پالئوزوئیک‌اند که اغلب آن‌ها در میان صفحه ایران در شمال و صفحه عربی در جنوب واقع شده‌اند و توسط اشتوکلین به دو زیرکمر بند بیرونی (جنوبی) و درونی (شمالی) تقسیم‌بندی شده‌اند [۵]. زیرکمر بند بیرونی در غرب و جنوب گسل معکوس اصلی زاگرس و زیرکمر بند درونی در شمال و شرق گسل معکوس اصلی زاگرس واقع شده است (شکل ۱- الف). قسمتی از زیرکمر بند شمالی که بلوک لوت را احاطه می‌کند، کمر بند افیولیت ملانژ ایران مرکزی نامیده می‌شود و شامل افیولیت‌های سبزوار، ناین- بافت، اسفندقه، مکران و بیرجند است. کمپلکس‌های افیولیتی ایران تقریباً دارای ویژگی‌های مشترکی در میان مناطق مختلف‌اند و حاوی توده‌های اولترامافیکی نوع آلی‌اند که اغلب دارای هارزبورژیت و دونیت به همراه لرزولیت و پیروکسنیت (به صورت فرعی)‌اند. تاکنون، مطالعات متعددی برای پی‌جویی و اکتشاف ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای با استفاده از روش‌های مختلف اکتشافی مانند زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و دورسنجی انجام شده است [۶-۱۲]. با این‌وجود، مدلسازی پتانسیل معدنی این نوع ذخایر به ندرت انجام گرفته و هنوز مدل اکتشافی دقیقی از این ذخایر به دست نیامده است. به منظور مدلسازی پتانسیل معدنی برای ذخیره مورد پی‌جویی، ابتدا کلیه ویژگی‌های کانسارهای تیپ ماده معدنی مورد اکتشاف شناسایی و جمع‌آوری می‌شوند. در واقع در این مرحله می‌توان مدل مفهومی ناحیه‌ای را با توجه به مطالعه اختصاصات عمومی ذخایر تیپ ماده معدنی مورد پی‌جویی که در سراسر جهان وجود دارند، استنتاج کرد، زیرا یک مدل مفهومی خوب

(الف)



(ب)



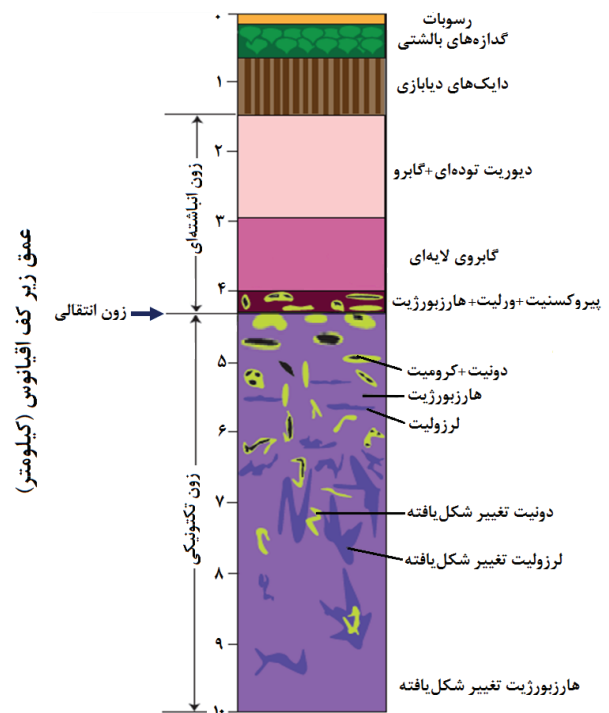
شکل ۱: (الف) واحدهای ساختاری و موقعیت افیولیت‌های اصلی ایران (اقتباس از [۲۴])، (ب) نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه

### ۳- مدل مفهومی ناحیه‌ای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای

کرومیت با فرمول شیمیایی  $(Mg, Fe^{2+})(Cr, Al)_2O_4$ ، عضوی از کانی‌های گروه اسپینل است که در بخش اولترامافیکی مجموعه‌های افیولیتی یافت می‌شود [۲۵، ۲۶]. توالی افیولیت‌ها از بالا به پایین شامل:

- رسوبات پلاژیک و عمیق دریایی مانند رادیولاریت، چرت، آهک‌های پلاژیک مناطق عمیق دریا و رسوبات آبیسال که معمولاً غنی از آهن و منگنزاند.
- گدازه‌های بالشتی که ضخامت آن‌ها تا حدود ۲ کیلومتر برآورد می‌شود.
- دایک‌های صفحه‌ای دیابازی که کانال‌های تغذیه‌کننده برای گدازه‌های بالشتی فوقانی است.
- توالی انباشته‌ای که از دو قسمت اصلی اولترامافیکی و گابرویی تشکیل شده است.
- توالی گوشته‌ای که ممکن است هارزبورژیته یا لرزولیتی باشد (شکل ۲).

فرضیه‌های مختلفی در مورد تشکیل کرومیت ارائه شده است اما در همه آن‌ها اتفاق نظر در مورد اینکه ذخایر کرومیت



شکل ۲: توالی تشکیل افیولیت‌ها و پراکندگی کرومیت‌های انبانه‌ای (لنزهای سیاه‌رنگ) (اقتباس از [۳۰])

تیپ انبانه‌ای در واحدهای مافیکی و اولترامافیکی مجموعه‌های افیولیتی در پوسته اقیانوسی تشکیل شده است و سپس در اثر عوامل تکتونیکی در حاشیه قاره‌ها و جزایر قوسی شکل قرار گرفته‌اند، وجود دارد. دونیت، سرپانتینیت و پریدوتیت سنگ‌های اصلی میزبان ذخایر کرومیت‌اند. سنگ‌های میزبان پریدوتیتی مانند هارزبورژیت و لرزولیت در توالی گوشته‌ای و ورلیت در توالی انباشته‌ای افیولیت‌ها است (شکل ۲). در توالی گوشته‌ای، ذخایر کرومیت به صورت عدسی‌های توده‌ای شکل است که اغلب آن‌ها در نزدیکی مرز پوسته و گوشته که زون انتقالی نیز نامیده می‌شود در داخل غلاف‌های دونیتی واقع در یک میزبان هارزبورژیته تشکیل می‌شوند (شکل ۲) [۲۸، ۲۷]. علاوه بر این، قسمت اولترامافیکی توالی انباشته‌ای، تناوبی از دونیت، هارزبورژیت، پیروکسنیت، ورلیت و وستریت است که به صورت لایه‌ای بر روی هم قرار گرفته و کرومیت در داخل دونیت‌های این قسمت تشکیل شده است و بر خلاف کرومیت‌های موجود در توالی گوشته‌ای ساختار لایه‌ای دارد (شکل ۲). نیکل، کبالت و مس عناصر ردیاب کروم‌اند، به طوری که مس به وسیله سولفورها و آلیاژهای فلزی و نیکل و کبالت به وسیله‌الیوین حمل می‌شود [۲۹].

تعدادی از ذخایر همراه با هاله‌ای از دگرسانی سرپانتینی‌اند درحالی‌که بعضی دیگر بدون آن است [۳۰، ۲۵]. وجود هاله دگرسانی به این دلیل است که سنگ‌های اولترامافیک، به ویژه دونیت و هارزبورژیت، تحت شرایط خاصی در اثر آبدگیری، کانی‌های گروه سرپانتین را به وجود می‌آورند و به این صورت دگرسانی سرپانتینی به وجود می‌آید. مقاومت کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های اولترامافیکی در برابر سرپانتینی شدن متفاوت است به طوری که ابتدا الیوین، سپس اورتوپیروکسن‌ها و در نهایت کلینوپیروکسن‌ها تحت تاثیر قرار می‌گیرند. بنابراین، چنانچه یک پریدوتیت در اثر آبدگیری به سرپانتینت تبدیل شود آخرین قطعاتی که باقی خواهند ماند کلینوپیروکسن‌ها هستند. کرومیت به صورت انواع مختلفی از بافت‌ها دیده می‌شود که بافت پوست‌پلنگی یک مشخصه مهم برای تشخیص ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای از ذخایر لایه‌ای است. در این حالت ندول‌ها و گلوله‌های کرومیت تیره‌رنگ به ابعاد مختلف که گاهی در حد سانتی‌متراند، در زمینه‌ای از سرپانتین و الیوین تشکیل شده‌اند [۳۰، ۲۷].

سرپانتینیت‌ها همانند نمک، به ویژه زمانی که به مقدار معینی به وسیله محلول‌های هیدروترمال تحت تاثیر حرارت قرار می‌گیرند، به دلیل وزن مخصوص پایین‌تر نسبت به

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

که در آن:

E: مقدار عددی شاهد فضایی در بازه نامحدود

F<sub>E</sub>: امتیاز فازی تخصیص یافته به E در بازه صفر و یک

S: شیب

i: نقطه عطف تابع است.

بنابراین، شکل تابع و در نتیجه مقدار تابع عضویت فازی به وسیله شیب و نقطه عطف تابع تعیین شده و وزن‌ها در دامنه بین صفر و یک قرار می‌گیرند، پس می‌توان از تابع فوق نقشه‌های شاهد فازی مختلف را تولید کرد و در نهایت با تلفیق آن‌ها با استفاده از یک روش مناسب (عملگر میانگین هندسی) مدل پتانسیل معدنی را تولید و به شناسایی مناطق امیدبخش و اولویت‌بندی آن‌ها پرداخت. بر اساس تراکم نمونه‌های ژئوشیمیایی، اندازه هر سلول برای تمامی نقشه‌های شاهد یاد شده در بالا برابر ۷۰×۷۰ متر مربع در نظر گرفته شد [۳۳].

#### ۴-۱- نقشه شاهد فاصله از سنگ میزبان

در کمربند افیولیتی سبزوار، ذخایر کرومیت معمولاً در داخل غلاف‌های دونیتی واقع در یک سنگ میزبان هارزبورژیتی تشکیل شده‌اند. این واحدها (دونیت و هارزبورژیت) در سطح وسیعی از منطقه به کانی‌های گروه سرپانتین تبدیل شده‌اند. بنابراین، شناسایی این واحدهای سنگی و نیز واحدهای دگرسان شده 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 سنجنده MSI ماهواره‌ای سنتینل 2B به شناسایی آن‌ها در نوار افیولیتی سبزوار پرداخته شده است. با این داده‌ها می‌توان تصاویری با قدرت تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر در ۱۳ باند در محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز طول موج کوتاه تهیه کرد. در این مطالعه ابتدا شاخص‌های مرتبط با کانی‌زایی (دونیت و هارزبورژیت سرپانتینی شده) با استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر مشابهت شناسایی و سپس نقشه فواصل از آن‌ها به روش پیوسته وزن‌دهی شد (شکل ۳-الف).

#### ۴-۲- نقشه شاهد چگالی گسل

در کمربند افیولیتی سبزوار، سنگ‌های سرپانتینیزه مرتبط با کانی‌سازی از لحاظ فضایی (نه ژنتیکی) همراه

رسوبات فوقانی به صورت یک دیپایر به سمت بالا حرکت می‌کنند. صعود دیپایر یک نمک به دلیل وزن مخصوص پایین آن نسبت به رسوبات فوقانی است. 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 محدوده ۲٫۸۰ تا ۳٫۳۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است [۳۱]. علاوه بر این، دونیت و هارزبورژیت بر اثر سرپانتینی شدن ۴۴ درصد افزایش حجم پیدا می‌کنند [۳۱]. بنابراین، در دیپایرسیم سرپانتینیت علاوه بر اختلاف وزن مخصوص، افزایش حجم نیز موثر است به طوری که افزایش حجم در مقایسه با اختلاف وزن مخصوص، نقش مهم‌تری را در صعود دیپایری توده‌های سرپانتینی بازی می‌کند [۳۱]. در نتیجه، سرپانتینیت در هر حرکت تکتونیکی که بخواهد حوزه افیولیتی را ببندد نمی‌تواند پایدار بماند و به صورت یک دیپایر نفوذ کرده و تمام کمپلکس افیولیتی را تکه‌تکه می‌کند. به همین دلیل، بر روی زمین یک مجموعه سنگی (رادپولاریت‌ها، گدازه‌های بالشتی، دایک‌های صفحه‌ای دیابازی، گابروهای لایه‌ای و نظایر آن) تکه‌تکه شده و بدون ارتباط با یکدیگر در یک زمینه سرپانتینی به شکل آمیزه رنگین دیده می‌شوند. در ملانژهای افیولیتی، ذخایر کرومیت در اثر سرپانتینی شدن بخش‌های اولترامافیک و متعاقب آن عملکرد دیپایری توده‌های سرپانتینی به درون مناطق برشی و یا زون‌های گسلی درون سرپانتینیت‌ها رانده شده و جایگزین شده‌اند [۳۲].

#### ۴- استنتاج معیارهای اکتشافی ناحیه‌ای از مدل مفهومی و تولید نقشه‌های شاهد اکتشافی وزن‌دار پیوسته

با توجه به مدل مفهومی ناحیه‌ای ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای، معیارهای اکتشافی ژئوشیمیایی و سنجش از دور برای تولید نقشه‌های شاهد اکتشافی فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی مرتبط با ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، به دلیل آن که مقادیر پیوسته نقشه‌های شاهد فضایی حاصل (فاصله از سنگ میزبان و چگالی گسل) در محدوده مشخص و یکسانی قرار نداشته و در نتیجه اهمیت نسبی آن‌ها به صورت درست و واقعی نمی‌تواند برای مدلسازی پتانسیل معدنی مورد ارزیابی قرار گیرد، از روش وزن‌دهی پیوسته، با استفاده از تابع لجستیکی بیان شده در رابطه ۱، برای فازی‌سازی نقشه‌های شاهد استفاده شد [۱۹]:

زمین‌شناسی، نتایج روش‌های مختلف تلفیق یکسان نخواهد بود، بنابراین لازم است در هر منطقه دو یا چند مدل پتانسیل با استفاده از روش‌های مختلف تلفیق، تولید و نتایج با هم مقایسه شوند تا بهترین مدل برای اکتشافات بعدی انتخاب شود. برای این منظور، بر اساس روش وزن‌دهی به لایه‌های شاهد و همچنین روش مدلسازی، روش‌ها یا توابع ریاضیاتی متعددی می‌توانند به منظور تلفیق نقشه‌های شاهد مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق، نقشه‌های شاهد پیوسته با استفاده از توابع (عملگرهای) گامای فازی و میانگین هندسی برای تولید مدل پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در کمر بند افیولیتی سبزوار با یکدیگر ترکیب شدند.

#### ۵-۱- تولید مدل پتانسیل معدنی به روش گامای فازی

از آنجایی که در این تحقیق وزن‌دهی به مقادیر نقشه‌های شاهد با استفاده از تابع لجستیکی انجام شده است و این وزن‌ها در محدوده [۰ و ۱] قرار دارند، بنابراین می‌توان آن‌ها را به عنوان نقشه‌های شاهد فازی با استفاده از عملگرهای فازی با یکدیگر ترکیب کرد [۱۳]. به این منظور هر یک از عملگرهای موجود فازی می‌توانند با توجه به نوع کانی‌سازی مورد جستجو و هدف تلفیق مورد استفاده قرار گیرند. از آنجایی که مناطق هدف برای اکتشافات تفصیلی تر ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای باید نشان‌دهنده ویژگی‌های شاهد مکمل که فعل و انفعالات شرایط مساعد برای تشکیل ذخایر معدنی را نشان می‌دهند، باشند در نتیجه چنین مناطقی باید دارای ارزش بالای اکتشافی باشند. برای نیل به این هدف، از عملگر گامای فازی برای تلفیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار طبق رابطه ۲ استفاده شد:

$$\mu_C = [1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)]^\gamma \times [\prod_{i=1}^n \mu_i]^{1-\gamma} \quad (2)$$

که در آن:

$\mu_C$ : مقدار نهایی پتانسیل برای هر سلول (پیکسل) واحد

$\mu_i$ : امتیاز فازی سلول  $i$ امین نقشه شاهد

$\gamma$ : پارامتری در محدوده [۰ و ۱] است.

از آنجایی که برای اهداف پتانسیل‌یابی، مقادیر گامای بزرگ‌تر از ۰٫۹ منجر به تولید مدل‌های کارآمدتری شده است [۱۳]، در این تحقیق نیز از گامای ۰٫۹ برای تولید مدل پتانسیل معدنی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای استفاده شد (شکل ۴-الف).

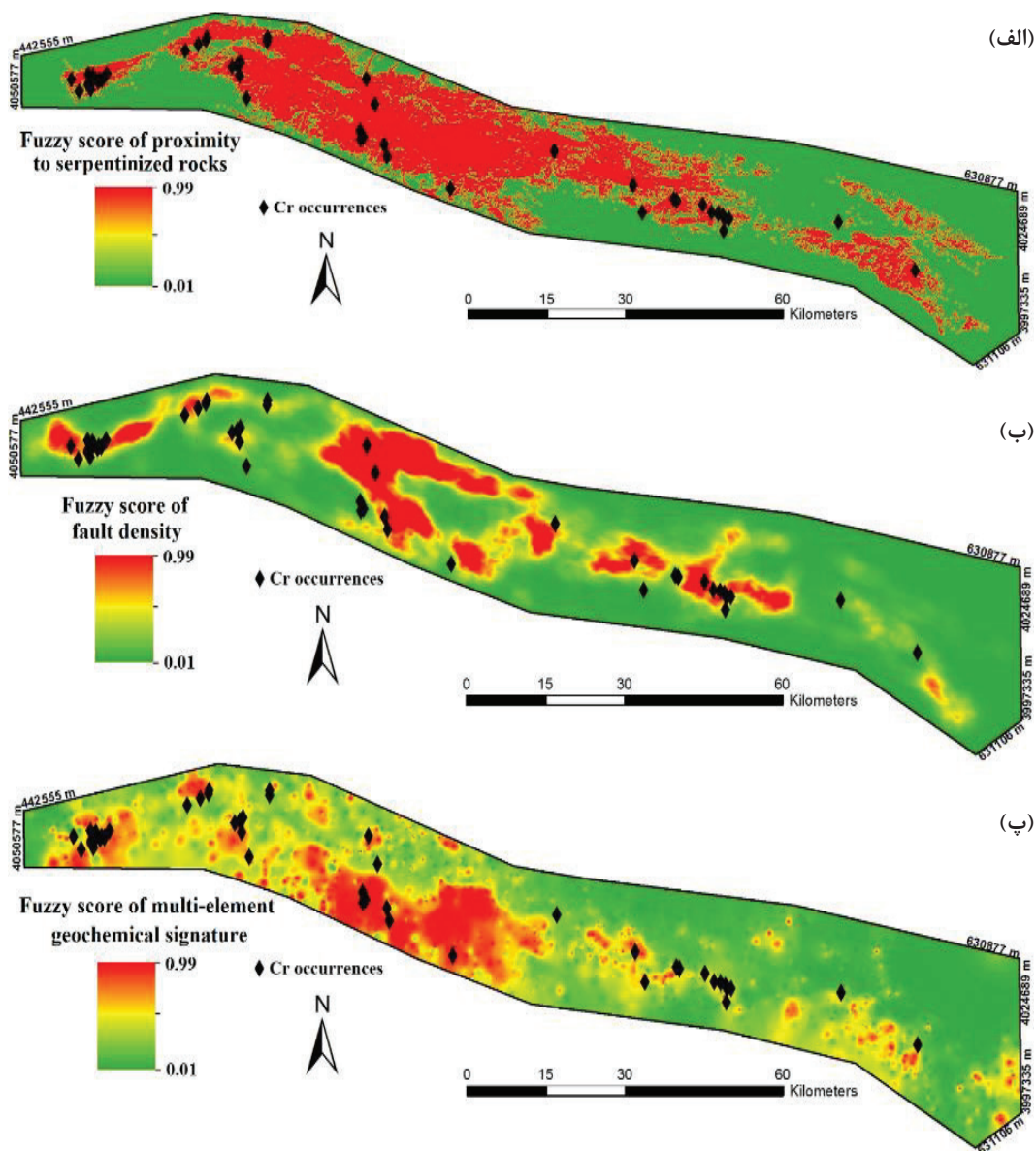
با ویژگی‌های ساختاری از جمله گسل‌هاوند که دلیل آن، عملکرد دی‌پیری توده‌های سربانتینی است [۳۴]. بنابراین، مقادیر بالای چگالی گسل دارای مطلوبیت بالاتری از نظر کانی‌سازی کرومیت تیپ انبانه‌ای‌اند. در این تحقیق، ابتدا گسل‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از تصاویر Landsat ETM<sup>+</sup> شناسایی و رقومی شده و سپس نقشه چگالی گسل ایجاد و به روش پیوسته وزن‌دهی شد (شکل ۳-ب).

#### ۴-۳- نقشه شاهد اثر ژئوشیمیایی چندعنصره

نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای و خاک به دلیل 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 به عنوان عناصر شاخص یا اثرهای ژئوشیمیایی ذخیره کرومیتی مورد استفاده قرار گیرند [۳۷-۳۵]. در این تحقیق، مقادیر عیاری عناصر شاخص فوق برای تعداد ۲۱۲۴ نمونه رسوب آبراهه‌ای تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی ایران (با تراکم حدود یک نمونه در هر کیلومتر مربع) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای تجزیه شیمیایی و تعیین مقادیر عناصر در نمونه‌های تهیه شده، نمونه‌ها خرد شده و سپس از الک ۱۷۷ میکرومتر عبور داده شد و مجدد الک و تا ۷۵ میکرومتر پودر شده‌اند، سپس به وسیله محلول تیزاب سلطانی هضم شده و در نهایت با استفاده از طیف‌سنج نوری پلاسما جفت‌شده القایی (ICP-OES) مورد آنالیز چند عنصری قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، دقت آنالیز عناصر شاخص با استفاده از روش Thompson and Howart (۱۹۸۶) تعیین شده است. بر اساس این روش، دقت نتایج آزمایش برای عناصر مورد استفاده در حد مطلوب بوده است. برای ایجاد نقشه شاهد اثر ژئوشیمیایی چندعنصره، ابتدا مقادیر عنصری کروم، کبالت، نیکل و مس با استفاده از رابطه ۱ فازی شد و سپس عناصر شاخص با اهمیت برای ایجاد یک نقشه شاهد چندعنصری با کارایی بالاتر، برای تلفیق با سایر نقشه‌های شاهد، شناسایی شدند [۳۸]. در نهایت عناصر کروم، کبالت و نیکل با استفاده از عملگر فازی "OR" با هم ترکیب شدند (شکل ۳-پ).

#### ۵- تلفیق نقشه‌های شاهد پیوسته

پس از تهیه نقشه‌های شاهد وزن‌دار باید آن‌ها را با یکدیگر تلفیق کرد. از آنجایی که در محیط‌های مختلف زمین‌شناسی و مناطق مختلف اکتشافی به دلیل وجود پیچیدگی‌های



شکل ۳: نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته، (الف) فاصله از سنگ میزبان، (ب) چگالی گسل، (پ) اثر ژئوشیمیایی چندعنصره

تعریف شده که  $n$  تعداد مقادیر است. این رابطه برای هر سلول از منطقه مورد مطالعه بوده است.

که در آن:

$G_A$ : میانگین هندسی مجموعه داده‌های اکتشافی

$F_i$ : مقدار عددی وزنی نقشه شاهد  $A_m$  در سلول مورد نظر

$n$ : تعداد نقشه‌های شاهد است.

در این تحقیق، رابطه میانگین هندسی کانی‌سازی کرومیت تیپ انبانه‌ای در هر سلول از منطقه مورد مطالعه با توجه به نقشه‌های شاهد مورد استفاده به صورت رابطه ۴ نوشته

۵-۲- تولید مدل پتانسیل معدنی به روش میانگین هندسی

عملگر میانگین هندسی، یک تابع تصمیم‌گیری چند معیاره است که به منظور تلفیق نقشه‌های شاهد وزن دار برای ایجاد مدل پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (رابطه ۳) [۳۹]:

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

میانگین هندسی به صورت ریشه  $n$ م حاصل ضرب مقادیر،

می‌شود:

(۴)

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

که در آن:

$F_{HR}$ : امتیاز فازی وزن دار مقادیر داده‌های اکتشافی متناظر با نقشه‌های شاهد فاصله از سنگ میزبان

$F_{FD}$ : چگالی گسل

$F_{GS}$ : اثر ژئوشیمیایی مرتبط با ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای پس از محاسبه مقادیر  $G_{Chromite}$  برای هر پیکسل در منطقه مورد مطالعه، این مقادیر به منظور تولید مدل پتانسیل معدنی کانی‌سازی کرومیت تیپ انبانه‌ای به نقشه تبدیل شدند (شکل ۴-ب).

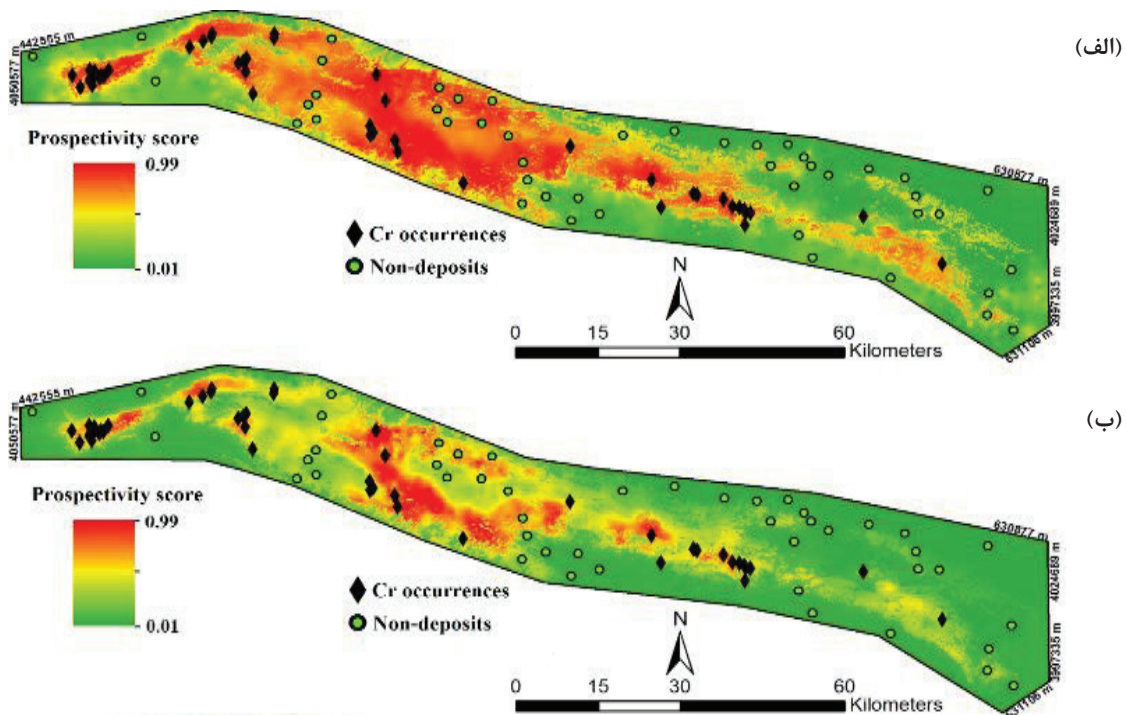
پتانسیل معدنی به طور گسترده کاربرد دارد، استفاده شد. برای این منظور، همانند روش پیوسته سه نقشه شاهد فاصله از سنگ میزبان، چگالی گسل و اثر ژئوشیمیایی چندعنصره تهیه شد. سپس هر یک از نقشه‌های شاهد به طور خطی به کلاس‌های دلخواه طبقه‌بندی شده و در نهایت یک مقدار عضویت فازی (امتیاز فازی) به هر کلاس شاهد با توجه به نقش آن‌ها در پی‌جویی و اکتشاف ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای بر اساس نظر کارشناس اختصاص داده شد (شکل ۵). با استفاده از نقشه‌های تهیه شده دو مدل پتانسیل معدنی به روش گامای فازی و میانگین هندسی با استفاده از نقشه‌های شاهد مکانی گسسته برای مقایسه مناسب‌تر با مدل‌های تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد مکانی پیوسته، تولید شد. برای مقایسه بهتر نقشه‌های حاصل در شکل ۶ ارایه شده است.

#### ۷- ارزیابی و مقایسه مدل‌های پتانسیل معدنی

در مدلسازی پتانسیل معدنی وزن اختصاص یافته به یک شاهد فضایی باید بازتاب‌دهنده رابطه بین شاهد فضایی و کانی‌سازی تیپ ذخیره مورد هدف باشد. بنابراین می‌توان از موقعیت اندیس‌های شناخته شده و همچنین موقعیت‌های فاقد

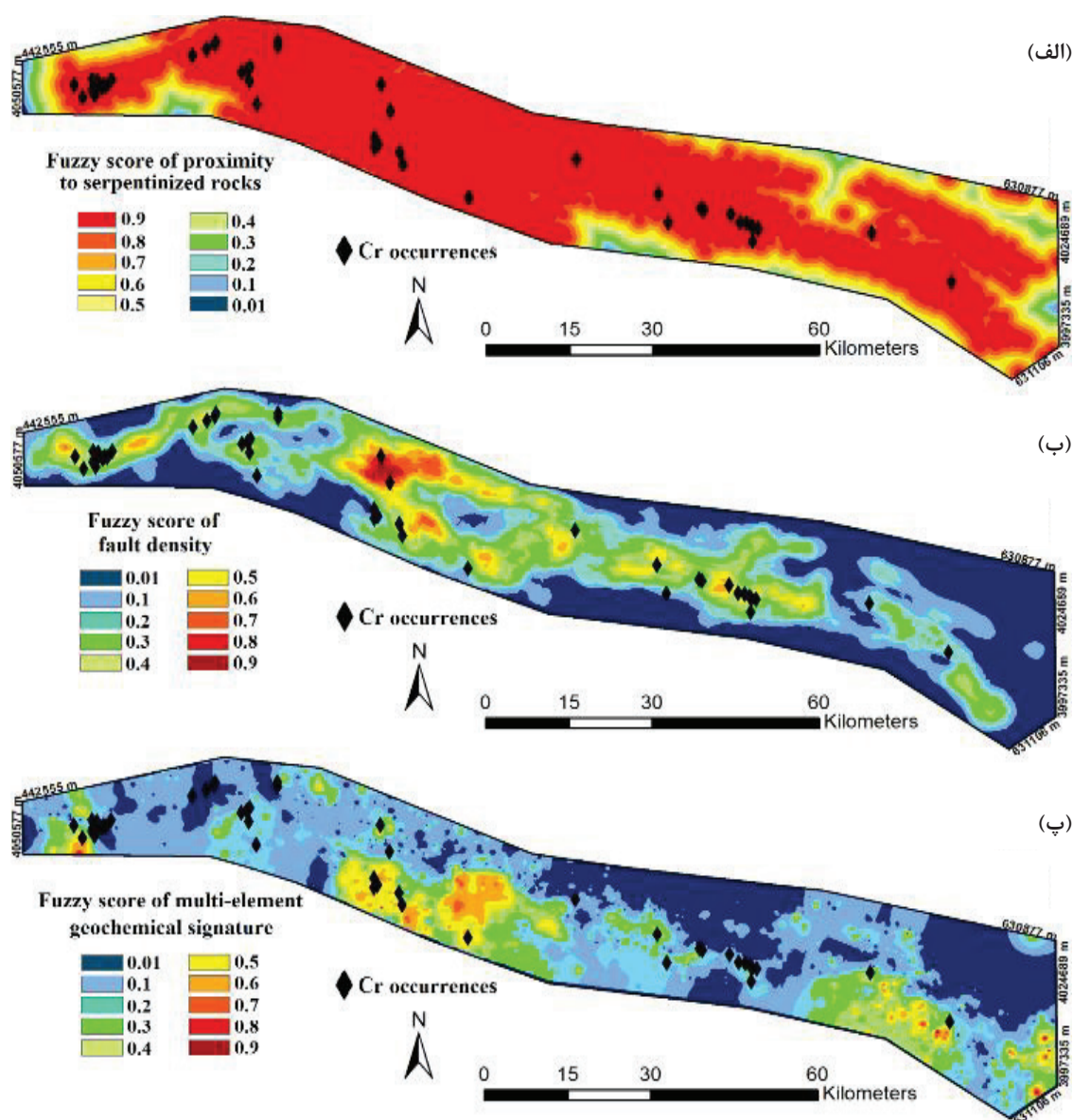
#### ۶- تولید مدل پتانسیل معدنی با استفاده از نقشه‌های شاهد اکتشافی وزن دار گسسته

در این تحقیق، علاوه بر استفاده از روش وزن‌دهی پیوسته از روش‌های وزن‌دهی گسسته که در مدلسازی‌های دانش‌محور



شکل ۴: مدل‌های پتانسیل معدنی، الف) مدل گامای فازی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته، ب) مدل میانگین هندسی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن دار پیوسته





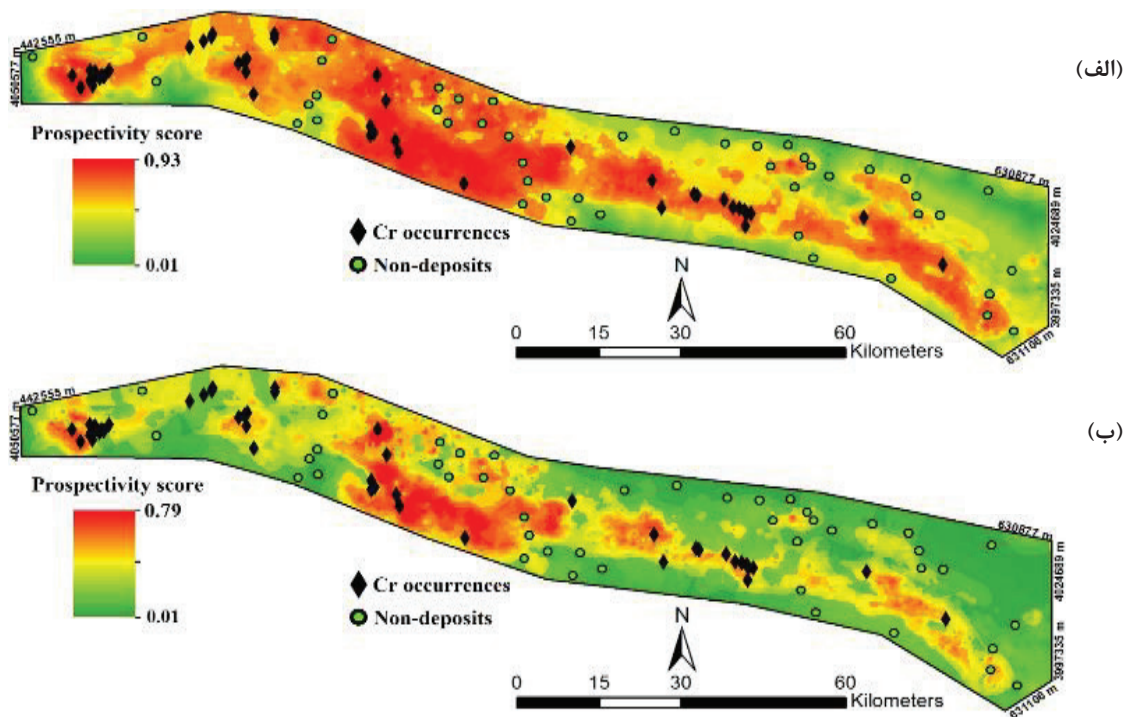
شکل ۵: نقشه‌های شاهد وزن دار گسسته، الف) فاصله از سنگ میزبان، ب) چگالی گسل، پ) اثر ژئوشیمیایی چندعنصره

دارد که در مقابل کلاس‌های مختلف مدل پتانسیل معدنی رسم می‌شوند. اولین منحنی مربوط به آهنگ پیش‌بینی اندیس‌های شناخته‌شده متناظر با کلاس‌های مدل پتانسیل معدنی و منحنی دیگر مساحت تحت پوشش هر کلاس از مدل پتانسیل معدنی نسبت به کل مساحت منطقه مورد مطالعه است [۴۰]. در این نمودار، نقطه تقاطع دو منحنی آهنگ پیش‌بینی و مساحت معیاری برای ارزیابی مدل پتانسیل معدنی است و هر چه نقطه تقاطع دو منحنی بالاتر باشد، مدل کارایی بیشتری دارد زیرا اندیس‌های شناخته شده در سطوح کوچک‌تری از منطقه مورد مطالعه قرار گرفته و در

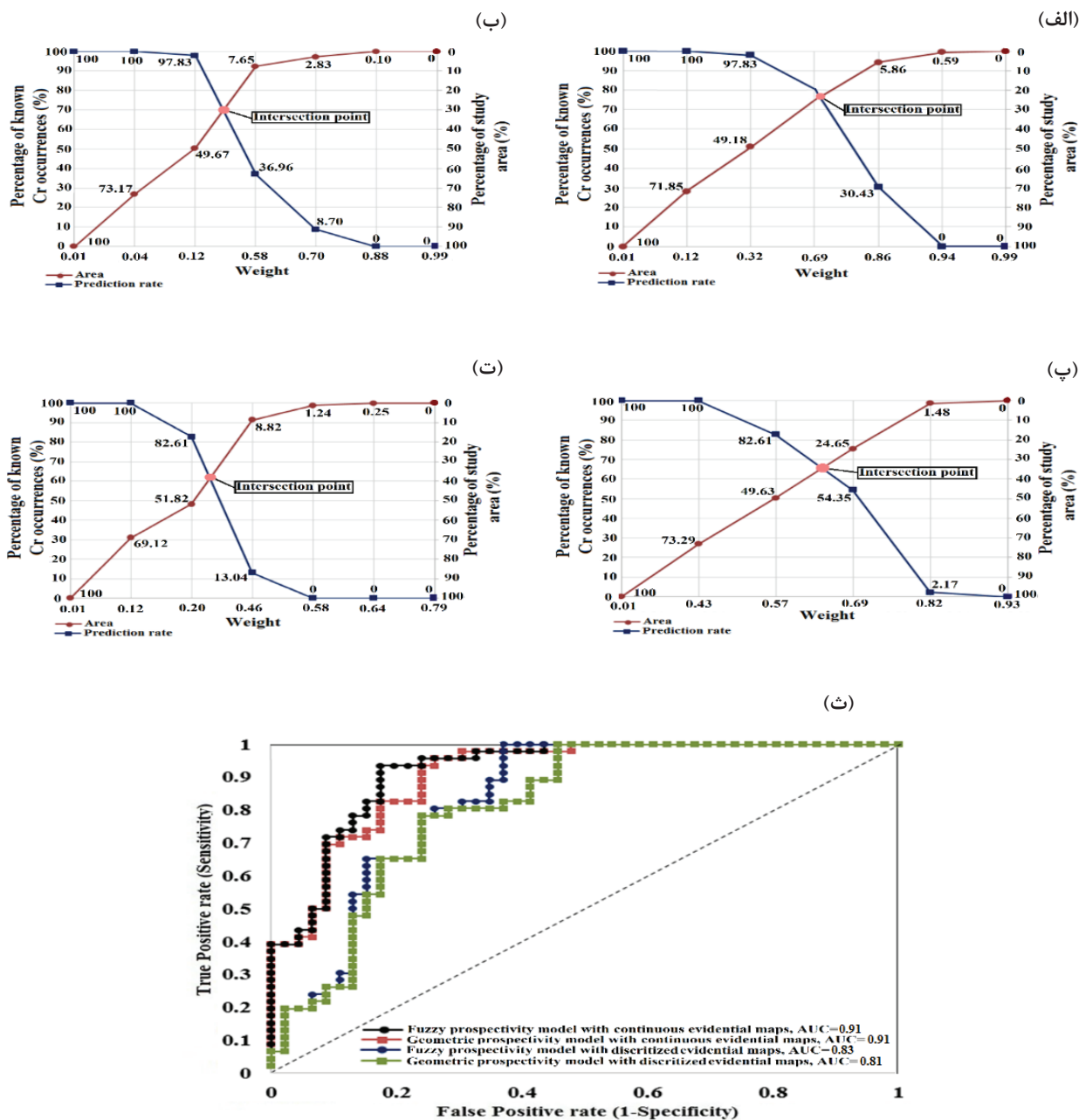
ذخیره در منطقه مورد مطالعه برای ارزیابی مدل‌های پتانسیل معدنی استفاده کرد. در این تحقیق نیز برای ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل‌های تولیدشده از ۴۶ موقعیت دارای ذخیره و ۴۶ موقعیت فاقد ذخیره کرومیت در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. از موقعیت‌های دارای ذخیره و فاقد ذخیره صرفاً برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شده و در تخصیص وزن و تولید مدل پتانسیل معدنی تاثیری نداشته‌اند. در این تحقیق، از نمودارهای آهنگ پیش‌بینی-مساحت و مشخصه عملکرد سیستم برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شده است. در نمودار آهنگ پیش‌بینی-مساحت، دو منحنی وجود

ارزیابی عملکرد مدل‌های پتانسیل معدنی استفاده می‌شود. مقدار AUC بین صفر و یک است به طوری که هر چه مقدار AUC بالاتر باشد مدل از کارایی بیشتری دارد. مطابق شکل ۷، در مدل‌های پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته، ۷۸ درصد ذخایر معدنی در مساحتی حدود ۲۲ درصد از منطقه مورد مطالعه در روش گامای فازی (شکل ۷-الف) و ۷۰ درصد ذخایر معدنی در مساحتی حدود ۳۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در روش میانگین هندسی (شکل ۷-ب) پیش‌بینی شده‌اند. هم‌چنین در مورد مدل‌های پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته، ۶۵ درصد ذخایر معدنی در مساحتی حدود ۳۵ درصد از منطقه مورد مطالعه در روش گامای فازی (شکل ۷-پ) و ۶۲ درصد ذخایر معدنی در مساحتی حدود ۳۸ درصد از منطقه مورد مطالعه در روش میانگین هندسی (شکل ۷-ت) پیش‌بینی شده‌اند. مقدار AUC برای مدل‌های پتانسیل تولید شده به روش پیوسته بالاتر از مدل‌های پتانسیل تولید شده به روش گسسته است (شکل ۷-ث).

نتیجه احتمال رخداد ذخایر معدنی در این سطوح بالاتر است. با توجه به اینکه برای رسم نمودار آهنگ پیش‌بینی-مساحت نیاز به طبقه‌بندی مدل‌های پتانسیل معدنی نیاز است از روش فرکتالی عیار-مساحت برای تعیین حد آستانه‌ای جوامع مختلف استفاده شد. سپس مدل‌های پتانسیل تولید شده، بر اساس حدود آستانه‌ای حاصل از روش فرکتالی طبقه‌بندی شدند. در نهایت، با توجه به مدل‌های پتانسیل معدنی طبقه‌بندی شده، تعداد اندیس‌های پیش‌بینی شده در هر کلاس و مساحت متناظر کلاس‌ها، نمودارهای آهنگ پیش‌بینی-مساحت رسم شده است (شکل ۷). برای رسم نمودار مشخصه عملکرد سیستم علاوه بر موقعیت اندیس‌های شناخته شده به موقعیت‌های فاقد ذخیره نیز نیاز است. محور عمودی این نمودار، «حساسیت» و محور افقی آن، «اختصاصی بودن» است (شکل ۷-ث) [۴۱-۴۵]. حساسیت بیانگر مقادیر پیش‌بینی شده مثبت درست در مقابل تمام خروجی‌های مثبت و اختصاصی بودن بیانگر مقادیر پیش‌بینی شده منفی درست در مقابل تمام خروجی‌های منفی است. سطح زیر منحنی مشخصه عملکرد سیستم (AUC) برای



شکل ۶: مدل‌های پتانسیل معدنی، الف) مدل گامای فازی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته، ب) مدل میانگین هندسی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته



شکل ۷: نمودارهای آهنگ پیش‌بینی - مساحت و مشخصه عملکرد سیستم برای مدل‌های پتانسیل معدنی، الف) نمودار آهنگ پیش‌بینی - مساحت برای مدل گامای فازی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته، ب) نمودار آهنگ پیش‌بینی - مساحت برای مدل میانگین هندسی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته، پ) نمودار آهنگ پیش‌بینی - مساحت برای مدل گامای فازی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته، ت) نمودار آهنگ پیش‌بینی - مساحت برای مدل میانگین هندسی تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسسته، ث) نمودار مشخصه عملکرد سیستم برای مدل‌های پتانسیل تولید شده

های شاهد وزن‌دار پیوسته از لحاظ پیش‌گویی موقعیت‌های دارای ذخیره نسبت به مدل‌های تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد گسسته عملکرد بهتری دارند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های پتانسیل تولید شده با استفاده از نقشه‌های شاهد وزن‌دار پیوسته برای هدایت فعالیت‌های اکتشافی ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای در منطقه مورد مطالعه، مناسب‌تر و قابل اعتمادتراند. اگرچه در این تحقیق نقشه‌های شاهد وزن‌دار با استفاده از توابع گامای فازی و میانگین هندسی تلفیق شدند که منجر به تولید مدل‌های پتانسیل مختلف با آهنگ پیشگویی متفاوت از ذخیره مورد جستجو شد اما نقشه‌های شاهد وزن‌دار می‌توانند برای تولید مدل‌های پتانسیل معدنی با کارایی بالاتر با استفاده از سایر روش‌های تلفیقی نیز ترکیب شوند.

#### ۹- سپاس‌گزاری

نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به علت فراهم کردن امکان دسترسی به اطلاعات و نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های ژئوشیمیایی منطقه مورد مطالعه تشکر و قدردانی کنند.

#### ۱۰- مراجع

- [1] Thayer, T. P. (1964). "Geologic features of podiform chromite deposits. Methods in prospecting for chromite". Woodtli, R., and Ostel, D. (Eds.), Paris OECD, 135-146.
- [2] Dickey, J. S. (1975). "A hypothesis of origin for podiform chromite deposits". In *Chromium: its Physicochemical Behavior and Petrologic Significance*, 39: 1061-1074.
- [3] Roberts, S. (1988). "Ophiolitic chromitite formation; a marginal basin phenomenon?". *Economic Geology*, 83: 1034-1036.
- [4] Arvin, M., and Robinson, P. T. (1994). "The petrogenesis and tectonic setting of lavas from the Baft ophiolitic mélange, southwest of Kerman, Iran". *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31: 824-834.
- [5] Stöcklin, J. (1977). "Structural correlation of the Alpine ranges between Iran and Central Asia". *Memoire Hors-Serve*, 8: 333-353.
- [6] Davis, W. E., Jackson, W. H., and Richter, D. H. (1957). "Gravity prospecting for chromite deposits in Camaguey province, Cuba". *Geophysics*, 22: 848-869.
- [7] Bhattacharya, B. B., Mallick, K., and Roy, A. (1969). "Gravity prospecting for chromite at Sukinda

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های پتانسیل تولید شده به روش پیوسته عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های پتانسیل تولید شده به روش گسسته دارند. همچنین مدل پتانسیل تولید شده به روش پیوسته گامای فازی بهترین عملکرد را در میان مدل‌های تولید شده دارد و می‌تواند برای انتخاب مناطق هدف به منظور اکتشافات تفصیلی‌تر ذخایر کرومیت تیپ انبانه‌ای استفاده شود.

#### ۸- نتیجه‌گیری

از آن‌جا که طرز تشکیل همه ذخایر کرومیت ایران به شکل انبانه‌ای است و از طرفی این نوع کرومیت‌ها در بخش اولترامافیکی توالی‌های افیولیتی یافت می‌شوند، بنابراین اولین گام در پی‌جویی این نوع ذخایر شناسایی کمربندهای افیولیتی است، بنابراین در این نواحی با تحلیل، ترکیب و تلفیق شواهد به دست آمده از منابع مختلفی از داده‌های فضایی (مانند زمین‌شناسی، ژئوفیزیک، ژئوشیمی، سنجش از دور) می‌توان به مدلسازی پتانسیل معدنی در هر مقیاسی، از ناحیه‌ای تا محلی، برای شناسایی مناطق امیدبخش پرداخت.

از آن‌جایی که در کلیه روش‌های دانش‌محور، داده‌محور و ترکیبی آن دو، مقادیر عددی داده‌های اکتشافی ابتدا به تعدادی کلاس با فواصل دلخواه طبقه‌بندی و سپس به همه مقادیر داده‌های اکتشافی در هر کلاس بر اساس یکی از روش‌ها وزن یکسانی تخصیص داده می‌شود، از این‌رو خروجی مدلسازی پتانسیل معدنی متأثر از تعداد و دامنه کلاس‌های انتخابی است و اهمیت نسبی داده‌های اکتشافی در هر کلاس از نقشه‌های شاهد در نظر گرفته نمی‌شود، در نتیجه چنین نقشه‌هایی نمی‌توانند عدم قطعیت را به خوبی مدل کنند. به همین دلیل استفاده از روش‌های پیوسته پیشنهاد می‌شود. در روش پیوسته، لایه‌های شاهد وزن‌دار با استفاده از توابع لجستیکی و بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده و همچنین بدون استفاده از قضاوت شخصی تولید می‌شوند. در نتیجه این روش بر وزن‌دهی جهت‌دار (خطای سیستماتیک و تصادفی ناشی از روش‌های داده‌محور و دانش‌محور) غلبه کرده و می‌تواند به خوبی عدم قطعیت را مدل کند.

در این تحقیق، از تابع غیرخطی لجستیک برای تولید نقشه‌های شاهد پیوسته به منظور مدلسازی پتانسیل کرومیت در کمر بند افیولیتی سبزوار استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های پتانسیل تولید شده با استفاده از نقشه

- evidence layers in mineral prospectivity mapping*". Journal of Geochemical Exploration, 164: 94-106.
- [20] Stöcklin, J. (1974). "Possible ancient continental margins in Iran". In *The geology of continental margins*, Berlin, Springer, 873-887.
- [21] Rajabzadeh, M. A., Ghasemkhani, E., and Khosravi, A. (2015). "Biogeochemical study of chromite bearing zones in Forumad area, Sabzevar ophiolite, Northeastern Iran". Journal of Geochemical Exploration, 151: 41-49.
- [22] Shafaii Moghadam, H., Rahgooshay, M., and Forouzes, V. (2010). "Geochemical investigation of the noudular chromites in the Forumad ophiolite, NE of Iran". Iranian Journal of Sciences and Technology, 43: 235-245.
- [23] Shirzadi, A., Masoudi F., and Rahimzadeh, B. (2013). "Nature of Chromite parent magma in Sabzevar ophiolite (North-East of Iran)". Iranian Society of Crystallography and Mineralogy, 21: 49-58.
- [24] 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.
- [25] Lipin, B. R. (1984). "Chromite from the Blue Ridge Province of North Carolina". American Journal of Science, 284: 507-529.
- [26] Prichard, H. M., Neary, C. R., Fisher, P. C., and O'hara, M. J. (2008). "PGE-rich podiform chromitites in the Al 'Ays ophiolite complex, Saudi Arabia: an example of critical mantle melting to extract and concentrate PGE". Economic Geology, 103: 1507-1529.
- [27] 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: 211-222.
- [28] Yigit, O. (2009). "Mineral deposits of Turkey in relation to Tethyan metallogeny: implications for future mineral exploration". Economic Geology, 104: 19-51.
- [29] 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.
- [30] 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 Scientific Investigations Report, pp. 45.
- [31] Schuiling, R. D. (2011). "Troodos: a giant serpentinite diaper". International Journal of Geosciences, 2: 98-101.
- and Sukrangi, Cuttack District, Orissa (India)". Geoexploration, 7: 201-240.
- [8] Bayrak, M. (2002). "Exploration of chrome ore in Southwestern Turkey by VLF-EM". Journal of the Balkan Geophysical Society, 5: 35-46.
- [9] 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.
- [10] Rajendran, S., Al-Khribash, 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.
- [11] Pournamdari, M., and Hashim, M. (2014). "Detection of chromite bearing mineralized zones in Abdasht ophiolite complex using ASTER and ETM+ remote sensing data". Arabian Journal of Geosciences, 7: 1973-1983.
- [12] Asçi, M., and Bayat, C. (2015). "Chrome mine exploration by microgravity method in Fenk plateau, Osmaniye, Turkey". In EGU General Assembly Conference Abstracts, pp. 17.
- [13] Bonham-Carter, G. F. (1994). "Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS". Computer methods in the geoscientists, Pergamon, Oxford, 13: 398.
- [14] Porwal, A., Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2004). "A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping". Mathematical geology, 36: 803-826.
- [15] Carranza, E. J. M. (2008). "Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS". Elsevier, 11: 365.
- [16] Porwal, A., and Kreuzer, O. P. (2010). "Introduction to the Special Issue: Mineral prospectivity analysis and quantitative resource estimation". Ore Geology Reviews 38: 121-127.
- [17] Kreuzer, O. P., Miller, A. V., Peters, K. J., Payne, C., Wildman, C., Partington, G. A., Puccioni, E., McMahon, M. E., and Etheridge, M. A. (2015). "Comparing prospectivity modelling results and past exploration data: A case study of porphyry Cu-Au mineral systems in the Macquarie Arc, Lachlan Fold Belt, New South Wales". Ore Geology Reviews, 71: 516-544.
- [18] Yousefi, M., and Nykänen, V. (2017). "Introduction to the special issue: GIS-based mineral potential targeting". Journal of African Earth Sciences, 12: 1-4.
- [19] Yousefi, M., and Nykänen, V. (2016). "Data-driven logistic-based weighting of geochemical and geological

- multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping*". Computers & Geosciences, 83: 72-79.
- [40] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Prediction-area (P-A) plot and C-A fractal analysis to classify and evaluate evidential maps for mineral prospectivity modeling". Computers & Geosciences, 79: 69-81.
- [41] 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.
- [42] Chen, Y. (2015). "Mineral potential mapping with a restricted Boltzmann machine". Ore Geology Reviews, 71: 749-760.
- [43] 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.
- [44] Parsa, M., Maghsoudi, A., and Yousefi, M. (2017). "A Receiver Operating Characteristics-Based Geochemical Data Fusion Technique for Targeting Undiscovered Mineral Deposits". Natural Resources Research, 27: 15-28.
- [45] Zuo, R. (2018). "Selection of an elemental association related to mineralization using spatial analysis". Journal of Geochemical Exploration, 184: 150-157.
- [۳۲] حشمت‌بهزادی، ک.، ۱۳۷۱؛ "بررسی مکانیسم تشکیل و جای‌گزینی ذخایر کرومیت انبانی موجود در آمیزه‌ی افیولیتی بافت". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [33] Hengl, T. (2006). "Finding the right pixel size". Computers & Geosciences, 32: 1283-1298.
- [34] 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, 1-17. DOI: 10.1007/s11053-018-9385-4.
- [35] Whittaker, P. J. (1986). "Chromite deposits in Ontario". Ontario Ministry of Northern Development and Mines, 55: 97.
- [36] Yang, W., and Siegel, F. R. (1989). "Geochemical exploration for chromite deposits, piedmont upland province, maryland, USA". Journal of Geochemical Exploration, 32: 299-300.
- [37] 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.
- [38] Roshanravan, B., Aghajani, H., Yousefi, M., and Kreuzer, O. (2018). "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.
- [39] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based



Imam Khomeini International University  
Vol. 4, No. 1, Spring 2019, pp. 1-5



نشریه مهندسی منابع معدنی  
Journal of Mineral Resources Engineering  
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2019.9465.1183

## Mineral Prospectivity Mapping For Podiform Chromite Deposits Using Continuously-Weighted Evidence Maps In Sabzevar Ophiolitic Belt

Roshanravan B.<sup>1</sup>, Aghajani H.<sup>2\*</sup>, Yousefi M.<sup>3</sup>, Kreuzer O.<sup>4</sup>

1- PhD candidate of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran  
bijan.roshanravan@gmail.com

2- Associate Professor, Dept. of Mining Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran  
haghajani@shahroodut.ac.ir

3- Associate Professor, Malayer University, Malayer, Iran  
m.yousefi.eng@gmail.com

4- Economic Geology Research Centre (EGRU), School of Earth & Environmental Science, James Cook University, Townsville, QLD 4811, Australia  
opkreuzer@gmail

(Received: 13 Oct. 2018, Accepted: 21 Nov. 2018)

**Abstract:** Multi-criteria decision-making approaches using geographical information system are widely used to solve problems in geoscience. In this paper, logistic transformation, as a data-driven way, was utilized to assign continuous weights to evidential maps of host rocks, structural controls and geochemical data. These three evidence layers were then integrated using fuzzy gamma and geometric average operators. The prediction-area plot and receiver operating characteristic curve confirm that the generated prospectivity models are reliable to be used for selecting exploration targets.

**Keywords:** Podiform chromite, Fuzzy gamma, Geometric average, Mineral prospectivity mapping.

### INTRODUCTION

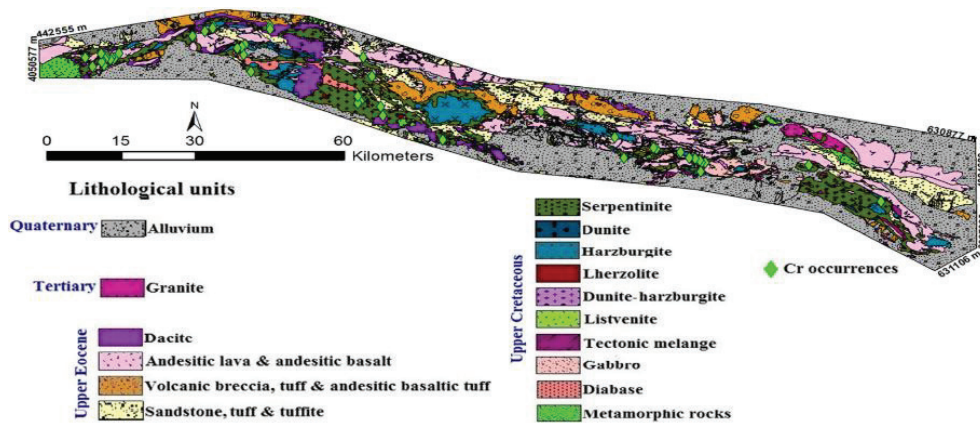
Diverse exploration methods (i.e., geology, geophysics, geochemistry and remote sensing) have been utilized to prospect podiform-type chromite deposits. Nevertheless, prospectivity analysis of this type of mineral deposits has rarely been implemented. There are various methods for mineral prospectivity mapping (MPM) [1,2]. The purpose of this paper is prospectivity analysis of podiform-type chromite deposits in regional scale (1:100,000) in northeast of Iran. For this end, a continuous weighting method [3] through fuzzy logic MPM was applied. The study area with a surface of ~4200 Km<sup>2</sup> located in Sabzevar ophiolite belt in the central Iranian microcontinent and is a part of the northern branch of Neo-Tethyan ophiolite belt in the Middle East [4].

## METHODS

In this paper, of various weighting methods of spatial exploration data, continuous weighting approach was utilized to evade (1) random error resulting from arbitrary judgments of analyst and (2) systematic error resulting from using known mineral deposit in definition of the weights [3,5]. Consequently, the ensuing exploration bias in the generation of exploration targets for further prospecting podiform-type chromite deposit could be modulated.

## FINDINGS AND ARGUMENT

There are various types of igneous, metamorphic, sedimentary, hydrothermal and volcano-sedimentary rocks, which exposed in the study area (Figure 1). We first elicited serpentinitized units from the Sentinel-2B satellite images. Then, we created a map of distance from the serpentinitized rocks. Subsequently, by transforming the distance values into [0, 1] range using a logistic function [3], fuzzified evidence layer of proximity to host rock was obtained (Figure 2A).



**Figure 1.** Simplified geological map of the study area and location of known podiform chromite occurrences

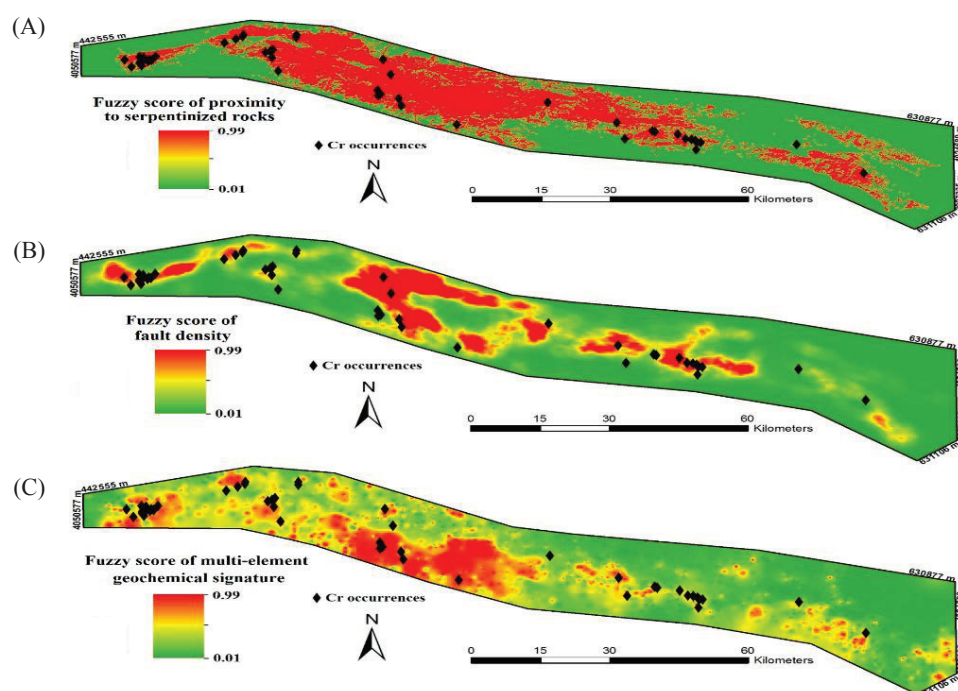
For depicting structural controls of the podiform chromite deposits, we recognized and digitalized faults with the aid of ETM<sup>+</sup> imagery. Then, we created a map of fault density (FD: total length of faults per pixel in the study area). Eventually, to generate a weighted evidence map of structural controls, the values of FD were fuzzified by using logistic function (Figure 2B).

Geochemical signatures could be applied to prospect podiform chromite deposits. For this, the element contents of Cr, Co, Ni and Cu geochemical indicators were fuzzified using logistic function, through which dispersion patterns of these geochemical signatures are modeled. Due to the close genetic linkage of these elements with chromite deposits, they could reveal signatures of the mineralization. Then, to achieve a stronger geochemical evidence layer, for integrating with other evidential maps, the efficient fuzzified uni-element geochemical signatures [6] were combined using fuzzy “OR” operator (Figure 2C).

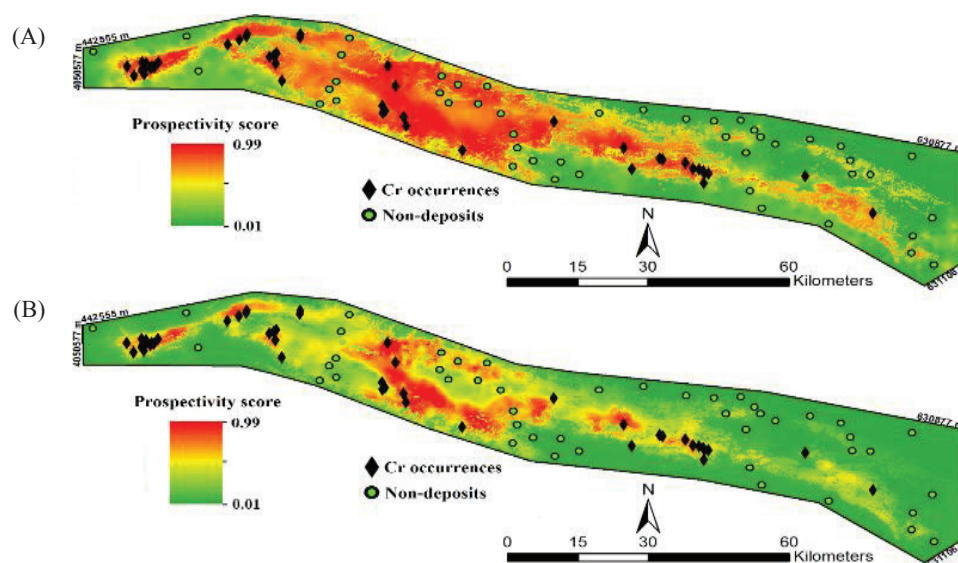
Finally, the three fuzzified evidence maps, i.e., weighted evidence layers of FD, proximity to host rocks, and geochemical signature were integrated with fuzzy gamma ( $=0.9$ ) and geometric average operators to delineate target areas for further exploration (Figure 3).

After generating the fuzzy and geometric average prospectivity models, we utilized the prediction-area (P-A) plot and receiver operating characteristic (ROC) curve to appraise the models. In this regard, we utilized two following criteria; 1) normalized density,  $N_d$  [7], and (2) area under the receiver operating characteristic curve, AUC [8]. For this, we used 46 mineral deposit locations (MDLs) and 46 non-deposit locations (NDLs) in the study area for evaluating the efficiency of the generated prospectivity models. The  $N_d$  and AUC criteria were adjusted in P-A plot [7] and ROC curve, respectively, for selecting more efficient prospectivity model. In a P-A plot, the two curves namely prediction rate curve of MDLs and occupied area





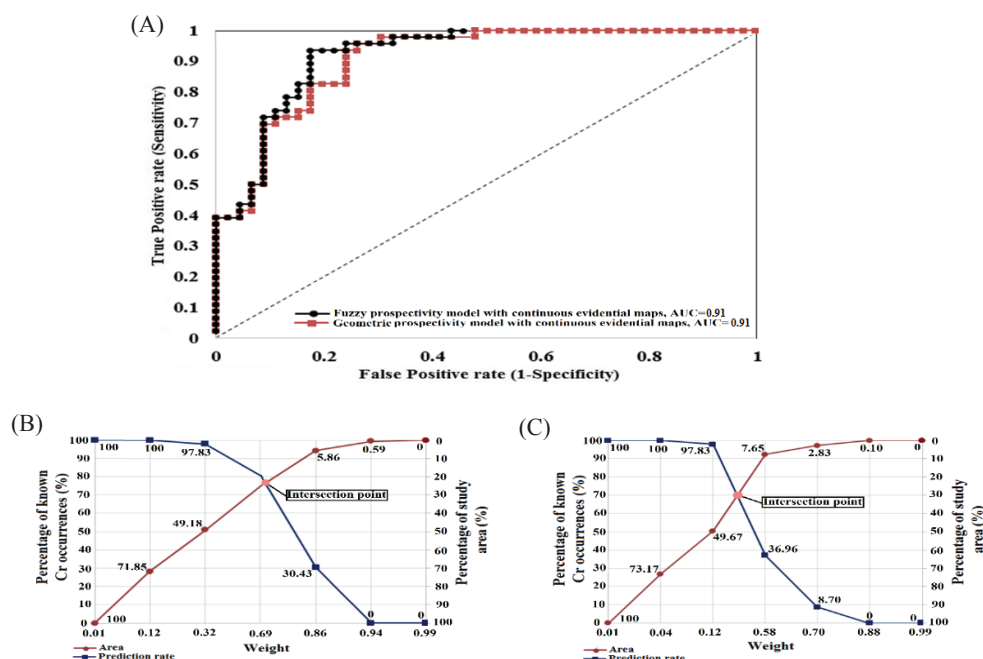
**Figure 2.** Continuously weighted evidence layer of A: proximity to serpentinized rocks, B: fault density and C: multi-element geochemical signature



**Figure 3.** Exploration targeting model of A: fuzzy gamma (=0.9) and B: geometric average

curve are depicted in a scheme versus their corresponding prospectivity scores. ROC curve is a plot of true positive rate (Sensitivity) on the y-axis versus false positive rate (1-Specificity) on the x-axis. Consequently, the ROC curve requires both MDLs and NDLs for evaluating the efficiency of the prospectivity models. We selected the NDLs respecting three following issues; 1) far away from the MDLs, 2) randomly distributed, and 3) not located on the host rocks. Targeting models with a  $N_d$  higher than 1 [7] and an AUC higher than 0.5 [8] could be utilized to select target areas for further exploration of deposit-type sought in the study area. The P-A plots and ROC curves corresponding to the prospectivity models generated are shown in Figure 4. Based

on the ROC curves (Figure 4A), the AUC value for both prospectivity models is 0.91, indicating the effective performance of the generated models. Based on the intersection points in Figure 2, 78% of the mineral deposits are predicted in 22% of the study area (Figure 4B) for the fuzzy gamma prospectivity model, while 70% of the mineral deposits are predicted in 30% of the study area (Figure 4C) for the geometric average prospectivity model. Thus, the  $N_d$  value for the fuzzy gamma and geometric average prospectivity models is 3.54 and 2.33, respectively. These comparisons demonstrated that the former model is better than the latter model in terms of generating reliable target areas and, thus, could be utilized to select target areas for further exploration of deposit-type sought in the study area.



**Figure 4.** A: Receiver operating characteristic curve of the exploration targeting models generated, B: Prediction-area plot for the fuzzy gamma exploration targeting model and C: Prediction-area plot for the geometric average exploration targeting model

## CONCLUSIONS

In this paper, prospectivity analysis of podiform chromite deposits was carried out by using logistic-based continuous weighting method without using known deposit locations as training sites to defeat exploration bias and errors. According to the value of  $N_d$  and AUC, the performance of the prospectivity models of fuzzy gamma and geometric average are efficient. Consequently, the exploration targets generated are reliable and could be used efficiently for further exploration programs.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors thank Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI) for supplying necessary data to do this research work.

## REFERENCES

- [1] Bonham-Carter, G. F. (1994). "Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS". Computer methods in the geoscientists, Pergamon, Oxford, 13: 398.
- [2] Carranza, E. J. M. (2008). "Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS". Elsevier, 11: 365.
- [3] 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.
- [4] Shafaii Moghadam, H., Rahgooshay, M., and Forouzes, V. (2010). "Geochemical investigation of the nodular chromites in the Forumad ophiolite, NE of Iran". Iranian Journal of Sciences and Technology, 43: 235–245.
- [5] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015a). "Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping". Computers & Geosciences, 83: 72–79.
- [6] Roshanravan, B., Aghajani, H., Yousefi, M., and Kreuzer, O. (2018). "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.
- [7] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015b). "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.
- [8] 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.