



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مهندسی اکتشاف معدن

بهبود مدل‌های پتانسیل معدنی به منظور افزایش موفقیت اکتشاف  
(با نگرش ویژه بر لایه شاهد ژئوشیمیایی در محیط GIS)

مهیار یوسفی

استاد راهنما :

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور :

**Dr. E. J. M. Carranza**

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

دی ۱۳۹۱

## تشکر و قدردانی

در طول اجرای رساله حاضر از مساعدت، راهنمایی و همراهی افرادی بزرگوار بهرمنند شده‌ام که بر خود لازم می‌دانم از این عزیزان تشکر نمایم. از جناب آقای دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی به خاطر انجام راهنمایی این رساله کمال تشکر و امتنان را دارم. از جناب آقای دکتر جان کارانزا (Dr. Emmanuel John Muico Carranza) به خاطر پذیرش مشاوره این رساله متشکرم. از جناب آقای پروفیسور گریم بونهام کارتر (Prof. Grame Bonham Carter) به خاطر مشاوره در انجام بخش‌هایی از رساله کمال تشکر را دارم. از مسئولین شرکت ملی صنایع مس ایران به خصوص جناب آقای مهندس اصفهانی‌پور و همچنین از آقایان دکتر کریمی و مهندس صاحب‌زمانی از مسئولین مهندسان مشاور پارس معدن آسیا به خاطر در اختیار گذاشتن برخی از اطلاعات مورد نیاز رساله کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب مهیار یوسفی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله بهبود مدل‌های پتانسیل معدنی به منظور افزایش موفقیت اکتشاف تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله 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 پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، 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 ۱۳۹۱/۱۱/۰۷

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها 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 پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.



## چکیده

مدل‌سازی پتانسیل معدنی عبارت است از تجزیه و تحلیل و تلفیق لایه‌های شاهد اکتشافی حاصل از مطالعات اکتشافی مستقل برای پی‌جویی یک ماده معدنی با تیپ مشخص، که به منظور به نقشه درآوردن و اولویت‌بندی نواحی امیدبخش و اهداف اکتشافات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور تخصیص وزن به قسمت‌های مختلف لایه‌های شاهد فضایی برای تولید نقشه‌های پیش‌گوی وزن‌دار قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، دو روش عمده دانش‌محور و داده‌محور استفاده می‌شود. در روش دانش‌محور که در مناطق کم اکتشاف شده (نواحی سبز) استفاده می‌شود، تخصیص وزن به قسمت‌های مختلف شواهد اکتشافی از طریق قضاوت کارشناسی صورت می‌گیرد. نواحی امیدبخش و اهداف اکتشافی در خروجی مدل‌های پتانسیل معدنی حاصل از روش‌های داده‌محور، به نحو زیادی متأثر از موقعیت اندیس‌های شناخته شده در منطقه مورد مطالعه است که ممکن است منجر به ایجاد یک خطای سیستماتیک در نتیجه خروجی شود. در این خصوص نقشه‌های آنومالی‌های ژئوشیمیایی از مهم‌ترین و متداول‌ترین لایه‌های شاهدهی هستند که در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده می‌شوند. تولید لایه‌های شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار همیشه بحث برانگیز بوده است. موضوع اصلی رساله حاضر شامل تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای برای استنتاج بهترین ترکیب یا ترکیب‌های چند عنصری معرف کانی‌سازی مورد جستجو، وزن‌دهی هدف‌دار به قسمت‌های مختلف نقشه‌های آنومالی‌های ژئوشیمیایی بدون دخالت قضاوت کارشناسی و بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل یک منطقه مورد مطالعه و همچنین به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی است. در این خصوص سه روش عمده شامل روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای برای استنتاج بهترین ترکیب(های) معرف کانی‌سازی مورد جستجو، روش شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی برای تخصیص وزن هدف‌دار به قسمت‌های مختلف نقشه‌های آنومالی‌های ژئوشیمیایی و همچنین روش حوضه‌های آبریز وزن‌دار برای به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی در مناطق با الگوی آنومالی پیچیده، برای بهبود مدل‌های پتانسیل معدنی، توسعه داده شده است. علاوه بر سه روش فوق، یک

شاخص جدید برای ارزیابی روش‌های مختلف جداسازی آنومالی از زمینه، تحت عنوان شاخص تفکیک، در این رساله معرفی شده است. همچنین دو روش جدید بهبود یافته دیگر برای تولید نقشه‌های وزن‌دار چگالی گسل و نقشه‌های وزن‌دار فاصله از عوارض زمین‌شناسی ارائه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای با شناسایی و حذف ترکیب‌ها و عناصر غیر پیش‌گو باعث افزایش واریانس تشریح شده توسط هر فاکتور می‌شود. همچنین شدت آنومالی مخصوصاً در نزدیکی و اطراف ذخایر معدنی با استفاده از روش تحلیل فاکتوری مرحله‌ای و روش شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی افزایش می‌یابد. روش شاخص احتمالی کانی‌سازی می‌تواند به عنوان یک روش جدید تحلیل داده‌های اکتشافی در روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی در نواحی بدون اندیس‌شناخته شده و بدون قضاوت کارشناسی برای تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار ژئوشیمیایی استفاده شود. آنومالی‌های مشخص شده در نقشه‌های حوضه‌های آبریز وزن‌دار انطباق بیشتری با سایر نشانه‌های معرف زمین‌شناسی کانی‌سازی مورد جستجو داشته و همچنین این نقشه‌ها می‌توانند مستقیماً در مدل‌سازی به روش منطق فازی، به عنوان یک نقشه وزن‌دار، استفاده شوند. با استفاده از روش حوضه‌های آبریز وزن‌دار، مشکل وابستگی به محل و چگالی نمونه‌برداری، در دو روش قبلی یعنی روش منحنی میزان (درون یابی) و روش تخصیص بالادست هر نمونه رسوب آبراهه‌ای تا نمونه بعدی به عنوان سطح تاثیر آن، مرتفع می‌شود. در نهایت این که با استفاده از روش‌های توسعه داده شده در رساله حاضر نرخ پیش‌بینی و همچنین موفقیت اکتشاف مدل‌های پتانسیل معدنی در مقایسه با روش‌های قبلی افزایش و بهبود یافته است.

## تولیدات علمی و مقالات مستخرج از رساله

### مقالات ISI و ISC:

1- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. and Carranza, E.J.M. 2012. Geochemical mineralization probability index (GMPI): a new approach to generate enhanced stream sediment geochemical evidential map for increasing probability of success in mineral potential mapping. Journal of Geochemical Exploration, 115, 24-35.

2- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. and Carranza, E.J.M. 2012. Application of staged factor analysis and logistic function to create a fuzzy stream sediment geochemical evidence layer for mineral prospectivity mapping. Geochemistry: Exploration, Environmental, Analysis.

۳- یوسفی، م.، کامکار روحانی، ا. و علی‌پور، م. (۱۳۹۱). شدت بخشی به هاله‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای با استفاده از شناسایی و حذف مرحله‌ای عامل‌های غیر پیش‌گو به منظور افزایش موفقیت اکتشاف - مطالعات موردی: کانی‌سازی‌های فلورین و مس، فصل‌نامه علمی- پژوهشی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

4- Yousefi, M., Carranza, E.J.M., and Kamkar-Rouhani, A. 2013. Weighted drainage catchment basin mapping of geochemical anomalies using stream sediment data for mineral potential modeling. Journal of Geochemical Exploration.

### مقالات کنفرانسی داخلی و خارجی:

5- Yousefi, M., Carranza, E.J.M., and Kamkar-Rouhani, (2012). An improved catchment basin modeling approach to vector into mineralized areas using stream sediment geochemical data, Goldschmidt\_2012, Canada.

6- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. and Carranza, E.J.M. (2011). Weighting stream sediment geochemical samples as exploration indicator of deposit-type, Goldschmidt\_2011, Czech Republic.

7- Yousefi, M., Kamkar-Rouhani, A. and Carranza, E.J.M. (2011). Calculation of recognition coefficient of exploration criteria for quantifying the conceptual model parameters in mineral potential mapping, GEOINDO 2011, Thailand.

8- Yousefi, M., and Kamkar-Rouhani, A., (2010). Design of an inference network to combine input Boolean evidential maps for predictive modeling of preliminary exploration of gold deposits in frontier areas, ISME-XI, September 7-10, Finland.

9- Yousefi, M., and Kamkar-Rouhani, A., (2010). Using spatial analysis and weight of evidence method for recognition and separation of lens and fault zone mineralization of fluorite in south of Mazandaran province, Iran, , ISME-XI, September 7-10, Finland.

۱۰- یوسفی، م.، کامکار روحانی، ا. و کریمی، ا. (۱۳۹۱). تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، روشی بهبود یافته برای شدت بخشی به هاله‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای مس در منطقه ساردویه- بافت، اولین کنگره جهانی مس، ۲ الی ۴ آبان ۱۳۹۰، مرکز همایش‌های صدا و سیما، تهران

### تألیف کتاب:

یوسفی، م. و کامکار روحانی، ا. (۱۳۸۹). اصول روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی (در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS)، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵	قدردانی
۵	تعهد نامه
۵	چکیده
۵	تولیدات علمی و مقالات مستخرج از رساله
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- تاریخچه موضوع رساله تحقیقاتی
۲	۲-۱- مدل سازی پتانسیل معدنی
۶	۳-۱- بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق
۱۲	۴-۱- اهداف اصلی تحقیق
۱۳	۵-۱- نوآوری تحقیق
۱۳	۶-۱- فرض های تحقیق
۱۴	۷-۱- سوالات تحقیق
۱۶	۸-۱- روش اجرای تحقیق
۱۶	۱-۸-۱- بهبود و تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن دار
۱۷	۲-۸-۱- بهبود و تولید نقشه های شاهد وزن دار گسل و زمین شناسی
۱۸	۳-۸-۱- تلفیق لایه های وزن دار مختلف و تولید مدل پتانسیل معدنی بهبود یافته
۱۸	۹-۱- اعتبار سنجی نتایج
۱۹	۱-۹-۱- کانی سازی مس پرفیری در استان کرمان
۲۱	۲-۹-۱- کانی سازی فلورین تیپ دره می سی سی پی در استان مازندران
۲۳	۱۰-۱- سازمان دهی رساله

۲۶	<b>فصل دوم: مروری بر روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی و مطالعات انجام شده</b>
۲۷	۱-۲- مقدمه
۲۷	۲-۲- اصول روش‌های داده‌محور
۳۱	۳-۲- استنتاج الگوهای شاهد در مدل‌سازی داده‌محور
۳۲	۴-۲- اصول روش‌های دانش‌محور
۳۴	۵-۲- روش‌های ترکیبی مدل‌سازی پتانسیل معدنی
۳۵	۶-۲- روش منطق فازی
۴۳	۷-۲- تخمین وزن با استفاده از روش عکس فاصله
۴۶	۸-۲- استنتاج الگوهای شاهد در مدل‌سازی دانش‌محور
۴۶	۹-۲- خلاصه و جمع‌بندی

## ۴۸ **فصل سوم: تحلیل فاکتوری مرحله‌ای (SFA) روشی بهبود یافته برای شناسایی اثرهای ژئوشیمیایی چند عنصری**

۴۹	۱-۳- مقدمه
۴۹	۲-۳- تحلیل فاکتوری مرحله‌ای
۵۳	۱-۲-۳- استخراج فاکتورهای تمیز
۵۴	۲-۲-۳- استخراج ترکیب چند عنصری معرف با اهمیت
۵۶	۳-۳- کانی‌سازی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی
۶۲	۴-۳- کانی‌سازی تیپ مس پرفیری
۷۵	۵-۳- نتیجه‌گیری

## ۷۶ **فصل چهارم: شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی (GMPI) و تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار**

۷۷	۱-۴- مقدمه
----	------------

۷۷	۲-۴- تابع لجستیکی و وزن دهی فازی
۸۰	۳-۴- تولید نقشه ژئوشیمیایی وزن دارکانی سازی فلورین
۹۴	۴-۴- تولید نقشه ژئوشیمیایی وزن دارکانی سازی مس
۱۰۲	۵-۴- جداسازی آنومالی از نمونه با استفاده از GMPI
۱۰۵	۶-۴- نتیجه گیری

## ۱۰۷ فصل پنجم: حوضه های آبریز وزن دار (WDCB) روشی بهبود یافته برای به نقشه درآوردن آنومالی های ژئوشیمیایی

۱۰۸	۱-۵- مقدمه
۱۰۸	۲-۵- به نقشه درآوردن آنومالی های ژئوشیمیایی
۱۱۱	۳-۵- حوضه های آبریز وزن دار
۱۱۹	۴-۵- مقایسه روش WDCB با نقشه های منحنی میزان و روش SCB
۱۲۲	۵-۵- نتیجه گیری

## ۱۲۴ فصل ششم: تولید نقشه های شاهد وزن دار در مدل سازی پتانسیل معدنی بدون استفاده از اندیس های شناخته شده و قضاوت کارشناسی

۱۲۵	۱-۶- مقدمه
۱۲۶	۲-۶- تولید نقشه شاهد وزن دار فازی گسل ها
۱۲۸	۳-۶- تولید نقشه شاهد وزن دار فازی از لایه زمین شناسی
۱۳۰	۴-۶- نحوه تولید سایر لایه های وزن دار فازی بدون قضاوت کارشناسی و بدون کاربرد اندیس های ...
۱۳۱	۱-۴-۶- عوارضی که فاصله از آنها اهمیت دارد
۱۳۱	۲-۴-۶- عوارضی که چگالی آنها اهمیت دارند
۱۳۲	۳-۴-۶- حالاتی که مقدار عددی یک متغیر اهمیت دارد
۱۳۲	۵-۶- تلفیق لایه های شاهد وزن دار در مدل سازی پتانسیل معدنی فلورین

۱۳۵ ۶-۶- تلفیق لایه‌های شاهد وزن‌دار در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مس

۱۳۹ ۶-۷- نتیجه‌گیری

## ۱۴۱ فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۴۲ ۷-۱- مقدمه

۱۴۲ ۷-۲- بهبود شناسایی بهترین ترکیب(های) چند عنصری معرف کانی‌سازی

۱۴۳ ۷-۳- بهبود روش تخصیص وزن به آنومالی‌های ژئوشیمیایی

۱۴۳ ۷-۴- توسعه و بهبود روش به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای

۱۴۴ ۷-۵- کاربرد لایه‌های وزن‌دار در انواع روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی

۱۴۵ ۷-۶- کاربرد نتایج در مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مناطق فاقد اندیس شناخته شده و بدون قضاوت ...

۱۴۶ ۷-۷- پیشنهادات

## ۱۵۰ منابع

۱۶۸ پیوست: نقشه‌های پراکندگی نمونه‌های آنومالی در مراحل مختلف تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، مقایسه روش منحنی میزان با حوضه آبریز بالادست نمونه‌ها، شماره و موقعیت اندیس‌های شناخته شده مس و روابط تبدیل ایزومتریک و وزن حوضه آبریز

## فهرست اشکال

صفحه	عنوان
۸	شکل ۱-۱. نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ و منطقه فرضی با ۴ اندیس شناخته شده ...
۲۱	شکل ۲-۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران (الف) و نقشه زمین‌شناسی ساردویه- بافت در ...
۲۳	شکل ۳-۱. نقشه زمین‌شناسی پل سفید در استان مازندران
۳۶	شکل ۱-۲. مراحل مدل‌سازی پتانسیل معدنی با کاربرد منطق فازی به طور نمادین
۳۹	شکل ۲-۲. تغییرات مقدار عضویت فازی بر اساس مقادیر پارامترهای تابع لجستیکی
۳۹	شکل ۳-۲. تخصیص وزن‌های فازی به فواصل مختلف، الف) خطی و ب) غیر خطی
۵۵	شکل ۱-۳. فرآیند کلی روش SFA
۵۹	شکل ۲-۳. پراکندگی مقادیر عناصر مشارکت‌کننده در فاکتور دوم (F2)، در خروجی ...
۶۰	شکل ۳-۳. پراکندگی مقادیر عناصر مشارکت‌کننده در فاکتور اول (F1)، در خروجی ...
۶۲	شکل ۴-۳. توزیع فضایی مقادیر امتیازات فاکتوری به صورت نمادین (نقطه‌ای)
۶۳	شکل ۵-۳. همراهی فضایی عناصر در مرحله اول تحلیل فاکتوری (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)
۶۴	شکل ۶-۳. نقشه توزیع امتیاز فاکتور اول (Ni و Cr، Co) به صورت نمادین (بالا) و توزیع مقادیر ...
۶۵	شکل ۷-۳. نقشه توزیع امتیاز فاکتور دوم (Zn و Pb) به صورت نمادین (بالا) و توزیع مقادیر (پایین) ...
۶۶	شکل ۸-۳. نقشه توزیع امتیاز فاکتور سوم (As و Mo) به صورت نمادین (بالا) و توزیع مقادیر (پایین) ...
۶۷	شکل ۹-۳. نقشه توزیع امتیاز فاکتور چهارم (Au و Cu) به صورت نمادین (بالا) و توزیع مقادیر (پایین) ...
۶۹	شکل ۱۰-۳. همراهی فضایی عناصر در مرحله دوم تحلیل فاکتوری (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)
۷۱	شکل ۱۱-۳. پراکندگی نمونه‌های آنومالی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی Zn-Pb
۷۱	شکل ۱۲-۳. پراکندگی نمونه‌های آنومالی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی As-Mo
۷۲	شکل ۱۳-۳. پراکندگی نمونه‌های آنومالی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی Cu-Au
۷۳	شکل ۱۴-۳. نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی با استفاده از ترکیب‌های کلیدی مختلف ...
۸۲	شکل ۱-۴. توزیع مقادیر متغیرهای ژئوشیمیایی برای کانی‌سازی فلورین ...
۸۶	شکل ۲-۴. مقادیر امتیازات فاکتوری در مرحله چهارم روش SFA در مقابل وزن‌های تخصیص یافته ...



- شکل ۳-۴. مدل مفهومی انتقال مجموعه داده‌های نامحدود در خارج از بازه ۰ و ۱ ... ۸۷
- شکل ۴-۴. مفهوم شاخص تفکیک و تباین در ارزیابی تفکیک‌پذیری جوامع مختلف ژئوشیمیایی ... ۹۱
- شکل ۵-۴. مقایسه مقادیر شاخص تفکیک در جوامع مختلف ژئوشیمیایی با استفاده از دو روش ... ۹۳
- شکل ۶-۴. توزیع مقادیر GMPI برای ترکیب چند عنصری Zn-Pb ( $GMPI_{Pb-Zn}$ ) ۹۵
- شکل ۷-۴. توزیع مقادیر GMPI برای ترکیب چند عنصری As-Mo ( $GMPI_{As-Mo}$ ) ۹۵
- شکل ۸-۴. توزیع مقادیر GMPI برای ترکیب چند عنصری Cu-Au ( $GMPI_{Cu-Au}$ ) ۹۵
- شکل ۹-۴. توزیع نمونه‌های آنومالی بر اساس مقدار نهایی  $GMPI_{Porphyry\ Cu}$  برای حد آستانه ۰/۸۸۸ ۱۰۰
- شکل ۱۰-۴. نرخ پیش‌بینی شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی ... ۱۰۱
- شکل ۱۱-۴. هیستوگرام (الف) و نمودار جعبه‌ای (ب) برای مقادیر نهایی  $GMPI_{Porphyry\ Cu}$  ۱۰۳
- شکل ۱۲-۴. توزیع نمونه‌های آنومالی حاصل از نمودارهای تحلیل داده‌های اکتشافی ... ۱۰۴
- شکل ۱۳-۴. انواع نقشه‌های توزیع مقادیر GMPI ۱۰۵
- شکل ۱-۵. حوضه‌های آبریز آبراه‌های و توزیع ۳ جامعه از نمونه‌های ژئوشیمیایی به صورت نمادین ۱۱۳
- شکل ۲-۵. مقدار میانگین شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی ( $M_T$ ) تمام نمونه‌ها ... ۱۱۴
- شکل ۳-۵. مقدار میانگین شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی نمونه‌های زمینه ( $M_b$ ) ... ۱۱۵
- شکل ۴-۵. نقشه حوضه‌های آبریز وزن‌دار، توزیع مقادیر وزن فازی ( $FC_x$ ) ۱۱۷
- شکل ۵-۵. مقادیر درون‌یابی شده شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی مس ۱۱۹
- شکل ۶-۵. توزیع نمونه‌های آنومالی و زمینه در حوضه‌های آبریز ۲۶، ۳۷ و ۴۰ ... ۱۲۱
- شکل ۱-۶. نقشه شاهد وزن‌دار فازی برای چگالی گسل‌ها، توزیع مقادیر  $F_{FD}$  ۱۲۸
- شکل ۲-۶. نقشه وزن‌دار فازی تولید شده برحسب فاصله از مرز توده‌های نفوذی ... ۱۳۰
- شکل ۳-۶. مدل پتانسیل معدنی فلورین حاصل از تلفیق نقشه شاهد چگالی گسل با ... ۱۳۳
- شکل ۴-۶. امتیاز پی‌جویی دو مدل پتانسیل معدنی فلورین در نقاط انتخابی ... ۱۳۴
- شکل ۵-۶. مدل پتانسیل معدنی تولید شده حاصل از تلفیق نقشه درون‌یابی شده مقادیر GMPI با ... ۱۳۶
- شکل ۶-۶. مدل پتانسیل معدنی تولید شده حاصل از تلفیق نقشه WDCB با ... ۱۳۷
- شکل ۷-۶. امتیاز پی‌جویی در مدل پتانسیل معدنی تولید شده با دو روش WDCB و منحنی میزان ... ۱۳۸
- شکل ۸-۶. درصد پیش‌بینی اندیس‌های شناخته شده بر اساس حد آستانه مختلف ... ۱۳۹

- شکل پ ۱. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله اول  
روش SFA برای فاکتور Zn-Pb  
۱۶۹
- شکل پ ۲. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله دوم  
روش SFA برای فاکتور Zn-Pb  
۱۶۹
- شکل پ ۳. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله نهایی  
روش SFA برای فاکتور کلیدی Zn-Pb  
۱۶۹
- شکل پ ۴. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله اول  
روش SFA برای فاکتور As-Mo  
۱۷۰
- شکل پ ۵. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله دوم  
روش SFA برای فاکتور As-Mo  
۱۷۰
- شکل پ ۶. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله نهایی  
روش SFA برای فاکتور کلیدی As-Mo  
۱۷۰
- شکل پ ۷. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله اول  
روش SFA برای فاکتور Cu-Au  
۱۷۱
- شکل پ ۸. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله دوم  
روش SFA برای فاکتور Cu-Au  
۱۷۱
- شکل پ ۹. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله نهایی  
روش SFA برای فاکتور کلیدی Cu-Au  
۱۷۱
- شکل پ ۱۰. موقعیت اندیس‌های شناخته شده مس و شماره آن‌ها  
۱۷۲
- شکل پ ۱۱. نمایش نمادین عدم کارایی روش SCB در شناسایی و به نقشه درآوردن محل کانی‌سازی  
در حالت الگوهای آنومالی پیچیده  
۱۷۲

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۱	جدول ۱-۲. انواع روش‌های داده‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی
۳۴	جدول ۲-۲. انواع روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی
۳۵	جدول ۲-۳. انواع روش‌های ترکیبی مدل‌سازی پتانسیل معدنی
۳۸	جدول ۲-۴. مقادیر عضویت فازی با توجه به پارامترهای شیب ( $a$ ) و نقطه عطف ( $b$ )
۵۶	جدول ۳-۱. روش SFA برای استنتاج عامل چند عنصری پیش‌گوی کانی‌سازی فلورین
۶۳	جدول ۳-۲. نتایج تحلیل فاکتوری مرحله اول (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)
۶۹	جدول ۳-۳. نتایج تحلیل فاکتوری مرحله دوم (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)
۸۸	جدول ۴-۱. مقادیر معادل فراوانی تجمعی مختلف برای امتیازات فاکتوری فاکتور اول در مرحله چهارم ..
۹۰	جدول ۴-۲. جوامع مختلف ژئوشیمیایی و مقدار میانه آن‌ها برای مجموعه داده‌های انتقال یافته ...
۹۸	جدول ۴-۳. مقادیر نظیر درصد فراوانی تجمعی مختلف برای شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ...
۹۹	جدول ۴-۴. مقادیر معادل فراوانی تجمعی مختلف برای مقدار نهایی $GMPI_{Porphyry\ Cu}$
۱۰۲	جدول ۴-۵. مقایسه درصد نمونه‌های آنومالی و نرخ پیش‌بینی متغیرهای ژئوشیمیایی مختلف
۱۱۸	جدول ۵-۱. پارامترهای محاسبه شده برای هر حوضه آبریز

# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- تاریخچه موضوع رساله تحقیقاتی

با گذشت زمان و افزایش جمعیت، روزبه‌روز نیاز به منابع طبیعی و ذخایر معدنی بیش‌تر احساس می‌شود. در این راستا هم‌زمان با بهره‌برداری از ذخایر کشف شده و اتمام آن‌ها، لزوم اکتشاف ذخایر جدید و عمیق‌تر احساس شده و بنابراین روش‌های اکتشاف دقیق‌تر و جدیدتر به منظور شناسایی ذخایر جدید توسعه یافته‌اند. با توجه به گستردگی تنوع ذخایر معدنی و اختصاصات آن‌ها و تنوع شرایط طبیعی حاکم بر محیط‌های پیچیده زمین‌شناسی، روش‌های مختلف اکتشافی با توجه به اختصاصات ذخایر مورد پی‌جویی ابداع شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به طور کلی مطالعات زمین‌شناسی، اکتشافات ژئوشیمیایی، اکتشافات ژئوفیزیکی و مطالعات سنجش از دور را نام برد. با توجه به این‌که اکتشاف هزینه‌بر بوده و پارامتر هزینه در آن تاثیر زیادی دارد، همیشه سعی بر توسعه روش‌هایی بوده که خطای شناسایی نواحی امیدبخش را به حداقل برساند. به این منظور از حدود سال‌های اواخر قرن بیستم میلادی سعی شد تا با مقایسه و تلفیق نتایج روش‌های مختلف اکتشافی، تحت عنوان مدل‌سازی پتانسیل معدنی، شناسایی نواحی که باید مورد پی‌جویی بیش‌تر قرار گیرند، دقیق‌تر صورت گیرد. با پیشرفت تکنولوژی در علوم کامپیوتر، از ابزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، برای تحلیل داده‌ها و تلفیق آن‌ها استفاده می‌شود. در این راستا رساله حاضر با هدف بهبود نتایج تلفیق لایه‌های مختلف اکتشافی تعریف و اجرا شده است که در فصل حاضر به موضوع آن پرداخته شده است.

## ۱-۲- مدل‌سازی پتانسیل معدنی

فعالیت‌های اکتشافی ذخایر معدنی، به خصوص برای یافتن تمرکز با ارزش اقتصادی از کانی‌ها و فلزات، دارای چهار مرحله شامل انتخاب منطقه<sup>۱</sup>، شناسایی هدف<sup>۲</sup>،

<sup>۱</sup> Area selection

<sup>۲</sup> Target generation

ارزیابی منبع<sup>۱</sup> و تعیین ذخیره<sup>۲</sup> می‌باشد (Carranza, 2008). انتخاب منطقه اکتشافی، در واقع انتخاب منطقه امیدبخش (عموماً وسیع) و مکان‌هایی که احتمال حضور ذخایر معدنی مورد پی‌جویی وجود دارند، می‌باشد. این انتخاب بر اساس شناخت از ذخیره و محیط آن در نزدیک سطح زمین و در مکان‌هایی که فرآیندهای زمین‌شناسی و ساختاری برای کانی‌سازی مناسب هستند، صورت می‌گیرد (Singer, 1993). به عنوان مثال اگر قرار باشد عملیات اکتشافی برای شناسایی مواد معدنی بر روی یک نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی و به وسعت آن (تقریباً ۲۵۰۰ کیلومتر مربع) صورت گیرد. این که کدام ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ انتخاب شود، در واقع جزء مرحله اول می‌باشد. البته اگر یک ورقه ۱/۲۵۰۰۰۰ یا حتی یک استان نیز انتخاب شود، باز هم جزء مرحله اول طبقه‌بندی می‌گردد. همچنین اگر هدف نهایی، به عنوان مثال اکتشاف فلورین باشد و با مطالعات اولیه روشن شود که مهمترین ذخایر فلورین کشور ایران در جنوب استان مازندران قرار دارند و پیرو آن اگر این منطقه به عنوان منطقه‌ای انتخاب شود که باید در آن مطالعات اکتشافی بعدی صورت گیرد، در واقع مرحله اول از چهار مرحله فوق انجام شده است.

شناسایی هدف، مرحله‌ای است که در آن مناطقی معرفی می‌شوند که باید برای مطالعات اکتشافی بیش‌تر و تفصیلی‌تر با استفاده از روش‌های اکتشافی موجود، مورد جستجو قرار گیرند. این مناطق در واقع قسمتی یا سطحی کوچک‌تر از منطقه انتخاب شده اولیه می‌باشند. عملیات اکتشافی در این مناطق به منظور کشف کانی‌سازی‌های جدید، بر اساس مدل‌های اکتشافی ذخایر مورد جستجو و برداشت داده‌های مناسب از قبیل زمین‌شناسی، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و ... صورت می‌گیرد (Carranza, 2008). شناسایی مناطق هدف خود یک فعالیت اکتشافی چند مرحله‌ای است که از مقیاس ناحیه‌ای (کوچک مقیاس) شروع شده و تا مقیاس محلی (بزرگ مقیاس) ادامه می‌یابد. در هر یک از مراحل فوق (مقیاس‌های فوق) شناسایی مناطقی که باید به عنوان هدف مورد توجه قرار گیرند،

---

<sup>1</sup> Resource evaluation

<sup>2</sup> Reserve definition

شامل جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و تلفیق انواع داده‌های مرتبط و مناسب می‌باشد که به منظور استخراج و استنتاج قسمت‌هایی از داده‌های فضایی معرف و شاهد کانی‌سازی، یعنی آنومالی‌های زمین‌شناسی، آنومالی‌های ژئوشیمیایی و یا ژئوفیزیکی همراه با ذخایر مورد پی‌جویی، صورت می‌گیرد. به عنوان مثال دگرسانی گرمابی، گرچه ممکن است همراه با هیچ کانی‌سازی نباشد ولی یک آنومالی زمین‌شناسی محسوب می‌شود. یک آنومالی ژئوفیزیکی از نوع مغناطیسی اختلاف بین مقدار مغناطیس اندازه‌گیری شده و مغناطیس نرمال (زمینه) است و همچنین یک آنومالی ژئوشیمیایی در واقع انحراف عیار یک عنصر از میزان پراکندگی نرمال (زمینه) در یک ناحیه می‌باشد. از آنجایی که تمام آنومالی‌های به دست آمده حاصل از هر یک از روش‌های اکتشافی همراه و یا معرف کانی‌سازی نیستند بنابراین سعی می‌شود تا از تلفیق نتایج روش‌های مختلف برای تأیید مناطق هدف استفاده شود. بنابراین مناطق هدف، که باید برای پی‌جویی‌های بعدی مورد توجه قرار گیرند به وسیله انطباق یا تلفیق چنین آنومالی‌هایی تعیین می‌شوند. فرآیند تجزیه و تحلیل، ترکیب و تلفیق داده‌های فضایی که به منظور شناسایی مناطق هدف در اکتشاف کانی‌سازی‌های ناشناخته صورت می‌گیرد، مدل‌سازی پتانسیل معدنی نامیده می‌شود (Carranza, 2008). خروجی مدل پتانسیل معدنی، نقشه‌ای خواهد بود که در آن محل حضور احتمالی ذخایر شناخته نشده مورد پیش‌بینی قرار گرفته است.

استفاده از داده‌ها و اطلاعات مربوط به سیستم‌های طبیعی و پیچیده دنیای واقعی (کانی‌سازی) که به طور مستقیم قابل مشاهده نیستند و همچنین انجام تحلیل‌های مناسب روی آن‌ها، توصیف، ارائه یا پیش‌گویی رفتار این سیستم‌ها را به عنوان متغیر هدف، ممکن می‌سازد. فرآیند فوق شامل یک متغیر هدف و همچنین تعدادی از متغیرهای پیش‌گو می‌باشد. متغیر هدف معمولاً رفتار (حضور یا عدم حضور) قابل مشاهده (به صورت غیر مستقیم) یک سیستم پیچیده از دنیای واقعی مثل کانی‌سازی است. متغیرهای پیش‌گو و اکتشافی، خصوصیت‌هایی هستند که مستقیماً قابل مشاهده و اندازه‌گیری بوده و به خوبی سیستم طبیعی، با هم ارتباط آشکار یا پنهان<sup>1</sup> دارند. بنابراین مدل‌های پیش‌بینی بر اساس

---

<sup>1</sup> Inter-related

وابستگی‌های پنهان بین متغیرهای پیش‌گویی کننده که می‌توانند الگوهای وابسته به متغیرهای هدف را آشکار کنند و همچنین وابستگی بین اهداف و متغیرهای پیش‌گو، بنا شده‌اند. واژه "ذخایر معدنی مورد انتظار"<sup>۱</sup> به احتمال و قابلیت حضور ذخایر معدنی مورد پی‌جویی در یک قسمت از یک ناحیه وسیع از زمین اطلاق می‌شود. این واژه مشابه و مترادف با واژه‌های پتانسیل معدنی<sup>۲</sup> و مطلوبیت معدنی<sup>۳</sup> که اشاره به میزان شانس و احتمال وقوع یک ذخیره مورد پی‌جویی در یک قسمت از یک منطقه دارند، می‌باشد. این واژه‌ها عموماً به جای هم استفاده می‌شوند (Carranza, 2008). در مدل‌های پتانسیل معدنی و شناسایی مناطق هدف دو موضوع مهم زیر باید در نظر گرفته شود (Carranza, 2008):

الف) اگر در یک محل خاص، شواهد و خصوصیات مشابه یک نوع از اندیس‌های معدنی شناخته شده (از نوع ذخایر مورد پی‌جویی) وجود داشته باشد، این محل در آینده به منظور اکتشافات بیشتر مورد توجه خواهد بود.

ب) اگر در یک محل الگوهای پیش‌گو و شواهد مهم‌تر، بیش‌تر از محل‌های دیگر حضور دارد بنابراین احتمال حضور کانی‌سازی در آن محل بیش از دیگر نقاط است.

مدل‌های پتانسیل معدنی در هر مقیاسی، از ناحیه‌ای تا محلی، برای شناسایی مناطق هدف تهیه می‌شوند (Hronsky and Groves, 2008). این مدل‌ها با تحلیل، ترکیب و تلفیق شواهد به دست آمده از منابع مختلفی از داده‌های فضایی، به تعیین و رتبه‌بندی نواحی امیدبخش، به منظور اکتشاف ذخایر کشف نشده، می‌پردازند. هدف از مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مقیاس ناحیه‌ای، شناسایی و تولید امیدبخش‌ترین مناطق هدف، در ناحیه‌ای وسیع، می‌باشد تا بر روی این بخش انتخاب شده (به عنوان هدف)، در مقیاس محلی دوباره مدل‌سازی پتانسیل معدنی با هدف شناسایی و معرفی امیدبخش‌ترین مکان‌ها (با مساحت کوچک‌تر از مرحله قبل) صورت گیرد. بنابراین با پیشرفت عملیات اکتشافی از

---

<sup>1</sup> Mineral prospectivity

<sup>2</sup> Mineral potential

<sup>3</sup> Mineral favorability



مقیاس ناحیه‌ای به مقیاس محلی، مجموعه داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی افزایش یافته و ضمن تفصیلی‌تر شدن، دقت نیز بالا می‌رود و تفکیک فضایی مکان‌ها و ساختارها نیز بهتر صورت می‌گیرد.

### ۱-۳- بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق

از آن‌جا که مراحل اولیه اکتشاف عموماً در مناطق با وسعت زیاد انجام می‌شود، اجرای عملیات اکتشافی با چگالی زیاد در محدوده‌های وسیع همواره مستلزم صرف هزینه و زمان زیاد است. بنابراین روشی مناسب باید اتخاذ گردد تا بتوان هزینه و زمان را کاهش و دقت اکتشاف را افزایش داد. در حالت کلی ابتدا اکتشاف در یک منطقه وسیع و با استفاده از روش‌های سریع و کم هزینه به ازای واحد سطح و در مقیاس کوچک شروع شده و پس از کسب نتیجه در هر مرحله و تعیین مناطق امیدبخش، عملیات مراحل بعدی که تفصیلی‌تر می‌باشند، بر روی مناطق امیدبخش به دست آمده از مراحل قبل متمرکز می‌گردد. مسئله‌ای که وجود دارد، نحوه انتخاب بهترین مناطق امیدبخش می‌باشد و باید روشی در نظر گرفته شود که بتوان با استفاده از آن و با یک روال منطقی و معقول، منطقه مورد مطالعه را کوچک نمود و نواحی امیدبخش را معرفی کرد. در مراحل اولیه اکتشاف و معرفی مناطق امیدبخش، ممکن است از یکی از روش‌های مختلف اکتشافی نظیر مطالعات زمین‌شناسی، سنجش از دور، ژئوشیمی، ژئوفیزیک و غیره و یا تلفیق نتایج چند روش استفاده شود. با توجه به این‌که عملیات اکتشافی در محیطی که در آن عدم قطعیت حاکم است صورت می‌پذیرد، از مهمترین تصمیم‌ها، نحوه انتخاب مناطق هدف می‌باشد. همان‌طور که قبلاً تشریح شد، یکی از مراحل اولیه اکتشاف، مدل‌سازی پتانسیل معدنی به منظور معرفی بهترین مناطق مناسب به عنوان اهداف، جهت اکتشافات بعدی می‌باشد. عموماً برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی، پس از اجرای روش‌های مختلف اکتشافی، از روش داده‌محور<sup>۱</sup> با تکیه بر اندیس‌های معدنی شناخته شده موجود در منطقه اکتشافی، دانش‌محور<sup>۲</sup> بر

---

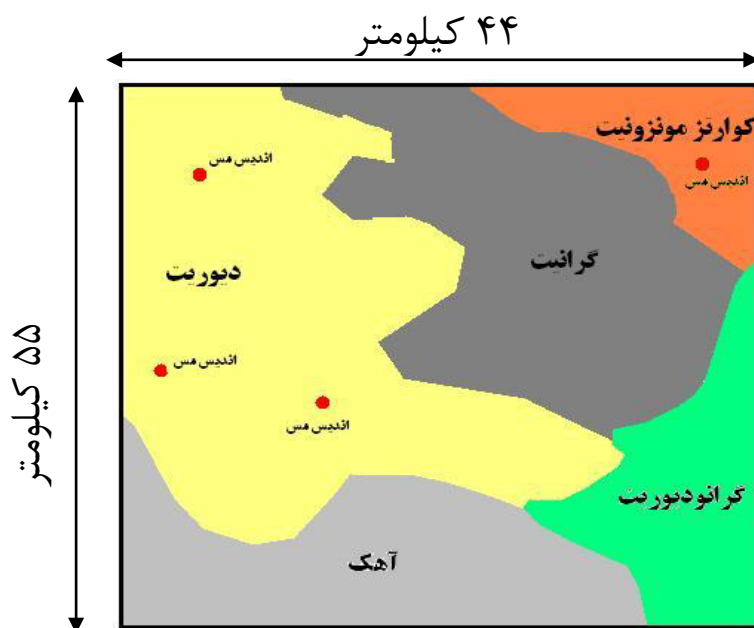
<sup>۱</sup> Data-driven

<sup>۲</sup> Knowledge-driven

اساس تجربه کارشناسی و همچنین ترکیب<sup>۱</sup> دو روش داده‌محور و دانش‌محور، برای تخصیص وزن به شواهد و الگوهای مختلف و تلفیق داده‌ها استفاده می‌شود. مهمترین مسئله این است که در روش داده‌محور، اگر تعداد اندیس‌های شناخته شده کم باشد، خروجی مدل دارای عدم قطعیت بالا بوده و نتایج اکتشاف از اعتبار کمی برخوردار خواهد بود. همچنین اگر در یک منطقه اکتشافی، یک واحد سنگ‌شناسی مهم به لحاظ زمین‌شناسی وجود داشته باشد ولی در این واحد (در منطقه مورد مطالعه)، اندیسی شناخته نشده باشد، عملاً از مناطق امیدبخش حذف شده یا از وزن بسیار کمی برخوردار می‌گردد. در مورد روش‌های دانش‌محور نیز تخصیص وزن به شواهد مختلف بر اساس قضاوت‌های کارشناسی بوده و هیچ معیار کمی کاملاً دقیق و قطعی برای آن وجود ندارد و چه بسا که در روش دانش‌محور، تخصیص وزن به الگوها تحت تأثیر خصوصیات اندیس‌های شناخته شده منطقه قرار گرفته و این خصوصیات نیز در قضاوت مؤثر بوده که باز همان مشکلات تشریح شده در فوق حاصل می‌شود. بنابراین خروجی این مدل‌ها نیز از اعتبار کمی برخوردار می‌باشد. در روش‌های ترکیبی نیز عموماً از نتایج مطالعه داده‌محور برای تخصیص وزن در روش دانش‌محور و یا بر عکس استفاده می‌شود که باز هم ایراد روش‌های داده‌محور و دانش‌محور بر آن وارد است. برای تشریح دقیق‌تر این مسئله به ذکر یک مثال فرضی پرداخته می‌شود. شکل ۱-۱ نقشه زمین‌شناسی یک منطقه فرضی را که در آن ۴ اندیس شناخته شده مس پرفیری وجود دارد، نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این نقشه می‌تواند به عنوان مثال یک نقشه آنومالی‌های ژئوشیمیایی دارای کلاس‌های مختلف و یا هر لایه دیگر اکتشافی دارای قسمت‌های (کلاس‌های) مختلف فرض شود.

---

<sup>۱</sup> Hybrid



شکل ۱-۱. نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰۰ منطقه فرضی با ۴ اندیس شناخته شده مس پرفیری

در مورد منطقه فرضی شکل ۱-۱ اگر از روش داده‌محور برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی مس پرفیری استفاده شود، طبیعتاً به واحد دیوریتی وزن بیشتری داده خواهد شد. در این حالت سوال این است که آیا ارزش اکتشافی واحد کوارتز مونزونیتی و یا گرانودیوریتی برای ذخایر مس پرفیری واقعاً کم‌تر از دیوریت است؟ آیا درست است که فقط به دلیل این‌که تا کنون در ناحیه فوق در واحد کوارتز مونزونیتی فقط یک اندیس مس پرفیری شناخته شده، به این واحد وزن کم‌تری تعلق گیرد؟ شاید دلیل نبود اندیس شناخته شده فقط عدم فعالیت اکتشافی مناسب (به هر دلیلی) باشد. البته با توجه به این‌که در منطقه مشخص شده در شکل ۱-۱ تعداد اندیس‌های شناخته شده کم است، شاید بهتر باشد از روش دانش‌محور استفاده شود ولی هدف از تشریح حالت فوق، فقط بیان مسئله است یعنی می‌توان مثلاً فرض نمود که در منطقه فوق کلاً ۲۰ اندیس شناخته شده وجود دارد که ۱۰ اندیس در واحد دیوریتی، ۵ اندیس در واحد گرانودیوریتی و ۵ اندیس در واحد کوارتز مونزونیتی حضور دارند (نوع واحدهای سنگی و تعداد اندیس‌ها تنها به جهت تشریح مسئله بوده و مربوط به هیچ منطقه‌ای نیست) که باز هم ایرادهای مطرح شده در بالا وجود دارند.

حال اگر از روش دانش‌محور استفاده شود، معیار تخصیص وزن به واحدهای سنگ‌شناسی منطقه فوق چه خواهد بود؟ عموماً دیده شده که هر کارشناسی در تخصیص وزن در چنین شرایطی (شکل ۱-۱) به واحد دیوریتی وزن بیشتری خواهد داد زیرا این واحد دارای ۳ اندیس شناخته شده مس پرفیری است، اگر چه ممکن است واحدهای دارای اهمیت دوم، واحدهای کوارتز مونزونیتی و گرانودیوریتی انتخاب گردند ولی یقیناً اهمیت آن‌ها کم‌تر از واحد دیوریتی در نظر گرفته خواهد شد زیرا در واحد دیوریتی ۳ اندیس شناخته شده وجود دارد که نظر کارشناس و کسی که وزن‌ها را تخصیص می‌دهد، به خود جلب خواهد نمود. در ضمن سوال مهم‌تر این است که در حالت دانش‌محور، اگر فرض شود که هیچ اندیس شناخته شده‌ای از مس پرفیری در منطقه وجود ندارد، معیار واقعی وزن‌دهی چه خواهد بود؟ یقیناً جواب سوال این است که هیچ معیار کمی دقیقی برای تخصیص وزن وجود ندارد و فقط این کارشناس است که وزن‌ها را انتخاب خواهد نمود. در مورد روش‌های ترکیبی نیز در برخی موارد به گونه‌ای از وزن‌های تخصیص یافته در روش داده‌محور برای اختصاص وزن در روش دانش‌محور استفاده می‌کنند که در این حالت نیز تخصیص وزن تحت تأثیر اندیس‌های شناخته شده و قضاوت کارشناس قرار گرفته و ایرادهای قبلی هم‌چنان باقی است. مشکلات فوق وقتی بیش‌تر نمود پیدا می‌کند که باید یک نقشه شاهد وزن‌دار ژئوشیمیایی در اکتشافات اولیه تولید شود. زیرا تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی تقریباً در اکثر روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی مستقل از نوع روش است. در این حالت سوالات مطرح در خصوص نحوه تولید بهینه یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی (تلفیق با دیگر لایه‌های اکتشافی)، شامل موارد زیر است:

۱- از کدام عنصر یا عناصر ردیاب و معرف یک تیپ کانی‌سازی مورد جستجو باید در تولید نقشه

شاهد ژئوشیمیایی استفاده نمود؟

۲- اگرچه در جواب سوال فوق باید گفت که عموماً از تحلیل‌های چند متغیره مانند تحلیل فاکتوری استفاده می‌شود. ولی در این حالت نیز سوال این است که بهترین ترکیب عناصر ردیاب و معرف یک کانی‌سازی مورد جستجو کدام است؟

۳- اگر عناصر ردیاب و معرف به صورت گروه‌های مختلف همراهی نشان دهند، کدام گروه یا گروه‌ها از عناصر ردیاب و معرف باید انتخاب شوند؟

۴- چگونه می‌توان از حداکثر تعداد ترکیبات معرف استفاده نمود؟

۵- سوال مهم‌تر در خصوص تولید یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار این است که نحوه تخصیص وزن به آنومالی‌های ژئوشیمیایی، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده و همچنین بدون قضاوت کارشناسی چگونه است؟

۶- نحوه به نقشه درآوردن بهینه آنومالی‌های ژئوشیمیایی چگونه باید باشد تا در هنگام تلفیق با سایر لایه‌های اکتشافی، یک مدل پتانسیل معدنی بهبود یافته با قابلیت پیش‌بینی بالاتر از ذخایر کشف نشده (نرخ پیش‌بینی<sup>۱</sup> بالاتر) تولید گردد؟

همان‌طور که از سوالات مطرح شده در خصوص نقشه زمین‌شناسی و لایه ژئوشیمیایی در فوق برمی‌خیزد تخصیص وزن قابل اعتماد به قسمت‌های مختلف لایه‌های شاهد اکتشافی در حالت عدم استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده و همچنین بدون قضاوت کارشناسی، مسئله اساسی است تا ضمن این‌که در مناطق کم‌اکتشاف شده (با تعداد اندیس‌های شناخته شده کم یا فاقد اندیس‌شناخته شده) قابل استفاده بوده، بتواند مسئله جهت‌دار بودن تخصیص وزن در مناطق دارای اندیس شناخته شده را نیز مرتفع نموده و موجب بهبود خروجی مدل‌های پتانسیل معدنی گردد.

شکل‌گیری یا تشکیل هر تیپ ذخیره معدنی به فرآیندها و ساختارهای زمین‌شناسی مشخصی وابسته است (Evans, 1987, 1993; Pirajno, 1992). در این حالت حضور یا عدم حضور یک متغیر وابسته یعنی کانی‌سازی، به وسیله مطالعه تفصیلی و کمی تعدادی متغیر مستقل مانند پراکندگی

---

<sup>1</sup> Prediction rate

عناصر ژئوشیمیایی، گسل‌ها، توده‌های نفوذی و ... کنترل می‌شود. بنابراین بهبود روش‌های تفسیر داده‌های مربوط به هر یک از این متغیرهای مستقل (روش‌های اکتشافی مختلف)، به بهبود نقشه شاهد تولید شده و در نتیجه بهبود مدل پتانسیل معدنی نهایی خواهد انجامید. بنابراین بررسی و تعیین فرآیندهای مختلف مربوط به کانی‌سازی، مشکل اساسی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی است. یکی از روش‌های حل مشکل فوق، کمی نمودن همراهی فضایی بین متغیرهای پیش‌گو با کانی‌سازی یا در واقع همان تخصیص وزن بهینه می‌باشد و کلیه روش‌های مدل‌سازی نیز به همین منظور توسعه یافته‌اند. بنابراین توسعه روش‌های بهبود مدل‌های پتانسیل معدنی و تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار یکی از موارد مهم بوده و همان‌طور که بیان گردید، روش‌های کمی‌سازی روابط بین متغیرهای پیش‌گو و کانی‌سازی (برای لایه‌ها و روش‌های مختلف اکتشافی مانند زمین‌شناسی و لایه ژئوشیمیایی که در فوق بیان گردید و همچنین لایه‌های ژئوفیزیک، گسل‌ها، دگرسانی و غیره)، در حالت عدم استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده و همچنین با حداقل قضاوت کارشناسی، مسئله اساسی است تا بتوان مسئله جهت‌دار بودن تخصیص وزن در مناطق دارای اندیس‌های شناخته شده و همچنین نحوه تخصیص وزن به خصوص در روش‌های دانش‌محور یعنی در جاهایی که اندیس شناخته شده عمدتاً وجود ندارد را مرتفع نمود.

علاوه بر مسائل بیان شده در فوق مشکل دیگری که وجود دارد این است که در مواردی که فاصله از عوارض خاصی مانند گسل اهمیت دارد در اکثر روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی، ابتدا این فواصل به دامنه‌های مختلف تقسیم شده و سپس به کل هر دامنه (بازه) یک وزن واحد تخصیص می‌یابد. یعنی به عنوان مثال اطراف گسل‌ها ابتدا حریم‌بندی<sup>1</sup> شده (به عنوان مثال فواصل ۰ تا ۲۰۰ متر، ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر، ۴۰۰ تا ۶۰۰ متر و ...) و در مرحله بعد به کل قسمت‌های هر بازه از فاصله یک وزن برابر تخصیص می‌یابد یعنی فاصله ۰ همان وزن فاصله ۲۰۰ متر را دارد که غیر واقعی است. علاوه بر این در صورت استفاده از روش حریم‌بندی، سوالی که مطرح می‌شود این است که انتخاب فاصله

---

<sup>1</sup> Buffering

بهبود (دامنه مناسب) برای حریم‌بندی چگونه است؟ بنابراین روشی بهبود یافته خواهد بود که به فواصل پیوسته وزن تخصیص یابد، نه مانند فوق به فواصل گسسته.

#### ۴-۱- اهداف اصلی تحقیق

با توجه به مسائل مطرح شده در قسمت‌های قبل، هدف از رساله حاضر بهبود خروجی مدل‌های پتانسیل معدنی از طریق حذف جهت‌دار بودن تخصیص وزن به قسمت‌های مختلف نقشه‌های شاهد در مناطق دارای اندیس شناخته شده و همچنین به حداقل رساندن اعمال سلیقه و قضاوت کارشناسی در تخصیص وزن در موارد کم بودن یا نبودن اندیس‌های شناخته شده در یک منطقه که ممکن است موجب تولید مدل‌های مختلفی گردد، می‌باشد. با بهبود تخصیص وزن به الگوها و شواهد مختلف، موفقیت اکتشاف نیز افزایش می‌یابد. بنابراین به طور کلی اهداف را می‌توان به دو قسمت زیر تقسیم نمود.

- بهبود مدل‌های پتانسیل معدنی از طریق تخصیص وزن به شواهد اکتشافی در حالت بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و بدون (یا با حداقل) قضاوت کارشناسی به منظور حذف اثر وزن‌دهی جهت‌دار<sup>۱</sup>

- معرفی یک شاخص کمی به عنوان ارزش اکتشافی هر الگو (قسمت، دامنه، واحد) از هر نقشه شاهد (هر معیار اکتشافی)، برای کانی‌سازی از نوع مورد جستجو.

البته لازم به ذکر است جهت دسترسی به اهداف فوق باید در هر مرحله اهداف جزئی‌تری طراحی شوند. در این خصوص در هر فصل از رساله حاضر به آن‌ها پرداخته شده و بهبود مورد نظر در چند مرحله حاصل شده است.

---

<sup>۱</sup> Bias

## ۱-۵- نوآوری تحقیق

ارائه روش تخصیص وزن داده‌محور در مناطق فاقد حتی یک اندیس شناخته شده و بدون (یا با حداقل) نظر کارشناسی، از نوآوری‌های این تحقیق بوده و در واقع برای اولین بار، تخصیص وزن به الگوهای شاهد در مناطق فاقد اندیس شناخته شده، بدون نظر کارشناسی صورت گرفته که همچنین موجب اصلاح و بهبود تخصیص وزن به شواهد مختلف و افزایش موفقیت اکتشاف مدل‌های پتانسیل معدنی شده است.

## ۱-۶- فرض‌های تحقیق

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، مدل‌سازی پتانسیل معدنی یک فرآیند چند مرحله‌ای شامل استنتاج الگوهای نشانه (معرف) حضور کانی‌سازی مورد جستجو، تخصیص وزن به این الگوها و تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار، تلفیق نقشه‌های شاهد و در نهایت رتبه‌بندی نواحی اهداف اکتشاف برای پی‌جویی‌های بیشتر در مراحل بعدی اکتشاف است. الگوهای شاهد یک تیپ کانی‌سازی مورد جستجوی مشخص، ممکن است از تحلیل اطلاعات اکتشافی به دست آمده از روش‌های مختلف اکتشافی نظیر ژئوشیمی، ژئوفیزیک، زمین‌شناسی و ... استنتاج شود. بنابراین لایه‌ها یا نقشه‌های شاهد تولید شده نیز به لایه‌های شاهد ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی و ... طبقه‌بندی می‌شوند که با توجه به نوع کانی‌سازی مورد جستجو و خصوصیات آن ممکن است از تعدادی از این لایه‌ها برای تلفیق در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده شود. از آن‌جا که مدل‌های پتانسیل معدنی حاصل تلفیق دو یا چند لایه به دست آمده از روش‌های مختلف اکتشافی است بنابراین اگر هر یک از این لایه‌های ورودی بهبود یابند، در نهایت می‌توانند موجب تولید مدل پتانسیل معدنی بهبود یافته در خروجی نهایی شوند. در این راستا با توجه به مسائل و سوالات بیان شده، می‌توان فرض‌هایی را به صورت زیر بیان نمود:



- می‌توان با استفاده از مدل‌سازی کانسارهای شناخته شده با یک تیپ مشخص و تعیین اختصاصات آن‌ها نقاط و کانسارهای مشابه را شناسایی نمود.
- می‌توان از پارامترها و اختصاصات کانسارهای مهم شناخته شده و تیپیک خارج از محدوده مورد مطالعه (در مناطقی که حتی یک اندیس شناخته شده نیز وجود ندارند) در اکتشاف ذخایر با تیپ مشابه استفاده نمود.
- با توجه به استفاده از اندیس‌های شناخته شده با تیپ مشخص در خارج از یک محدوده برای تولید مدل مفهومی و یا همچنین استفاده از اندیس‌های شناخته شده در داخل محدوده برای اعتبار سنجی نتایج، اکتشاف از نوع موضوعی مد نظر می‌باشد.
- تلفیق لایه(های) اکتشافی بهبود یافته با سایر لایه‌های اکتشافی، در نهایت مدل پتانسیل معدنی بهبود یافته تولید خواهد نمود.
- روش‌هایی وجود دارد که بتوان با استفاده از آن‌ها ارزش اکتشافی یک الگوی شاهد برای یک ماده معدنی از نوع مشخص را با توجه به اختصاصات توصیفی آن به وزن کمی تبدیل نمود.
- با توجه به این‌که نقشه شاهد ژئوشیمیایی یکی از لایه‌های اکتشافی مهم می‌باشد، اگر یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی بهبود یافته در تلفیق با سایر نقشه‌های شاهد (برای مثال نقشه‌های شاهد زمین‌شناسی، گسل‌ها و ...) برای تولید مدل پتانسیل معدنی استفاده شود، نواحی امیدبخش معرفی شده در مدل نهایی برای اکتشافات بعدی بیش‌تر قابل اعتماد بوده و بنابراین موفقیت اکتشاف افزایش خواهد یافت.
- داده‌های مورد استفاده قابل اعتماد هستند.

## ۷-۱- سوالات تحقیق

- احتمال حضور ذخایر معدنی بستگی به حضور شواهدی دارد که به صورت خصوصیات مربوط به هر نوع کانی‌سازی مطرح می‌شوند زیرا حضور یک نوع ذخیره معدنی مورد جستجو تحت

تأثیر حضور، وقوع و فراهم بودن شرایط، ساختارها و شواهد معین و مشخصی از جمله آنومالی‌های ژئوشیمیایی، ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی و ... است. منظور از نقشه شاهد، نقشه‌ای است که بر اساس شواهد حاصل از یک نوع روش اکتشافی خاص مثل نقشه‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی، ژئوشیمیایی و ... برای یک نوع ذخیره مشخص، به دست آمده باشد. در این رساله حاضر بر روی بهبود تخصیص وزن به لایه‌های اکتشافی حاصل از روش‌های مختلف اکتشافی متمرکز بوده و نگرش ویژه‌ای به لایه ژئوشیمیایی به عنوان یکی از مهمترین لایه‌های اکتشافی در مراحل اولیه دارد و در آن به سه سوال عمده و مهم زیر در خصوص لایه مهم اکتشافی ژئوشیمیایی و همچنین لایه‌های گسل و زمین‌شناسی (در این رساله توده‌های نفوذی) پاسخ داده خواهد شد:

۱- چگونه می‌توان یک نقشه (لایه) شاهد وزن‌دار برای یک تیپ کانی‌سازی مورد جستجو در یک منطقه، در حالت عدم استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده و همچنین بدون (یا با حداقل) قضاوت کارشناسی تولید نمود؟

۲- روش‌های بهبود مدل‌های پتانسیل معدنی و افزایش موفقیت اکتشاف یعنی افزایش نرخ و قابلیت پیش‌بینی این مدل‌ها چیست؟

۳- آیا می‌توان از روش‌های فازی بهبود یافته در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده و بدون استفاده از نظر کارشناسی در تخصیص وزن بهره‌گرفت؟

لازم به ذکر است که سوالات فوق به عنوان سوالات عمده و مهم ذکر شده و در هر مورد در فصل‌های مختلف ممکن است برخی دیگر از سوالات که زیر مجموعه سوالات فوق است، مطرح و پاسخ داده شوند زیرا بهبود مدل‌های پتانسیل معدنی که هدف اصلی رساله است به عوامل مختلف و همچنین بهبود تک‌تک لایه‌های اکتشافی مورد استفاده بستگی دارد.

## ۱-۸- روش اجرای تحقیق

در اجرای رساله حاضر از نرم‌افزارهای مختلف و همچنین قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و همچنین از داده‌های مطالعات زمین‌شناسی، گسل‌ها و ژئوشیمی اکتشافی استفاده شده است. توجه شود که موضوع اصلی تحقیق، هیچ یک از روش‌های اکتشافی نظیر زمین‌شناسی، ژئوفیزیک اکتشافی، ژئوشیمی اکتشافی و سنجش از دور نیست ولی با توجه به این‌که در مدل‌سازی پتانسیل معدنی از تلفیق لایه‌ها و شاهد‌های مختلف اکتشافی حاصل از روش‌های مختلف اکتشافی استفاده می‌شود، ناگزیر باید هر یک از لایه‌ها بهبود یابند تا خروجی بهبود یافته تولید گردد. در رساله حاضر توجه خاص به بهبود نقشه شاهد ژئوشیمیایی به عنوان یکی از لایه‌های مهم مورد استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی برای اکتشاف ذخایر معدنی و معرفی مناطق مستعد اکتشافی و همچنین گسل‌ها و توده‌های نفوذی شده است. در این خصوص توجه ویژه به بهبود روش تخصیص وزن به کلاس‌های مختلف نقشه‌های شاهد، بدون قضاوت کارشناسی و بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و در نهایت افزایش نرخ پیش‌بینی خروجی مدل‌های پتانسیل معدنی و همچنین افزایش موفقیت اکتشاف است. بنابراین می‌توان روش اجرا را به سه قسمت عمده شامل بهبود و تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار، بهبود و تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسل و زمین‌شناسی، تلفیق لایه‌های وزن‌دار مختلف و تولید مدل پتانسیل معدنی بهبود یافته تقسیم نمود. در این خصوص مورد اول خود شامل چند مرحله بوده و در سه فصل جداگانه تشریح شده است. همچنین موارد دوم و سوم در فصل جداگانه‌ای تنظیم و نحوه اجرای آن‌ها در زیر بیان می‌شود.

### ۱-۸-۱- بهبود و تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار

الف- شناسایی بهترین ترکیب چند عنصری معرف

ابتدا برای شناسایی بهترین ترکیب چند عنصری معرف کانی‌سازی مورد جستجو، یک روش جدید با عنوان تحلیل فاکتوری مرحله‌ای<sup>۱</sup> (SFA)، توسعه داده شده است. این روش یک روش بهبود یافته برای شناسایی بهترین ترکیب از عناصر معرف و ردیاب یک تیپ کانی‌سازی مشخص بوده و نتیجه آن شناسایی همراهی عناصر و حصول امتیاز چند عنصری قابل اعتمادتر است.

ب- توسعه روش تخصیص وزن

پس از شناسایی بهترین ترکیب یا ترکیب‌های چند عنصری معرف کانی‌سازی مورد جستجو با استفاده از روش SFA، در مرحله بعد روش تخصیص وزن به هر نمونه رسوب آبراهه‌ای بدون قضاوت کارشناسی و همچنین بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده، توسعه و معرفی می‌شود. این روش با عنوان شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی<sup>۲</sup> (GMPI) نام‌گذاری شده است. کاربرد روش GMPI خود نیز باعث بهبود بیش‌تر لایه ژئوشیمیایی گردید.

ج- توسعه روش بهبود یافته به نقشه درآوردن متغیرهای ژئوشیمیایی

پس از توسعه روش بهبود یافته تخصیص وزن به نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای، روش GMPI، با توجه به این‌که هر متغیر ژئوشیمیایی باید به نقشه تبدیل شود تا بتوان آن را در تلفیق با سایر لایه‌های شاهد اکتشافی به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده نمود و همچنین با توجه به معایب روش‌های موجود در به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی، روش دیگری با عنوان حوضه‌های آبریز وزن‌دار<sup>۳</sup> (WDCB)، با هدف استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی توسعه داده شده است.

### ۱-۸-۲- بهبود و تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار گسل و زمین‌شناسی

از آن‌جا که در مدل‌سازی پتانسیل معدنی هر لایه شاهد وزن‌دار می‌تواند با سایر لایه‌های وزن‌دار حاصل از سایر روش‌های اکتشافی، تلفیق شود، روش تخصیص وزن بدون دخالت قضاوت کارشناسی و

<sup>۱</sup> Staged factor analysis (SFA)

<sup>۲</sup> Geochemical mineralization probability index (GMPI)

<sup>۳</sup> Weighted drainage catchment basin (WDCB)

همچنین بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده برای لایه‌های چگالی گسل‌ها و توده‌های نفوذی دارای اهمیت در کانی‌سازی توسعه داده شده است.

### ۱-۸-۳- تلفیق لایه‌های وزن دار مختلف و تولید مدل پتانسیل معدنی بهبود یافته

به منظور ارزیابی نتیجه تلفیق شاخص معرفی شده در اکتشافات ژئوشیمیایی و نقشه شاهد حاصل از آن با سایر لایه‌های اکتشافی، در این قسمت، لایه‌های مختلف با استفاده از عملگرهای فازی تلفیق شده تا مدل پتانسیل معدنی تولید شود. با توجه به این که وزن تخصیص یافته در کلیه نقشه‌های شاهد در بازه بین ۰ و ۱ می‌باشد و در نهایت نقشه‌ها با استفاده از عملگرهای فازی تلفیق شده‌اند، روش جدید معرفی شده را می‌توان یک روش مدل‌سازی پتانسیل معدنی فازی نامید که در آن بدون قضاوت کارشناسی و همچنین بدون استفاده از اندیس‌های داخل محدوده مورد مطالعه می‌توان مدل‌سازی پتانسیل معدنی را انجام داد.

### ۱-۹- اعتبار سنجی نتایج

به منظور اعتبار سنجی روش‌های معرفی شده در رساله حاضر، از داده‌های دو نوع ماده معدنی شامل مس پرفیری در استان کرمان به عنوان یک ماده معدنی فلزی و همچنین فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی<sup>۱</sup> در استان مازندران به عنوان یک ماده معدنی غیر فلزی استفاده شده و این روش‌ها در این دو منطقه اجرا شده‌اند. همچنین به منظور سنجش روش‌های ارائه شده برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی، از نمودارهای نرخ پیش‌بینی برای مقایسه روش‌های قبلی و جدید معرفی شده استفاده شده است. در منطقه کرمان که دارای اندیس‌های شناخته شده می‌باشد، بدون دخالت اندیس‌های شناخته شده، روش‌های معرفی شده اجرا شده است. در واقع فرض شده که هیچ اندیس شناخته شده‌ای وجود ندارد. سپس از محل اندیس‌های شناخته شده به عنوان نقاط تست، برای ارزیابی روش استفاده

<sup>1</sup> Mississippi valley type

گردیده است. در منطقه مازندران نیز که در آن تنها یک معدن شناخته شده وجود دارد و در واقع یک منطقه کار نشده یا کم کار شده محسوب می‌شود از محل حضور سنگ میزبان کانی‌سازی برای اعتبار سنجی استفاده شده است.

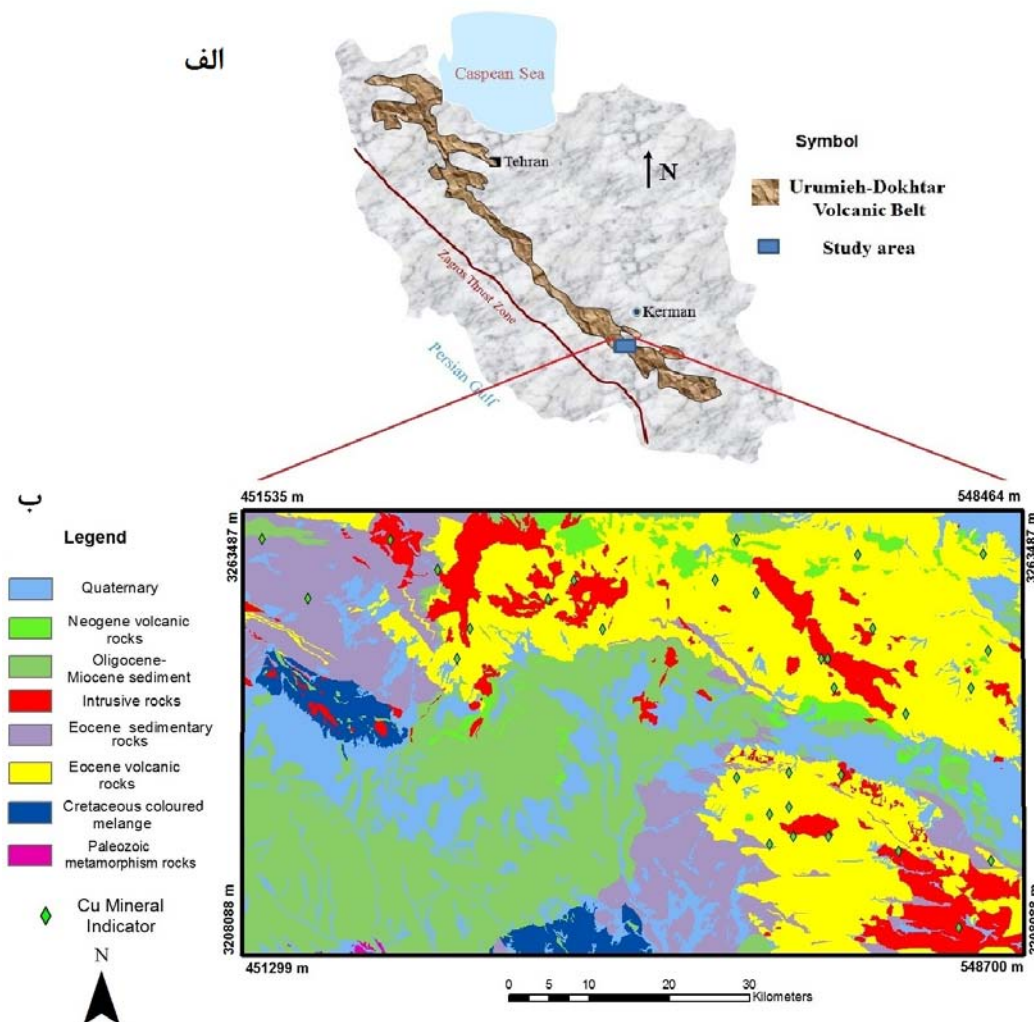
### ۱-۹-۱- کانی‌سازی مس پرفیری در استان کرمان

در این منطقه از نتایج تجزیه ۱۸۰۴ نمونه رسوب آبراهه‌ای برای عناصر Pb, As, Sb, Ni, Cr, Co, Zn, Mo, Au و Cu استفاده شده است. این برداشت‌ها توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام شده و توسط شرکت ملی صنایع مس ایران در اختیار قرار گرفته است. مطالعه حاضر بر روی مس پرفیری متمرکز است. این نوع ذخیره در موارد زیادی در دنیا مورد مطالعه قرار گرفته است (Guangsheng et al., 2007; Singer et al., 2005; Cooke et al., 2005; Sillitoe, 1993; Boomeri et al., 2009). در مطالعات بسیاری سعی بر این بوده که اختصاصات این تیپ ذخایر مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. بر طبق این مطالعات، مهمترین عناصر معرف و ردیاب این ذخایر شامل Cu-Au-Mo-Zn-Pb-As-Sb-Ag-Fe-S است (Liu and Peng, 2003; Halter et al., 2004; Sotnikov et al., 2007; Singer et al., 2005; Landtwing et al., 2005; Cooke et al., 2005; Weixuan et al., 2007; Xiaoming et al., 2007; Yang et al., 2009). ذخایر مس پرفیری از سیالات هیدروترمال ماگمایی مرتبط با سنگ‌های نفوذی گرانیتوئیدی شکل می‌گیرند که عموماً دارای هاله‌های ژئوشیمیایی عناصر Cu, Mo, Pb, Zn و S هستند (Singer et al., 2005; Arribas, 1995). فرآیندهای هیدروترمال همراه این ذخایر در موارد متعدد مورد مطالعه تفصیلی قرار گرفته است (Cline and Bodnar, 1991; Sillitoe, 1993; Herzarkhani et al., 1999) و اعتقاد بر این است که این ذخایر در کمرندهای قوسی و قاره‌ای شکل می‌گیرند (Sillitoe, 1972; Mitchell, 1973; Billa et al., 2004; Cooke et al., 2005) و منبع اصلی و اولیه مس هستند (Halter et al., 2004). این ذخایر بر اساس ترکیب و همراهی عناصر به انواع مس پرفیری، مس-طلائی پرفیری و

مس- مولیبدن پرفیری تقسیم می‌شوند (Guangsheng et al., 2007). این سه نوع از ذخایر مس پرفیری در مجموعه‌های زمین‌شناسی مشابه تشکیل شده و در مقیاس محلی و نوارهای فلزایی یافت می‌شوند.

منطقه مورد مطالعه با مساحت حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع، دو ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ ساردویه و بافت در زون ارومیه-دختر را تحت پوشش قرار می‌دهد (شکل ۱-۲). این زون با توجه به اختصاصات زمین‌شناسی و اکتشافات صورت گرفته از پتانسیل بسیار بالایی برای ذخایر مس پرفیری برخوردار است (Ranjbar et al., 2004; Hezarkhani, 2006a;b; Atapour and Aftabi, 2007; Boomeri et al., 2009). کمر بند آتشفشانی ارومیه- دختر حاصل فرورانش صفحه عربستان در زیر ایران مرکزی در فاز کوهزایی آلپین است (Niazi and Asoudeh, 1978). واحدهای سنگ‌شناسی منطقه را می‌توان به هشت گروه نشان داده شده در شکل ۱-۲ طبقه‌بندی نمود. سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک شامل فیلیت، سربیسیت شیست و مرمر و همچنین ملانژهای کرتاسه شامل دیاباز، توف اسپلیتی، چرت، سرپانتین، هارزبورژیت، ماسه‌سنگ، گابرو و کراتوفیر از قدیمی‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی منطقه هستند. سنگ‌های ولکانیکی ائوسن شامل پیروکلاستیک، تراکی‌اندزیت، تراکی‌بازالت، آندزیت-بازالت، آندزیت-لاوا، رسوبات توفی، ریولیت، توف ریولیتی، توف آگلومرا، آگلومرا، ایگنمبریت، سنگ‌های بازالتی و آندزیت هستند. سنگ‌های رسوبی با سن ائوسن در کمپلکس‌های رسوبی-آتشفشانی شامل ماسه‌سنگ، سیلتستون، کنگلومرا و آهک می‌باشد. سنگ‌های نفوذی شامل گرانودیوریت، کوارتز دیوریت، دیوریت، دیوریت پرفیری، گرانیت پرفیری و گرانیت با سن کرتاسه، ائوسن، الیگومیوسن و نئوژن هستند. رسوبات الیگومیوسن شامل عمدتاً کنگلومرا، سیلتستون و ماسه‌سنگ هستند. سنگ‌های آتشفشانی نئوژن عموماً شامل پیروکلاستیک، آگلومرای آندزیتی، داسیت، ریوداسیت و آندزیت هستند. رسوبات کواترنر، آبرفت‌ها، رس‌ها و گراول‌ها از جوان‌ترین واحدها در منطقه هستند (Sridic et al., 1972; Zolanj et al., 1972; Dimitrijevic, 1973; Dimitrijevic and Djokovic, 1973). در منطقه تعداد ۳۲ اندیس مس وجود دارد که از آن‌ها برای

اعتبارسنجی و نمونه‌های تست برای ارزیابی روش‌های ارائه شده استفاده شده است. بنابراین در این منطقه از دو لایه ژئوشیمیایی و زمین‌شناسی استفاده شده است.



شکل ۱-۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران (الف) و نقشه زمین‌شناسی ساردویه- بافت در استان کرمان (ب) (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ۱۳۵۱ الف و ب با اندکی تغییر)

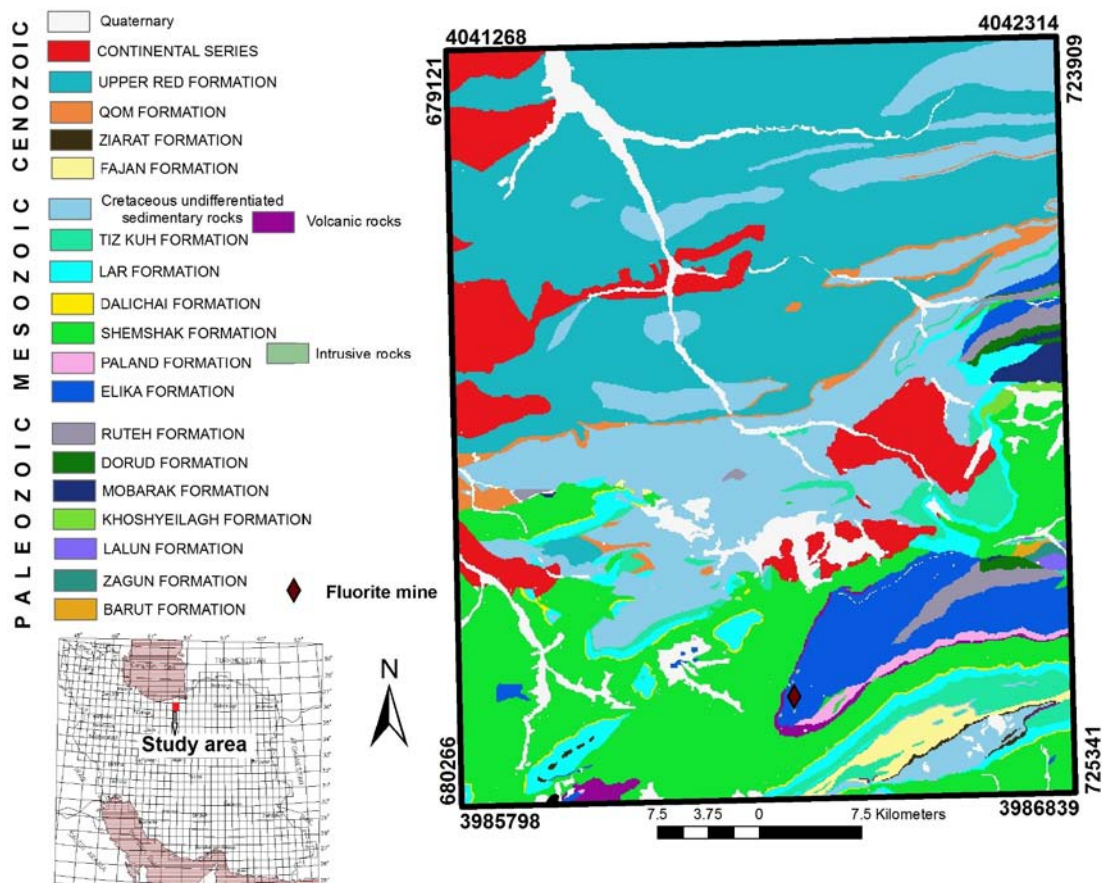
### ۲-۹-۱- کانی‌سازی فلورین تپ دره می‌سی‌سی‌پی در استان مازندران

این منطقه به عنوان یک منطقه کم اکتشاف شده در شمال ایران و در جنوب استان مازندران انتخاب شده است و به منظور تحلیل و ارزیابی روش‌های ارائه شده در رساله حاضر از اطلاعات نقشه زمین‌شناسی (شکل ۱-۳) و همچنین داده‌های حاصل از تجزیه ۵۰۲ نمونه ژئوشیمیایی رسوب آبراهه‌ای برای عناصر Au, Bi, Ni, Mn, Co, Cr, V, W, Sn, Mo, Cu, Sr, Ba, Sb, As, Ag, Pb و



Zn که توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور و همچنین سازمان صنعت، معدن و تجارت استان مازندران برداشت و تجزیه شده، استفاده شده است. مطالعه حاضر بر روی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی متمرکز است. این منطقه در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی پل سفید با مساحت حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع، در بخش شرقی زون البرز مرکزی در جنوب استان مازندران قرار دارد. در این بخش از زون البرز، چندین معدن و اندیس شناخته شده از ذخایر فلورین همراه با باریت، سرب و روی وجود دارد که عمدتاً تحت عنوان ذخایر فلورین شناخته شده‌اند. هشت معدن شناخته شده فلورین در این بخش از البرز شامل پاچی‌میانا، کمرپشت، شش‌رودبار، دراسله، ارا، امافت، سرچلشک و اشچال است. معدن فلورین پاچی‌میانا تنها معدن شناخته شده‌ای است که در نقشه پل سفید قرار دارد (شکل ۱-۳). واحدهای سنگی رخنمون‌دار در منطقه شامل انواع سنگ‌های آذرین (درونی و بیرونی) و رسوبی می‌باشد که سنگ‌های رسوبی غالب بوده و گستردگی بیشتری دارند (وحدتی‌دانشمند، ۱۳۸۱). سن واحدهای زمین‌شناسی از پرکامبرین تا عهد حاضر متغیر است. سازند الیکا (آهک و دولومیت با سن تریاس) و سازند تیزکوه (آهک اربیتولین‌دار با سن کرتاسه پایین) مهمترین واحدهای میزبان کانی‌سازی فلورین در این بخش از زون البرز مرکزی هستند (وهاب‌زاده، ۱۳۸۶). کانی‌سازی فلورین در این منطقه در مناطق گسل خورده و شکستگی‌ها تشکیل شده‌اند (وهاب‌زاده، ۱۳۸۶). چندین مطالعه انجام شده در این منطقه کانی‌سازی فلورین را تیپ دره می‌سی‌سی‌پی معرفی نموده‌اند (وهاب‌زاده، ۱۳۸۶؛ علیرضایی، ۱۳۶۶) مقایسه ذخایر فلورین این منطقه با انواع ذخایر فلورین تیپ می‌سی‌سی‌پی در دنیا همچنان دلالت بر تیپ دره می‌سی‌سی‌پی این ذخایر دارند (Hill et al. 2000؛ Sasmaz et al. 2005؛ Partida et al. 2003؛ Pannalal et al. 2003؛ Cardellach et al. 2002؛ Bouch et al. 2006؛ Daneshfar et al. 2006؛ Sánchez et al. 2009؛ Souissi et al. 2010). از میان اختصاصات ذخایر فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی، همراهی عناصر F، Ba، Pb و Zn است که از آن می‌توان در اکتشافات ژئوشیمیایی و تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی کانی‌سازی فلورین به منظور استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده نمود. بنابراین در این منطقه از دو لایه ژئوشیمیایی و

گسل‌ها در تلفیق استفاده شده و همچنین از محل‌های حضور سنگ میزبان کانی‌سازی در نقشه زمین‌شناسی نیز برای ارزیابی روش‌های به‌کار گرفته شده در این رساله بهره گرفته شده است.



شکل ۱-۳. نقشه زمین‌شناسی پل سفید در استان مازندران با اندکی تغییر (وحدتی‌دانشمند، ۱۳۸۱)

## ۱-۱۰- سازمان‌دهی رساله

پس از فصل حاضر که در آن موضوع رساله، مسئله مورد بررسی، فرض‌ها، سوالات، اهداف، روش اجرای تحقیق و همچنین روش اعتبار‌سنجی نتایج با استفاده از اطلاعات دو تیپ ماده معدنی مختلف در دو ناحیه متفاوت بیان گردید، در فصل دوم مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی پتانسیل معدنی ارائه می‌شود. در فصل سوم روش تجزیه و تحلیل SFA به عنوان روشی جدید و بهبود یافته برای استنتاج بهترین ترکیب(های) چند عنصری از متغیرهای ژئوشیمیایی معرف و پیش‌گوی

یک تیپ کانی‌سازی مشخص توسعه داده شده و ارائه شده است. در فصل چهارم روش جدیدی تحت عنوان GMPI معرفی شده که با استفاده از آن می‌توان لایه ژئوشیمیایی وزن‌دار فازی را بدون استفاده از قضاوت کارشناسی و همچنین بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده تولید نمود که می‌تواند در یک منطقه حتی بدون اندیس شناخته شده و بدون قضاوت کارشناسی به منظور تولید مدل پتانسیل معدنی با دیگر لایه‌های اکتشافی تلفیق شود. از آن‌جا که هر یک از روش‌های موجود برای به نقشه درآوردن متغیرهای ژئوشیمیایی در مطالعات رسوبات آبراهه‌ای (نظیر رسم منحنی میزان با استفاده از درون‌یابی، حوضه آبریز بالادست یک نمونه تا نمونه بعدی<sup>۱</sup> (SCB)، نمایش مقدار متغیر با استفاده از علائم<sup>۲</sup> و...)، مشکلات و معایب خاص خود را دارند که به خصوص در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مشکل ایجاد می‌کنند، بنابراین در فصل پنجم روش جدید WDCB برای به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای توسعه داده شده که موجب بهبود خروجی مدل‌های پتانسیل معدنی و افزایش موفقیت اکتشاف آن‌ها شده است. پس از آن در فصل ششم ابتدا روشی برای تولید دو لایه شاهد چگالی گسل‌ها و محل‌های تماس توده‌های نفوذی با سایر واحدها، هر دو به صورت فازی بدون استفاده از قضاوت کارشناسی و همچنین بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده توسعه داده شده و سپس دو مدل پتانسیل معدنی یکی برای فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی با استفاده از دو لایه ژئوشیمی و چگالی گسل‌ها و دیگری برای مس پرفیری با استفاده از دو لایه ژئوشیمی و توده‌های نفوذی با اهمیت تولید و ارائه گردیده است. در نهایت در فصل هفتم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات بیان شده است. نتیجه رساله حاضر در واقع توسعه یک روش فازی در حالت عدم استفاده از قضاوت کارشناسی برای تخصیص وزن است که در مناطق حتی بدون یک اندیس شناخته شده قابل استفاده است. در این روش‌ها حتی اگر در محدوده مورد مطالعه اندیس‌های شناخته شده ماده معدنی مورد جستجو نیز وجود داشته باشند، از آن‌ها برای مدل‌سازی استفاده نمی‌شود و فقط می‌توان از موقعیت آن‌ها برای اعتبارسنجی مدل استفاده نمود. همچنین منظور از

---

<sup>1</sup> Sample catchment basin (SCB)

<sup>2</sup> Symbol map

کانی‌سازی فلورین در رساله حاضر همان کانی‌سازی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی بوده و منظور از کانی‌سازی مس همان کانی‌سازی تیپ مس پرفیری است که با توجه به این‌که در دفعات مختلف از آن‌ها در متن رساله استفاده شده، در برخی مواقع به طور خلاصه نوشته شده‌اند. همچنین در بعضی از قسمت‌های رساله از نقشه‌های منحنی میزان<sup>۱</sup> در نمایش آنومالی‌های ژئوشیمیایی استفاده شده است که دلیل آن نشان دادن و مقایسه شدت آنومالی‌ها در نقشه‌ها و روش‌های مختلف می‌باشد. همچنین همان‌طور که گفته شد در فصل پنجم یک روش جدید برای حل مشکلات نقشه‌های منحنی میزان و همچنین حل مشکل روش SCB توسعه داده شده است.

همچنین لازم به ذکر است که در رساله حاضر از لایه‌های تصاویر ماهواره‌ای و یا ژئوفیزیک استفاده نشده است زیرا روش‌های تولید نقشه‌های وزن‌دار بهبود یافته برای این روش‌های اکتشافی هنوز توسعه داده نشده و با توجه به ماهیت آن‌ها که دو روش اکتشافی متفاوت هستند هر یک از آن‌ها نیاز به تعریف یک طرح تحقیقاتی مستقل دارند تا در نهایت نقشه‌های شاهد وزن‌دار بهبود یافته قابل استفاده در مدل پتانسیل معدنی، برای این روش‌ها، تولید شود. علاوه بر این داده‌های مناسبی از این دو روش در اختیار نبوده که بتوان از آن‌ها استفاده نمود.

---

<sup>۱</sup> Contour map

## فصل دوم

مروری بر روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی و  
مطالعات انجام شده

## ۲-۱- مقدمه

در مراحل اولیه اکتشاف، در صورتی که در یک منطقه به اندازه کافی اندیس‌های شناخته شده وجود داشته باشد، از مدل‌سازی داده‌محور پتانسیل معدنی برای تعیین مناطق هدف اکتشافات بعدی استفاده می‌شود. در این روش ابتدا کلیه خصوصیات اندیس‌های شناخته شده، از نوع کانی‌سازی مورد جستجو، جمع آوری شده و ارتباط این خصوصیات با شواهد و الگوهای فضایی کمی می‌گردد. سپس نقاطی جستجو می‌شود که مشابه این خصوصیات، در آن مناطق حضور دارند. در این حالت می‌توان مناطقی را که دارای خصوصیات مشابه می‌باشند، به عنوان مناطق امیدبخش و مناسب برای پی‌جویی ذخیره هدف و مورد جستجو در نظر گرفت. همچنین در شرایطی که در منطقه مورد مطالعه تعداد اندیس‌های شناخته شده کم بوده و یا هیچ اندیس شناخته شده‌ای وجود ندارد، از روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده می‌شود. در این روش‌ها، کمی‌سازی روابط بین شواهد و کانی‌سازی از طریق قضاوت کارشناسی صورت می‌گیرد. همچنین روش‌هایی نیز تحت عنوان روش‌های ترکیبی توسعه یافته‌اند که هم‌زمان از هر دو روش استفاده می‌کنند. در این راستا فصل حاضر به مروری بر انواع روش‌های داده‌محور، دانش‌محور و ترکیبی مدل‌سازی پتانسیل معدنی و ذکر برخی از منابع مربوطه پرداخته است. تشریح کامل‌تر انواع روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی در منبع یوسفی و کامکار روحانی (۱۳۸۹) قابل دسترسی است.

## ۲-۲- اصول روش‌های داده‌محور

روش‌های داده‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مناطقی که عملیات اکتشافی و مطالعات قبلی در حد متوسط تا خوب انجام گرفته (نواحی قهوه‌ای<sup>۱</sup>)، مناسب می‌باشند. در این مناطق هدف تعیین حدود<sup>۲</sup> نواحی با وسعت کم‌تر می‌باشد که باید برای اکتشاف بیش‌تر، به منظور شناسایی محل ذخایر کشف نشده، بر اساس فرض‌های زیر مورد توجه قرار گیرند (Carranza, 2008):

<sup>۱</sup> Brown field

<sup>۲</sup> Demarcate

۱ - در یک منطقه مورد مطالعه، محل‌های وقوع ذخایر شناخته شده، مجموعه نمونه‌هایی با شباهت بالا به محل‌های حضور کانی‌سازی‌های ناشناخته هستند.

۲ - این نمونه‌ها مجموعه اطلاعات زمین‌شناسی با ارزشی از منظرها<sup>۱</sup> و الگوهای شاهد فضایی مانند آنومالی‌های ژئوشیمیایی، گسل‌ها، آنومالی‌های ژئوفیزیکی، سنگ میزبان کانی‌سازی و غیره را فراهم می‌کنند که همراه با ذخایر شناخته شده و در محل آن‌ها حضور دارند.

۳ - این مجموعه از اطلاعات زمین‌شناسی، می‌تواند یک مدل مفهومی از معیارهای پی‌جویی را برای محل ذخایر کشف نشده ارائه نمایند.

هر تیپ ذخیره معدنی یا کانی‌سازی را می‌توان با یک سری خصوصیات و ویژگی‌ها تعریف نمود که مدل توصیفی یا مفهومی نام دارد. مدل مفهومی به دست آمده، اهمیت و میزان وابستگی ذخایر معدنی را به عنوان تابعی از حضور مهمترین معیارها و شواهد فضایی منحصر به فرد بیان می‌کند. بنابراین با توجه به توضیحات فوق اگر در یک ناحیه الگوها و شواهد مهم با تعداد بیش‌تر نسبت به سایر نواحی حضور داشته باشند، این ناحیه احتمال امیدبخشی بیش‌تری را نسبت به سایر نقاط دارد. مدل مفهومی، چارچوبی را برای بررسی و کمی نمودن همراهی فضایی بین یک مجموعه از ذخایر شناخته شده و مجموعه شواهد و معیارهای شناسایی آن‌ها، در یک منطقه مورد مطالعه، فراهم می‌آورد. کمی نمودن تجربی همراهی فضایی بین ذخایر شناخته شده و مجموعه داده‌های شاهد و الگوهای فضایی خاص، شاخص‌هایی را آشکار می‌سازند که وابسته به وقوع ذخایر می‌باشند. این شاخص‌ها عموماً به صورت نقشه‌های پیش‌گو، تصویر و توصیف می‌شوند. این نقشه‌های پیش‌گو در نهایت به منظور مشخص نمودن حدود نواحی هدف در اکتشافات بعدی (بیش‌تر) برای شناسایی محل ذخایر کشف نشده، تلفیق می‌شوند. علاوه بر این کمی نمودن تجربی همراهی فضایی بین ذخایر شناخته شده و مجموعه الگوهای شاهد فضایی خاص، می‌تواند برای بهبود و تکمیل مجدد یک مدل مفهومی بهتر، با استفاده از معیارهای شناسایی ذخایر مورد جستجو در منطقه مورد مطالعه استفاده

---

<sup>1</sup> Features

شود. در یک منطقه مورد مطالعه، برای تعیین شاخص حضور کانی‌سازی (PD) برای یک ذخیره هدف (D) بر اساس محل ذخایر شناخته شده از نوع مورد جستجو (D)، می‌توان یک تابع به صورت  $f$  تعریف نمود که از تعدادی شاهد فضایی  $X_i$  (از ۱ تا  $n$  یعنی متغیرهای پیش‌گوی اکتشافی) تشکیل شده است. این تابع می‌تواند به صورت رابطه (۱-۲) بیان شود (Carranza, 2008):

$$P_D = f(X_i) = f(X_1, \dots, X_n) \quad (1-2)$$

برای یک منطقه مورد مطالعه، نقشه پراکندگی اندیس‌های شناخته شده از نوع D و هر کدام از نقشه‌های خاص مربوط به متغیرهای پیش‌گو، به سلول‌هایی با اندازه مساوی و معمولاً مربع شکل تقسیم می‌شوند. شاخص حضور کانی‌سازی (PD)، میزان شباهت<sup>۱</sup> هر سلول واحد از منطقه را به محل یک ذخیره معین و شناخته شده نشان می‌دهند. هر کدام از نقشه‌های خاص مربوط به منظرها و شاهد‌های فضایی  $X_i$ ، خود به تعدادی کلاس و الگوی  $C_{ji}$  تقسیم می‌شود که در آن  $j$  از ۱ تا  $m$  تغییر می‌کند. برای هر سلول واحد در یک منطقه مورد مطالعه،  $P_D$  می‌تواند به صورت رابطه (۲-۲) نیز تعیین شود (Carranza, 2008):

$$P_D = f(wC_{ji})_{i=1, \dots, n}^{j=1, \dots, m} = f(wC_{11}, \dots, wC_{mn}) \quad (2-2)$$

در رابطه (۲-۲)،  $wC_{ji}$  نشان دهنده وزن زامین الگو از  $i$  امین نقشه شاهد برای حضور ذخیره D است. در واقع این وزن نشان دهنده میزان همراهی فضایی الگوی  $j$  از نقشه شاهد معین  $X_i$  یعنی  $C_{ji}$ ، با ذخیره D است. وزن‌ها وابسته به میزان انطباق<sup>۲</sup> یا همراهی بین ذخیره D و هر  $C_{ji}$  (هر الگو و در واقع هر کلاس) در هر یک از نقشه‌های شاهد  $X_i$ ، است. در نقشه‌های شاهد  $X_i$ ، سلول‌های واحدی که به وسیله مقادیر بالای  $wC_{ji}$  مشخص می‌شوند در بیش‌تر مواقع خصوصیات زمین‌شناسی مشابه با سلول‌های دارای ذخایر شناخته شده، از نوع D را دارند. بنابراین دو معادله فوق مجموعاً شامل یک سری تحلیل بر روی سلول‌های واحدی می‌باشند که احتمالاً شامل محل‌های ذخایر ناشناخته و کشف

<sup>1</sup> Likelihood

<sup>2</sup> Coincidence



نشده از نوع D هستند. این تحلیل‌ها بر اساس همراهی و همبستگی فضایی بین الگوهای  $C_{ji}$  از نقشه‌های شاهد  $X_i$  با سلول‌های واحد دارای ذخایر شناخته شده از نوع D صورت می‌گیرد. روش‌های کمی نمودن همراهی فضایی بین نقاط دارای کانی‌سازی و نقشه‌های شاهد مشخص به منظور تعیین وزن ( $w$ ) هر الگو ( $C_{ji}$ ) از هر نقشه شاهد ( $X_i$ ) متفاوت است. بر این اساس در روش‌های مختلف داده‌محور، انواع روش‌های تعیین وزن الگوهای شاهد و تولید نقشه‌های پیش‌گو و در نهایت ترکیب و تلفیق این نقشه‌های پیش‌گو، از طریق تابع  $f$ ، برای تولید مدل پتانسیل معدنی یعنی در واقع به نقشه در آوردن شاخص حضور کانی‌سازی ( $P_D$ )، توسعه پیدا کرده است. بنابراین به طور خلاصه در انواع روش‌های داده‌محور، با توجه به وجود اندیس‌های معدنی شناخته شده در یک منطقه و همچنین با توجه به این‌که شناخت مشخصات یک تیپ کانسار خاص در یک محیط زمین‌شناسی معلوم، راهنمای برنامه‌ریزان اکتشافی برای دستیابی به کانسارهای مشابه است، می‌توان اندیس‌های دیگری مشابه ذخایر شناخته شده را جستجو نمود. (Bonham-Carter, 1994). در بخش عمده‌ای از عملیات اکتشافی، عوامل زمین‌شناسی مؤثر در اکتشاف در کنترل طراح پروژه نیستند. از جمله این عوامل می‌توان مشخصات کانسار مورد پی‌جویی را نام برد. این مشخصات را می‌توان از مطالعه اندیس‌های شناخته شده مشابه در یک منطقه به دست آورد و به اصطلاح مدل کانسارهای منطقه را مشخص نمود و سپس با یک طرح مناسب و چند مرحله‌ای به دنبال مناطقی گشت که دارای خصوصیات مشابه مدل به دست آمده باشند و آن مناطق را به عنوان اولویت اکتشافی در نظر گرفت. انواع روش‌های داده‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی شامل روش‌های وزن‌های نشانگر<sup>۱</sup>، روش توابع برآورد<sup>۲</sup>، رگرسیون لجستیکی<sup>۳</sup>، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)<sup>۴</sup>، تحلیل مطلوبیت<sup>۵</sup>، تحلیل ویژگی<sup>۶</sup>، تحلیل جداسازی<sup>۷</sup>.

<sup>1</sup> Weights-of-evidence

<sup>2</sup> Evidential belief function (EBF)

<sup>3</sup> Logistic regression

<sup>4</sup> Artificial neural networks (ANN)

<sup>5</sup> Favorability analysis

<sup>6</sup> Characteristic analysis

<sup>7</sup> Discriminant analysis

تحلیل ضریب درست نمایی<sup>۱</sup>، طبقه بندی شبکه‌ای بیزین<sup>۲</sup>، وزن های نشانگر مبسوط<sup>۳</sup> و روش ماشین ماشین برداری پشتیبان<sup>۴</sup> می‌باشند. در جدول ۱-۲ انواع روش‌های داده‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی به همراه برخی منابع مهم آورده شده است. لازم به ذکر است که نقطه مشترک تمام روش‌های داده‌محور استفاده از خصوصیات توصیفی و فضایی اندیس‌های شناخته شده منطقه مورد مطالعه است. همچنین روش توابع برآورد هم به صورت داده‌محور و هم دانش‌محور توسعه یافته است.

جدول ۱-۲. انواع روش‌های داده‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی

نوع روش داده‌محور	برخی منابع مهم مربوط در مدل‌سازی پتانسیل معدنی
وزن‌های نشانگر	Bonham-Carter et al. (1989), Agterberg et al. (1990, 1993), Bonham-Carter and Agterberg (1990), Agterberg (1992), Bonham-Carter (1994), Cheng and Agterberg (1999), Raines (1999), Singer and Kouda (1999), Pan and Harris (2000), Agterberg and Cheng (2002), Harris et al. (2003), Carranza (2004b), Porwal et al. (2001, 2006)
توابع برآورد	Carranza (2002), Carranza and Hale (2003), Carranza et al. (2005, 2008a, 2008)
رگرسیون لجستیکی	Chung and Agterberg (1980, 1988), Agterberg et al. (1993), Pan and Harris (2000), Carranza (2002), Harris et al. (2003), Daneshfar et al. (2006)
شبکه عصبی مصنوعی	Pan and Harris (2000), Brown et al. (2000, 2003), Porwal et al. (2003b, 2004), Porwal (2006), Nykänen (2008)
تحلیل مطلوبیت	Pan and Portefield (1995), Pan and Harris (2000)
تحلیل ویژگی	McCammon et al. (1983), Pan and Harris (2000)
تحلیل جداسازی	Bonham-Carter and Chung (1983), Pan and Harris (2000), (Carranza, 2008)
تحلیل ضریب درست نمایی	Chung and Fabbri (1993), Chung and Keating (2002)
طبقه‌بندی شبکه‌ای بیزین	Porwal (2006), Porwal et al. (2006a)
وزن‌های نشانگر مبسوط	Porwal et al. (2003a), Porwal (2006)
ماشین برداری پشتیبان	Zuo and Carranza (2011), Abedi et al. (2012)

## ۲-۳- استنتاج الگوهای شاهد در مدل‌سازی داده‌محور

شناسایی بهترین معیارهای اکتشافی و انتخاب بهترین الگوها (کلاس‌ها) از هر نقشه شاهد (زمین‌شناسی، ژئوشیمی و ...)، یکی از مهمترین مراحل تهیه مدل پتانسیل معدنی است. استنتاج

<sup>1</sup> Likelihood ratio analysis

<sup>2</sup> Bayesian network classifiers

<sup>3</sup> Extended Weights-of-Evidence

<sup>4</sup> Support vector machine

بهینه الگوهای شاهد، در روش‌های داده‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی، با استفاده از تحلیل موقعیت فضایی اندیس‌های شناخته شده از نوع مورد جستجو و کمی نمودن خصوصیات توصیفی این اندیس‌های شناخته شده در داخل محدوده مورد مطالعه صورت می‌گیرد. همان‌طور که در فصل حاضر تشریح گردید، استنتاج الگوهای شاهد (معرف‌ترین کلاس‌ها از هر نقشه شاهد)، ممکن است با استفاده از روش‌های مختلفی صورت گیرد. انتخاب روش استخراج الگوهای شاهد، با توجه به نوع داده‌های اکتشافی و قابلیت روش‌های موجود، همچنین ابتکار عمل و هنر به کارگیری صحیح از اطلاعات و استفاده حداکثری از آن‌ها، توسط کارشناس صورت می‌گیرد. بنابراین با توجه به اطلاعات موجود ممکن است از هر یک از روش‌های تشریح شده در فصل حاضر استفاده گردد.

## ۲-۴- اصول روش‌های دانش‌محور

روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی در شروع عملیات اکتشاف در مناطقی که از لحاظ زمین‌شناسی مناسب بوده ولی در آن کار اکتشافی کم صورت گرفته مناسب هستند. این روش‌ها عموماً در مناطقی که در آنجا هیچ ذخیره شناخته شده‌ای وجود ندارد یا تعداد ذخایر شناخته شده اندک است (نواحی سبز<sup>۱</sup>) به کار می‌روند. تجربه اجرای عملیات اکتشاف و بررسی ارتباط و وابستگی بین ذخایر معدنی شناخته شده و الگوهای زمین‌شناسی در نواحی که در آن‌ها اکتشاف در حد خوب و متوسط صورت گرفته، به عنوان اساس روش دانش‌محور در تهیه مدل پتانسیل معدنی می‌باشد (Carranza, 2008). بنابراین در این روش از مدل مفهومی ذخایر مورد پی‌جویی در مناطقی که عملیات اکتشاف در آنجا خوب صورت گرفته، برای تهیه مدل پتانسیل معدنی در مناطق جدید استفاده می‌شود. در واقع از مدل مفهومی به عنوان ملاکی برای انتخاب و شناسایی معیارهای اکتشافی و الگوهای شاهد، تولید نقشه‌های پیش‌گو، تخصیص وزن به نقشه‌ها و الگوهای شاهد و در نهایت تلفیق نقشه‌های شاهد به منظور معرفی مناطق امیدبخش برای ذخیره مورد جستجو، استفاده

---

<sup>۱</sup> Green field

می‌شود. بنابراین واژه دانش‌محور اشاره به ارزیابی کیفی<sup>۱</sup> و وزن دادن<sup>۲</sup> به شواهد بر اساس مقایسه و قضاوت کارشناسی دارد. تخمین وزن هر نقشه شاهد و همچنین تخمین امتیاز و ارزش هر الگو (کلاس) از هر نقشه شاهد بر اساس قضاوت کارشناسی و تجربی روی همراهی فضایی بین ذخایر مورد جستجو و هر مجموعه از منظرهای زمین‌شناسی شاخص<sup>۳</sup> (نشانه و راهنما)، صورت می‌گیرد. از این رو روش دانش‌محور به نام روش تجربه‌محور<sup>۴</sup> مدل‌سازی پتانسیل معدنی نیز شناخته شده است. تجربه‌ای که در روش دانش‌محور تهیه مدل پتانسیل معدنی استفاده می‌شود، از طریق عملیات و مشاهدات صحرایی اکتشاف مواد معدنی و همچنین از طریق تجربه‌های کاربرد روش‌های مختلف تحلیل و وابستگی فضایی بین منظرها و الگوهای زمین‌شناسی مشخص، با پراکندگی ذخایر شناخته شده مشابه مواد معدنی مورد جستجو، به دست می‌آید. همچنین ممکن است برای یک کارشناس که تجربه قابل توجهی<sup>۵</sup> در اکتشاف ذخایر معدنی از نوع مورد جستجو دارد، دانش از تجربه استنتاج<sup>۶</sup> شود. روش دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی ممکن است نقشه‌های شاهد دوتایی یا چند کلاسه را بر اساس میزان اطلاعات و تجربه به دست آمده از نواحی خوب اکتشاف شده قبلی و یا با توجه به میزان دقت داده‌های اکتشافی در دسترس در مناطق مناسب (به لحاظ زمین‌شناسی) برای اکتشاف، به کار گیرد. اگر میزان یک یا هر دو عامل فوق یعنی اطلاعات حاصل از عملیات صحرایی و همچنین تجربه حاصل از مطالعه اندیس‌های شناخته شده مشابه ذخایر مورد جستجو بالا باشد، استفاده از نقشه‌های شاهد چند کلاسه برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی مناسب می‌باشد در غیر این صورت باید از نقشه‌های شاهد دوتایی استفاده گردد (Carranza, 2008). انواع روش‌های مدل‌سازی دانش‌محور پتانسیل معدنی در جدول ۲-۲ آمده است. همچنین نقطه مشترک تمام روش‌های دانش‌محور استفاده از

---

<sup>1</sup> Qualitative

<sup>2</sup> Weighting

<sup>3</sup> Indicative

<sup>4</sup> Expert driven

<sup>5</sup> Profound

<sup>6</sup> Elicit

قضاوت کارشناسی در تخصیص وزن می‌باشد. لازم به ذکر است همان‌طور که در جدول ۲-۱ نیز بیان گردید برای روش توابع برآورد دو نوع داده‌محور و دانش‌محور وجود دارد.

جدول ۲-۲. انواع روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی

انواع روش دانش‌محور	برخی منابع مهم در مدل‌سازی پتانسیل معدنی
روش منطق بولی <sup>۱</sup>	Bonham-Carter (1994), Thiart and De Wit (2000), Harris et al. (2001), Carranza (2008)
روش هم‌پوشانی شاخص دوتایی <sup>۲</sup>	Bonham-Carter (1994), Thiart and De Wit (2000), Carranza (2002, 2008)
روش هم‌پوشانی شاخص چند کلاسه	Harris et al. (2001), De Araújo and Macedo (2002), Billa et al. (2004), Carranza (2008)
فرآیند تصمیم‌گیری تحلیل سلسله مراتبی <sup>۳</sup>	De Araújo and Macedo (2002), Carranza (2008)
روش منطق فازی <sup>۴</sup>	D'Ercole et al. (2000), Knox-Robinson (2000), Porwal and Sides (2000), Venkataraman et al. (2000), Carranza and Hale (2001), Carranza (2002), Porwal et al. (2003), Tangestani and Moore (2003), Ranjbar and Honarmand (2004), Eddy et al. (2006), Rogge et al. (2006), Nykänen et al. (2008a, 2008b), Carranza (2008)
توابع برآورد	Dempster (1967), Moon (1990), Chung and Moon (1991), Moon et al. (1991), Chung and Fabbri (1993), Carranza (2002, 2008), Tangestani and Moore (2002b), Rogge et al. (2006)
عکس فاصله یا وایلدکت <sup>۵</sup>	Carranza (2002, 2008), Carranza and Hale (2002b), Carranza (2010b)

## ۲-۵- روش‌های ترکیبی مدل‌سازی پتانسیل معدنی

روش‌های دوگانه یا ترکیبی، که در واقع ترکیب دو روش داده‌محور و دانش‌محور هستند، نیز در مدل‌سازی پتانسیل معدنی توسعه یافته‌اند. در این روش‌ها عموماً از وزن‌های تخصیص یافته و نتایج مطالعه در روش داده‌محور، برای تخصیص وزن در روش دانش‌محور و برعکس، استفاده می‌شود. فرآیند استخراج دانش تجربی برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی هنوز به خوبی توسعه پیدا نکرده است و هنوز در مورد تبدیل قضاوت‌های کیفی به روابط و وزن‌های کمی معیارهای منطقی وجود ندارد که البته رساله حاضر در مورد لایه ژئوشیمیایی و گسل‌ها و همچنین فاصله از ساختارهای زمین‌شناسی به حل مشکل پرداخته است. دو نوع از روش‌های ترکیبی شامل روش ترکیبی فازی- وزن‌های نشان‌گر<sup>۶</sup> و

<sup>1</sup> Boolean logic

<sup>2</sup> Binary index overlay

<sup>3</sup> Analytical hierarchy process(AHP)

<sup>4</sup> Fuzzy logic modeling

<sup>5</sup> Wildcat

<sup>6</sup> Hybrid fuzzy weights-of-evidence

و روش ترکیبی شبکه عصبی- فازی<sup>۱</sup> می‌باشند. در جدول ۲-۳ برخی منابع مربوط به این دو روش ذکر شده است.

جدول ۲-۳. انواع روش‌های ترکیبی مدل‌سازی پتانسیل معدنی

انواع روش ترکیبی	برخی منابع مهم در مدل‌سازی پتانسیل معدنی
فازی- وزن‌های نشان‌گر	Cheng and Agterberg (1999), Porwal (2006), Porwal et al. (2006)
شبکه عصبی- فازی	Porwal et al. (2004), Porwal (2006)

پس از بیان انواع روش‌های داده و دانش‌محور و همچنین ترکیبی مدل‌سازی پتانسیل معدنی از آن‌جایی که در رساله حاضر، نقشه‌های شاهد تولید شده دارای وزن بین ۰ و ۱ هستند و می‌توان آن‌ها را وزن فازی تلقی نمود و همچنین با توجه به این‌که روش عکس فاصله نیز روشی است که وزن فازی را بدون قضاوت کارشناسی تخصیص می‌دهد، بنابراین مدل‌سازی به روش منطق فازی و عکس فاصله در ادامه تشریح می‌گردند

## ۲-۶- روش منطق فازی

مدل‌سازی به روش منطق فازی بر اساس تئوری مجموعه‌های فازی (Zadeh, 1965) بنا شده است. به طور کلی کاربرد منطق فازی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی شامل سه مرحله اصلی است. مرحله اول شامل تخصیص وزن و فازی‌سازی<sup>۲</sup> داده‌های مربوط به شواهد، مرحله دوم ترکیب منطقی نقشه‌های شاهد فازی با کمک مجموعه عملگرهای مناسب فازی و مرحله سوم قطعی‌سازی و خروج از حالت فازی<sup>۳</sup> به منظور کمک به تفسیر بهتر می‌باشد. مراحل فوق به صورت نمادین در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Hybrid Neuro-Fuzzy

<sup>2</sup> Fuzzification

<sup>3</sup> Defuzzification



شکل ۱-۲. مراحل مدل‌سازی پتانسیل معدنی با کاربرد منطق فازی به طور نمادین (Carranza, 2008)

فازی‌سازی، فرآیند تبدیل شواهد فضایی به مجموعه‌های فازی است. یک مجموعه فازی به صورت گروه‌هایی از اعضا است که میزان عضویت<sup>۱</sup> و تعلق آن‌ها به مجموعه، با توجه به تخصیص عددی بین ۰ و ۱ تعیین می‌شود. هر عضو مجموعه فازی به وسیله درجه<sup>۲</sup> عضویت (وزن و اهمیت نسبی) خود در مجموعه تعریف می‌گردد. اگر  $X$  مجموعه‌ای از اعضا، هر یک با خصوصیت<sup>۳</sup> و ویژگی  $X$  باشد، در این صورت مجموعه فازی  $A$  در  $X$ ، یک مجموعه از زوج‌های شامل هر خصوصیت (هر عضو) و درجه نظیر هر خصوصیت (درجه هر عضو) می‌باشد یعنی  $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$ ، که در آن  $\mu_A(x)$  تابع نشان دهنده درجه عضویت  $x$  (وزن فازی  $x$ ) در  $A$  می‌باشد. تابع  $\mu_A(x)$  حالت فازی داشته و درجه عضویت هر خصوصیت  $x$  (عضو) در فاصله بین ۰ و ۱ می‌باشد یعنی  $\mu_A(x) \in [0, 1]$ . در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مجموعه  $X$  می‌تواند به عنوان مثال فاصله از ساختارهای زمین‌شناسی باشد. در این حالت یک مجموعه فازی از الگوهای شاهد می‌تواند به صورت فواصل مختلف  $X$  تعریف شود. بنابراین مجموعه فازی فواصل مناسب از کانی‌سازی نوع  $D$ ، به صورت عضوی  $X$  تعریف می‌شود که هر فاصله وزن و میزان اهمیت مخصوص به خود را در دامنه ۰ و ۱ دارد. بنابراین شواهد فضایی خاص مربوط به کانی‌سازی که به صورت نقشه می‌باشند، می‌توانند با توجه به درجه اهمیت عضویت و میزان مطلوبیت برای کانی‌سازی در یک مجموعه فازی بر اساس نظر و تجربه کارشناسی

<sup>1</sup> Membership

<sup>2</sup> Grade

<sup>3</sup> Attribute

ارزیابی شوند. میزان عضویت معمولاً به وسیله یک تابع ریاضی نشان داده می‌شود که ممکن است خطی یا غیر خطی باشد. در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، میزان عضویت الگوهای شاهد مختلف (خصوصیات) در یک مجموعه فازی از شواهد مطلوب کانی‌سازی، در یک محل خاص به عنوان مثال یک سلول واحد از منطقه مورد مطالعه، بر اساس این جمله ارزیابی می‌شود که این محل برای جستجوی ذخیره معدنی مورد پی‌جویی چقدر امیدبخش و دارای اهمیت می‌باشد. بنابراین فازی‌سازی با کاربرد تابع عضویت  $\mu_A(x)$  برای یک مجموعه از نقشه‌های دارای الگوهای مختلف از شواهد فضایی انجام می‌گیرد. تخمین و تعیین  $\mu_A(x)$  می‌تواند به هر دو صورت داده‌محور و دانش‌محور صورت گیرد. در مدل‌سازی دانش‌محور پتانسیل معدنی، انتخاب یا تعیین تابع عضویت فازی برای فازی‌سازی شواهد فضایی مربوط به کانی‌سازی باید بر اساس قضاوت کارشناسی در میزان همراهی فضایی بین الگوها و منظرهای زمین‌شناسی و ذخایر معدنی مورد پی‌جویی صورت گیرد. تابع عضویت لجستیکی بیان شده در رابطه (۳-۲) می‌تواند برای فازی‌سازی نقشه‌های شاهد چند کلاسه در روش دانش‌محور استفاده شود (Zimmermann, 1991; Porwal, 2006):

$$\mu_{\tilde{A}_i}(x_{ij}) = \frac{1}{1 + e^{-a(cs_{ij}-b)}} \quad (3-2)$$

که در آن  $cs_{ij}$  امتیاز الگوی  $x_{ij}$  و  $x_{ij}$  نشان دهنده زمین الگو از  $i$  امین نقشه شاهد می‌باشد.  $cs_{ij}$  از رابطه (۴-۲) به دست می‌آید (Porwal et al., 2003):

$$CS_{ij} = w_i \times w_{ij} \quad (4-2)$$

$w_i$  وزن  $i$  امین نقشه پیش‌گو و  $w_{ij}$  وزن زمین الگو (کلاس) از  $i$  امین نقشه پیش‌گو می‌باشد. در این حالت بر اساس قضاوت کارشناسی و در دامنه بین ۱۰ و ۱۰۰ به الگوهای شاهد وزن تخصیص می‌یابد. مطلوب‌ترین الگو دارای رتبه ۱۰۰ و به الگوهای دارای حداقل مطلوبیت امتیاز ۱۰ تعلق می‌گیرد. برای نقشه‌های شاهد نیز به طور مشابهی بر اساس میزان برتری و اهمیت معیارهای اکتشافی نسبت به هم، وزن تخصیص یافته می‌تواند بین ۱ تا ۱۰ تغییر کند.  $a$  و  $b$  در رابطه (۳-۲)



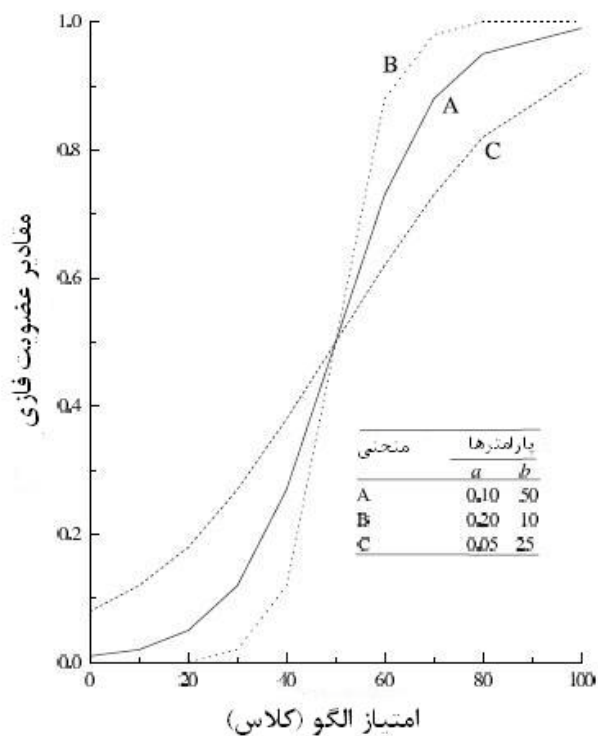
پارامترهایی هستند که به ترتیب شیب و نقطه عطف<sup>۱</sup> تابع بوده و به طور تجربی و ابتکاری انتخاب می‌شوند (Porwal, 2006). بنابراین این پارامترها شکل تابع و در نتیجه مقدار تابع عضویت فازی را تعیین می‌کنند. برای مجموعه‌ای از داده‌های ساختگی  $a$  و  $b$ ، مقدار عضویت فازی بر اساس تابع لجستیکی محاسبه شده و در جدول ۴-۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۲. مقادیر عضویت فازی با توجه به پارامترهای شیب ( $a$ ) و نقطه عطف ( $b$ ) (Porwal, 2006)

الگوی نقشه پیش‌گو ( $x_{ij}$ )	امتیاز الگو $cs_{ij}$	مقدار عضویت فازی $\mu_j(x)$		
		$a = 0.1$ $b = 50$	$a = 0.2$ $b = 10$	$a = 0.05$ $b = 25$
$x_{11}$	0	0.01	0.00	0.08
$x_{12}$	10	0.02	0.00	0.12
$x_{13}$	20	0.05	0.00	0.18
$x_{14}$	30	0.12	0.02	0.27
$x_{15}$	40	0.27	0.12	0.38
$x_{16}$	50	0.50	0.50	0.50
$x_{17}$	60	0.73	0.88	0.62
$x_{18}$	70	0.88	0.98	0.73
$x_{19}$	80	0.95	1.00	0.82
$x_{110}$	100	0.99	1.00	0.92

همان‌طور که از جدول ۴-۲ مشخص است، مقادیر عضویت با توجه به مقادیر  $a$  و  $b$  متغیر هستند. بنابراین در مواردی که امتیاز الگوها به هم نزدیک هستند باید در تعیین مقادیر  $a$  و  $b$  دقت شود تا باعث افزایش یا کاهش کاذب در مقدار تابع عضویت فازی نشود. در شکل ۲-۲ نیز مقادیر جدول ۴-۲ به صورت نمودار نشان داده شده است.

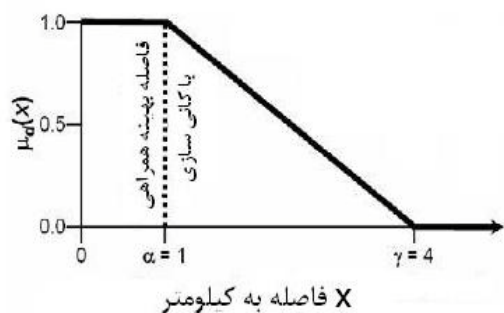
<sup>1</sup> Inflection point



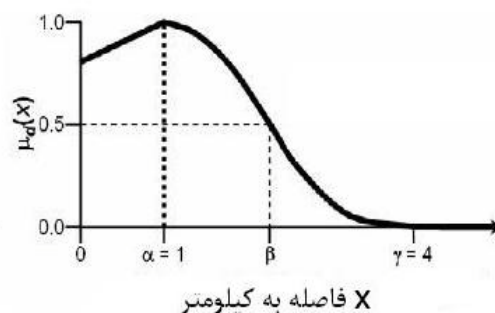
شکل ۲-۲. تغییرات مقدار عضویت فازی بر اساس مقادیر پارامترهای تابع لجستیکی (Porwal, 2006)

روش دیگر تخصیص وزن و فازی‌سازی، تخصیص وزن‌های فازی به فواصل مختلف از یک عارضه زمین‌شناسی می‌باشد در شکل ۲-۳، تخصیص وزن‌های فازی به فواصل مختلف از گسل، هم به صورت خطی و هم غیر خطی نشان داده شده است.

تابع خطی (الف)



تابع خطی و غیر خطی (ب)



شکل ۲-۳. تخصیص وزن‌های فازی به فواصل مختلف، الف) خطی و ب) غیر خطی (Carranza, 2008)

در شکل ۳-۲، X فاصله به کیلومتر از گسل می‌باشد. در شکل ۳-۲ الف وزن‌ها می‌تواند به صورت

رابطه (۵-۲) نشان داده شده در زیر تخصیص یابند (Carranza, 2008):

$$\mu_d(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } x < \alpha \\ (\gamma - x) / (\gamma - \alpha) & \text{for } \alpha \leq x \leq \gamma \\ 0 & \text{for } x > \gamma \end{cases} \quad (5-2)$$

در رابطه (۵-۲)،  $\mu_d(x)$  یعنی درجه عضویت X برای ذخیره نوع d، همچنین X فاصله به کیلومتر و پارامترهای  $\alpha$  و  $\gamma$  به ترتیب فاصله بهینه و حداکثر فاصله دارای وزن در شکل ۳-۲ هستند که بر اساس فاصله بهینه همراهی فضایی معنی‌دار با ذخیره و در نظر گرفتن حداکثر فاصله‌ای که بعد از آن هیچ گونه مطلوبیت و ارزشی برای جستجوی ذخایر از نوع هدف وجود ندارد، تعیین می‌شوند. پارامترهای  $\alpha$  و  $\gamma$  در تابع فوق بر اساس قضاوت یا دانش کارشناسی به طور دلخواه<sup>۱</sup> و هدف‌دار<sup>۲</sup> (بر حسب مورد) برای تعیین میزان همراهی فضایی بین ذخایر معدنی مورد پی‌جویی و منظرها و الگوهای شاهد انتخاب می‌شوند. تابع عضویت فازی در شکل ۳-۲ الف و رابطه (۵-۲) خطی بوده و بنابراین کمی متناقض و متفاوت شرایط طبیعی است. بنابراین می‌توان از رابطه (۶-۲) برای تعیین تابع عضویت فواصل مختلف به صورت غیر خطی در شکل ۳-۲ ب استفاده نمود (Carranza, 2008):

$$\mu_d(x) = \begin{cases} [0.2(x - \min) / (\alpha - \min)] + 0.8 & \text{for } x < \alpha \\ 1 - [(x - \alpha) / (\gamma - \alpha)]^2 & \text{for } \alpha \leq x \leq \beta \\ [(x - \gamma) / (\gamma - \alpha)]^2 & \text{for } \beta \leq x \leq \gamma \\ 0 & \text{for } x > \gamma \end{cases} \quad (6-2)$$

همان‌طور که در شکل ۳-۲ ب، که با استفاده از رابطه (۶-۲) قابل بیان است، مشاهده می‌شود، این

تابع هم دارای قسمت خطی (در شرط اول) و هم دارای قسمت غیر خطی (در سه شرط آخر رابطه

<sup>1</sup> Arbitrarily

<sup>2</sup> Subjective

(۶-۲) می‌باشد. پارامترهای  $\alpha$ ،  $\beta$  (نقطه عطف) و  $\gamma$  در این حالت نیز مانند حالت خطی بر اساس نظر کارشناسی و تجربی انتخاب می‌شوند.

علاوه بر روش‌های فوق، روش دیگری که برای فازی‌سازی و تعیین مقدار عضویت فازی وجود دارد یک روش داده‌محور خطی بوده که به صورت رابطه (۷-۲) بیان می‌شود (Bonham-Carter, 1994):

$$\mu_{\tilde{A}_i}(x_{ij}) = \begin{cases} 0.01 & \text{if } C_{ij} = C_{\min} \text{ \& } C_{\min} < 0 \\ 0.5 - \frac{C_{ij}}{2 \times C_{\min}} & \text{if } C_{\min} < C_{ij} \leq 0 \\ 0.5 + \frac{C_{ij}}{2 \times C_{\max}} & \text{if } 0 \leq C_{ij} \leq C_{\max} \end{cases} \quad (7-2)$$

در رابطه (۷-۲)،  $\mu_{\tilde{A}_i}(x_{ij})$  مقدار تابع عضویت فازی برای الگوی  $j$  از نقشه شاهد  $i$  می‌باشد.  $C_{ij}$  مقدار تباین<sup>۱</sup> برای  $x_{ij}$  (زامین الگو از  $i$  امین نقشه شاهد) و  $C_{\min}$  و  $C_{\max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار تباین در مجموعه داده‌ها می‌باشد.  $C_{ij}$  با توجه به رابطه (۸-۲) تعیین می‌شود (Bonham-Carter, 1994):

$$C_{ij} = W_{ij}^+ - W_{ij}^- \quad (8-2)$$

$W^+$  وزنی است که معرف حضور و همراهی مثبت نقاط مورد نظر با هر کلاس خاص و  $W^-$  معرف عدم حضور یا همراهی منفی مکانی نقاط مورد نظر با آن کلاس خاص است. تفاضل این دو وزن، که به نام تباین معروف است، معرف وضعیت کلی همراهی یا عدم همراهی نقاط مورد نظر با الگوهای مختلف از نقشه شاهد می‌باشد. وزن‌های  $W_{ij}^+$  و  $W_{ij}^-$  بر اساس روابط (۹-۲) و (۱۰-۲) محاسبه می‌شوند:

$$W_{ij}^+ = \log_e \frac{P(x_{ij}|D)}{P(x_{ij}|\bar{D})} \quad (9-2)$$

<sup>۱</sup> Contrast

$$W_{ij}^- = \log_e \frac{P(\bar{x}_{ij} | D)}{P(\bar{x}_{ij} | \bar{D})} \quad (10-2)$$

$x_{ij}$  و  $\bar{x}_{ij}$  به ترتیب معرف حضور و عدم حضور الگوی شاهد (زامین الگو از  $i$  امین نقشه شاهد) و  $D$  و  $\bar{D}$  به ترتیب معرف حضور و عدم حضور یک ذخیره مورد هدف است.  $P$  نیز نشان دهنده احتمال شرطی است. دو رابطه اخیر همراهی فضایی بین یک مجموعه شواهد را با یک نوع ذخیره مورد پی‌جویی، کمی می‌کنند. این دو وزن برای هر الگوی شاهد ( $x_{ij}$ ) محاسبه می‌شوند. اگر مقدار تباین بر مقدار انحراف معیار آن تقسیم شود پارامتری تحت عنوان  $S(c)$  به دست می‌آید که معرف میزان عدم قطعیت تباین بوده و می‌تواند در رابطه (۷-۲) به جای تباین برای تعیین مقدار عضویت فازی یک الگوی شاهد استفاده شود.

به هر حال بعد از تخصیص وزن به تمام الگوهای (کلاس‌های مختلف) نقشه‌های شاهد باید کلیه نقشه‌ها با هم تلفیق شوند. در این خصوص پنج عملگر فازی شامل AND فازی، OR فازی، حاصل ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و گامای<sup>۱</sup> ( $\gamma$ ) فازی وجود دارد. انتخاب نوع عملگر فازی، برای استفاده در تلفیق مجموعه‌های فازی از شواهد فضایی، با در نظر گرفتن این که کدام یک از آن‌ها یا کدام ترکیب از آن‌ها می‌تواند وابستگی بین مجموعه الگوهای شاهد را با کانی‌سازی به تصویر بکشد، صورت گیرد. همچنین این انتخاب باید با مدل مفهومی تعیین شده برای مدل‌سازی پتانسیل معدنی سازگاری داشته باشد. در خروجی مدل پتانسیل معدنی توسط کاربرد منطق فازی، کلیه مناطق، با ارزش حداقل ۰ تا حداکثر ۱ به طور تدریجی مشخص شده‌اند.

اگر چه تخصیص وزن در منطق فازی به صورت تجربی و قضاوت کارشناسی است که ممکن است در یک منطقه واحد دو کارشناس متفاوت نتایج متفاوتی را به دست دهند ولی در دسترس بودن عملگرهای فازی مختلف و همچنین تخصیص وزن در دامنه ۰ و ۱ که امکان تشریح رخدادهای

---

<sup>1</sup> Gamma

احتمالی مانند کانی‌سازی (حضور یا عدم حضور) را ممکن می‌سازد، از مزیت‌های مدل‌سازی به روش منطق فازی در مقایسه با دیگر روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی می‌باشد.

## ۷-۲- تخمین وزن با استفاده از روش عکس فاصله

در عمل، کمی نمودن همراهی فضایی بین ذخایر معدنی از نوع مورد جستجو و الگوها و شواهد زمین‌شناسی فضایی، به خصوص در مراحل اولیه اکتشاف، بر اساس مدل‌سازی دانش‌محور، مشکل است. این مشکل وقتی بیش‌تر نمایان می‌شود که فقط یک نقشه زمین‌شناسی از نواحی تقریباً بکر (به اصطلاح نواحی سبز) موجود بوده که در آن‌ها ذخایر شناخته شده وجود نداشته یا تعداد آن‌ها بسیار کم باشد. علاوه بر این، برداشت‌های اکتشافات شناسایی و اولیه عموماً بیش‌تر روی نشانه‌های زمین‌شناسی وقوع ذخایر تمرکز دارند تا بر روی نوع خود ذخیره مورد انتظار. بنابراین به نقشه درآوردن مناطق امیدبخش که ممکن است برای راهنمایی در اکتشافات بیش‌تر استفاده گردد، مستقیماً به مسئله نحوه تولید و تلفیق مهم‌ترین شواهد پیش‌گوی زمین‌شناسی ذخایر معدنی مورد پی‌جویی مربوط می‌شود (Carranza, 2008). برای حل این مسئله یک روش ابتکاری با نام وایلدکت به وجود آمد (Carranza, 2002; Carranza and Hale, 2002b) که با توجه به این‌که اساس آن استفاده از روش عکس فاصله<sup>۱</sup> است، از این پس روش عکس فاصله نامیده می‌شود. اگر چه در این روش از دانش مربوط به کانی‌سازی و وابستگی‌های مهم فضایی بین شواهد نیز، برای محاسبه و تخصیص وزن معنی‌دارتر به الگوها و تلفیق آن‌ها استفاده می‌گردد، ولی در واقع یک روش دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی است که توسط روش داده‌محور راهنمایی شده است زیرا امتیاز الگوهای شاهد (کلاس‌ها) بر اساس داده‌ها محاسبه می‌شود. این روش مدل‌سازی پتانسیل معدنی بر اساس اطلاعات و دانش کیفی کلی و عمومی درباره مشخصات محیط زمین‌شناسی ذخایر معدنی بنا شده است. برای مثال ذخایر گرمابی عموماً در یا نزدیک همسایگی ساختارها و الگوهای زمین‌شناسی

<sup>1</sup> Inverse distance

مانند نفوذی‌های آذرین (از قبیل دایک یا استوک و ...)، گسل‌ها و ساختارهای خطی وجود دارند. علاوه بر این نواحی دارای ذخایر گرمایی عموماً به وسیله آنومالی‌های ژئوشیمیایی سطحی نیز مشخص می‌شوند. در این روش ابتدا نقشه‌های مجاورت<sup>۱</sup> با ساختارهای زمین‌شناسی تهیه شده و به منظور نمایش کنترل‌کننده‌های زمین‌شناسی مؤثر در کانی‌سازی، با یکدیگر تلفیق می‌شوند. سپس شواهد فضایی شامل کنترل‌کننده‌های زمین‌شناسی، با شواهد از نوع آنومالی‌های ژئوشیمیایی ترکیب می‌گردند. به منظور تعیین میزان شدت تأثیر کنترل‌کننده‌های زمین‌شناسی، از روش عکس فاصله نسبت به کنترل‌کننده‌های زمین‌شناسی (منظرها و ساختارهای زمین‌شناسی)، برای تولید نقشه‌های شاهد و معیارهای اکتشافی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده می‌شود. این روش بر اساس تجربه عمومی و این باور بنا شده است که ذخایر معدنی عموماً ترجیح می‌دهند در مجاورت الگوهای زمین‌شناسی که نقش مشخص و اساسی در کانی‌سازی دارند، تشکیل شوند. بنابراین برای هر دامنه (کلاس) از مجاورت و فاصله از ساختارهای زمین‌شناسی، امتیاز شاهد یعنی  $s_c$  (از ۱ تا n) از رابطه (۱۱-۲) به صورت زیر محاسبه می‌شود (Carranza, 2008):

$$s_c = \frac{1}{d_c} \quad (11-2)$$

که در آن  $d_c$  وسط کلاس مورد نظر (وسط فاصله هر دامنه از هر کلاس) می‌باشد. از این روش همچنین می‌توان در محاسبه مقدار تابع عضویت منطق فازی برای یک مجموعه از مقادیر  $s_c$  با استفاده از رابطه (۱۲-۲) استفاده نمود (Carranza, 2008):

$$fs_c = \frac{1}{1 + e^{-m(s_c - \bar{s}_c)}} \quad (12-2)$$

در رابطه (۱۲-۲)،  $fs_c$  (از ۱ تا n) مقدار (درجه) فازی شده هر دامنه از فاصله (هر کلاس)،  $s_c$  امتیاز خاص هر کلاس c از معادله (۱۱-۲)،  $\bar{s}_c$  میانگین مجموعه مقادیر  $s_c$  و m ثابت قراردادی و

<sup>1</sup> Proximity

دلخواه<sup>۱</sup> است که شیب و دامنه مقادیر توابع عضویت فازی را کنترل می‌کند. از تابع عضویت فازی به دلیل انتقال مقادیر  $S_c$  به بازه ۰ و ۱ و احتمالی نمودن آن استفاده می‌شود. بنابراین شبیه مقادیر احتمالی، مقادیر  $fS_c$  بین ۰ و ۱ قرار دارند. البته با توجه به مقدار در نظر گرفته شده برای  $m$ ، مقادیر محاسبه شده برای  $fS_c$  ممکن است در دامنه ۰ و ۱ قرار نگیرند. مقادیر مناسب برای  $m$  آن‌هایی هستند که تمام مجموعه کلاس‌های مجاورت با منظرهای زمین‌شناسی، در تمام نقشه‌های شاهد را در دامنه یکسانی از مقادیر  $fS_c$  از مقدار حداقل ممکن (نه برابر ۰) تا بالاترین مقدار یعنی ۱ طبقه‌بندی کند. روش عکس فاصله در مرحله شناسایی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی کوچک مقیاس و در اولین ارزیابی از پتانسیل معدنی در نواحی بکر برای شناسایی نواحی امیدبخش سودمند است. این روش که یک روش دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی با کمک گرفتن از داده‌ها است به گستره و دامنه کلاس‌های در نظر گرفته شده در مجاورت ساختارهای زمین‌شناسی و انواع منظرهای مورد استفاده در تحلیل، حساس است. حدود کم (دامنه تغییرات کم) کلاس‌های مجاور با منظرهای زمین‌شناسی باعث ایجاد نرخ پیش‌بینی بالاتر در مدل‌سازی پتانسیل معدنی می‌شود (Carranza and Hale, 2002b). انتخاب این‌که کدام نوع از منظرهای زمین‌شناسی مورد استفاده قرار گیرد، به میزان سطح اطلاعات و تجربه در مورد انواع ذخایر احتمالی که در ناحیه مورد پی‌جویی وجود دارد، بر می‌گردد. بنابراین در روش عکس فاصله به اندازه دیگر روش‌های دانش‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی، داشتن سطح اطلاعات و دانش کافی از ویژگی‌های عمومی ذخایر معدنی و زمین‌شناسی ساختمانی آن‌ها ضروری است (Carranza, 2008). همچنین مهمترین عیب روش عکس فاصله این است که فواصل مختلف از هر عارضه به دامنه‌های مختلف تقسیم می‌شوند و سپس به هر یک از آن‌ها یک وزن تخصیص می‌یابد یعنی مانند مسئله بیان شده در مورد گسل‌ها در فصل اول، ابتدا اطراف عوارض حریم‌بندی شده (به عنوان مثال فواصل ۰ تا ۲۰۰ متر، ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر، ۴۰۰ تا ۴۰۰

---

<sup>1</sup> Arbitrary



۶۰۰ متر و ...) و در مرحله بعد به کل قسمت‌های هر بازه از فاصله یک وزن برابر تخصیص می‌یابد که غیر واقعی است.

## ۲-۸- استنتاج الگوهای شاهد در مدل‌سازی دانش‌محور

همان‌طور که در فصل حاضر تشریح شد، در مدل‌سازی دانش‌محور پتانسیل معدنی شناسایی بهترین معیارهای اکتشافی ذخیره مورد جستجو و استنتاج بهترین الگوهای شاهد، باید با استفاده از تعریف یک مدل مفهومی و توصیفی مناسب از ذخیره صورت گیرد. روش‌های مختلفی نیز برای این نوع مدل‌سازی وجود دارد که بیان گردید. در روش دانش‌محور، پس از تعریف مدل مفهومی و انتخاب معیارهای مناسب برای ذخیره مورد جستجو، عموماً یک شبکه استنتاج<sup>۱</sup> الگوهای شاهد برای تلفیق مجموعه داده‌های شاهد فضایی طراحی می‌گردد. شبکه استنتاج در واقع یک سری مراحل منطقی برای استخراج الگوهای شاهد اکتشافی و تلفیق آن‌ها می‌باشد که هر مرحله آن نشان دهنده یک فرضیه در مورد روابط بین مجموعه الگوهای پیش‌گو در نقشه‌های شاهد با کانی‌سازی است و در واقع ارائه دهنده روابط بین فرآیندهای کنترل کننده کانی‌سازی و الگوهای فضایی دلالت کننده حضور آن می‌باشند.

## ۲-۹- خلاصه و جمع‌بندی

خروجی انواع روش‌های داده‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی (جدول ۲-۱) وابسته به محل و تعداد اندیس‌های شناخته شده در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در این صورت اگر تعداد اندیس‌های شناخته شده کم باشد و یا عدم وجود ذخایر شناخته شده در قسمتی از منطقه مورد مطالعه به علت فعالیت اکتشافی کم‌تر و یا پنهان بودن ذخایر باشد، مدل پتانسیل معدنی تولید شده قدرت پیش‌بینی کافی نداشته و دارای اعتبار کم است. ضعف روش‌های مدل‌سازی دانش‌محور (جدول

<sup>۱</sup> Inference network

۲-۲)، به طور کلی عدم ثبات در تخصیص وزن به شواهد مختلف است که ممکن است از یک کارشناس به کارشناس دیگر متفاوت باشد. همچنین ممکن است تخصیص وزن به طرف قسمت‌هایی از منطقه مورد مطالعه که در آن‌ها بعضاً اندیس شناخته شده وجود دارد جهت‌دار گردد. بنابراین هر دو روش دانش‌محور و داده‌محور مدل‌سازی پتانسیل معدنی دارای معایبی بوده و همچنین روش‌های ترکیبی که از هر دو روش به طور هم‌زمان استفاده می‌کنند، طبیعتاً معایب هر دو روش را دارند که این موارد به تفصیل در فصل اول در بخش بیان مسئله مورد بحث قرار گرفت. بنابراین توسعه روش‌های جدید می‌تواند در راستای حل مشکلات و بهبود این روش‌ها مؤثر واقع گردد.

## فصل سوم

تحلیل فاکتوری مرحله‌ای (SFA) روشی بهبود یافته برای شناسایی اثرهای ژئوشیمیایی چند عنصری

### ۳-۱- مقدمه

تلفیق داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای با سایر داده‌های اکتشافی، در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به ویژه در روش دانش‌محور، یک موضوع بحث برانگیز می‌باشد. بنابراین در فصل حاضر با ارائه و به کارگیری روش جدید تجزیه و تحلیل فاکتوری مرحله‌ای (SFA) به برخی سوالات در خصوص استفاده از تحلیل فاکتوری در اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای پاسخ داده می‌شود. علاوه بر این، روش جدید ارائه شده موجب شدت بخشی به هاله‌های ژئوشیمیایی و تولید نقشه ژئوشیمی بهبود یافته شده است. بنابراین موضوع فصل حاضر تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای به منظور استنتاج یک ترکیب (یا ترکیبات) چند عنصری معرف و بهینه از یک ذخیره مورد جستجو است که بتوان از آن در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده نمود. به این منظور در ادامه ابتدا سوالات مطرح شده در خصوص تحلیل فاکتوری معمولی مطرح می‌شود. سپس روش SFA به عنوان یک روش جدید و بهبود یافته تشریح شده و در نهایت با اجرای آن در دو منطقه متفاوت با دو تیپ کانی‌سازی مختلف، کارایی روش و بهبود حاصل شده، اثبات و بارزسازی می‌گردد.

### ۳-۲- تحلیل فاکتوری مرحله‌ای

به منظور تولید و آماده‌سازی لایه شاهد ژئوشیمیایی قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، عموماً از تحلیل‌های چند متغیره ژئوشیمیایی برای استنتاج بهترین معرف یا معرف‌های چند عنصری کانی‌سازی مورد جستجو استفاده می‌شود (Chandrajith et al., 2001؛ Grunsky et al., 2009) زیرا تحلیل‌های چند متغیره می‌توانند اهمیت نسبی ترکیب‌های مختلف از متغیرهای (عناصر) ژئوشیمیایی را به نحو مطلوب‌تری ارزیابی کنند (Garrett and Grunsky 2001؛ Carranza 2004, 2010b؛ Grunsky et al. 2009). با توجه به این که کانی‌سازی یک پدیده کمیاب بوده و این تنها یکی از عوامل متعددی است که تغییرات عناصر را در رسوبات آبراهه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد

(Bonham-Carter et al. 1987؛ Carranza and Hale 1997)، استنتاج بهترین ترکیب معرف ژئوشیمیایی یک تیپ کانی‌سازی مشخص نیز یک چالش است. در این خصوص تحلیل فاکتوری، به عنوان یک روش چند متغیره، به طور گسترده‌ای در تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای استفاده می‌شود (Reimann et al., 2002؛ Kumru and Bakac, 2003؛ Helvoort et al., 2005). هدف تحلیل فاکتوری، تشریح تغییرات در یک مجموعه از داده‌های ژئوشیمیایی چند عنصری است. این کار از طریق کاهش ابعاد داده‌ها و متغیرها به تعدادی فاکتور صورت می‌گیرد که می‌تواند همراهی‌های پنهان بین عناصر را آشکار کند (Tripathi, 1979). با وجود استفاده گسترده از تحلیل فاکتوری، این روش هنوز بحث برانگیز بوده و در مورد آن سوالاتی مطرح است. Reimann et al., (2002) و همچنین Helvoort et al., (2005) سوالاتی را در خصوص استفاده از تحلیل فاکتوری شامل (۱) چند عامل معرف باید استخراج شود؟ (۲) کدام عناصر باید در هر فاکتور وجود داشته باشند؟ (۳) چگونه تعداد زیادی نقشه تک عنصری می‌توانند در قالب تعداد اندکی نقشه فاکتوری (کاهش تعداد متغیرها) نمایش داده شوند؟ مطرح کردند (Reimann et al., 2002؛ Helvoort et al., 2005). همچنین سوال دیگری که مطرح می‌گردد این است که چگونه می‌توان با کاربرد تحلیل فاکتوری موفقیت اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای را افزایش داد؟

تجزیه و تحلیل‌های چند متغیره عموماً به منظور به دست آوردن نحوه تغییرات گروهی عناصر، اجرا می‌گردد. از آن جا که عناصر همراه در کانسارهای گوناگون می‌توانند مختلف باشند از تجزیه و تحلیل‌های چند متغیره برای شناخت ارتباط بین عناصر استفاده می‌شود. بنابراین ماهیت تجزیه و تحلیل چند متغیره شناخت روابط میان چند عنصر است و در نتیجه با اجرای این تجزیه و تحلیل، همراهی‌های عناصری که با هم تغییر می‌کنند، تشخیص داده می‌شوند. شناخت ارتباط و وابستگی‌های متقابل میان عناصر گوناگون می‌تواند به شناخت دقیق‌تر تغییرات موجود در محیط‌های ژئوشیمیایی و تفسیر صحیح‌تر داده‌های ژئوشیمیایی کمک مؤثری بنماید. در ضمن تجمع ژنتیکی بعضی عناصر

ممکن است به عنوان راهنمای مستقیمی در تفسیر نوع نهشته‌ای که احتمالاً در ناحیه وجود دارد به کار رود. البته باید توجه داشت که تجمع بعضی از عناصر ممکن است دلالت بر وجود آنومالی‌هایی بی‌اهمیت داشته باشد. بنابراین اگر ترکیبی از مقادیر یک گروه از عناصر معرف به جای مقدار یک عنصر خاص به کار گرفته شود، متغیرها و اثرهای ژئوشیمیایی معرف در اطراف توده‌های کانساری بهتر مشخص می‌شوند و در ضمن اثر خطاهای تصادفی در آنها به حداقل می‌رسد. به طور کلی دو مزیت عمده در تحلیل‌های چند متغیره را می‌توان انطباق بیش‌تر با شواهد ساختمانی و زمین‌شناسی ذخایر معدنی و همچنین کاهش خطاهای تصادفی و تعداد متغیرها بیان نمود. بنابراین با انجام بررسی‌های چند متغیره و نیز با بررسی زمین‌شناسی در یک منطقه، می‌توان تصمیم‌گیری‌های اکتشافی و طراحی اکتشافات بعدی را با دقت بیش‌تری انجام داد. تجزیه و تحلیل فاکتوری یکی از روش‌های چند متغیره تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی می‌باشد. تجزیه و تحلیل فاکتوری بین مجموعه‌ای از متغیرها که ظاهراً بی‌ارتباط هستند، یک رابطه خطی، تحت عنوان فاکتور برقرار می‌کند و یکی از اهداف اصلی آن کاهش ابعاد داده‌هاست. بنابراین پس از انجام تجزیه و تحلیل فاکتوری، تعداد متغیرهای به دست آمده (تعداد فاکتورها) کمتر از تعداد متغیرهای اصلی می‌باشد. فرض اساسی در این روش، وجود ارتباط بین متغیرهاست که این ارتباط در قالب یک فاکتور ظاهر می‌شود و به طور کلی هدف از تجزیه و تحلیل فاکتوری عبارت است از تعیین متغیرهای کنترل‌کننده اصلی در بین یک سری داده‌های ژئوشیمیایی یا به عبارت دیگر یافتن حداقل تعداد متغیرهایی است که بیشترین تغییرات مشاهده شده را در بین سری داده‌ها نشان می‌دهند. تحلیل فاکتوری یک روش آماری است که از ماتریس کل داده‌ها یعنی به عنوان مثال از ماتریس همبستگی یا واریانس-کواریانس بین متغیرها برای تولید یک رابطه خطی (فاکتور) استفاده می‌کند. در رابطه خطی هر متغیر (عنصر) دارای ضریبی است که اهمیت آن را در فاکتور مورد نظر نشان می‌دهد. اگرچه به خوبی شناخته شده است که داده‌های ژئوشیمیایی تقریباً هرگز توزیع نرمال نشان نمی‌دهند (Reimann and Filzmoser 2000)، ولی مانند بسیاری از روش‌های آماری، تحلیل فاکتوری باید بر روی داده‌های نرمال یا تقریباً نرمال صورت گیرد. به علاوه

داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای از نوع داده‌های ترکیبی هستند یعنی داده‌هایی که در آن متغیرها مستقل از هم نبوده و یک قسمتی از کل هستند (Filzmoser et al. 2009a)؛ Carranza 2011) یعنی منشأ مواد تشکیل دهنده یک نمونه رسوب آبراهه‌ای شامل تمام مواد بالادست است. بنابراین یک مرحله فرآیند نرمال‌سازی باید بر روی داده‌ها صورت گیرد تا توزیع داده‌ها به نرمال نزدیک شوند (Reimann and Filzmoser 2000؛ Reimann et al. 2002). (Filzmoser et al. 2009a) در خصوص استفاده از تبدیل لگاریتمی و تبدیل نسبت لگاریتم ایزومتريک<sup>۱</sup> (Egozcue et al. 2003) بحث کرده و ثابت نموده‌اند که تبدیل نسبت لگاریتم ایزومتريک می‌تواند مجموعه داده‌های با توزیع تقریباً نرمال حاصل کند. در این خصوص محققین دیگری نیز در مورد برتری‌های تبدیل ایزومتريک در برابر سایر تبدیل‌ها بر روی داده‌های ژئوشیمیایی بحث نموده‌اند (Aitchison and Egozcue 2005؛ Reimann et al. 2008؛ Templ et al. 2008). همچنین Carranza (2011) نشان داده است که تبدیل ایزومتريک در مقایسه با تبدیل لگاریتمی و سایر تبدیل‌ها، نتایج بهتری را در خصوص شناسایی متغیرهای چند عنصری ژئوشیمیایی منعکس کننده کانی‌سازی به دست می‌دهد. در مطالعه حاضر از تبدیل نسبت لگاریتم ایزومتريک برای تبدیل داده‌ها به یک توزیع تقریباً نرمال، قبل از اجرای تحلیل فاکتوری استفاده شده است. تبدیل نسبت لگاریتم ایزومتريک نیز مانند بسیاری دیگر از تبدیل‌ها یک رابطه است که بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. این تبدیل در رابطه (پ ۱) پیوست نشان داده شده است. در مطالعه حاضر از روش تحلیل فاکتوری کلاسیک<sup>۲</sup> استفاده شده است یعنی در اجرای تحلیل فاکتوری، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۳</sup> به عنوان روش استخراج، از روش واریماکس<sup>۴</sup> (Kaiser, 1958) برای دوران داده‌ها، از مقادیر ویژه<sup>۵</sup> بزرگ‌تر از ۱ برای تعداد فاکتورها و همچنین با توجه به این که بعضی از محققین مقدار ۰/۶ را به عنوان یک حد آستانه با قابلیت اعتماد بیش تر (Treiblmaier and Filzmoser 2010؛ Helvoort et al. 2005) معرفی

<sup>1</sup> Isometric logratio (ilr) transformation

<sup>2</sup> Classic

<sup>3</sup> Principal component analysis (PCA)

<sup>4</sup> Varimax

<sup>5</sup> Eigenvalues

نموده‌اند، از مقدار ۰/۶ به عنوان حد آستانه برای انتخاب عناصر شرکت کننده در هر فاکتور استفاده شده است. از آنجایی که در مطالعه حاضر در معادلات ریاضی و آماری تحلیل فاکتوری هیچ تغییری داده نشده و فقط نحوه استفاده از آن بهبود یافته است، همچنین با توجه به این که مباحث مربوط به تحلیل فاکتوری، انواع آن و پارامترهایی که باید برای اجرای آن در نظر گرفته شوند، بسیار گسترده بوده و خارج از موضوع رساله است و نیز نظر به این که بحث در مورد انواع روش‌های نرمال‌سازی از اهداف رساله حاضر دور است در این جا از توضیح بیشتر این موارد صرفه‌نظر می‌گردد و البته منابع زیادی وجود دارد که برای اطلاعات بیشتر می‌توان به آن‌ها رجوع نمود. انواع روش‌های تحلیل فاکتوری و انواع گزینه‌هایی که در اجرای تحلیل فاکتوری قابل انتخاب هستند در منابع مختلفی از جمله (Reimann and Filzmoser (2000)؛ Reimann et al. (2002)؛ Helvoort et al. (2005)؛ Filzmoser and Hron (2009)؛ Filzmoser et al. (2009a, 2009b, 2009c, 2010) و Treiblmaier and Filzmoser (2010) قابل دسترسی می‌باشند. در روش تحلیل فاکتوری بهبود یافته در فصل حاضر (SFA)، به منظور استنتاج بهترین ترکیب (های) چند عنصری معرف یک تیپ کانی‌سازی مورد جستجو، از دو فاز اصلی تحت عنوان "استخراج فاکتورهای تمیز"<sup>۱</sup> و "استنتاج اثر(های) چند عنصری با اهمیت و محاسبه امتیازات فاکتوری قابل اعتماد" استفاده شده است. هر یک از فازهای اصلی فوق ممکن است خود شامل چند مرحله داخلی باشند. این دو فرآیند به طور کلی در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

### ۳-۲-۱- استخراج فاکتورهای تمیز

در این مرحله ابتدا تحلیل فاکتوری بر روی مجموعه داده‌های اولیه شامل تمام عناصر انتخاب شده، اجرا می‌شود. این مرحله در واقع تحلیل فاکتوری مرحله اول می‌باشد. در خروجی تحلیل فاکتوری مرحله اول، عناصری که با توجه به حد آستانه انتخاب شده در هیچ فاکتوری مشارکت نمی‌کنند،

---

<sup>۱</sup> Clean factors



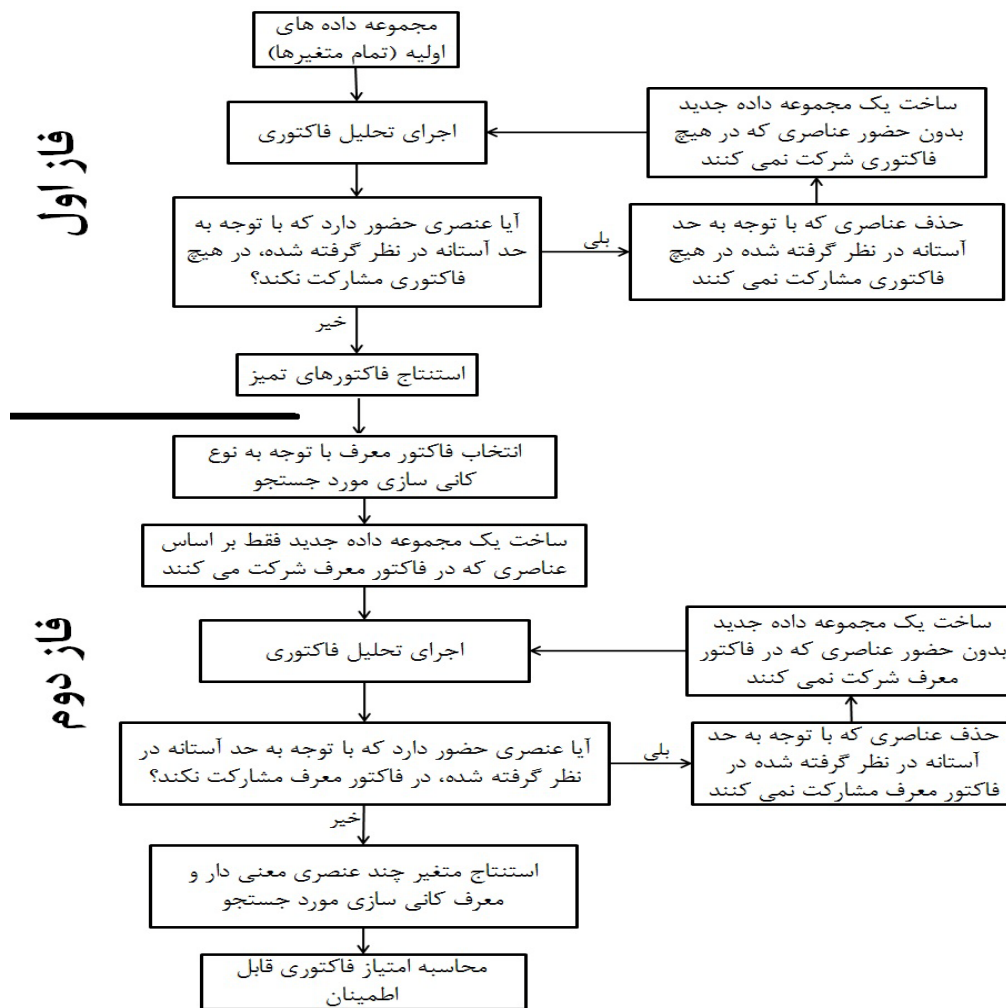
حذف می‌شوند زیرا حضور یا عدم حضور حتی یک عنصر در مجموعه داده‌های ورودی، می‌تواند نتیجه را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار دهد (Reimann et al., 2002). در واقع این عناصر را می‌توان عناصر مزاحم ژئوشیمیایی<sup>۱</sup> و مختل کننده تحلیل فاکتوری نامید. بنابراین این عناصر باید از مجموعه داده‌ها حذف شوند و تحلیل فاکتوری مجدداً اجرا شود که در واقع این اجرای دوم، تحلیل فاکتوری مرحله دوم نامیده می‌شود و خروجی آن ممکن است فاکتورهای جدیدی را به دست دهد که در آن‌ها همراهی‌های عناصر، ضرایب آن‌ها و همچنین مقدار امتیاز فاکتوری هر نمونه می‌تواند متفاوت باشد (Helvoort et al. 2005). در خروجی تحلیل فاکتوری مرحله دوم، اگر همچنان عناصری وجود داشته باشند که با توجه به حد آستانه در نظر گرفته شده، نتوانند در هیچ فاکتوری مشارکت داشته باشند، باید از مجموعه داده‌ها حذف شده و مجدداً تحلیل فاکتوری در یک مرحله جدید اجرا شوند. در این خصوص اگر در خروجی تحلیل فاکتوری مرحله دوم، عنصری وجود نداشته باشد که نتوان آن را در هیچ فاکتوری طبقه‌بندی نمود، پایان فاز اول تحلیل فاکتوری بوده و فاکتورهای استخراج شده، فاکتورهای تمیز خواهند بود که در آنها عناصر مزاحم وجود ندارد (شکل ۳-۱).

### ۳-۲-۲- استخراج ترکیب چند عنصری معرف با اهمیت

علاوه بر مسئله حضور عناصر مزاحم ژئوشیمیایی که در بالا ذکر شد، هنوز به خاطر ماهیت روش تحلیل فاکتوری، مشکل دیگری وجود دارد. با توجه به این‌که در تحلیل فاکتوری از ماتریس کل داده‌ها برای محاسبه ضرایب و همراهی‌ها استفاده می‌شود، در محاسبه مقادیر ضرایب عناصر در هر فاکتور و همچنین امتیازات فاکتوری مربوطه، مقادیر عناصری که در سایر فاکتورها حضور دارند نیز تأثیر گذار بوده و خود باعث فاصله گرفتن نتایج از مقادیر واقعی می‌گردند. یعنی همچنان به عنوان مزاحم ژئوشیمیایی مطرح هستند زیرا این عناصر ممکن است به عنوان معرف یا ردیاب کانی‌سازی مورد جستجو مطرح نباشند. بنابراین در فاز دوم از روش SFA باید با توجه به نوع کانی‌سازی مورد

<sup>۱</sup> Geochemical noise

جستجو، یک یا چند فاکتور به عنوان فاکتور پیش گو و معرف کانی سازی مورد جستجو انتخاب شوند. این فاکتور یا فاکتورهای پیش گو و معرف، فاکتورهای "کلیدی" نامیده می شوند. سپس باید با ایجاد یک مجموعه داده جداگانه برای هر یک از فاکتورهای کلیدی، مجدداً تحلیل فاکتوری منحصراً بر روی مجموعه داده جدید اجرا گردد و همچنان مانند فاز اول اگر عنصر مزاحمی حضور داشت، حذف شود و تحلیل تکرار شود (شکل ۳-۱). این روش باعث تولید تعداد کمتری از فاکتورهای (ترکیب‌های چند متغیره) معرف می شود. در صورتی که تعداد کمتری فاکتور استنتاج شود، تفسیر، نتایج بهتری به دنبال خواهد داشت (Reimann et al. 2002). اجرای روش SFA و نتایج به دست آمده بر روی داده‌های مطالعات موردی در ادامه تشریح می شود.



شکل ۳-۱. فرآیند کلی روش SFA

### ۳-۳- کانی سازی فلورین تیپ دره می سی سی پی

به منظور ارزیابی روش SFA، برای یک کانی سازی غیر فلزی در یک منطقه خوب اکتشاف نشده (فاقد اندیس های شناخته شده به تعداد زیاد)، این روش بر روی مجموعه داده های نمونه های رسوب آبراهه ای در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ پل سفید در استان مازندران اجرا شد و پس از اجرای چهار مرحله، بهترین ترکیب معرف کانی سازی فلورین شامل عناصر Pb, Ag, Zn, Ba و Sb استخراج گردید. نتایج اجرای چهار مرحله تحلیل فاکتوری در روش SFA در جدول ۱-۳ آمده است.

جدول ۱-۳. روش SFA برای استنتاج عامل چند عنصری پیش گوی کانی سازی فلورین

فاز اول							فاز دوم				
مرحله اول			مرحله دوم				مرحله سوم		مرحله چهارم		
عنصر	F1	F2	F3	عنصر	F1	F2	F3	عنصر	F1	عنصر	F1
Pb	0.418	<b>0.792</b>	-0.040	Pb	0.377	<b>0.830</b>	-0.011	Pb	<b>0.900</b>	Pb	<b>0.921</b>
Ag	0.011	<b>0.817</b>	0.224	Ag	-0.002	<b>0.799</b>	0.256	Ag	<b>0.784</b>	Ag	<b>0.759</b>
Zn	-0.035	<b>0.853</b>	0.240	Zn	-0.079	<b>0.867</b>	0.269	Zn	<b>0.824</b>	Zn	<b>0.784</b>
Ba	<b>0.687</b>	0.588	-0.261	Ba	<b>0.671</b>	<b>0.615</b>	-0.238	Ba	<b>0.760</b>	Ba	<b>0.824</b>
Sb	0.555	<b>0.708</b>	-0.107	Sb	0.544	<b>0.717</b>	-0.074	Sb	<b>0.840</b>	Sb	<b>0.860</b>
Cu	<b>0.810</b>	0.239	0.342	Cu	<b>0.790</b>	0.261	0.355	Mo	0.590	Eigenvalue	3.458
Ni	<b>0.669</b>	0.238	<b>0.605</b>	Ni	<b>0.675</b>	0.216	<b>0.622</b>	Eigenvalue	3.734	Var.	69.170
Mo	-0.145	<b>0.637</b>	0.463	Mo	-0.159	<b>0.613</b>	0.498	Var.	62.232	Cum.Var.	69.170
Sn	0.139	0.198	<b>0.862</b>	Sn	0.124	0.172	<b>0.863</b>	Cum.Var.	62.232		
Co	<b>0.686</b>	0.223	0.549	Co	<b>0.684</b>	0.214	0.565				
Cr	<b>0.843</b>	-0.037	-0.131	Cr	<b>0.856</b>	-0.026	-0.126				
V	<b>0.907</b>	0.094	0.060	V	<b>0.915</b>	0.102	0.071				
Mn	<b>0.866</b>	0.080	-0.096	Mn	<b>0.871</b>	0.097	-0.086				
Sr	-0.587	0.586	0.121	As	<b>0.744</b>	0.198	0.129				
As	<b>0.723</b>	0.216	0.105	Bi	<b>0.620</b>	0.031	0.203				
Bi	<b>0.609</b>	0.039	0.196	W	<b>0.696</b>	-0.034	0.165				
W	<b>0.713</b>	-0.067	0.171	Eigenvalue	7.519	2.877	1.574				
Au	0.561	-0.029	0.151	Var.	46.997	17.981	9.836				
Eigenvalue	7.816	3.485	1.582	Cum.Var.	46.997	64.978	74.813				
Var.	43.422	19.364	8.792								
Cum.Var.	43.422	62.786	71.577								

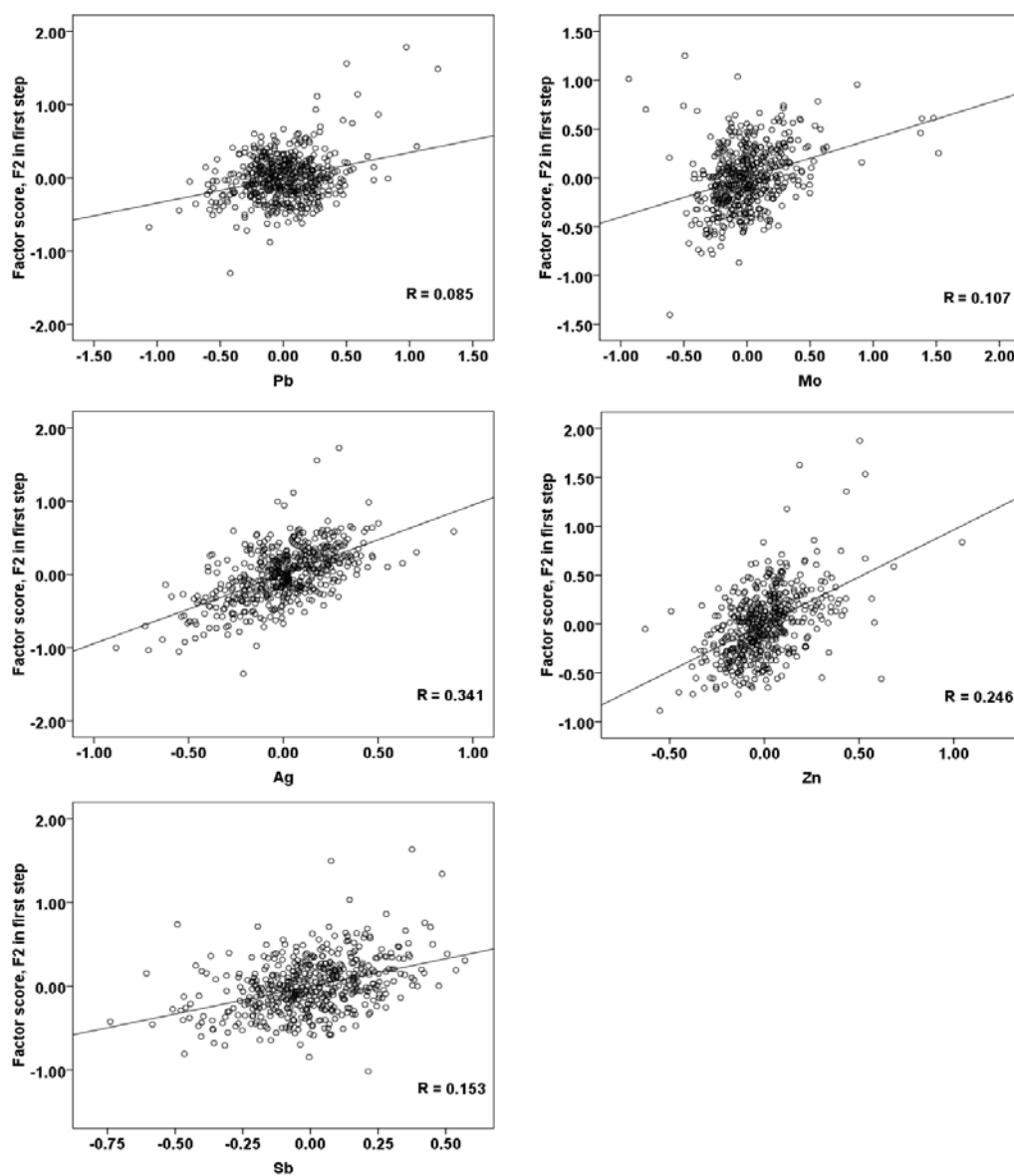
همان طور که در جدول ۱-۳ مشاهده می شود، مرحله اول و مرحله دوم تحلیل فاکتوری در واقع همان فاز اول یعنی حذف اولیه عناصر مزاحم و تولید فاکتورهای تمیز می باشند. در این حالت در خروجی مرحله اول تحلیل فاکتوری در جدول ۱-۳، فاکتور اول (F1) شامل عناصر As-Ba-Cu-W-V-Cr-Co- Mn-Ni-Bi است. فاکتور دوم (F2) همراهی عناصر Zn-Pb-Ag-Sb-Mo را نشان می دهد و عناصر

Ni-Sn نیز در فاکتور سوم (F3) مشارکت بالا دارند. به علت حضور عناصر Zn, Pb, Ag, Sb در فاکتور دوم (F2)، این فاکتور می‌تواند به عنوان عامل چند متغیره معرف برای کانی‌سازی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی استفاده شود. بنابراین محل‌های (نمونه‌های) دارای مقادیر بالای امتیاز فاکتوری دوم (F2) در مرحله اول تحلیل فاکتوری می‌توانند برای اکتشافات بیش‌تر مورد توجه قرار گیرند. ولی طبق روش SFA، فاکتور دوم (F2) در خروجی تحلیل فاکتوری مرحله اول در جدول ۱-۳، یک فاکتور بهینه نیست زیرا Ba که یک عنصر معرف مهم برای کانی‌سازی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی است (Sasmaz et al. 2005؛ Bouch et al. 2006؛ Daneshfar et al. 2006؛ Sánchez et al. 2009؛ Souissi et al. 2010) در فاکتور دوم مشارکت خوبی ندارد. همچنین در خروجی مرحله اول تحلیل فاکتوری ۲ عنصر Sr و Au در هیچ فاکتوری با توجه به حد آستانه در نظر گرفته شده مشارکت معنی‌داری ندارند. بنابراین با حذف این دو عنصر از مجموعه داده‌ها و اجرای مجدد تحلیل فاکتوری، در خروجی تحلیل فاکتوری مرحله دوم، مشارکت Ba با فاکتور دوم بیش‌تر و بارزتر می‌شود (جدول ۱-۳). در این حالت در خروجی مرحله دوم تحلیل فاکتوری، چون هیچ عنصری وجود ندارد که نتوان آن را در هیچ یک از سه فاکتور طبقه‌بندی نمود، بنابراین فاکتورهای اول، دوم و سوم (F1، F2 و F3) در خروجی مرحله دوم تحلیل فاکتوری در واقع فاکتورهای تمیز هستند که عناصر مزاحم از آن‌ها حذف شده‌اند و نتایج نسبت به مرحله اول قابل اعتمادتر هستند.

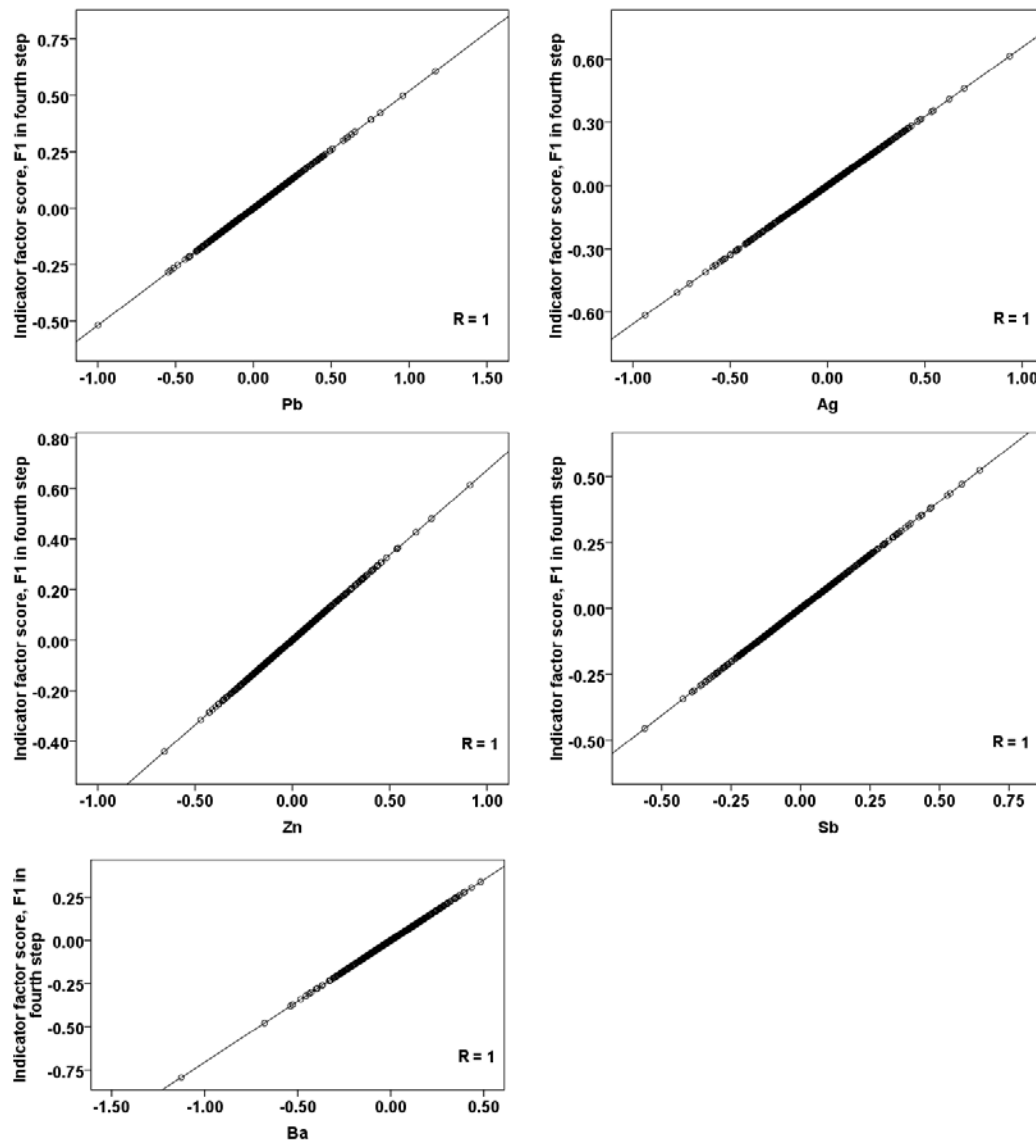
پس از استخراج فاکتورهای تمیز باید فاکتور یا فاکتورهایی که می‌توانند با توجه به نوع کانی‌سازی مورد جستجو، به عنوان فاکتور کلیدی و معرف باشند، انتخاب شوند. در مورد کانی‌سازی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی، فاکتور دوم (F2) در خروجی مرحله دوم) بهترین عامل معرف چند متغیره و فاکتور کلیدی می‌باشد (Hill et al. 2000؛ Cardellach et al. 2002؛ Pannalal et al. 2003؛ Partida et al. 2003؛ Sánchez et al. 2009؛ Souissi et al. 2010). ولی از آن‌جایی که مقادیر عناصر مشارکت‌کننده در سایر فاکتورها نیز در محاسبه ضرایب و امتیاز فاکتوری نمونه‌ها در فاکتور دوم نقش دارند بنابراین هنوز عناصر مزاحم به طور کامل حذف نشده‌اند. به عنوان مثال در خروجی مرحله

اول و دوم تحلیل فاکتوری عناصر Cr و W به طور مثبتی در فاکتور اول (F1) مشارکت دارد ولی با فاکتور دوم (F2) مشارکت منفی دارند بنابراین مقادیر ضرایب و امتیازات فاکتوری در فاکتور دوم تحت تأثیر مقدار این عناصر قرار می‌گیرند در حالی که این عناصر برای فاکتور دوم عناصر مزاحم می‌باشند پس هنوز فاکتور دوم به طور کامل بهینه نشده است. بنابراین در فاز دوم روش SFA ابتدا مجموعه داده‌ای فقط با حضور عناصر مشارکت کننده در فاکتور دوم (در خروجی مرحله دوم تحلیل فاکتوری)، با توجه به حد آستانه در نظر گرفته شده، ساخته می‌شود سپس تحلیل فاکتوری مرحله سوم، فقط بر روی مجموعه داده جدید ساخته شده با عناصر مشارکت کننده در فاکتور کلیدی اجرا می‌گردد زیرا در هر صورت استنتاج حداقل تعداد فاکتور، تفسیر را ساده‌تر می‌کند (Reimann et al. 2002). همان‌طور که در خروجی تحلیل فاکتوری مرحله سوم در جدول ۳-۱ مشاهده می‌شود عنصر Mo مقدار مشارکت بالایی با فاکتور کلیدی ندارد در حالی که در فاکتور دوم از مرحله دوم تحلیل فاکتوری مشارکت خوبی داشت. این نشان می‌دهد که روش SFA می‌تواند عناصر معرف کاذب را نیز شناسایی کند. بنابراین با حذف عنصر Mo از مجموعه داده‌ها و اجرای مجدد تحلیل فاکتوری در مرحله چهارم، خروجی، همراهی عناصر Pb-Sb-Ba-Zn-Ag را نشان می‌دهد که تمام آن‌ها معرف خوبی برای کانی‌سازی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی می‌باشند (Hill et al. 2000؛ Cardellach et al. 2002؛ Pannalal et al. 2003؛ Partida et al. 2003؛ Sasmaz et al. 2005؛ Bouch et al. 2006؛ Daneshfar et al. 2006؛ Sánchez et al. 2009؛ Souissi et al. 2010). علاوه بر مطالب فوق جدول ۳-۱ نشان می‌دهد که مجموع تغییرات تحت پوشش برای فاکتور معرف (F2) از ۱۹ درصد (برای فاکتور دوم در مرحله اول تحلیل فاکتوری) به ۶۹ درصد (برای فاکتور اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری یعنی همان فاکتور کلیدی معرف) افزایش یافته است. بنابراین با توجه با این که مجموع تغییرات تحت پوشش بالاتر اهمیت بیشتری دارند (Helvoort et al. 2005؛ Treiblmaier and Filzmoser 2010) پس فاکتور چند عنصری استنتاج شده در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری از اهمیت بیشتری برخوردار است. به منظور بارزسازی بیش‌تر کارایی روش SFA نسبت به

تحلیل فاکتوری معمولی، نمودار پراکندگی مقادیر عناصر ورودی در مقابل امتیازات فاکتوری دوم در مرحله اول تحلیل فاکتوری (F2 در مرحله اول، قبل از حذف عناصر مزاحم) و همچنین نمودار پراکندگی مقادیر عناصر ورودی در مقابل امتیازات فاکتوری اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری (F1 در مرحله چهارم، بعد از حذف عناصر مزاحم) با هدف مقایسه ترسیم شد که به ترتیب در شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۳. پراکندگی مقادیر عناصر مشارکت کننده در فاکتور دوم (F2)، در خروجی مرحله اول تحلیل فاکتوری، در مقابل امتیازات فاکتوری مربوطه



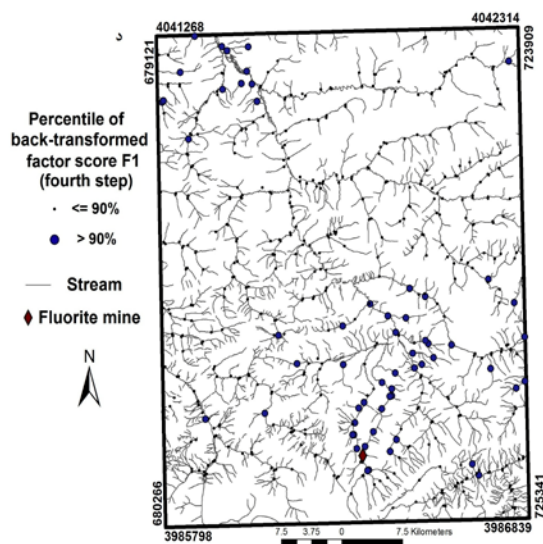
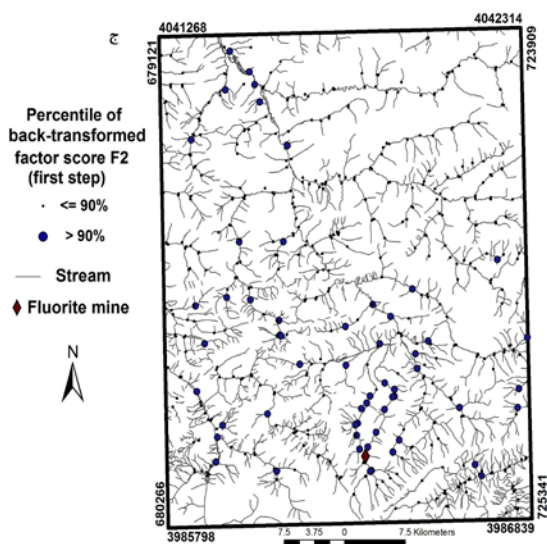
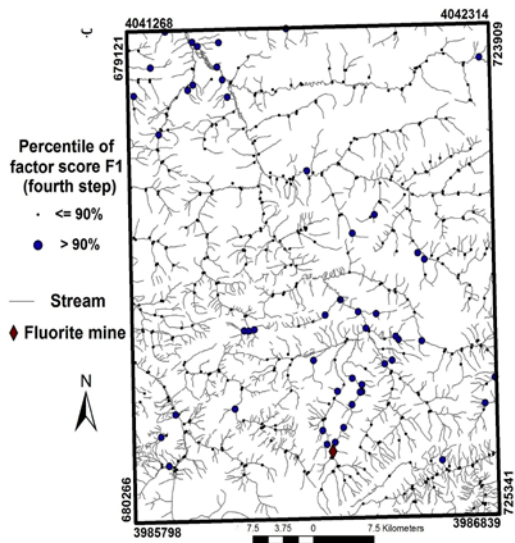
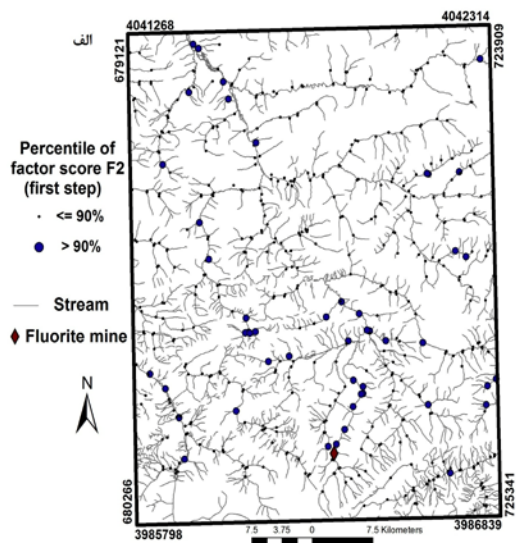
شکل ۳-۳. پراکندگی مقادیر عناصر مشارکت کننده در فاکتور اول (F1)، در خروجی مرحله چهارم (مرحله نهایی) تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، در مقابل امتیازات فاکتوری مربوطه

مقایسه دو شکل ۲-۳ و ۳-۳ نشان می‌دهد که مقادیر عناصر ورودی همبستگی ضعیفی با مقادیر امتیازات فاکتوری F2 در مرحله اول تحلیل فاکتوری دارند و این در حالی است که مقادیر ورودی عناصر مشارکت کننده در فاکتور معرف (F1 در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری) با مقادیر امتیازات فاکتوری مربوطه همبستگی بسیار خوبی دارند. بنابراین کارایی روش SFA در شناسایی و حذف عناصر مزاحم ژئوشیمیایی و استنتاج فاکتور کلیدی معرف کانی‌سازی مورد جستجو به اثبات می‌رسد. پس نواحی دارای نمونه‌های با مقدار امتیاز فاکتوری بالا، از فاکتور اول در خروجی مرحله

چهارم تحلیل فاکتوری برای اکتشافات بعدی قابل اعتمادتر هستند زیرا عناصر مزاحم ژئوشیمیایی شناسایی و حذف شده‌اند.

توزیع فضایی مقادیر امتیازات فاکتوری برای فاکتور دوم در مرحله اول تحلیل فاکتوری و همچنین فاکتور اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. برای مقایسه نتایج روش SFA و تحلیل فاکتوری معمولی مقدار معادل ۹۰ درصد فراوانی تجمعی برای جداسازی نمونه‌های آنومالی انتخاب شده است. همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، تعدادی نمونه که بر اساس فاکتور اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری جزء نمونه‌های آنومالی طبقه‌بندی شده‌اند در نقشه به‌دست آمده از فاکتور دوم در مرحله اول تحلیل فاکتوری جزء نمونه‌های زمینه طبقه‌بندی گردیده‌اند و برعکس. این در حالی است که شدت آنومالی در پایین دست معدن فلورین در شکل ۳-۴ ب بیش‌تر از شکل ۳-۴ الف است. یعنی تعداد نمونه‌های آنومالی مجاور هم برای فاکتور اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری بیش‌تر از فاکتور دوم در مرحله اول تحلیل فاکتوری است که این مسئله در کل نقشه مشاهده می‌شود. بنابراین آنومالی‌های حاصله از نتایج فاکتور اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری برای تولید یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی بیش‌تر قابل اعتماد است. در شکل ۳-۴ ج و د نیز توزیع فضایی مقادیر برگشت داده‌شده به فضای اولیه، برای امتیازات فاکتوری F2 در مرحله اول تحلیل فاکتوری (یعنی تحلیل فاکتوری معمولی) و همچنین فاکتور F1 در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری (یعنی خروجی روش SFA) نشان داده شده است. از آن‌جا که تحلیل فاکتوری پس از انتقال داده‌های اولیه اجرا گردید (انتقال داده‌ها با استفاده از تبدیل نسبت لگاریتم ایزومتریک)، در این قسمت دوباره داده‌ها به فضای اولیه برگشت داده شدند تا در هر دو صورت (مقادیر انتقال یافته اولیه و همچنین مقادیر برگشت داده شده) مقایسه صورت گیرد. نتایج مقایسه شکل‌های ۳-۴ ج و د نیز مانند مقایسه شکل‌های ۳-۴ الف و ب می‌باشد که مجدداً برتری روش SFA نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی اثبات می‌گردد.





شکل ۳-۴. توزیع فضایی مقادیر امتیازات فاکتوری به صورت نمادین (نقطه‌ای) الف) برای فاکتور دوم در مرحله اول تحلیل فاکتوری ب) برای فاکتور اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری ج) برای مقادیر برگشت داده شده فاکتور دوم در مرحله اول تحلیل فاکتوری د) برای مقادیر برگشت داده شده فاکتور اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری

### ۳-۴- کانی‌سازی تیپ مس پرفیری

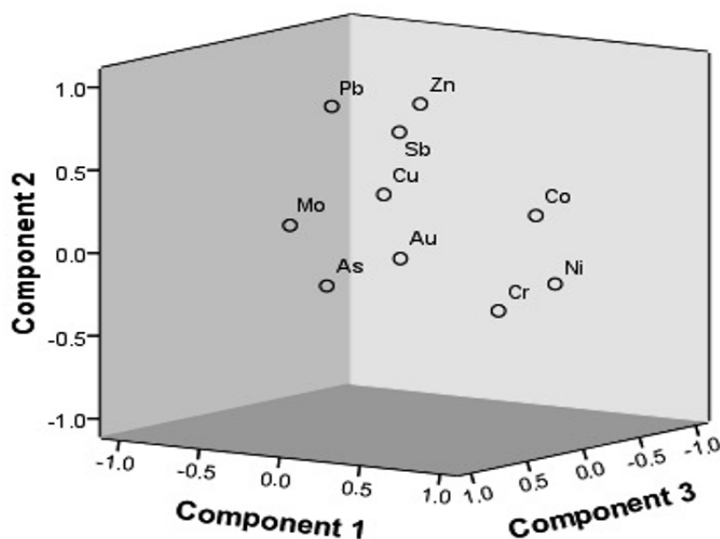
به منظور ارزیابی روش SFA، برای یک کانی‌سازی فلزی، این روش بر روی مجموعه داده‌های حاصل از نتایج آنالیز ۱۸۰۴ نمونه رسوب آبراهه‌ای در ورقه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ ساردویه و بافت در استان کرمان اجرا شد. از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه تعداد ۳۲ اندیس شناخته شده وجود دارد، از این

اندیس‌ها به عنوان نمونه‌های تست، ارزیابی و مقایسه دو روش SFA و تحلیل فاکتوری معمولی استفاده شد. در جدول ۲-۳ نتایج تحلیل فاکتوری مرحله اول آورده شده است.

جدول ۲-۳. نتایج تحلیل فاکتوری مرحله اول (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)

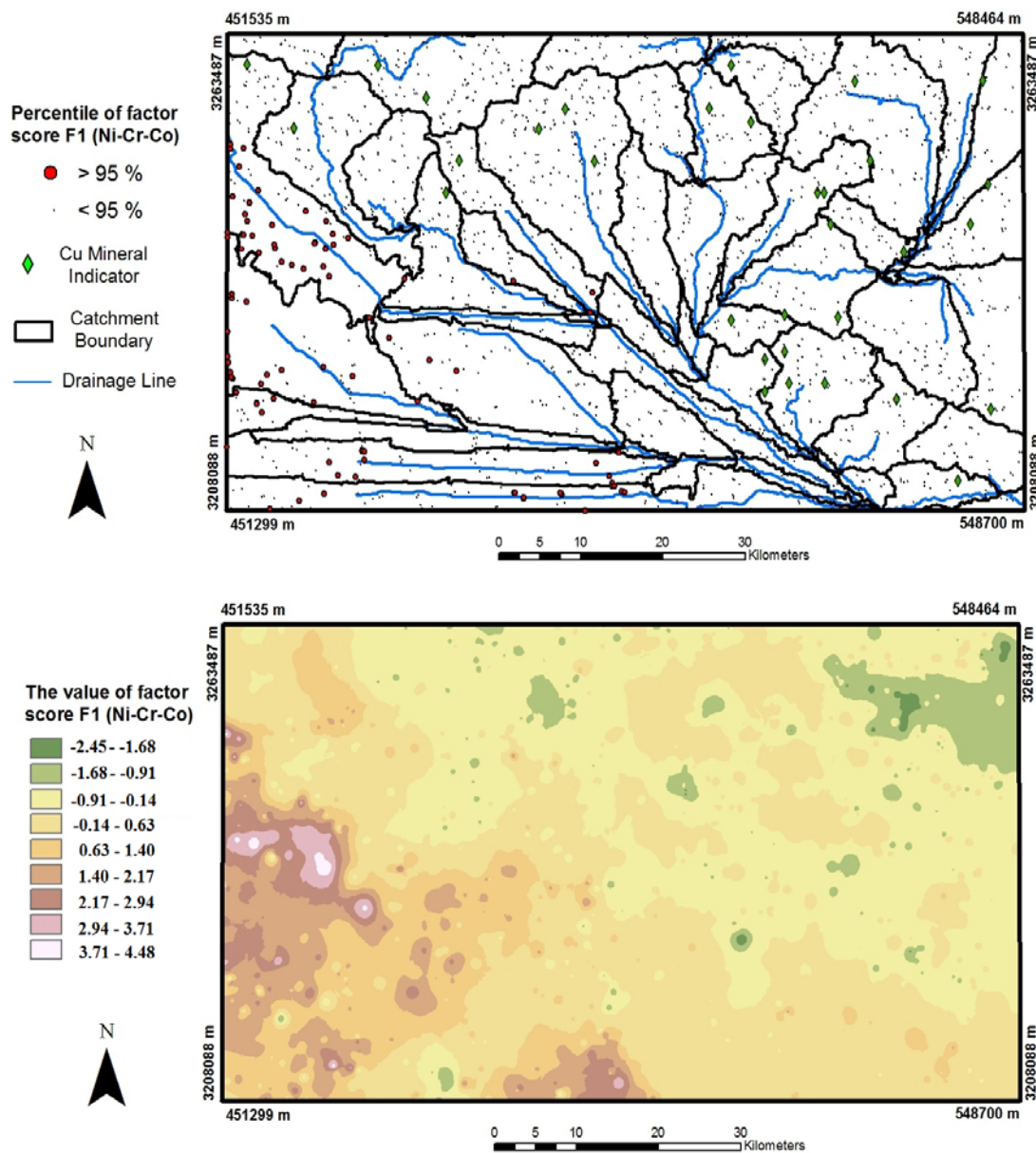
	فاکتورها			
	F1	F2	F3	F4
Zn	.132	<b>.872</b>	.048	.121
Pb	-.445	<b>.794</b>	.012	-.033
Cu	.017	.337	.209	<b>.751</b>
As	.122	-.109	<b>.867</b>	-.065
Sb	-.419	.559	-.553	.179
Mo	-.178	.212	<b>.766</b>	.162
Au	-.105	-.108	-.112	<b>.806</b>
Ni	<b>.842</b>	-.170	-.137	-.207
Cr	<b>.813</b>	-.268	.325	-.198
Co	<b>.785</b>	.250	-.048	.398
Eigen-value	3.192	1.896	1.647	1.112
Variance (%)	31.9	18.9	16.5	11.1
Cumulative variance (%)	31.9	50.8	67.3	78.4

همان‌طور که از جدول ۲-۳ مشخص است با توجه به حد آستانه در نظر گرفته شده (۰/۶) چهار فاکتور در ابتدا معرفی شده‌اند. فاکتور اول (F1) شامل عناصر Ni-Cr-Co، فاکتور دوم (F2) شامل عناصر Zn-Pb، فاکتور سوم (F3) شامل عناصر As-Mo و فاکتور چهارم (F4) با مشارکت بالای عناصر Cu-Au مشخص می‌شود. برای نمایش بهتر تعداد فاکتورهای استخراج شده، همراهی عناصر در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.

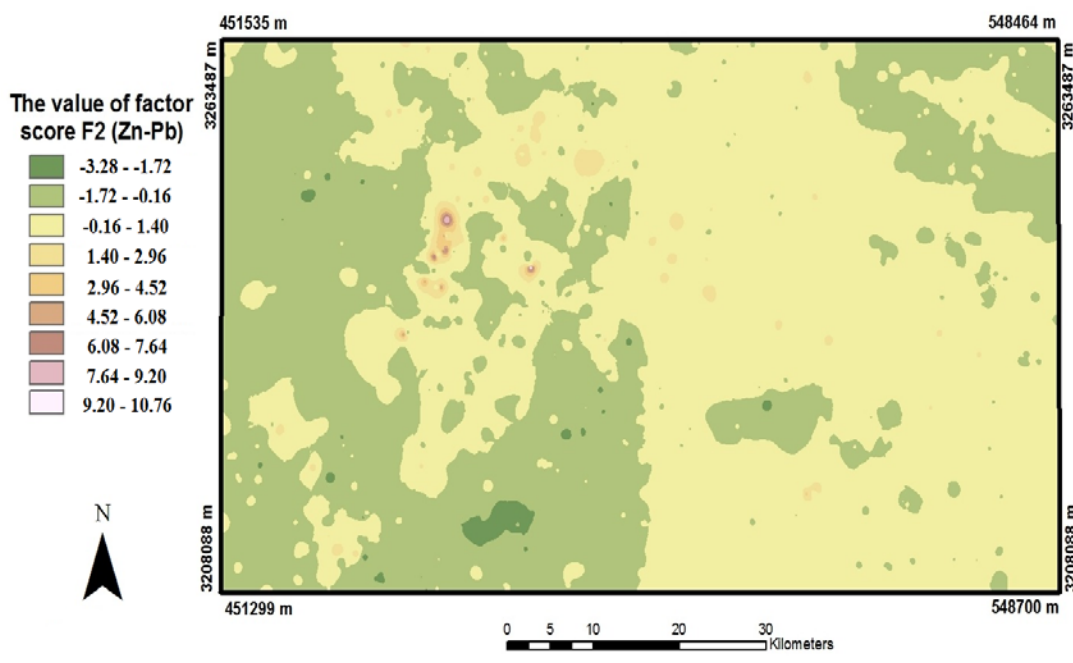
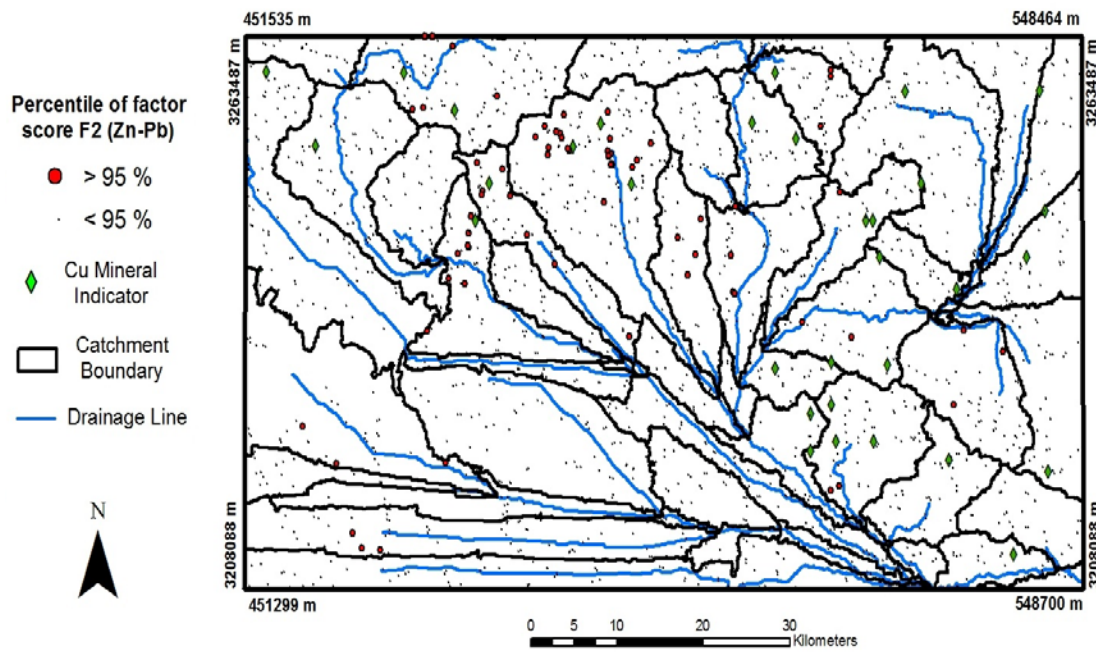


شکل ۳-۵. همراهی فضایی عناصر در مرحله اول تحلیل فاکتوری (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)

نقشه پراکندگی امتیازات فاکتوری برای فاکتورهای اول تا چهارم به ترتیب در شکل‌های ۳-۶ تا ۳-۹ به دو صورت نمادین و درونی‌یابی شده نشان داده شده است. با توجه به این‌که هدف از مطالعه حاضر در این قسمت ارزیابی روش SFA و مقایسه آن با تحلیل فاکتوری معمولی است، حد فراوانی ۹۵ درصد برای جداسازی آنومالی از زمینه در نظر گرفته شده است. استفاده از نقشه‌های درونی‌یابی شده فقط به منظور نمایش شدت آنومالی‌ها و مقایسه نقشه‌ها می‌باشد.

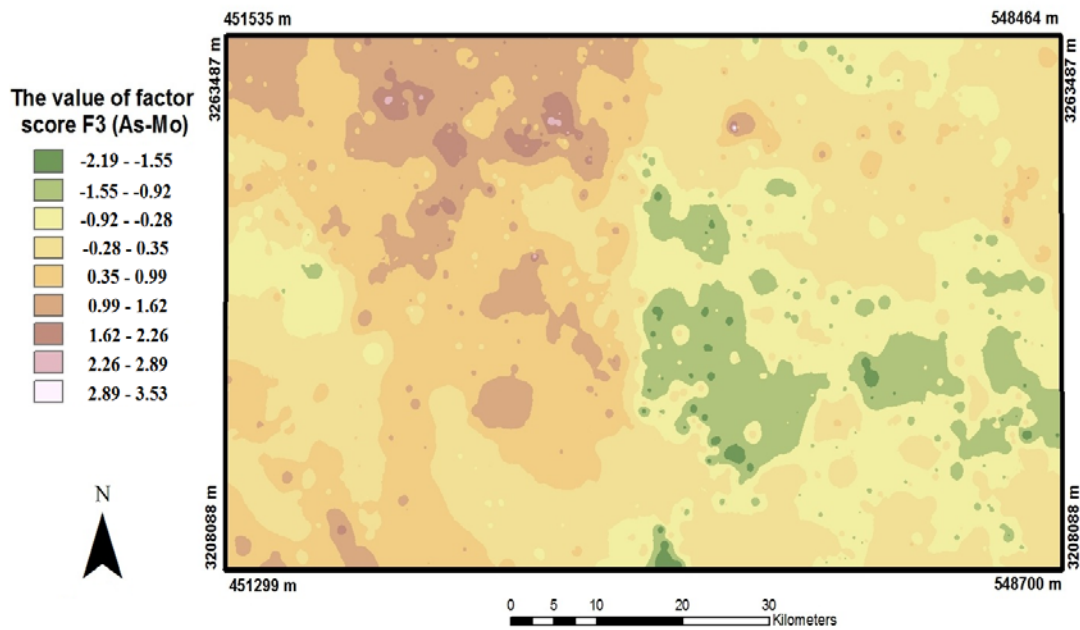
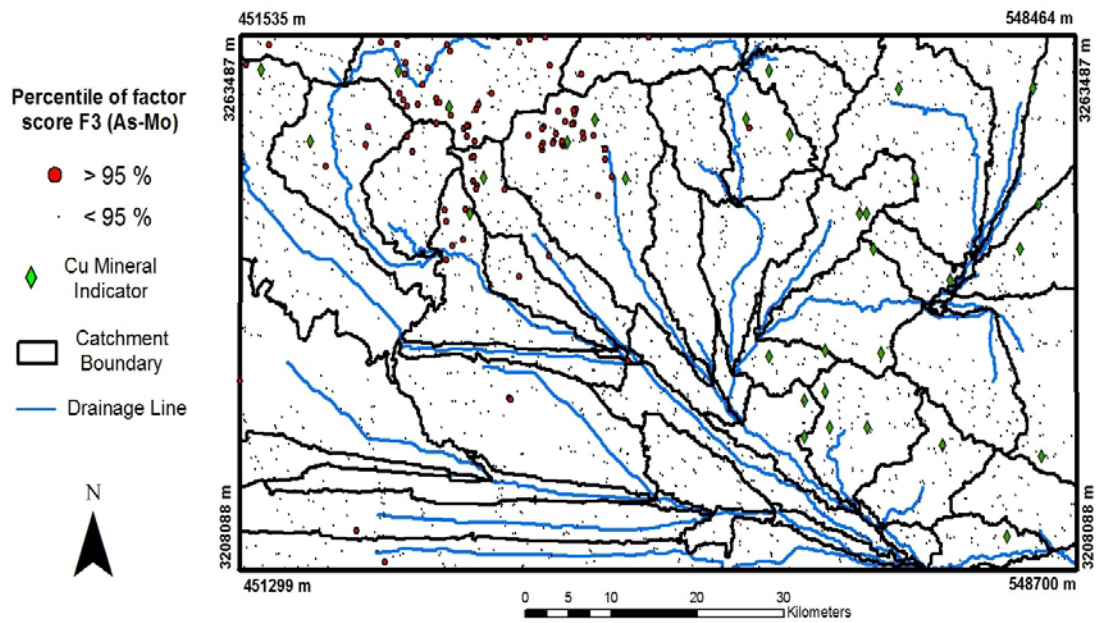


شکل ۳-۶. نقشه توزیع امتیاز فاکتور اول (Ni و Cr, Co) به صورت نمادین (بالا) و توزیع مقادیر (پایین) در تحلیل فاکتوری مرحله اول (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)

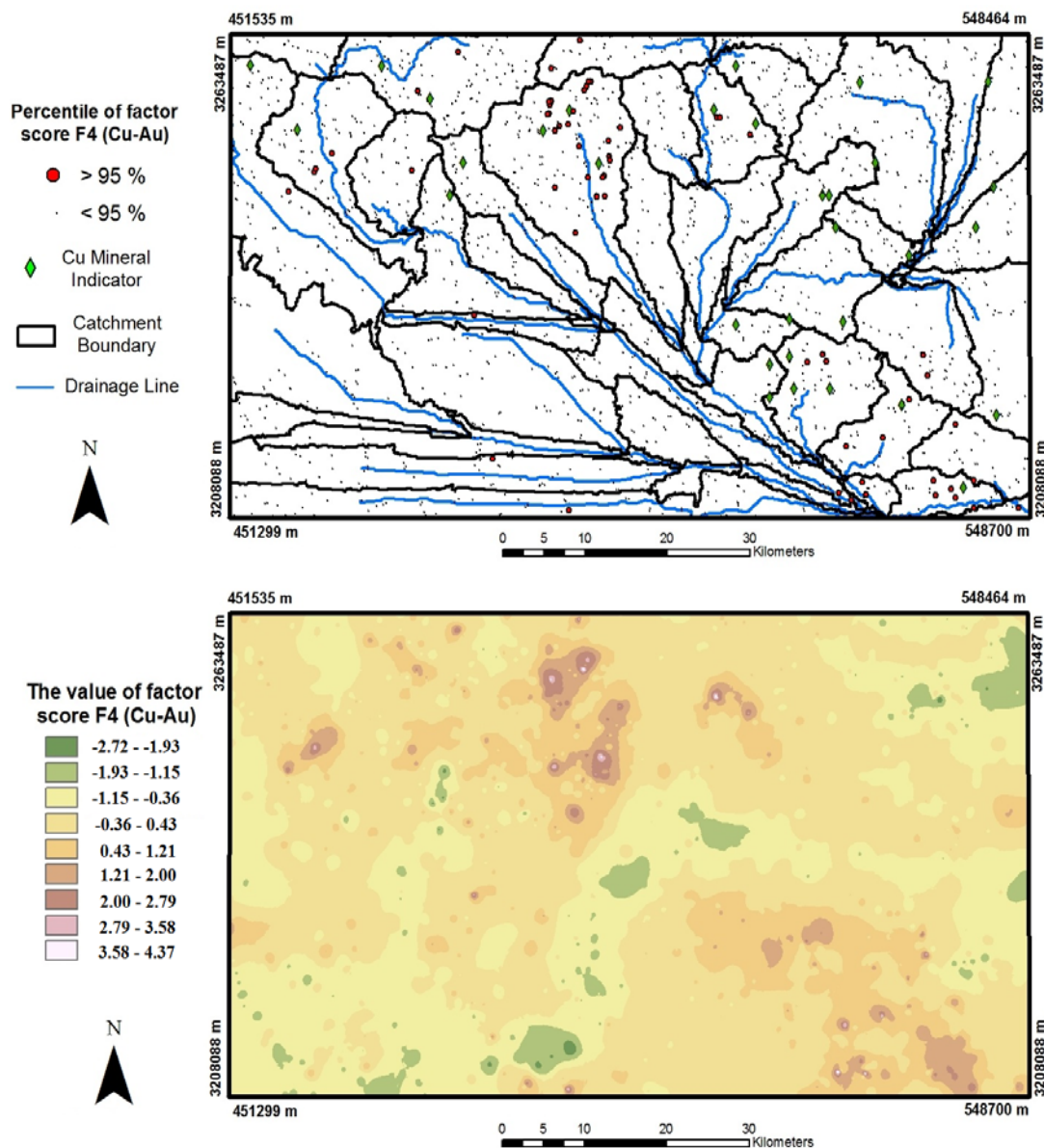


شکل ۳-۷. نقشه توزیع امتیاز فاکتور دوم (Zn و Pb) به صورت نمادین (بالا) و توزیع مقادیر (پایین) در تحلیل فاکتوری مرحله اول (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)





شکل ۳-۸. نقشه توزیع امتیاز فاکتور سوم (Mo و AS) به صورت نمادین (بالا) و توزیع مقادیر (پایین) در تحلیل فاکتوری مرحله اول (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)



شکل ۳-۹. نقشه توزیع امتیاز فاکتور چهارم (Cu و Au) به صورت نمادین (بالا) و توزیع مقادیر (پایین) در تحلیل فاکتوری مرحله اول (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)

هر یک از نقشه‌های پراکندگی امتیازات فاکتوری اول تا چهارم در شکل‌های ۳-۶ تا ۳-۹، برخی از قسمت‌های منطقه مورد مطالعه را بر اساس آنومالی‌های چند عنصری، به عنوان نواحی امیدبخش معرفی می‌کنند که ممکن است با مناطق معرفی شده در سایر نقشه‌های پراکندگی چند عنصری منطبق بوده یا هیچ انطباقی نداشته باشند. با در نظر گرفتن نقشه‌های پراکندگی ژئوشیمیایی فوق، چند سوال مطرح می‌شود.

۱- در مدل پتانسیل معدنی از کدام یک از نقشه‌های پراکندگی چند عنصری مختلف (شکل‌های ۳-۶ تا ۳-۹) باید استفاده شود؟ کدام نواحی از منطقه مورد مطالعه باید برای اکتشافات بیش‌تر کانی‌سازی مورد جستجو انتخاب شوند؟ طرح سوال فوق به این دلیل است که در تحلیل فاکتوری، عموماً از یک فاکتور (مانند مطالعه موردی کانی‌سازی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی در فوق) به عنوان یک ترکیب چند عنصری معرف کانی‌سازی مورد جستجو استفاده می‌شود که در این صورت اگر برخی عناصر ردیاب یا معرف کانی‌سازی مورد جستجو در سایر فاکتورها مشارکت بالا داشته باشند، ممکن است برخی اطلاعات مفید با حذف سایر فاکتورها از دست برود.

۲- حال اگر تمام ترکیب‌های چند عنصری مورد استفاده قرار گیرند، سوالی که مطرح می‌شود این است که چه روشی برای تلفیق نقشه‌های فاکتوری مناسب‌تر است؟

دو سوال فوق علاوه بر مسائلی هستند که در قسمت روش SFA و دو فاز اصلی اجرای آن مطرح گردید. بنابراین در روش SFA، هدف این است که ضمن پاسخ به سوالات فوق و در نظر گرفتن مسائل مطرح شده در بخش ۳-۲، عناصری که بیش‌ترین تأثیر مثبت را در نتیجه تحلیل فاکتوری دارند شناسایی و مورد استفاده قرار گرفته و سایر عناصر مزاحم حذف گردند. همچنین نواحی که باید مورد توجه بیش‌تر برای اکتشافات بعدی قرار گیرند، شناسایی شوند.

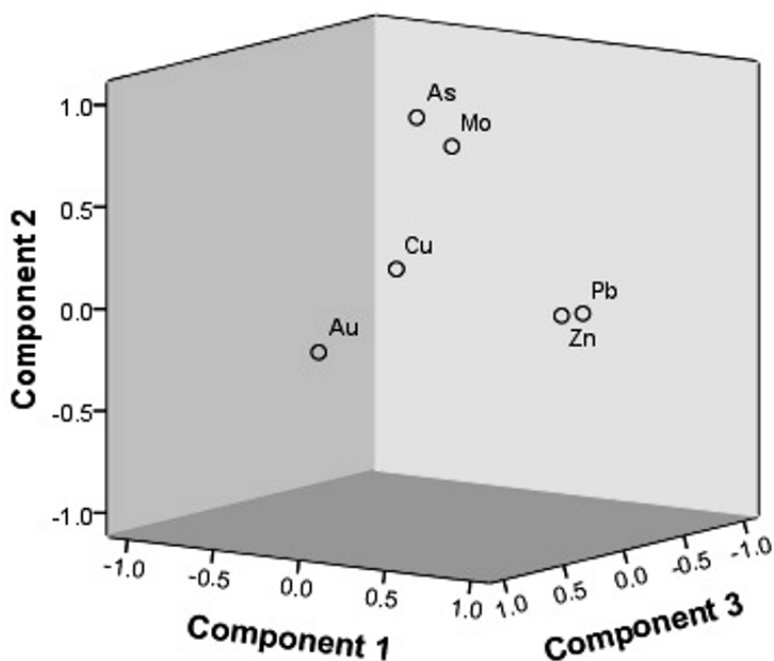
برای پاسخ به سوالات فوق، باید روشی به کار گرفته شود که ضمن کاهش تعداد فاکتورها، شدت آنومالی نیز بیش‌تر شود. افزایش شدت آنومالی در این‌جا به معنی افزایش تعداد نمونه‌های آنومالی مجاور هم نسبت به تعداد کل نمونه‌های آنومالی در منطقه مورد مطالعه، می‌باشد.

برای دسترسی به هدف فوق، ابتدا عنصر Sb که در هیچ فاکتوری مشارکت بالا ندارد از مجموعه داده‌ها حذف گردید. سپس داده‌های مربوط به عناصر Ni، Cr و Co نیز که مشارکت بالایی در فاکتور اول (F1) دارند و این همراهی به علت واحد زمین‌شناسی ملانژ و سنگ‌شناسی آن بوده و

ارتباطی به کانی‌سازی ندارد، حذف گردیدند. سپس تحلیل فاکتوری مجدداً اجرا گردید که نتیجه آن در جدول ۳-۳ آمده است. همچنین رابطه بین عناصر در فاکتورهای استنتاج شده و همراهی آنها در شکل ۱۰-۳ نشان داده شده است.

جدول ۳-۳. نتایج تحلیل فاکتوری مرحله دوم (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)

	فاکتورها		
	F1	F2	F3
Zn	<b>.850</b>	.025	.141
Pb	<b>.888</b>	.022	.018
Cu	.278	.276	<b>.698</b>
As	-.161	<b>.861</b>	-.097
Mo	.227	<b>.795</b>	.164
Au	-.048	-.139	<b>.880</b>
Eigen-value	1.961	1.386	1.110
Variance (%)	32.7	23.1	18.5
Cumulative variance (%)	32.7	55.8	74.3



شکل ۱۰-۳. همراهی فضایی عناصر در مرحله دوم تحلیل فاکتوری (مورد کانی‌سازی مس پرفیری)

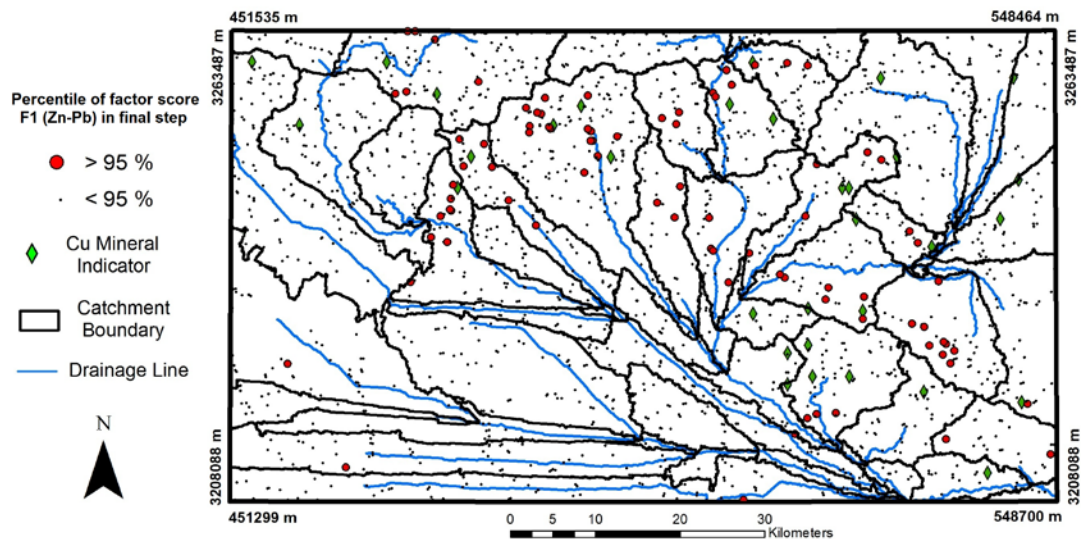
همان‌طور که در جدول ۳-۳ مشاهده می‌شود فاکتور اول (F1) شامل عناصر Zn و Pb، فاکتور دوم (F2) شامل عناصر As و Mo و فاکتور سوم (F3) همراهی عناصر Cu و Au را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جداول ۲-۳ و ۳-۳، مشاهده می‌شود که مجموع تغییرات تحت پوشش



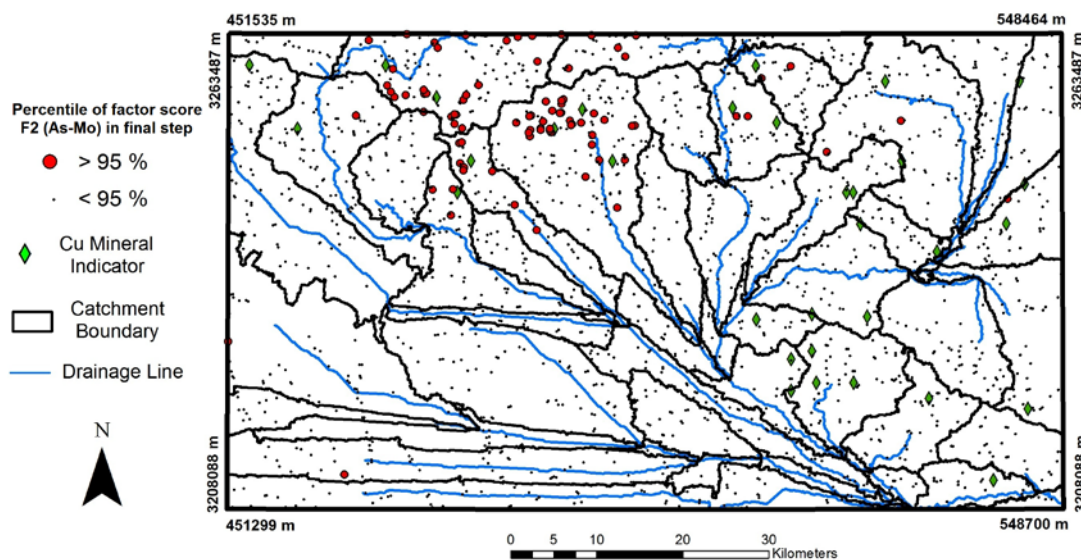
فاکتور مربوط به همراهی عناصر Cu و Au که یک ترکیب معرف و با اهمیت برای کانی‌سازی مس پرفیری است، از ۱۱/۱ درصد به ۱۸/۵ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این مجموع واریانس تحت پوشش مربوط به همراهی عناصر Zn و Pb و همچنین عناصر As و Mo به ترتیب از ۱۸/۹ و ۱۶/۵ به ۳۲/۷ و ۲۳/۱ افزایش یافته است. بنابراین مانند مثال بحث شده در مورد کانی‌سازی فلورین تیپ دره می‌سی‌سی‌پی، در مورد کانی‌سازی مس نیز با توجه به این‌که فاکتورها و عناصر غیر معرف از محاسبات حذف می‌شوند با کاربرد روش SFA، نه تنها تعداد فاکتورها کم شده بلکه تغییرات تحت پوشش ترکیب‌های چند عنصری نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر این همان‌طور که در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده، تفکیک متغیرهای چند عنصری (فاکتورهای F1، F2 و F3) نیز بهتر صورت می‌گیرد.

در این مرحله با توجه به این‌که هیچ عنصری وجود ندارد که در هیچ یک از فاکتورها مشارکت نکند بنابراین فاکتورهای F1، F2 و F3، فاکتورهای تمیز هستند. از آنجایی که کلیه عناصر مشارکت کننده در این سه فاکتور یعنی عناصر Zn، Pb، As، Mo، Cu و Au جزء عناصر معرف و ردیاب کانی‌سازی مس پرفیری هستند و در موارد مختلفی از آن‌ها در مطالعات اکتشافی مربوط به ذخایر مس پرفیری استفاده شده است (Arribas, 1995؛ Liu and Peng, 2003؛ Singer et al., 2005؛ Landtwing et al., 2005؛ Cooke et al., 2005؛ Halter et al., 2004؛ Xiaoming et al., 2007؛ Weixuan et al., 2007؛ Sotnikov et al., 2007؛ Yang et al., 2009)، بنابراین هر سه فاکتور به دست آمده، به عنوان فاکتورهای کلیدی انتخاب شدند و در فاز دوم روش SFA، سه مجموعه داده جداگانه برای سه فاکتور استخراج شده ساخته شد و تحلیل فاکتوری مجدداً برای هر یک از مجموعه داده‌ها به طور جداگانه اجرا گردید. سپس امتیاز فاکتوری کلیه نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای برای هر یک از سه فاکتور محاسبه شد. یعنی سه مجموعه از امتیازات فاکتوری شامل امتیاز فاکتوری کلیه نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای برای ترکیب Zn و Pb، امتیاز فاکتوری کلیه نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای برای ترکیب As و Mo و همچنین

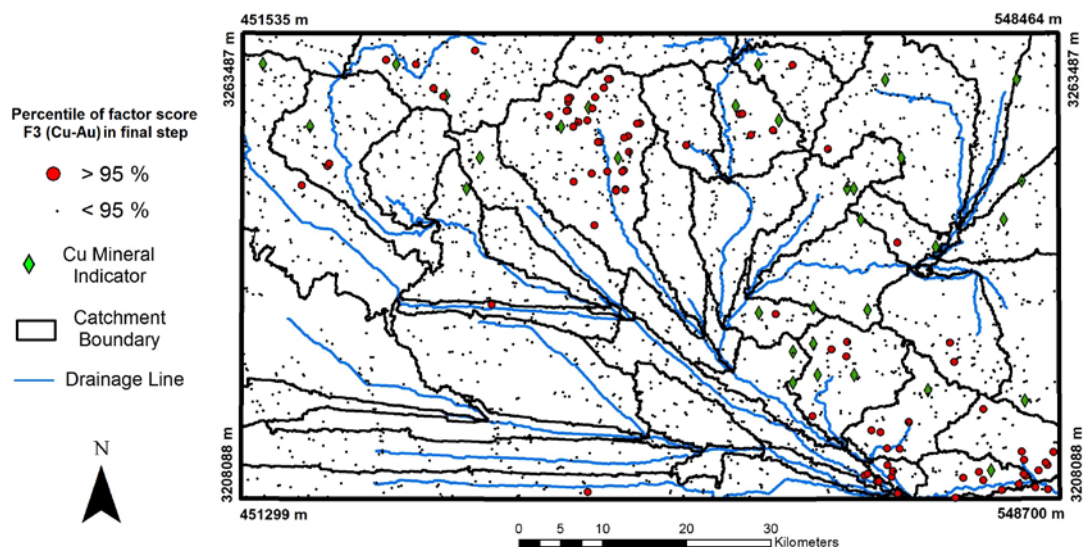
امتیاز فاکتوری کلیه نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای برای ترکیب Cu و Au به دست آمد. نقشه‌های پراکندی چند عنصری ژئوشیمیایی برای فاکتورهای کلیدی F1 شامل عناصر Zn و Pb، F2 شامل عناصر Mo و As و همچنین F3 شامل عناصر Cu و Au، در مرحله نهایی روش SFA، به ترتیب در شکل‌های ۱۱-۳، ۱۲-۳ و ۱۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۳. پراکندگی نمونه‌های آنومالی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی Zn-Pb

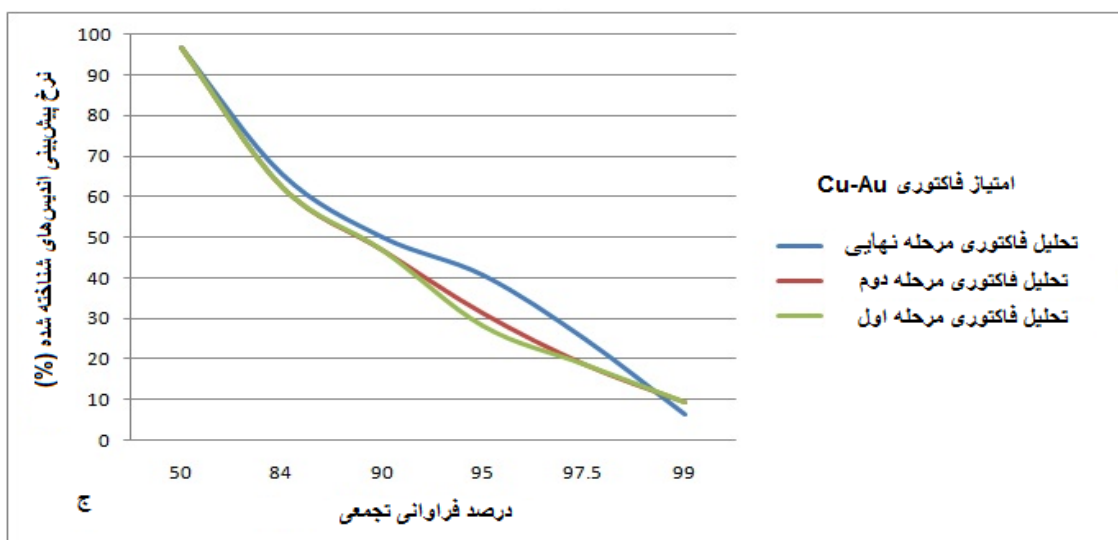
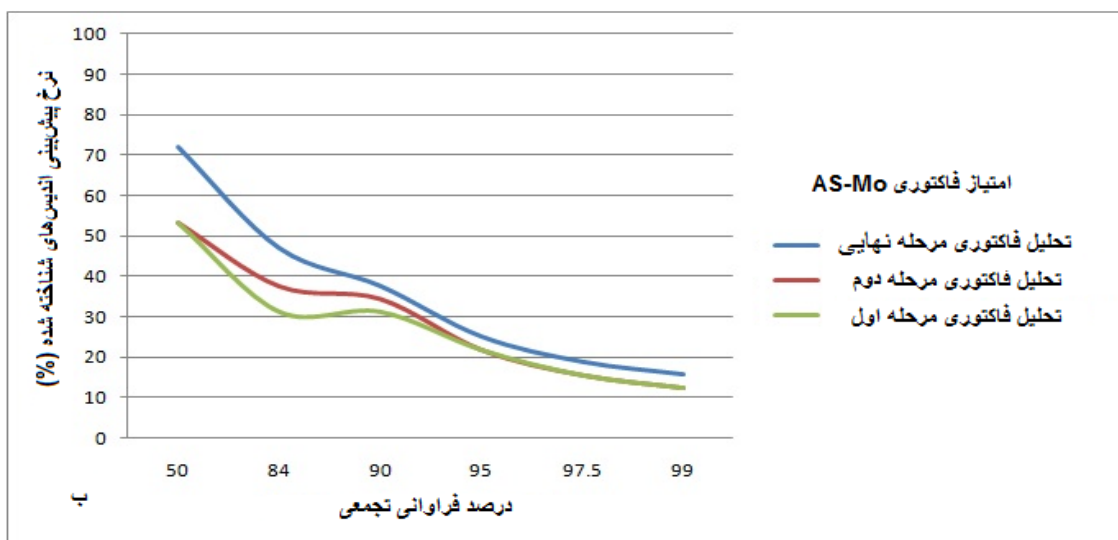
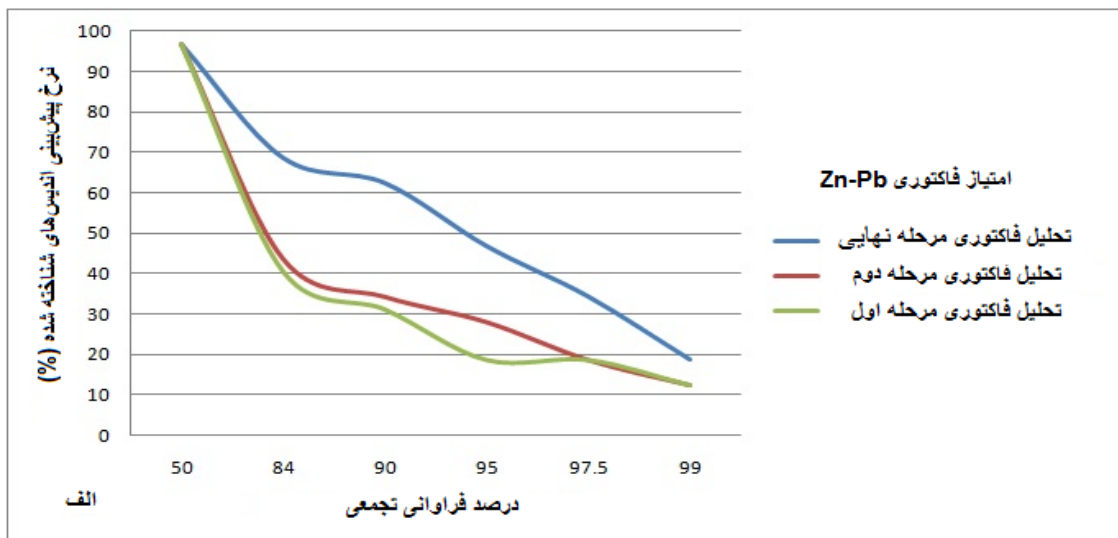


شکل ۱۲-۳. پراکندگی نمونه‌های آنومالی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی As-Mo



شکل ۳-۱۳. پراکندگی نمونه‌های آنومالی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی Cu-Au

به منظور اثبات برتری روش SFA نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی، نقشه‌های چند عنصری فاکتورهای اول، دوم و سوم ترسیم شده در شکل‌های ۳-۱۱، ۳-۱۲ و ۳-۱۳ که حاصل مرحله نهایی تجزیه و تحلیل به روش SFA هستند با نقشه‌های چند عنصری متناظر آن‌ها یعنی فاکتورهای دوم، سوم و چهارم که در شکل‌های ۳-۷، ۳-۸ و ۳-۹ ترسیم شده‌اند و حاصل تجزیه و تحلیل فاکتوری معمولی (مرحله اول تجزیه و تحلیل فاکتوری) هستند، مقایسه گردیدند. در این خصوص از موقعیت تعداد ۳۲ اندیس شناخته شده مس به عنوان نمونه‌های تست برای ارزیابی دو روش استفاده شد و قدرت پیش‌بینی و شناسایی این اندیس‌ها توسط هر دو روش در صورتی که مقادیر مختلف فراوانی تجمعی به عنوان حد جدایش آنومالی از زمینه در نظر گرفته شود، در روی نمودارهای شکل ۳-۱۴ ترسیم شده است. در این نمودارها درصد اندیس‌های شناخته شده در بالادست نمونه‌های آنومالی به‌ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی و با در نظر گرفتن مجموع ۳۲ اندیس، برای هر دو روش محاسبه و به عنوان نرخ پیش‌بینی در نظر گرفته شد. اگرچه در مورد کانی‌سازی مس، حد ۹۵ درصد فراوانی به عنوان حد مقایسه در نظر گرفته شده است ولی شکل‌های ۱ پ تا ۹ پیوست نیز همچنان نقشه‌های مربوطه را با توجه به مقادیر مختلف فراوانی‌های تجمعی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۴. نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی با استفاده از ترکیب‌های کلیدی مختلف الف) ترکیب کلیدی Zn-Pb (ب) ترکیب کلیدی As-Mo و ج) ترکیب کلیدی Cu-Au. در مراحل مختلف تحلیل SFA

همان‌طور که از مقایسه نقشه‌های چند عنصری حاصل تحلیل فاکتوری معمولی و روش SFA مشخص است تعدادی نمونه در نقشه‌های اولیه جزء آنومالی طبقه‌بندی شده‌اند که در نقشه‌های حاصل از روش SFA جزء نمونه‌های زمینه می‌باشند و برعکس و این در حالی است که:

در شکل ۳-۱۴ الف نرخ پیش‌بینی نقشه چند عنصری Zn-Pb، حاصل مرحله نهایی روش SFA، از نرخ پیش‌بینی نقشه‌های چند عنصری Zn-Pb حاصله در مرحله دوم و اول (تحلیل فاکتوری معمولی) بیش‌تر است.

در شکل ۳-۱۴ ب نرخ پیش‌بینی نقشه چند عنصری As-Mo، حاصل مرحله نهایی روش SFA، از نرخ پیش‌بینی نقشه‌های چند عنصری As-Mo حاصله در مرحله دوم و اول (تحلیل فاکتوری معمولی) بیش‌تر است.

در شکل ۳-۱۴ ج نرخ پیش‌بینی نقشه چند عنصری Cu-Au، حاصل مرحله نهایی روش SFA، از نرخ پیش‌بینی نقشه‌های چند عنصری Cu-Au حاصله در مرحله دوم و اول (تحلیل فاکتوری معمولی) بیش‌تر است.

از شکل‌های ۳-۱۴ همچنین نتیجه می‌شود که نرخ پیش‌بینی نقشه‌های چند عنصری حاصل از مرحله دوم روش SFA، عموماً بیش‌تر از نرخ پیش‌بینی نقشه‌های چند عنصری در مرحله اول (تحلیل فاکتوری معمولی) می‌باشد. همچنین شدت آنومالی (تعداد نمونه‌های آنومالی مجاور هم) به خصوص در پایین دست اندیس‌های شناخته شده افزایش یافته است (مقایسه شکل‌های ۳-۷، ۳-۸ و ۳-۹ با نقشه‌های متناظر خود یعنی به ترتیب شکل‌های ۳-۱۱، ۳-۱۲ و ۳-۱۳). مقایسه‌های فوق برتری روش SFA را در شناسایی بهینه ترکیب‌های چند عنصری معرف یک تیپ کانی‌سازی مورد جستجو و همچنین در افزایش موفقیت اکتشاف نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی نشان می‌دهد. بنابراین ترکیب‌های چند عنصری حاصل از نتایج تحلیل به روش SFA، می‌توانند به عنوان اثرهای ژئوشیمیایی چند عنصری با اهمیت برای افزایش موفقیت اکتشاف در مدل‌های پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار گیرند.

### ۳-۵- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش SFA، یک روش جدید برای تحلیل چند عنصری داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای در این رساله توسعه داده شده است. با استفاده از این روش جدید، روش تحلیل فاکتوری معمولی برای شناسایی اثرهای چند عنصری معرف یک تیپ کانی‌سازی مشخص مورد جستجو بهبود یافته است. علاوه بر این نتایج زیر نیز در این رابطه به دست آمده است:

- ۱- عناصر و ترکیب‌های غیر معرف و مزاحم با استفاده از روش SFA شناسایی می‌شوند.
  - ۲- روش SFA، با استفاده از حذف عناصر و ترکیب‌های غیر پیش‌گو و مزاحم، مجموع درصد تغییرات تحت پوشش تشریح شده را افزایش می‌دهد.
  - ۳- شدت آنومالی در نزدیک و اطراف کانی‌سازی‌ها، با استفاده از روش SFA، نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی افزایش می‌یابد.
  - ۴- نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی با استفاده از روش SFA نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی افزایش می‌یابد.
  - ۵- با استفاده از روش SFA امتیازات چند عنصری هر نمونه و مقدار عددی مشارکت هر عنصر در هر فاکتور اصلاح می‌شود.
- عموماً نتایج تحلیل فاکتوری معمولی شامل چندین فاکتور می‌باشد که ممکن است در آن همراهی‌های مختلفی از عناصر در فاکتورهای مختلف مشاهده شود ولی نتایج روش SFA بهتر قابل تفسیر بوده و بیش‌تر قابل اعتماد است زیرا عناصر غیر معرف شناسایی و از تحلیل خارج می‌شوند. با توجه به این‌که روش SFA در دو منطقه کم اکتشاف شده و خوب اکتشاف شده در این تحقیق به اجرا درآمده است، نتایج حاصله نشان داده که با توجه به داده‌ها و همچنین نوع کانی‌سازی مورد جستجو ممکن است یک یا چند فاکتور کلیدی بهبود یافته شناسایی شوند ولی در هر صورت در مقایسه با تحلیل فاکتوری معمولی، تعداد فاکتورها کاهش یافته، میزان تغییرات تحت پوشش بیش‌تر شده و از همه مهم‌تر نرخ پیش‌بینی نیز بالا می‌رود.

## فصل چهارم

شاخص احتمالی کانی سازی ژئوشیمیایی  
(GMPI) و تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی

وزن دار

#### ۴-۱- مقدمه

پس از شناسایی یک یا چند فاکتور کلیدی معرف کانی‌سازی مورد جستجو با استفاده از روش SFA در فصل قبل، مقادیر امتیازات فاکتوری (چند عنصری) می‌توانند به طور مؤثری در شناسایی نواحی امیدبخش مورد استفاده قرار گیرند. در این حالت مقادیر امتیاز فاکتوری نمونه‌ها می‌تواند به نقشه تبدیل شده و به عنوان یک لایه شاهد ژئوشیمیایی، برای تلفیق با سایر لایه‌های اکتشافی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین مهمترین سوالی که مطرح می‌شود این است که چگونه می‌توان به نمونه‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای وزن مناسبی تخصیص داد تا بتوان یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن دار قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی تولید نمود؟ در فصل حاضر ضمن پاسخ به سوال فوق و توسعه یک روش جدید بهبود یافته، کارایی آن مورد بحث قرار گرفته و به اثبات می‌رسد.

#### ۴-۲- تابع لجستیکی و وزن دهی فازی

یکی از راه‌های درک یک پدیده یا توزیع یک متغیر، برای مثال توزیع متغیرهای ژئوشیمیایی در یک ناحیه، طبقه‌بندی آن می‌باشد (Micheli-Tzanakou, 1999). یکی از روش‌های کلاسیک برای طبقه‌بندی، تبدیل داده‌ها و انتقال به یک فضای جدید است (Berthold and Hand, 2002). در این خصوص به جای استفاده از یک مدل غیر خطی در فضای اولیه، می‌توان از یک تبدیل غیر خطی مناسب به فضای جدید استفاده نمود. این روش می‌تواند برای حل برخی مسائل طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گیرد (Alpaydm, 2004). در واقع دلیل اولیه از انتقال داده‌ها به فضای جدید، مهیا ساختن مجموعه داده‌هایی است که بیش‌تر قابل تفکیک بوده و کمتر باهم تداخل داشته باشند (Micheli-Tzanakou, 1999). همچنین انتقال داده‌ها با یک تبدیل مناسب، شانس شناختن نحوه آرایش و پیکربندی آن‌ها را افزایش داده (Berthold and Hand, 2002) و در نتیجه مسئله طبقه‌بندی می‌تواند بهبود یابد (Fink, 2007). در این خصوص Bishop (2006) نشان داده است که نتیجه انتقال



داده‌ها با استفاده از یک تابع لجستیکی<sup>۱</sup>، می‌تواند مرزهای بارزتر و تفکیک‌پذیرتری را برای تصمیم‌گیری در مسائل طبقه‌بندی به دست دهد. تابع لجستیکی "S" شکل بوده (مانند روابط ۴-۱ و ۴-۲) و یک بازه نامحدود از یک متغیر را به محدوده بین ۰ و ۱ انتقال می‌دهد. در این خصوص ابتدا نسبت وقوع یک پیشامد<sup>۲</sup> (اتفاق) محاسبه شده و سپس از آن لگاریتم گرفته می‌شود که لجیت<sup>۳</sup> نام دارد. بنابراین لجیت، لگاریتم نسبت وقوع یک پیشامد است. علاوه بر این تبدیل لجستیکی نقش مهمی را در بسیاری از الگوریتم‌های طبقه‌بندی و شناسایی الگو (Bishop 2006) مانند شبکه‌های عصبی، یادگیری سیستماتیک<sup>۴</sup> و سیستم‌های خبره<sup>۵</sup> (Micheli-Tzanakou, 1999)؛ Berthold and Hand, 2002؛ Alpaydm, 2004؛ Fink, 2007) بازی می‌کند. مسئله‌ای که در تحلیل‌های چند متغیره (در این جا تحلیل فاکتوری)، وجود دارد این است که متغیر جواب یعنی امتیاز فاکتوری نمونه‌ها، پیوسته بوده و بدون حد و مرز می‌باشد. بنابراین استفاده مستقیم از امتیازات فاکتوری نمونه‌ها، روش مناسبی برای پیش‌بینی احتمال وقوع یک رویداد دوتایی (یعنی حضور یا عدم حضور کانی سازی)، در محل‌های مشخص و مناطق مختلف نیست. در واقع مسئله این است که در حالتی که متغیر جواب دوتایی است (حضور یا عدم حضور)، متغیر پیش‌گوی جواب باید بین ۰ و ۱ باشد تا حالت احتمالی در نظر گرفته شود (زیرا احتمال بین ۰ و ۱ است) در حالی که در خروجی تحلیل فاکتوری، امتیازات فاکتوری<sup>۶</sup> (FS) هر یک از نمونه‌های ژنوشیمیایی می‌تواند در خارج از دامنه ۰ و ۱ قرار بگیرد و مقادیر خارج از بازه ۰ و ۱ در بیان احتمالی رخدادها به کار نمی‌روند و همچنین نمی‌تواند به عنوان یک وزن فازی در مدل‌سازی منطق فازی مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین استفاده از یک تابع لجستیکی مناسب می‌تواند مقادیر خارج از بازه ۰ و ۱ را به درون این دامنه انتقال دهد (Cox and Snell, 1989) تا قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به منظور طبقه‌بندی احتمالی

---

<sup>1</sup> Logistic function

<sup>2</sup> Odd

<sup>3</sup> Logit

<sup>4</sup> Machine learning

<sup>5</sup> Expert system

<sup>6</sup> Factor score (FS)

مناطق امیدبخش و یا استفاده در روش منطق فازی باشد. انواع مختلفی از تابع لجستیکی وجود دارند (Theodoridis and Koutroumbas, 2006) که می‌توانند برای انتقال یک مجموعه از اعداد به بازه ۰ و ۱، بر اساس مقادیر حداقل، حداکثر و شیب تغییرات بین آن‌ها مورد استفاده قرار گیرند (Carranza, 2008; Daneshfar et al., 2006; Porwal et al., 2003; Carranza and Hale, 2002b). اگر یک متغیر  $X$  دارای مقادیر خارج از دامنه ۰ و ۱ باشد در این صورت با استفاده از دو نوع تابع لجستیکی روابط (۱-۴) و (۲-۴) می‌توان مقادیر  $X$  را به دامنه ۰ و ۱ انتقال داد در این حالت مقادیر انتقال یافته می‌توانند به عنوان یک وزن فازی (مقدار عضویت فازی  $FW_x$ ) مورد استفاده قرار گیرند.

$$FW_x = \frac{e^x}{1+e^x} \quad (1-4)$$

$$FW_x = \frac{1}{1+e^{-s(X-i)}} \quad (2-4)$$

$s$  و  $i$  در رابطه (۲-۴) پارامترهایی هستند که به ترتیب شیب و نقطه عطف تابع بوده و به طور تجربی و ابتکاری انتخاب می‌شوند (Porwal, 2006). بنابراین این پارامترها شکل تابع و در نتیجه مقدار تابع عضویت فازی را تعیین می‌کنند. انتخاب تابع لجستیکی مناسب و مقادیر  $s$  و  $i$  بر اساس دامنه تغییرات و مقادیر حداکثر و حداقل متغیر ورودی صورت می‌گیرد. بهترین اعداد برای این متغیرها آن‌هایی هستند که حداکثر و حداقل مقدار داده‌های ورودی را به ترتیب به ۱ و ۰ نزدیک کنند. بنابراین خروجی روابط (۱-۴) و (۲-۴) یک عدد احتمالی بین ۰ و ۱ خواهد بود که با استفاده از آن یک معیار احتمالی مناسب برای سنجش میزان احتمال حضور یک نوع کانی‌سازی خاص، بر اساس شواهد مختلف، محاسبه می‌شود. این مقدار می‌تواند به نقشه تبدیل شده و برای شناسایی مناطق امیدبخش مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳-۴- تولید نقشه ژئوشیمیایی وزن دار کانی سازی فلورین

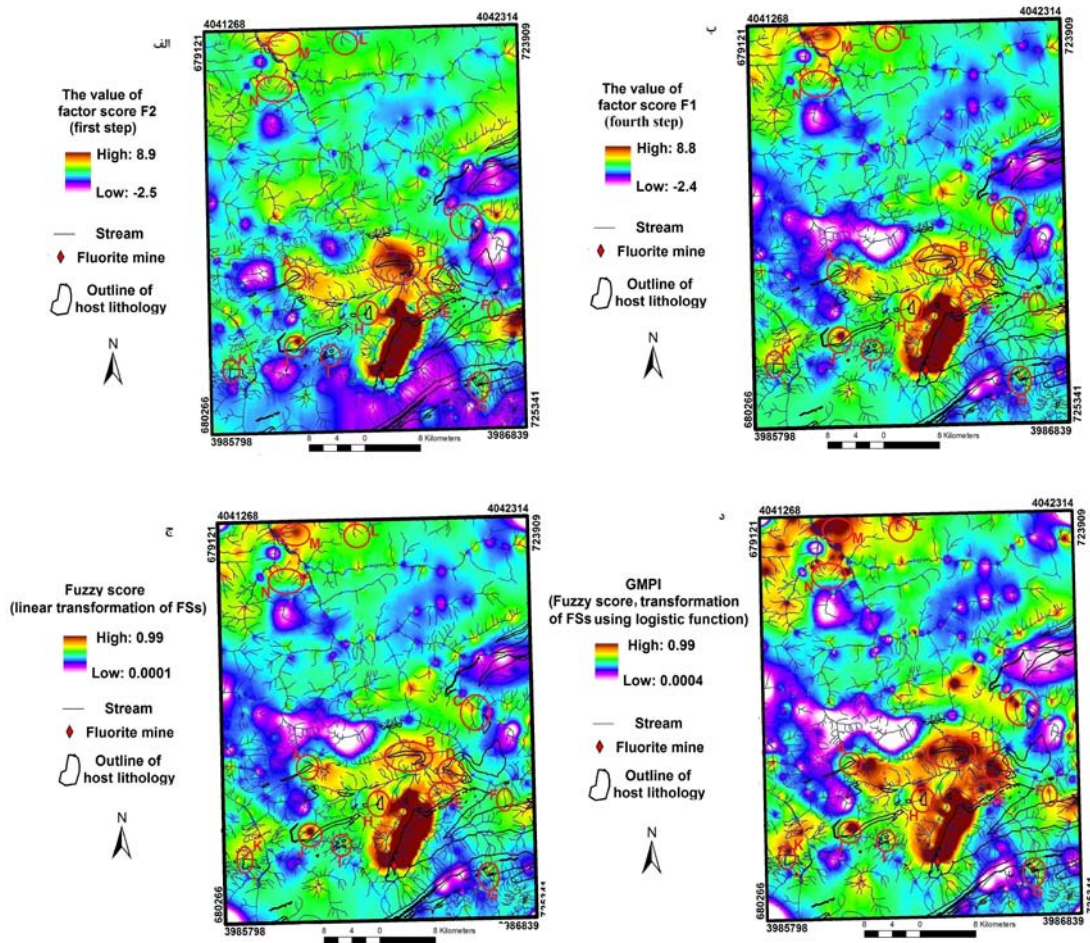
همان طور که در فصل قبل بیان گردید در خصوص تولید نقشه شاهد وزن دار چند عنصری برای کانی سازی فلورین تیپ دره می سی سی پی، پس از شناسایی بهینه ترین ترکیب و همراهی عناصر ردیاب و معرف یعنی عناصر Pb-Sb-Ba-Zn-Ag با استفاده از روش SFA، یک امتیاز فاکتوری قابل اعتمادتر برای هر نمونه رسوب آبراهه ای محاسبه گردید. در این حالت با توجه به این که مجموعه مقادیر امتیاز فاکتوری می توانند خارج از بازه ۰ و ۱ قرار گیرند بنابراین ضمن این که احتمالی نیستند، به عنوان یک وزن فازی نیز نمی توانند در مدل سازی منطق فازی برای تولید یک نقشه شاهد وزن دار مورد استفاده قرار گیرند. به منظور انتقال این مقادیر به بازه ۰ و ۱ می توان از تابع لجستیکی رابطه (۳-۴) استفاده نمود.

$$GMPI = \frac{e^{FS}}{1 + e^{FS}} \quad (3-4)$$

در رابطه فوق FS مقدار امتیاز فاکتوری یک نمونه ژئوشیمیایی حاصل از روش SFA بوده و GMPI مقدار وزن خروجی در بازه بین ۰ و ۱ می باشد. از آن جایی که وزن تخصیص یافته در واقع به هر نمونه ژئوشیمیایی تخصیص داده می شود که نشان دهنده احتمال حضور کانی سازی در بالادست آن می باشد و تیپ کانی سازی مورد جستجو نیز باید مشخص باشد (با توجه به روش SFA به کار گرفته شده) بنابراین این وزن می تواند شاخص احتمالی کانی سازی ژئوشیمیایی (GMPI) نامیده شود. در خصوص کانی سازی فلورین رابطه (۴-۴) به صورت زیر نوشته می شود

$$GMPI_{MVT-fluorite} = \frac{e^{FS_{Zn-Pb-Ag-Sb-Ba}}}{1 + e^{FS_{Zn-Pb-Ag-Sb-Ba}}} \quad (4-4)$$

در این رابطه  $FS_{Zn-Pb-Ag-Sb-Ba}$  مقدار امتیاز فاکتوری چند عنصری هر نمونه بر اساس فاکتور معرف F1 در مرحله چهارم روش SFA در فصل قبل می‌باشد. به منظور بارزسازی بیش‌تر برتری‌های انتقال غیر خطی داده‌ها با استفاده از تابع لجستیکی و تولید مقادیر GMPI، نسبت به مقادیر امتیاز فاکتوری (FS) به دست آمده از تجزیه و تحلیل فاکتوری معمولی و همچنین در مقایسه با انتقال خطی داده‌ها به بازه ۰ و ۱، چهار نقشه ژئوشیمیایی تولید شد. این نقشه‌ها شامل توزیع مقادیر امتیاز فاکتوری فاکتور دوم (F2) در تحلیل فاکتوری معمولی، توزیع مقادیر امتیاز فاکتوری فاکتور اول (F1) در خروجی روش SFA (مرحله چهارم تحلیل فاکتوری)، توزیع مقادیر امتیاز فاکتوری فاکتور اول (F1) در خروجی روش SFA که به طور خطی به بازه ۰ و ۱ انتقال یافته‌اند و همچنین توزیع مقادیر GMPI که حاصل انتقال غیر خطی (رابطه ۴-۴) مقادیر امتیاز فاکتوری فاکتور اول (F1) در خروجی روش SFA با استفاده از تابع لجستیکی به بازه ۰ و ۱ می‌باشند که به ترتیب در شکل‌های ۱-۴ الف تا ۱-۴ د نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای انتقال خطی داده‌ها به بازه ۰ و ۱، برای هر داده ابتدا کوچک‌ترین مقدار در داده‌ها از آن کم شده و سپس عدد حاصله بر اختلاف بین بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار در مجموعه داده‌ها تقسیم می‌گردد. به این ترتیب به بزرگ‌ترین عدد مقدار ۱، به کوچک‌ترین عدد مقدار ۰ و به سایر مقادیر وزن‌هایی بین ۰ و ۱ تخصیص می‌یابد.



شکل ۴-۱. توزیع مقادیر متغیرهای ژئوشیمیایی برای کانی‌سازی فلورین: مقادیر امتیاز فاکتوری فاکتور دوم در تحلیل فاکتوری معمولی (الف)، توزیع مقادیر امتیاز فاکتوری فاکتور اول در خروجی مرحله چهارم روش SFA (ب)، توزیع مقادیر امتیاز فاکتوری فاکتور اول در خروجی روش SFA و انتقال یافته به طور خطی به بازه ۰ و ۱ (ج) توزیع مقادیر GMPI حاصل از انتقال غیر خطی مقادیر امتیاز فاکتوری فاکتور اول در خروجی روش SFA با استفاده از تابع لجستیکی به بازه ۰ و ۱ (محل‌های مشخص شده با A تا N برای مقایسه هستند)

با توجه به شکل‌های ۴-۱ الف تا ۴-۱ د و با استفاده از مقایسه اختلاف بین مقادیر حداکثر و حداقل در شدت آنومالی‌های ژئوشیمیایی، می‌توان به نتایج خوبی دست یافت. مقایسه چهار نقشه شکل ۴-۱ الف تا ۴-۱ د نشان می‌دهد که مقدار تباین بین مقادیر حداکثر و حداقل در نقشه‌های شکل‌های ۴-۱ ب و ۴-۱ ج که حاصل روش SFA و همچنین انتقال خطی امتیازات فاکتوری مربوطه، به بازه ۰ و ۱ می‌باشد، از مقادیر تباین در نقشه شکل ۴-۱ الف که حاصل تحلیل فاکتوری معمولی

است بیشتر است (مقایسه شکل ۱-۴ الف با شکل‌های ۱-۴ ب و ۱-۴ ج به خوبی این اختلاف را نشان می‌دهد). در این رابطه همان‌طور که نقشه‌های مذکور نشان می‌دهند، مناطق تهی شده در نقشه ۱-۴ الف عموماً دارای تهی‌شدگی بیشتر در نقشه‌های شکل‌های ۱-۴ ب و ۱-۴ ج بوده و همچنین مناطق غنی شده در شکل ۱-۴ الف عموماً دارای شدت غنی‌شدگی بیشتر در شکل‌های ۱-۴ ب و ۱-۴ ج می‌باشند (منظور از تهی‌شدگی و غنی‌شدگی در اینجا مقادیر وزن و امتیاز فاکتوری کم و زیاد است) که خود نشانه شدت بخشی به آنومالی‌ها با استفاده از روش SFA می‌باشد. مقایسه فوق همچنین نشان می‌دهد که اگرچه در نقشه شکل ۱-۴ ج مقادیر امتیاز فاکتوری به بازه ۰ و ۱ انتقال داده شده‌اند ولی مقادیر تباین در نقشه‌های شکل‌های ۱-۴ ب و ۱-۴ ج به طور بسیار زیادی شبیه هم هستند که این به دلیل انتقال خطی مقادیر امتیاز فاکتوری به بازه ۰ و ۱ است که در آن فواصل مقادیر ورودی، نسبت به هم حفظ می‌شود.

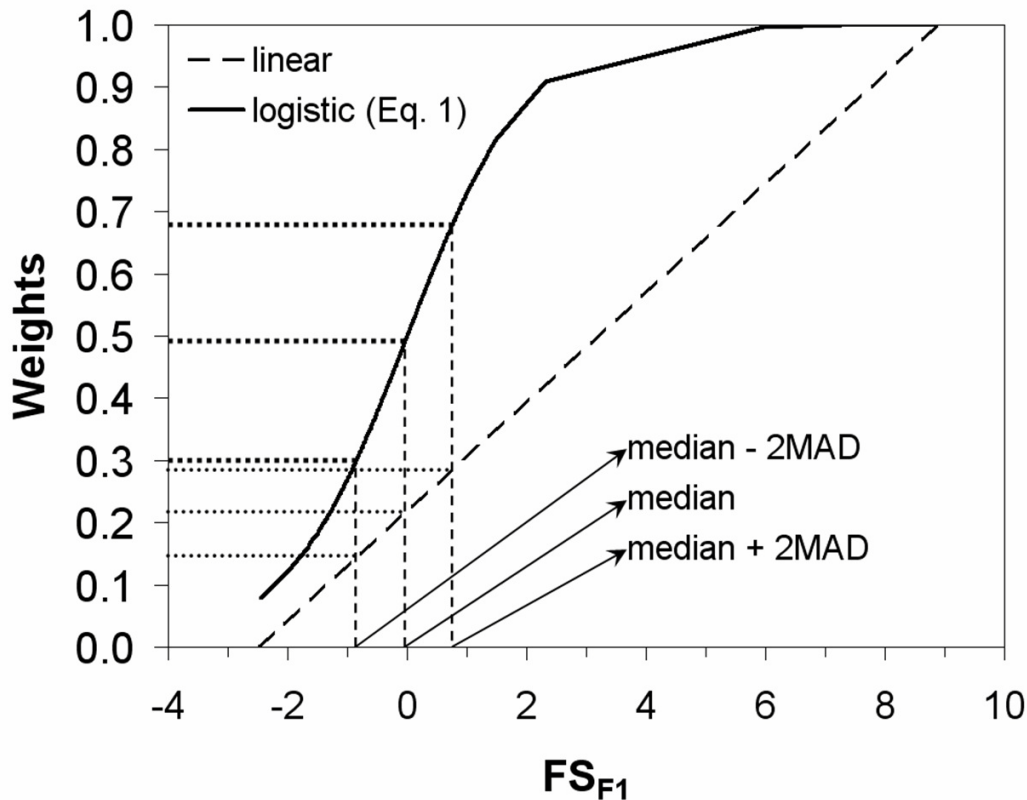
از مقایسه نقشه شکل ۱-۴ د یعنی توزیع مقادیر GMPI که حاصل انتقال غیر خطی مقادیر امتیاز فاکتوری، در خروجی روش SFA، با استفاده از تابع لجستیکی می‌باشد با نقشه‌های شکل‌های ۱-۴ ب و ۱-۴ ج نیز مجدداً برتری تباین در شکل ۱-۴ د نسبت به شکل‌های ۱-۴ ب و ۱-۴ ج به خوبی نمایان است. همچنین با مقایسه نقشه‌های شکل‌های ۱-۴ د و ۱-۴ الف نیز می‌توان برتری تباین در شکل ۱-۴ د را نسبت به شکل ۱-۴ الف به خوبی مشاهده نمود. مقایسه‌های فوق اثبات می‌کنند که جداسازی آنومالی از زمینه و شدت بخشی به آنومالی‌ها با استفاده از نقشه توزیع مقادیر GMPI نسبت به نتایج تحلیل فاکتوری معمولی و یا انتقال خطی داده‌ها به بازه ۰ و ۱ بهبود یافته است. این برتری به علت (۱) همبستگی بیشتر مقادیر امتیاز فاکتوری F1 در خروجی روش SFA با عناصر ورودی (شکل ۳-۳، ۲) مقادیر تغییرات تحت پوشش بیشتر در خروجی روش SFA (جدول ۱-۳) و (۳) استفاده از یک تابع لجستیکی (غیر خطی) در انتقال داده‌ها به جای انتقال خطی به بازه ۰ و ۱ است.

با توجه به این که منطقه مورد مطالعه انتخاب شده برای جستجوی کانی‌سازی فلورین، یک منطقه کم اکتشاف شده بوده و در آن تنها یک معدن شناخته شده وجود دارد، بنابراین باید از یک معیار دیگر (به غیر از موقعیت اندیس‌های شناخته شده) برای تأیید آنومالی‌های ژئوشیمیایی استفاده نمود (Carranza, 2010a). به این منظور برای تأیید و مقایسه آنومالی‌ها در نقشه‌های شکل‌های ۱-۴ الف تا ۱-۴ د، از توزیع فضایی لیتولوژی‌های میزبان دارای پتانسیل برای کانی‌سازی فلورین (سازندهای الیکا و تیزکوه) در بالادست نواحی آنومالی به عنوان یک معیار استفاده شد. در این نقشه‌ها نواحی مشخص شده با حرف A تا N به منظور مقایسه مشخص شده‌اند. مقایسه نقشه‌های شکل ۱-۴ نشان می‌دهد که به طور کلی مقادیر آنومالی با شدت بالاتر در پایین دست سازندهای الیکا و تیزکوه (در مناطق A تا K)، در نقشه GMPI (شکل ۱-۴ د) نسبت به شکل‌های ۱-۴ ج و ۱-۴ ب (به ترتیب انتقال خطی امتیازات فاکتوری و مقادیر اصلی حاصل از روش SFA) و همچنین نسبت به شکل ۱-۴ الف حاصل تحلیل فاکتوری معمولی، بیش تر است. علاوه بر این انطباق بیشتری بین توزیع فضایی آنومالی‌ها و سنگ میزبان کانی‌سازی در نقشه GMPI نسبت به نقشه امتیازات فاکتوری، در تحلیل فاکتوری معمولی، وجود دارد که به علت استفاده از روش SFA و انتقال با استفاده از تابع لجستیکی است. در برخی از مناطق نقشه GMPI (شکل ۱-۴ د) در بالادست مناطق با شدت بالای آنومالی (مثلاً مناطق L، M و N)، سازندهای الیکا و تیزکوه در روی نقشه زمین‌شناسی دیده نمی‌شود که به این علت است که برخی رخنمون‌های کوچک و با وسعت کم در نقشه‌های با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ قابل برداشت نمایش نیستند. همچنین ممکن است به علت پنهان شدن رسوبات سازندهای الیکا و تیزکوه در زیر رسوبات جوان تر باشد. در این مناطق GMPI مقادیر بالایی را نشان می‌دهد که ممکن است به دلیل حضور کانی‌سازی پنهان باشد.

با توجه به این که مقایسه صورت گرفته در شکل ۱-۴ بصری می‌باشد به منظور شفاف‌سازی بیش تر برتری انتقال غیر خطی نسبت به انتقال خطی به طور کمی، مقادیر امتیاز فاکتوری اول F1 در خروجی روش SFA نسبت به مقادیر انتقال یافته به طور خطی و غیر خطی به بازه ۰ و ۱ در شکل

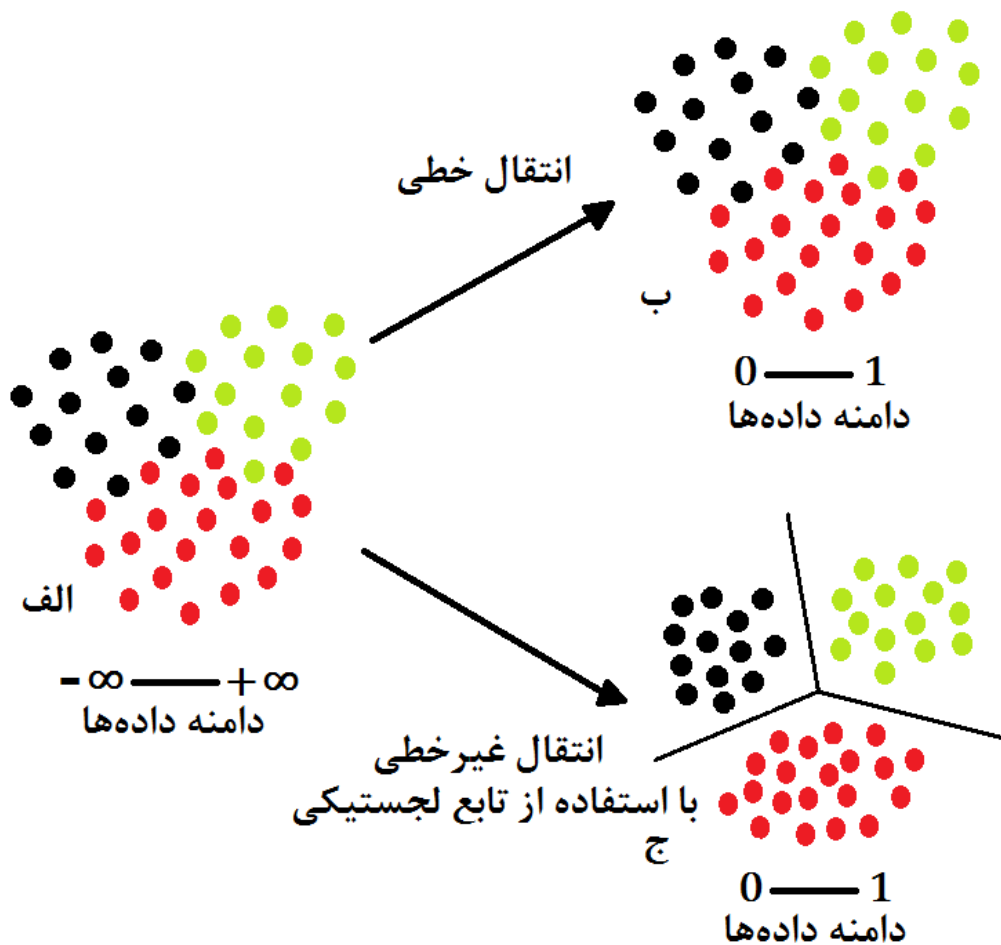
۲-۴ رسم شده است. در شکل ۲-۴ به عنوان یک مرجع جهت مقایسه دو نوع انتقال مختلف، از مقادیر میانه (median)،  $median+2MAD$  و  $median-2MAD$  که برای امتیازات فاکتوری در خروجی مرحله چهارم تحلیل فاکتوری محاسبه شده، استفاده گردید. مقدار  $MAD$  برابر میانه قدر مطلق اختلاف تمام داده‌ها از مقدار میانه است (Tukey, 1977). در تحلیل داده‌های اکتشافی مقدار  $median+2MAD$  می‌تواند به عنوان یک حد آستانه برای جداسازی آنومالی از زمینه استفاده شود (Reimann et al., 2005). مقدار  $MAD$  قابل مقایسه با مقدار انحراف معیار (SDEV) در تحلیل کلاسیک است. بنابراین مقدار  $median+2MAD$  قابل مقایسه با  $mean+2SDEV$  (Rose et al. 1979) خواهد بود. همچنین  $median-2MAD$  مقداری در جامعه زمینه می‌باشد. برای مجموعه داده‌های امتیازات فاکتوری F1 در خروجی روش SFA مقادیر میانه،  $median+2MAD$  و  $median-2MAD$  به ترتیب برابر  $0/04$ ،  $0/77$  و  $0/84$  - با استفاده از شکل ۲-۴ به دست آمده است. برای مقادیر انتقال یافته به طور خطی این مقادیر با توجه به شکل ۲-۴ به ترتیب برابر  $0/21$ ،  $0/29$  و  $0/14$  است. همچنین برای مقادیر GMPI (انتقال یافته به صورت غیر خطی با استفاده از تابع لجستیکی) مقادیر میانه،  $median+2MAD$  و  $median-2MAD$  بر اساس شکل ۲-۴، به ترتیب برابر  $0/49$ ،  $0/68$  و  $0/3$  است. مقدار میانه برای مجموعه داده‌های GMPI تقریباً برابر  $0/5$  است که بزرگ‌تر از میانه داده‌های انتقال یافته به صورت خطی است. همچنین مقدار  $median+2MAD$  برای GMPI بزرگ‌تر از  $0/5$  است اما برای داده‌های خطی این‌طور نیست و این نشان می‌دهد که تفکیک آنومالی و زمینه با استفاده از GMPI بهبود یافته است. همچنین قدر مطلق اختلاف بین  $median+2MAD$  و  $median-2MAD$  برای انتقال خطی برابر  $0/15$  و برای GMPI این مقدار برابر  $0/38$  است که مجدداً قدرت تفکیک بیش‌تر روش GMPI را ثابت می‌کند.





شکل ۴-۲. مقادیر امتیازات فاکتوری در مرحله چهارم روش SFA در مقابل وزن‌های تخصیص یافته به طور خطی و غیر خطی

در یک مجموعه از داده‌های ژئوشیمیایی عموماً مقادیر خیلی بالا می‌توانند به عنوان آنومالی طبقه‌بندی شوند و مقادیر خیلی پایین عموماً می‌توانند در جامعه زمینه طبقه‌بندی گردند. در این خصوص مسئله اساسی تعیین مرز جدایش جوامع ژئوشیمیایی است. Bishop (2006) نشان داد که نتیجه انتقال داده‌ها با استفاده از یک تابع لجستیکی می‌تواند مرزهای بارزتری را در طبقه‌بندی و جداسازی جوامع مختلف نسبت به یک تبدیل خطی مشخص کند. بنابراین با توجه به بارزسازی‌های مذکور در بالا و با توجه به Bishop (2006)، می‌توان عملکرد بهتر تابع لجستیکی به عنوان یک تابع غیر خطی در انتقال داده‌ها به بازه ۰ و ۱ و بارزسازی مرز جوامع مختلف از یک مجموعه داده‌های ژئوشیمیایی را، در مقابل یک انتقال خطی، به صورت شکل ۴-۳ نشان داد.



شکل ۳-۴. مدل مفهومی انتقال مجموعه داده‌های نامحدود در خارج از بازه ۰ و ۱ (الف) به داخل دامنه ۰ و ۱، با استفاده از روابط خطی (ب) و غیر خطی (ج)

از آن جایی که در این قسمت از مطالعه حاضر از روش GMPI در یک ناحیه کم‌اکتشاف شده (تنها با یک معدن شناخته شده) استفاده شده است، بنابراین باید برای ارزیابی نتایج از نشانه‌های زمین‌شناسی نظیر سنگ میزبان (تشریح شده در فوق) استفاده نمود. در این خصوص روش کمی دیگری نیز برای اثبات برتری روش GMPI استفاده شده است که در ادامه تشریح می‌شود.

مقایسه توزیع فضایی متغیرهای ژئوشیمیایی در شکل ۱-۴ الف تا ۱-۴ د، با توجه به این که با استفاده از ارزیابی کیفی و چشمی انجام شده است ممکن است کاملاً قابل اطمینان نباشد. بنابراین برای کمی‌سازی مقایسه مقدار تباین بین نقشه‌ها در شکل‌های ۱-۴ الف تا ۱-۴ د و در نتیجه، اثبات کمی برتری روش GMPI نسبت به انتقال خطی امتیازات فاکتوری، ابتدا یک طبقه‌بندی بر اساس مقادیر

معادل فراوانی‌های تجمعی مختلف صورت گرفت (Bonham-Carter et al., 1987)؛ Carranza, 2010a؛ Ohta et al., 2005؛ Carranza and Hale, 1997؛ Darwish and Poellmann, 2010). سپس مقادیر امتیازات فاکتوری، مقادیر انتقال یافته به صورت خطی و همچنین مقادیر GMPI به صورت مقادیر معادل فراوانی تجمعی برابر ۹۷/۵، ۹۵، ۹۰، ۸۴، ۵۰، ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ درصد، به عنوان مرز جوامع مختلف ژئوشیمیایی محاسبه و طبقه‌بندی گردیدند (جدول ۴-۱). این مقادیر از فراوانی تجمعی، به عنوان مقادیر معنی‌دار در موارد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است (Lepeltier, 1969؛ Levinson, 1974؛ Sinclair, 1974؛ Bonham-Carter and Goodfellow, 1986؛ Stanley and Sinclair, 1987؛ Carranza, 2008؛ Carranza, 2010a).

جدول ۴-۱. مقادیر معادل فراوانی تجمعی مختلف برای امتیازات فاکتوری فاکتور اول در مرحله چهارم تحلیل فاکتوری مرحله‌ای و مقادیر انتقال یافته به طور خطی و غیر خطی

درصد فراوانی تجمعی	امتیاز فاکتوری در مرحله چهارم روش SFA	مقدار انتقال یافته به طور خطی	مقدار انتقال یافته به طور غیر خطی (GMPI)
97.5	1.27	0.33	0.78
95	1.01	0.3	0.73
90	0.77	0.28	0.68
84	0.55	0.26	0.63
50	-0.04	0.21	0.49
40	-0.15	0.2	0.46
30	-0.35	0.18	0.41
20	-0.56	0.16	0.35
10	-0.9	0.13	0.28

در تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای مقادیر معادل و بزرگ‌تر از ۹۰ درصد فراوانی تجمعی عموماً به عنوان حد آستانه برای جداسازی مقادیر بالای آنومالی استفاده می‌شوند (Lepeltier, 1969؛ Bonham-Carter and Goodfellow, 1986؛ Bonham-Carter et al., 1987؛ Wilde et al., 2004). در این خصوص همان‌طور که در جدول ۴-۱ مشاهده می‌شود، برای انتقال خطی، مقادیر معادل ۹۷/۵، ۹۵ و ۹۰ درصد فراوانی تجمعی به ترتیب برابر ۰/۳۳، ۰/۳ و ۰/۲۸ است

همچنین این مقادیر برای GMPI به ترتیب برابر ۰/۷۸، ۰/۷۳ و ۰/۶۸ می‌باشند. این نتیجه نشان می‌دهد که وزن‌دهی به جوامع مختلف ژئوشیمیایی با استفاده از روش GMPI به طور قابل اعتمادتری نسبت به روش خطی صورت می‌گیرد زیرا مقادیر بزرگ‌تر از ۹۰ درصد فراوانی تجمعی عملاً (به طور تجربی) آنومالی هستند و باید وزن بالایی را به خود اختصاص دهند در صورتی که مثلاً وزن تخصیص یافته به فراوانی تجمعی ۹۰ درصد با استفاده از روش خطی برابر ۰/۲۸ است که برای یک جامعه آنومالی، وزن بسیار کمی است. همچنین مقادیر معادل فراوانی تجمعی ۸۴ و ۵۰ درصد نیز عموماً به عنوان حد جدایش دو جامعه کلی آنومالی از زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند (Lepeltier, 1969; Sinclair, 1974; Levinson, 1974; Stanley and Sinclair, 1987) ولی همان‌طور که از جدول ۴-۱ مشخص است برای انتقال خطی مقدار وزن تخصیص یافته معادل مقادیر معادل فراوانی تجمعی ۸۴ و ۵۰ درصد به ترتیب برابر ۰/۲۶ و ۰/۲۱ بوده و برای GMPI این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۶۳ و ۰/۴۹ است. این نتیجه نیز همچنان نشان می‌دهد که وزن‌دهی با روش GMPI قابل اعتمادتر و منطقی‌تر از روش خطی است زیرا مثلاً وزن تخصیص یافته به فراوانی تجمعی معادل ۵۰ درصد که یک عدد متوسط است با استفاده از GMPI برابر ۰/۴۹ می‌باشد که همچنان یک وزن متوسط است در حالی که وزن تخصیص یافته برای این مقدار متوسط با استفاده از روش خطی برابر ۰/۲۱ است که برای یک مقدار متوسط بسیار کم می‌باشد. علاوه بر موارد فوق به منظور کمی‌سازی مقدار تباین جوامع مختلف ژئوشیمیایی و ارزیابی میزان تفکیک مرز جدایش آنومالی‌ها در شکل‌های ۴-۱ الف تا ۴-۱ د و ۴-۳ از یک شاخص جدید کمی دیگر نیز استفاده شده که در ادامه تشریح می‌شود.

Rose et al. (1979) و Sinclair (1991) از تقسیم مقدار میانگین جامعه آنومالی بر میانگین جامعه زمینه برای کمی‌سازی تباین آنومالی استفاده نمودند در رساله حاضر نیز از مفهوم تباین برای مقایسه انتقال خطی و غیر خطی در جداسازی و بارزسازی مرز جدایش جوامع مختلف ژئوشیمیایی به منظور اثبات آن‌چه در شکل‌های ۴-۱ و ۴-۳ نشان داده شده و در نتیجه ارزیابی قابلیت آن‌ها در تخصیص وزن قابل اعتماد به آنومالی‌ها استفاده شده است. به این منظور با توجه به جدول ۴-۱ و در نظر

گرفتن مقادیر درصد فراوانی تجمعی به عنوان مرز جدایش جوامع مختلف ژئوشیمیایی، می‌توان مجموعه داده‌ها را به ۱۰ جامعه تقسیم نمود. در جدول ۴-۲ به مجموعه داده‌های بین یک زوج درصد فراوانی تجمعی، به عنوان یک جامعه، یک عدد تحت عنوان شماره جامعه تخصیص داده شده است و همچنین برای هر جامعه مقدار میانه آن در مجموعه داده‌های انتقال یافته به طور خطی و غیر خطی محاسبه شده‌اند.

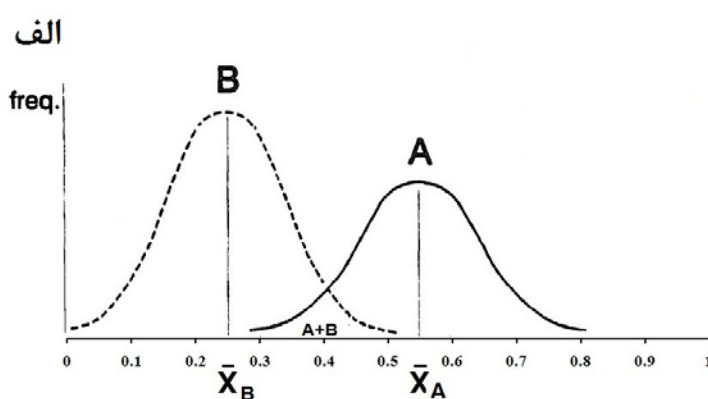
جدول ۴-۲. جوامع مختلف ژئوشیمیایی و مقدار میانه آن‌ها برای مجموعه داده‌های انتقال یافته به طور خطی و غیر خطی

شماره جامعه	درصد فراوانی تجمعی	میانه جامعه در مجموعه داده‌های انتقال یافته به طور خطی	میانه جامعه در مجموعه داده‌های انتقال یافته به طور غیرخطی (GMPI)
1	$\geq 97.5$	0.35	0.82
2	95-97.5	0.31	0.74
3	90-95	0.29	0.70
4	84-90	0.27	0.65
5	50-84	0.24	0.55
6	40-50	0.21	0.47
7	30-40	0.19	0.44
8	20-30	0.17	0.38
9	10-20	0.15	0.32
10	<10	0.11	0.23

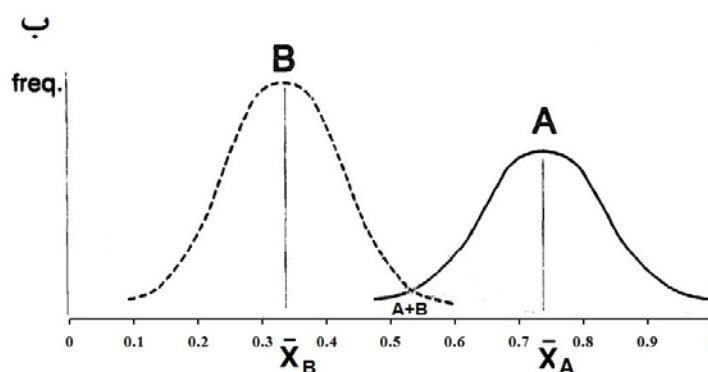
اگر چه (Rose et al. (1979) و Sinclair (1991) از تقسیم مقدار میانگین جامعه آنومالی بر میانگین جامعه زمینه برای کمی‌سازی تباین آنومالی (C) استفاده نمودند، ولی در این رساله از قدرمطلق اختلاف بین میانه جوامع مختلف به منظور کمی نمودن مقدار تباین استفاده شد. این مقدار تباین در این جا تحت عنوان شاخص تفکیک<sup>۱</sup> (DI) نام‌گذاری گردید. بنابراین شاخص تفکیک برای دو جامعه از داده‌های ژئوشیمیایی، برابر قدرمطلق اختلاف بین میانه آن دو جامعه است. در این خصوص برای دو جامعه مختلف ژئوشیمیایی انتخاب شده، شاخص تفکیک بالاتر، دلالت بر جداسازی و تفکیک‌پذیری بالاتر دارد زیرا شاخص تفکیک بالا یعنی جوامع بیش‌تر از هم فاصله گرفته و بهتر تفکیک‌پذیر هستند (مقایسه شکل‌های ۴-۱). بنابراین شاخص تفکیک، یک معیار برای ارزیابی میزان

<sup>1</sup> Discrimination index

تفکیک پذیری جوامع مختلف ژئوشیمیایی است. برتری روش به کار گرفته شده در این رساله تحت عنوان شاخص تفکیک نسبت به تباین (Sinclair, 1991)، به طور مفهومی در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. این شکل اثبات می کند که به خصوص در مواردی که مقادیر حداکثر و حداقل داده ها در روش های مختلف جداسازی جوامع ژئوشیمیایی، یکی است استفاده از DI بهتر از C در ارزیابی روش های جداسازی زمینه از آنومالی می باشد.



$$\begin{aligned} \bar{X}_A &= 0.55, & \bar{X}_A &= M_A \\ \bar{X}_B &= 0.25, & \bar{X}_B &= M_B \\ C &= \bar{X}_A / \bar{X}_B = 2.2 \\ DI &= |\bar{X}_A - \bar{X}_B| = 0.3 \\ \text{or} \\ DI &= |M_A - M_B| = 0.3 \\ \text{Max}_A - \text{Min}_A &= 0.81 - 0.29 = 0.52 \\ \text{Max}_B - \text{Min}_B &= 0.51 - 0 = 0.51 \\ A+B &= OL = 0.51 - 0.29 = 0.22 \end{aligned}$$

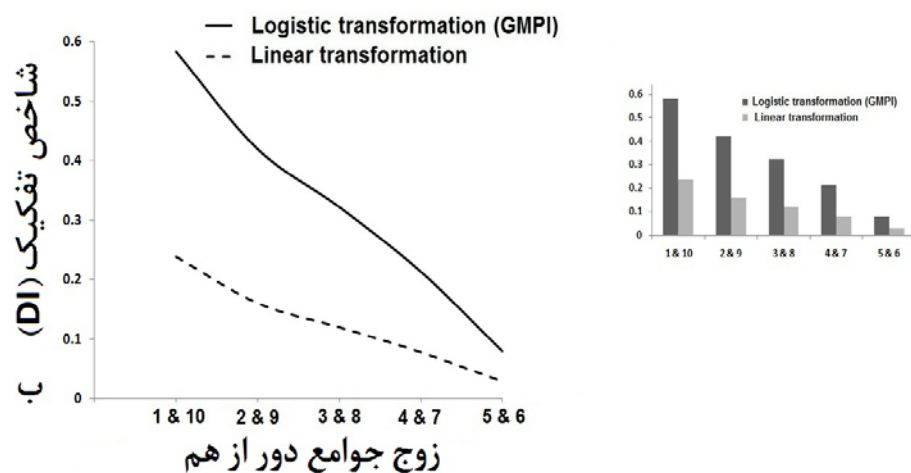
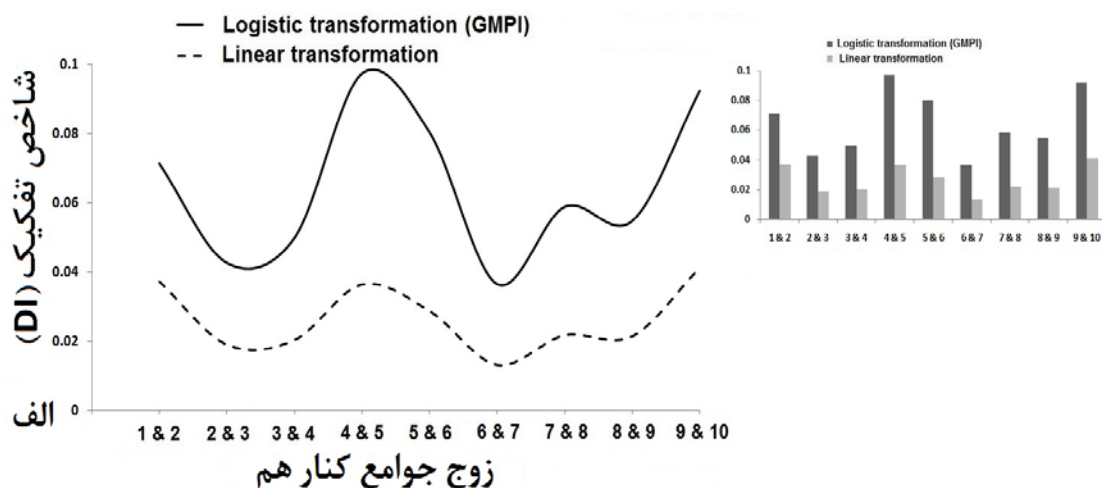


$$\begin{aligned} \bar{X}_A &= 0.73, & \bar{X}_A &= M_A \\ \bar{X}_B &= 0.33, & \bar{X}_B &= M_B \\ C &= \bar{X}_A / \bar{X}_B = 2.2 \\ DI &= |\bar{X}_A - \bar{X}_B| = 0.4 \\ \text{or} \\ DI &= |M_A - M_B| = 0.4 \\ \text{Max}_A - \text{Min}_A &= 1 - 0.48 = 0.52 \\ \text{Max}_B - \text{Min}_B &= 0.6 - 0.09 = 0.51 \\ A+B &= OL = 0.6 - 0.48 = 0.12 \end{aligned}$$

شکل ۴-۴. مفهوم شاخص تفکیک و تباین در تفکیک پذیری جوامع مختلف ژئوشیمیایی و مقایسه آن ها با استفاده از روش های مختلف جداسازی به عنوان مثال (الف) انتقال خطی (ب) انتقال غیر خطی.  $X_A$ : میانگین جامعه آنومالی (A)،  $X_B$  میانگین جامعه زمینه (B)،  $M_A$ : میانه جامعه آنومالی (A)،  $M_B$ : میانه جامعه زمینه (B)، C: تباین، DI: شاخص تفکیک،  $\text{Max}_A$ : حداکثر مقدار در جامعه آنومالی،  $\text{Max}_B$ : حداکثر مقدار در جامعه زمینه،  $\text{Min}_A$ : حداقل مقدار در جامعه آنومالی،  $\text{Min}_B$ : حداقل مقدار در جامعه زمینه، A+B: ناحیه تداخل دو جامعه، OL: طول هم پوشانی دو جامعه، freq: فراوانی.

همان طور که از شکل ۴-۴ مشاهده می شود روش DI بهتر از C است. اختلاف بین یک جفت فراوانی تجمعی انتخاب شده، به عنوان مثال بالاترین و پایین ترین درصد فراوانی تجمعی برای یک

مجموعه از داده‌های ژئوشیمیایی طبقه‌بندی شده می‌تواند برای تفکیک آن‌ها استفاده شود (Sinclair, 1974؛ Sinclair, 1991) زیرا بالاترین و پایین‌ترین مقادیر عموماً به ترتیب جزء جوامع آنومالی و زمینه هستند (Sinclair, 1974). برای مثال در جدول ۴-۲ مقادیر بزرگ‌تر از ۹۷/۵ درصد و کوچک‌تر از ۱۰ درصد فراوانی تجمعی برای مجموعه داده‌های انتقال یافته به صورت خطی و غیر خطی می‌توانند به ترتیب به دو جامعه کلاً آنومالی و کلاً زمینه طبقه‌بندی گردند (Sinclair, 1974). در این خصوص طبق جدول ۴-۲ اختلاف بین مقادیر میانه جوامع شماره ۱ (بزرگ‌تر از ۹۷/۵ درصد فراوانی تجمعی) و ۱۰ (کوچک‌تر از ۱۰ درصد فراوانی تجمعی) برابر ۰/۲۴ (۰/۱۱-۰/۳۵) برای انتقال خطی و همچنین برابر ۰/۵۹ (۰/۲۳-۰/۸۲) برای تبدیل غیر خطی است. بنابراین با توجه به این‌که مقدار شاخص تفکیک بین بالاترین و پایین‌ترین جامعه برای تبدیل غیر خطی (GMPI)، برابر ۰/۵۹ است که بیش‌تر از شاخص تفکیک در تبدیل خطی یعنی ۰/۲۴ است. پس جداسازی آنومالی از زمینه با استفاده از روش GMPI بهبود یافته‌تر است. در این خصوص برای جدایش جوامع مختلف ژئوشیمیایی در جدول ۴-۲ (در همسایگی هم و دور از هم)، مقدار شاخص تفکیک محاسبه شده که در شکل‌های ۴-۵ الف و ۴-۵ ب نشان داده شده است.



شکل ۴-۵. مقایسه مقادیر شاخص تفکیک در جوامع مختلف ژئوشیمیایی با استفاده از دو روش انتقال خطی و غیر خطی، برای جوامع مجاور (الف) و جوامع دور از هم (ب)

شکل ۴-۵ نشان می‌دهد که منحنی شاخص تفکیک برای انتقال غیر خطی (GMPI) برای جدایش تمام جوامع ژئوشیمیایی (در همسایگی و دور از هم) به طور بارزی بالاتر از شاخص تفکیک با استفاده از انتقال خطی قرار دارد. بنابراین شکل‌های ۴-۴، ۴-۵ و جداول ۴-۱ و ۴-۲ مانند شکل‌های ۴-۱ الف تا ۴-۱ د، ۴-۲ و ۴-۳ برتری روش GMPI را در تفکیک جوامع مختلف آنومالی‌های ژئوشیمیایی و تخصیص وزن منطقی و قابل اعتماد به آن‌ها نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی و انتقال خطی به اثبات می‌رساند.



#### ۴-۴- تولید نقشه ژئوشیمیایی وزن دار کانی سازی مس

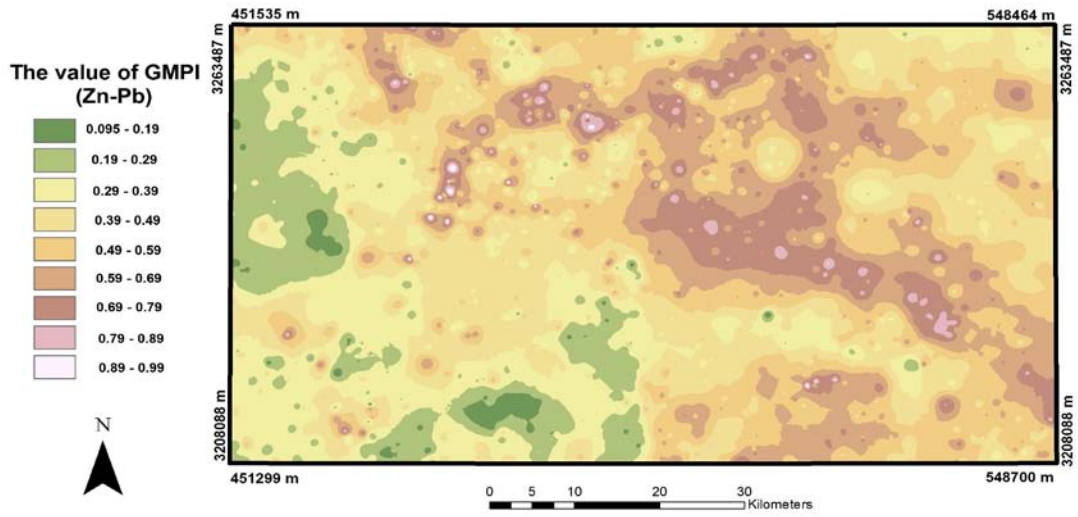
پس از شناسایی فاکتورهای معرف چند عنصری بهینه برای پی جویی کانی سازی مس، در مرحله نهایی تحلیل فاکتوری مرحله ای در فصل قبل، یعنی فاکتور اول ( $F_{Zn-Pb}$ )، فاکتور دوم ( $F_{As-Mo}$ ) و فاکتور سوم ( $F_{Cu-Au}$ ) ترسیم شده در شکل های ۱۱-۳، ۱۲-۳ و ۱۳-۳ که حاصل مرحله نهایی روش SFA هستند، به منظور محاسبه مقادیر GMPI مربوط به هر نمونه رسوب آبراهه ای و نظیر هر یک از فاکتورهای چند عنصری معرف، برای تولید نقشه های شاهد ژئوشیمیایی وزن دار فازی در دامنه ۰ و ۱، از تابع لجستیکی روابط (۴-۵) تا (۴-۷) بیان شده در زیر استفاده شده است.

$$GMPI_{Zn-Pb} = \frac{e^{F_{S_{Zn-Pb}}}}{1 + e^{F_{S_{Zn-Pb}}}} \quad (۴-۵)$$

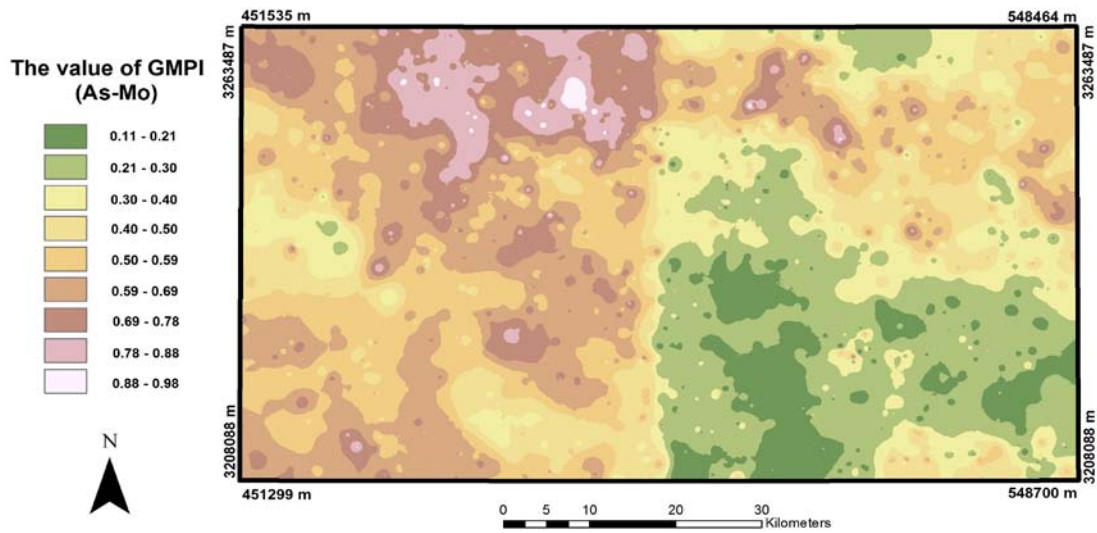
$$GMPI_{As-Mo} = \frac{e^{F_{S_{As-Mo}}}}{1 + e^{F_{S_{As-Mo}}}} \quad (۴-۶)$$

$$GMPI_{Cu-Au} = \frac{e^{F_{S_{Cu-Au}}}}{1 + e^{F_{S_{Cu-Au}}}} \quad (۴-۷)$$

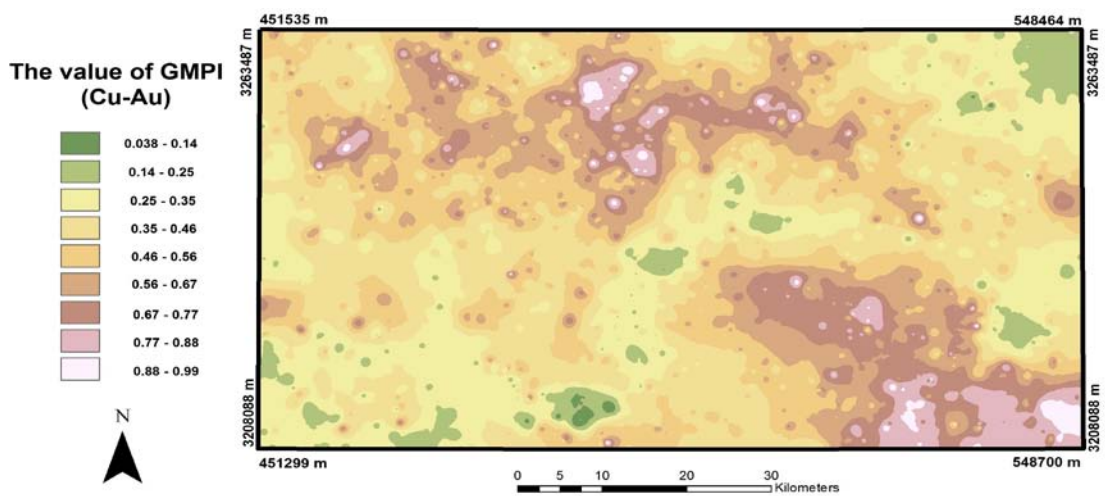
همان طور که قبلاً تشریح گردید GMPI، یک وزن احتمالی فازی در بازه ۰ و ۱ برای هر نمونه رسوب آبراهه ای، متناظر با هر یک از ترکیبات معرف چند عنصری است و مقادیر  $F_{Zn-Pb}$ ،  $F_{As-Mo}$  و  $F_{Cu-Au}$  امتیازات فاکتوری برای فاکتورهای کلیدی حاصل از مرحله نهایی روش SFA هستند. پس از محاسبه مقادیر GMPI نظیر هر فاکتور معرف یعنی  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  و  $GMPI_{Cu-Au}$ ، توزیع این مقادیر به نقشه تبدیل شد که به ترتیب در شکل های ۴-۶، ۴-۷ و ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۶. توزیع مقادیر GMPI برای ترکیب چند عنصری Zn-Pb ( $GMPI_{Pb-Zn}$ )



شکل ۴-۷. توزیع مقادیر GMPI برای ترکیب چند عنصری AS-Mo ( $GMPI_{AS-Mo}$ )



شکل ۴-۸. توزیع مقادیر GMPI برای ترکیب چند عنصری Cu-Au ( $GMPI_{Cu-Au}$ )

از مقایسه نقشه‌های شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۸ که حاصل به نقشه درآوردن مقادیر GMPI می‌باشند، با نقشه‌های چند عنصری متناظر آن‌ها یعنی فاکتورهای دوم، سوم و چهارم که در شکل‌های ۳-۷، ۳-۸ و ۳-۹ ترسیم شده‌اند و حاصل تجزیه و تحلیل فاکتوری معمولی (مرحله اول تجزیه و تحلیل فاکتوری) هستند، نتیجه می‌شود که شدت آنومالی در نقشه‌های GMPI بیش‌تر شده است. این افزایش شدت آنومالی به دلیل استفاده از روش SFA در شناسایی بهینه ترکیب‌های چند عنصری معرف با مقادیر امتیاز فاکتوری قابل اعتمادتر و تغییرات تحت پوشش بیش‌تر و همچنین استفاده از یک تبدیل غیر خطی در انتقال مقادیر امتیاز فاکتوری به بازه ۰ و ۱ به منظور تولید نقشه‌های شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار فازی است که همان‌طور که در شکل ۳-۱۴ و ۴-۵ نشان داده شد موجب افزایش نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی و شدت بخشی به آنومالی‌ها شده است.

پس از به‌دست آوردن مقادیر GMPI برای هریک از سه فاکتور معرف کانی‌سازی مس یعنی  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  و  $GMPI_{Cu-Au}$ ، مسئله این است که چگونه باید این نقشه‌ها به عنوان یک شاهد ژئوشیمیایی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی با دیگر لایه‌های اکتشافی تلفیق شوند؟ زیرا اگر فقط از یکی از آن‌ها استفاده شود ارزش اکتشافی بقیه از دست می‌رود. به عنوان مثال  $GMPI_{Cu-Au}$  با توجه به همراهی دو عنصر مهم و معرف کانی‌سازی مس یعنی Cu و Au، می‌تواند به عنوان بهترین متغیر چند عنصری مؤثر برای پی‌جویی مس مورد استفاده قرار گیرد. در این مورد اهمیت  $GMPI_{Pb-Zn}$  و  $GMPI_{As-Mo}$  نیز نباید نادیده گرفته شود زیرا عناصر Zn، Pb، As و Mo از ردیاب‌های کانی‌سازی مس می‌باشند و همان‌طور که در فصل قبل نشان داده شد از قدرت ردیابی خوبی برای کانی‌سازی مس برخوردار بوده (شکل ۳-۱۴) و همچنین در موارد متعددی برای مطالعه این نوع کانی‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Liu and Peng, 2003؛ Halter et al., 2004؛ Cooke et al., 2005؛ Weixuan et al., 2007؛ Sotnikov et al., 2007؛ Singer et al., 2005؛ Landtwing et al., 2005؛ Xiaoming et al., 2007؛ Yang et al., 2009). به علت اختلاف در تحرک شیمیایی و فیزیکی، ممکن است تمام این عناصر در یک نمونه رسوب آبراهه‌ای، شدت آنومالی یکسانی نشان ندهند یعنی به

عنوان مثال برای یک ذخیره مشخص، محل نمونه‌های آنومالی عنصر Cu با محل نمونه‌های آنومالی عنصر Mo یکی نباشد در حالی که هر دو متعلق به یک منشأ هستند. بنابراین تمام ترکیب‌های چند عنصری  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  و  $GMPI_{Cu-Au}$  باید به عنوان متغیرهای معرف و پیش‌گوی کانی‌سازی مس مورد استفاده قرار گیرند در حالی که ممکن است محل نمونه‌های آنومالی این معرف‌های چند عنصری نیز یکی نباشد. در این خصوص اگرچه ممکن است یکی از معرف‌های چند عنصری از اهمیت بیش‌تری برخوردار باشد ولی باید روشی به‌کار گرفته شود تا از قابلیت ردیابی تمام آن‌ها استفاده گردد. با توجه به توضیحات فوق اگر فقط یکی از متغیرهای ژئوشیمیایی استفاده شود اهمیت دو متغیر دیگر حذف می‌شود در حالی که هر دو متغیر مهم هستند. همچنین با توجه به این‌که مناطق آنومالی مشخص شده توسط هر یک از شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی فوق (شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۸) ممکن است با هم منطبق بوده یا هم‌پوشانی نداشته باشند، سوال دیگر این است که کدام روش باید برای ترکیب این سه نقشه شاهد  $GMPI$  مورد استفاده قرار گیرد تا در نهایت فقط یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی تولید گردد؟ بنابراین باید روشی برای تلفیق نقشه‌های چند عنصری  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  و  $GMPI_{Cu-Au}$  تولید نمود. برای تولید یک نقشه دوتایی از مناطق امیدبخش (Bonham-Carter, 1994؛ Carranza, 2008)، مقادیر بالای  $GMPI$  به عنوان مثال بزرگ‌تر از ۹۵ درصد فراوانی تجمعی، می‌توانند از هر یک از نقشه‌های  $GMPI$  استخراج شده و سپس با استفاده از عملگرهای "AND" یا "OR" منطق بولین ترکیب شوند که در این صورت مناطق امیدبخش ممکن است به طور اشتباهی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر نشان داده شوند و همچنین از همه مهم‌تر وزن فازی آن‌ها نیز از بین می‌رود. به منظور حل این مشکل ابتدا مقادیر نظیر ۹۹، ۹۷/۵، ۹۵، ۹۰، ۸۴ و ۵۰ درصد فراوانی تجمعی برای  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  و  $GMPI_{Cu-Au}$  محاسبه شده و نتایج آن در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۳. مقادیر نظیر درصد فراوانی تجمعی مختلف برای شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی مختلف

درصد فراوانی تجمعی	$GMPI_{Zn-Pb}$	$GMPI_{As-Mo}$	$GMPI_{Cu-Au}$
99 %	0.938	0.917	0.971
97.5 %	0.863	0.873	0.926
95 %	0.80	0.833	0.866
90 %	0.736	0.784	0.774
84 %	0.676	0.731	0.694
50 %	0.476	0.508	0.459

سپس با توجه به این که هدف از مطالعه حاضر در این قسمت ارزیابی روش  $GMPI$  و مقایسه آن با تحلیل فاکتوری معمولی است، مانند فصل قبل و تحلیل فاکتوری معمولی، حد فراوانی ۹۵ درصد برای جداسازی آنومالی از زمینه در نقشه‌های پراکندگی  $GMPI$  در نظر گرفته شد و از روابط (۴-۸) تا (۴-۱۵) بیان شده در زیر برای ترکیب مقادیر  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  و  $GMPI_{Cu-Au}$  مربوط به هر نمونه رسوب آبراهه‌ای و تولید یک مقدار نهایی شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی ( $GMPI_{Porphyry Cu}$ ) به منظور پی‌جویی کانی‌سازی مس استفاده شد.

$$GMPI_{(porphyry Cu)} =$$

$$\left. \begin{array}{l} GMPI_{Cu-Au} \\ GMPI_{Zn-Pb} \\ GMPI_{As-Mo} \\ \text{Average}(GMPI_{Cu-Au}, GMPI_{As-Mo}) \\ \text{Average}(GMPI_{Cu-Au}, GMPI_{Zn-Pb}) \\ \text{Average}(GMPI_{Zn-Pb}, GMPI_{As-Mo}) \\ \text{Average}(GMPI_{Zn-Pb}, GMPI_{Cu-Au}, GMPI_{As-Mo}) \\ \text{Average}(GMPI_{Zn-Pb}, GMPI_{Cu-Au}, GMPI_{As-Mo}) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{If } GMPI_{Cu-Au} \geq 0.866 \text{ and } GMPI_{Zn-Pb} < 0.8 \text{ and } GMPI_{As-Mo} < 0.833 \quad (8-4) \\ \text{If } GMPI_{Zn-Pb} \geq 0.8 \text{ and } GMPI_{Cu-Au} < 0.866 \text{ and } GMPI_{As-Mo} < 0.833 \quad (9-4) \\ \text{If } GMPI_{As-Mo} \geq 0.833 \text{ and } GMPI_{Zn-Pb} < 0.8 \text{ and } GMPI_{Cu-Au} < 0.866 \quad (10-4) \\ \text{If } GMPI_{Cu-Au} \geq 0.866 \text{ and } GMPI_{Zn-Pb} < 0.8 \text{ and } GMPI_{As-Mo} \geq 0.833 \quad (11-4) \\ \text{If } GMPI_{Cu-Au} \geq 0.866 \text{ and } GMPI_{Zn-Pb} \geq 0.8 \text{ and } GMPI_{As-Mo} < 0.833 \quad (12-4) \\ \text{If } GMPI_{Cu-Au} < 0.866 \text{ and } GMPI_{Zn-Pb} \geq 0.8 \text{ and } GMPI_{As-Mo} \geq 0.833 \quad (13-4) \\ \text{If } GMPI_{Cu-Au} \geq 0.866 \text{ and } GMPI_{Zn-Pb} \geq 0.8 \text{ and } GMPI_{As-Mo} \geq 0.833 \quad (14-4) \\ \text{If } GMPI_{Cu-Au} < 0.866 \text{ and } GMPI_{Zn-Pb} < 0.8 \text{ and } GMPI_{As-Mo} < 0.833 \quad (15-4) \end{array}$$

سوالات مطرح شده در فوق در خصوص نحوه ترکیب مقادیر مختلف  $GMPI$  (یعنی  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،

$GMPI_{Cu-Au}$  و  $GMPI_{As-Mo}$ ) و تولید تنها یک مقدار  $GMPI$  برای هر نمونه رسوب آبراهه‌ای، سه حالت مختلف ترکیب را به وجود می‌آورد.

الف- اگر برای یک نمونه رسوب آبراهه‌ای تنها یکی از شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی

یعنی  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  یا  $GMPI_{Cu-Au}$  دارای مقدار بزرگ‌تر از حد فراوانی تجمعی ۹۵ درصد

باشد و دو شاخص دیگر مقدار کوچک‌تر از فراوانی تجمعی ۹۵ درصد را به خود اختصاص داده باشند. در این صورت مقدار نهایی GMPI برای آن نمونه، برابر آن مقدار از GMPI است که بزرگ‌تر از فراوانی تجمعی ۹۵ درصد می‌باشد. سه معادله اول (۴-۸ تا ۴-۱۰) این حالت را پوشش می‌دهند و خروجی مانند عملگر "OR" فازی خواهد بود.

ب- اگر برای یک نمونه رسوب آبراهه‌ای تنها یکی از شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی یعنی  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  یا  $GMPI_{Cu-A}$  دارای مقدار کوچک‌تر از حد فراوانی تجمعی ۹۵ درصد باشند و دو شاخص دیگر مقادیر بزرگ‌تر از فراوانی تجمعی ۹۵ درصد را به خود اختصاص داده باشند. در این صورت مقدار نهایی GMPI مس برای نمونه مورد نظر، برابر میانگین مقادیر شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی است که بزرگ‌تر از فراوانی تجمعی ۹۵ درصد می‌باشند. سه معادله دوم (۴-۱۱ تا ۴-۱۳) این حالت را پوشش می‌دهند.

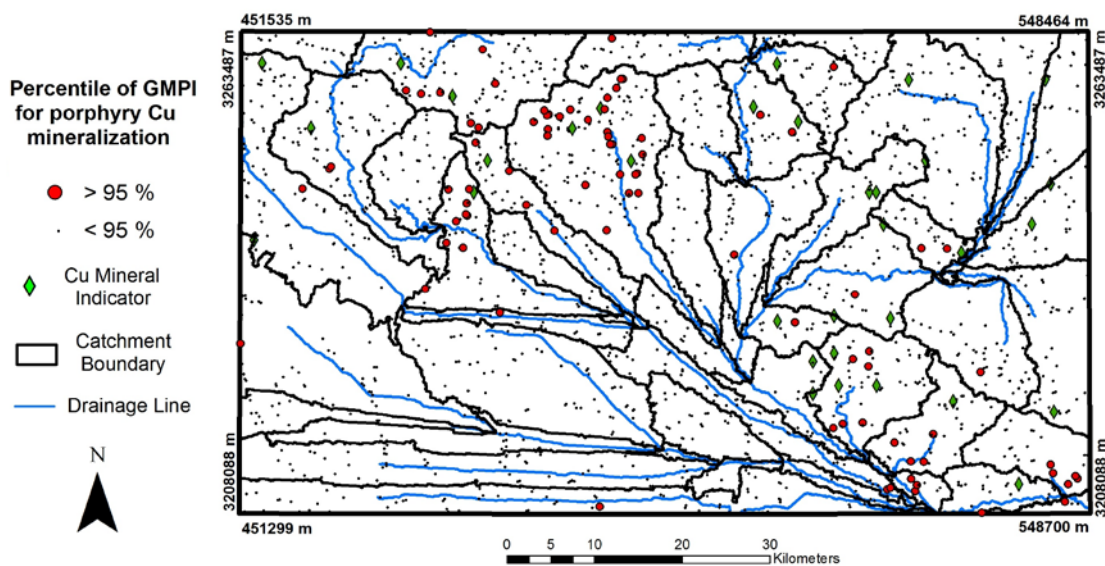
ج- اگر برای یک نمونه رسوب آبراهه‌ای، تمام شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی یعنی  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{As-Mo}$  و  $GMPI_{Cu-A}$  دارای مقدار کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از حد فراوانی تجمعی ۹۵ درصد باشند در این صورت مقدار نهایی GMPI مس برای نمونه مورد نظر، برابر میانگین مقادیر تمام شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی است. دو معادله آخر (۴-۱۴ و ۴-۱۵) این حالت را نشان می‌دهند.

معادلات فوق می‌توانند به طور مؤثری برای ارزیابی میزان معرف بودن نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای برای جستجوی کانی‌سازی مس در بالادست آن‌ها مورد استفاده قرار گیرند. پس از محاسبه مقادیر نهایی GMPI برای مس ( $GMPI_{Porphyry Cu}$ )، مقادیر نظیر ۹۹، ۹۷/۵، ۹۵، ۹۰، ۸۴ و ۵۰ درصد فراوانی تجمعی برای آن محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۴. مقادیر معادل فراوانی تجمعی مختلف برای مقدار نهایی  $GMPI_{Porphyry Cu}$

	99 %	97.5 %	95 %	90 %	84 %	50 %
$GMPI_{Porphyry Cu}$	0.975	0.938	0.888	0.839	0.660	0.477

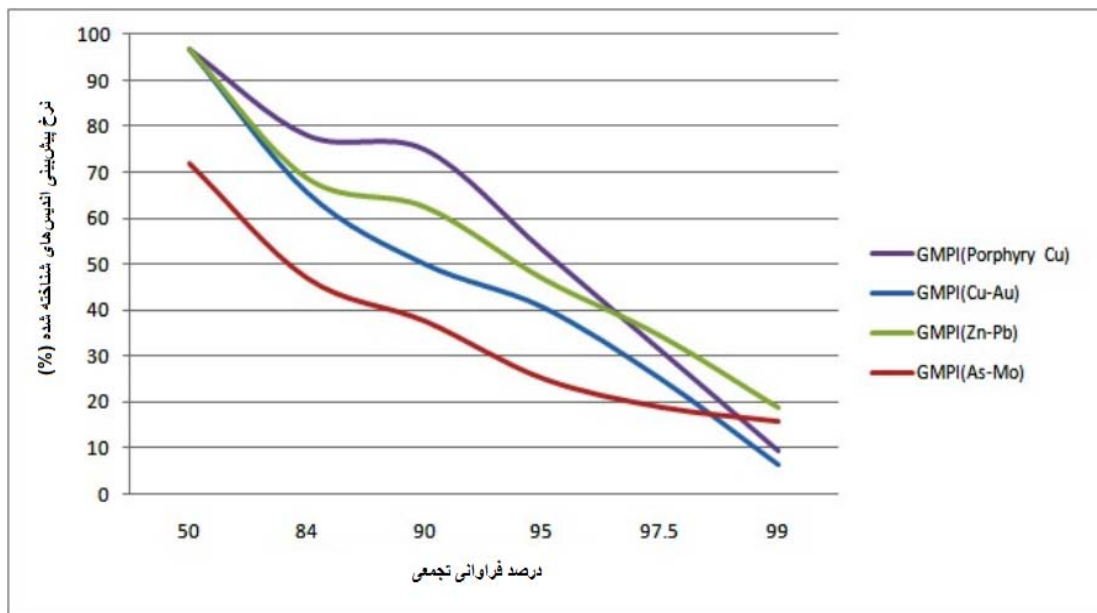
همان‌طور که از جدول ۴-۴ مشخص است مقدار  $GMPI_{\text{Porphyry Cu}}$  معادل ۹۵ درصد فراوانی  
تجمعی، برابر ۰/۸۸۸ است که قابل مقایسه با نقشه‌های امتیازات فاکتوری خواهد بود. در شکل ۴-۹  
نقشه توزیع نمونه‌های آنومالی به دست آمده از طریق  $GMPI_{\text{Porphyry Cu}}$  نشان داده شده است.  
همان‌طور که قبلاً بیان شد مقدار فراوانی تجمعی معادل ۹۵ درصد در تمام نقشه‌ها به عنوان حد  
جدایش در نظر گرفته شده تا مقایسه صورت گیرد.



شکل ۴-۹. توزیع نمونه‌های آنومالی بر اساس مقدار نهایی  $GMPI_{\text{Porphyry Cu}}$  برای حد آستانه ۰/۸۸۸

با توجه به نقشه شکل ۴-۹ تعداد اندیس‌های مس در بالادست نمونه‌های آنومالی برابر ۱۷ یعنی  
معادل ۵۳/۱۲ درصد کل اندیس‌ها می‌باشد. بنابراین در حالی که ترکیب‌های چند عنصری به‌دست  
آمده در خروجی روش SFA (مقادیر  $F_{\text{Cu-Au}}$  و  $F_{\text{As-Mo}}$ ،  $F_{\text{Zn-Pb}}$  در مرحله نهایی روش SFA در فصل  
قبل) و یا مقادیر فازی نظیر آن‌ها یعنی  $GMPI_{\text{Pb-Zn}}$ ،  $GMPI_{\text{As-Mo}}$  و  $GMPI_{\text{Cu-Au}}$ ، باعث بهبود نرخ  
پیش‌بینی اندیس‌های معدنی شده است، استفاده از  $GMPI_{\text{Porphyry Cu}}$  که حاصل ترکیب مقادیر  
 $GMPI$  مربوط به معرف‌های چند عنصری مختلف با استفاده از معادلات (۴-۸) تا (۴-۱۵) می‌باشد نیز  
موجب بهبود بیش‌تر و افزایش موفقیت اکتشاف می‌شود. به منظور بارزسازی این موضوع، نرخ  
پیش‌بینی اندیس‌های مس در بالادست نمونه‌های آنومالی، برای مقادیر ۹۹، ۹۷/۵، ۹۵، ۹۰، ۸۴ و ۵۰  
درصد فراوانی تجمعی، در حالت استفاده از  $GMPI_{\text{Pb-Zn}}$ ،  $GMPI_{\text{As-Mo}}$  و  $GMPI_{\text{Cu-Au}}$  و همچنین

مقادیر نهایی شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی مس یعنی  $GMPI_{Porphyry\ Cu}$  در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰. نرخ پیش‌بینی شاخص‌های احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی بر اساس ترکیب‌های چند عنصری گوناگون در مقابل مقادیر فراوانی تجمی مختلف

همان‌طور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود نرخ پیش‌بینی در نقشه نهایی شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی مس ( $GMPI_{Porphyry\ Cu}$ ) بالاتر از هر یک از نقشه‌های  $GMPI_{Pb-Zn}$ ،  $GMPI_{Cu-Au}$  و  $GMPI_{As-Mo}$  است. برتری  $GMPI$  نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی وقتی بیش‌تر نمایان می‌شود که نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی و درصد نمونه‌های آنومالی معرفی شده در خروجی روش‌های تحلیل فاکتوری معمولی،  $SFA$  و همچنین  $GMPI$  هم‌زمان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. جدول ۴-۵ این مقایسه را برای فراوانی ۹۵ درصد نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که کارایی نقشه شاهد ژئوشیمیایی با استفاده از روش  $SFA$  و همچنین روش  $GMPI$  نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی افزایش یافته است.



جدول ۴-۵. مقایسه درصد نمونه‌های آنومالی و نرخ پیش‌بینی متغیرهای ژئوشیمیایی مختلف

	F(Zn-Pb) در مرحله اول	F(Zn-Pb) در مرحله دوم	<i>GMPI</i> (Zn-Pb)	F(As-Mo) در مرحله اول	F(As-Mo) در مرحله دوم	<i>GMPI</i> (As-Mo)	F(Cu-Au) در مرحله اول	F(Cu-Au) در مرحله دوم	<i>GMPI</i> (Cu-Au)	<i>GMPI</i> نهایی
نمونه‌های آنومالی (%)	3.93	3.66	4.98	4.93	4.88	4.98	3.66	3.77	4.98	5.04
درصد نرخ پیش‌بینی	18.75	28.12	46.87	21.87	21.87	25	28.12	31.25	40.62	53.12

همان‌طور که از جدول ۴-۵ مشخص است نرخ پیش‌بینی از روش تحلیل فاکتوری معمولی به سمت روش SFA و همچنین روش *GMPI* به طور کاملاً محسوسی افزایش یافته است. نکته مهم‌تر این است که تعداد نمونه‌های آنومالی که در واقع مساحت تحت پوشش مناطق امیدبخش مورد جستجو را نشان می‌دهد از مقدار میانگین حدود ۴ درصد در تحلیل فاکتوری معمولی به حدود ۵ درصد (فقط ۱ درصد و تنها ۱۸ نمونه از ۱۸۰۴ نمونه) افزایش یافته است که البته با توجه به این که شدت آنومالی (تعداد نمونه‌های مجاور هم) بیش‌تر شده و پراکندگی نمونه‌ها زیادتر نشده است تأثیری در مساحت تحت پوشش ندارد.

#### ۴-۵- جداسازی آنومالی از نمونه با استفاده از *GMPI*

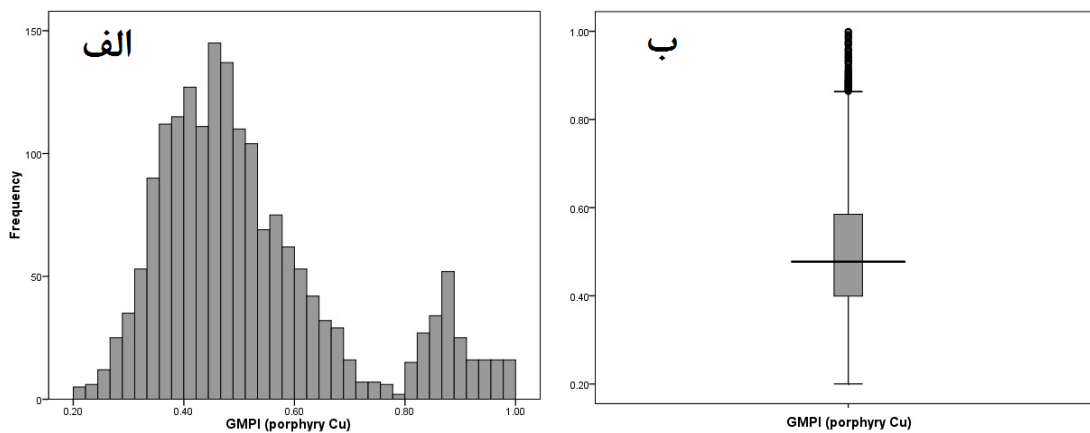
از آن‌جایی که مقدار *GMPI*، به تنهایی یک متغیر ژئوشیمیایی چند عنصری است که از داده‌های اولیه استخراج شده است بنابراین باید بتواند به تنهایی برای جداسازی نمونه‌های آنومالی از زمینه استفاده شود. به این منظور برای تعیین حد آستانه جداسازی آنومالی از زمینه بر اساس مقادیر نهایی *GMPI*، از رسم نمودارهای تحلیل داده‌های اکتشافی<sup>۱</sup> استفاده شده است. از آن‌جایی که حضور ذخایر شناخته شده و شناخته نشده همیشه می‌تواند باعث حضور مقادیر خارج از رده در داده‌ها شود (Ohta et al., 2005) بنابراین از رسم هیستوگرام فراوانی و نمودار جعبه‌ای<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> Exploratory data analysis

<sup>۲</sup> Box plot

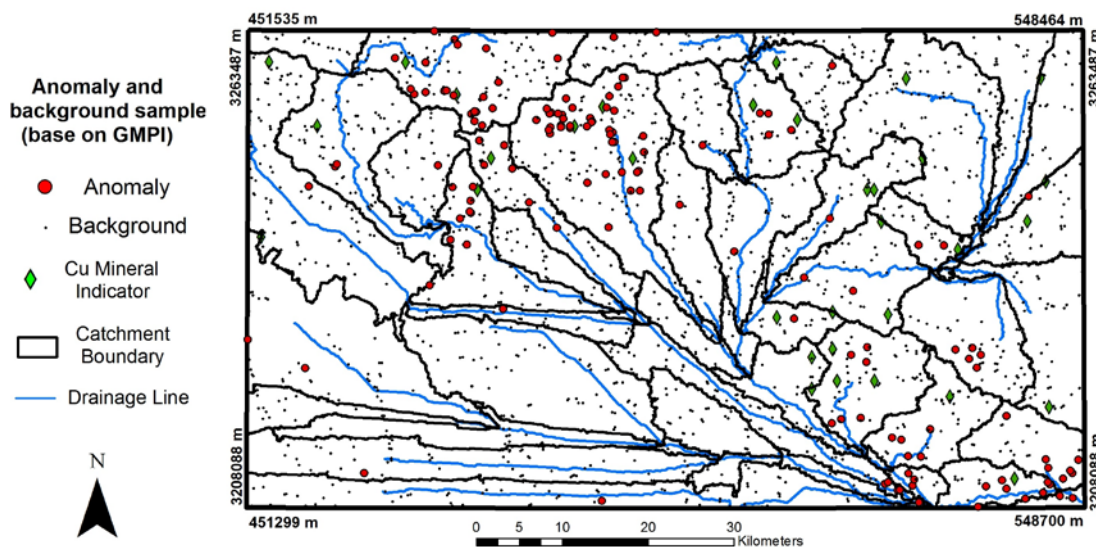
(Carranza, 2008؛ Reimann et al., 2005) برای تعیین حد آستانه جداسازی این مقادیر استفاده شده

که نتایج آن در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.



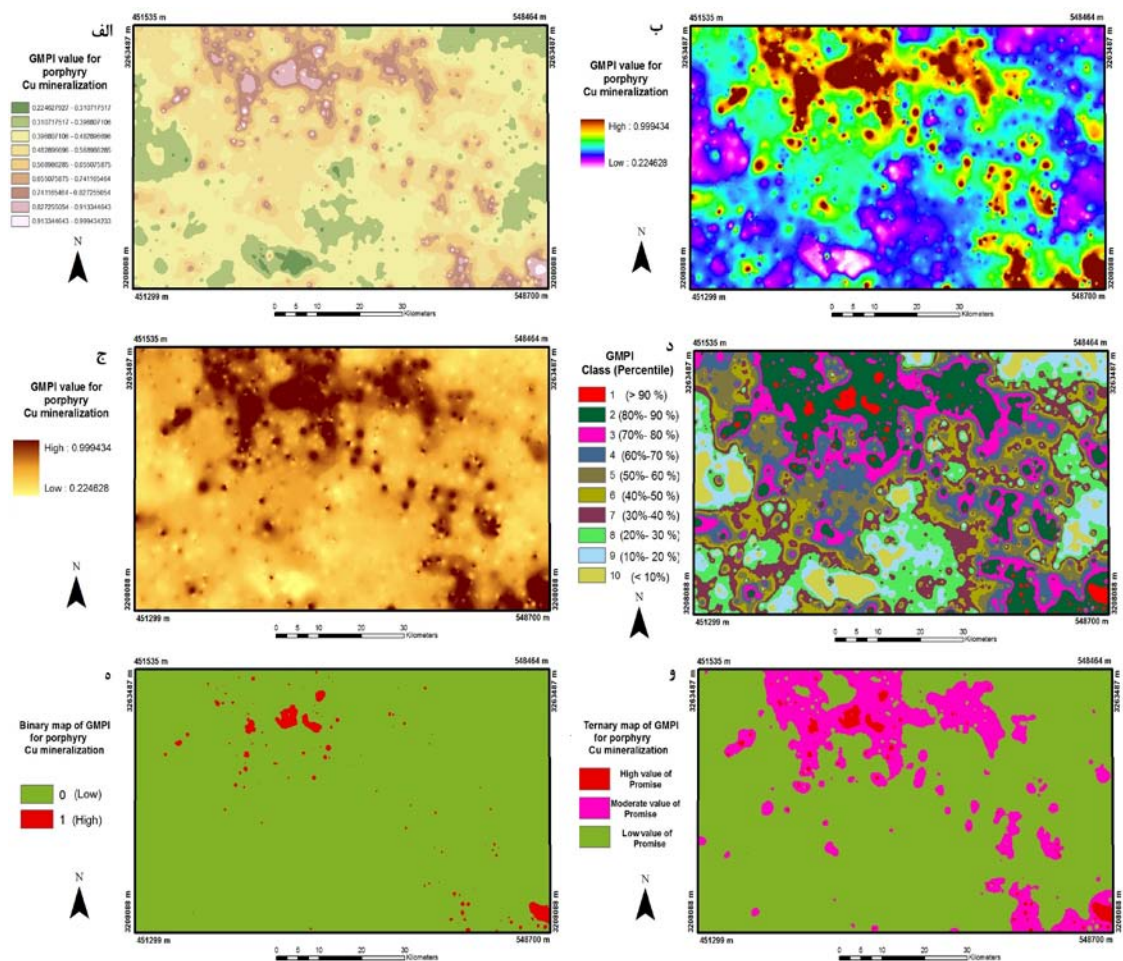
شکل ۴-۱۱. هیستوگرام (الف) و نمودار جعبه‌ای (ب) برای مقادیر نهایی GMPI Porphyry Cu

هیستوگرام مقادیر نهایی GMPI (شکل ۴-۱۱ الف) حضور دو جامعه اصلی را نشان می‌دهد که با حد آستانه ۰/۸ قابل جدا شدن هستند. همچنین نمودار جعبه‌ای مقادیر نهایی GMPI (شکل ۴-۱۱ ب) حضور مقادیر بزرگتر از ۰/۸۶ را به عنوان مقادیری که از داده‌ها فاصله گرفته‌اند نشان می‌دهد. بنابراین به طور محافظه‌کارانه مقدار ۰/۸۶ می‌تواند برای جداسازی نمونه‌های آنومالی از زمینه مورد استفاده قرار گیرد. توزیع این نمونه‌های آنومالی در نقشه شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲. توزیع نمونه‌های آنومالی با در نظر گرفتن حد آستانه ۰/۸۶ بر اساس نمودارهای تحلیل داده‌های اکتشافی (هیستوگرام و نمودار جعبه‌ای)

طبق نقشه شکل ۴-۱۲ تعداد اندیس‌های پیش‌بینی شده در بالادست نمونه‌های آنومالی برابر ۲۲ یعنی ۶۹ درصد است که بالاتر از تمام نرخ‌هایی است که تاکنون به دست آمده است. بنابراین روش GMPI بسیار قدرتمندتر از تحلیل فاکتوری معمولی در شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی و مناطق یا اهداف اکتشافی عمل می‌کند. شش نوع از نقشه‌های توزیع مقادیر GMPI (در این قسمت برای مس) در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. شکل‌های ۴-۱۳ الف، ۴-۱۳ ب و ۴-۱۳ ج نقشه‌های فازی توزیع مقادیر GMPI را نشان می‌دهند. نقشه ۴-۱۳ د توزیع مقادیر GMPI را برای ۱۰ بازه مساوی طبقه‌بندی شده از فراوانی تجمعی نشان می‌دهد. نقشه‌های ۴-۱۳ ا و ۴-۱۳ ب به ترتیب نقشه‌های دوتایی و سه کلاسه را برای توزیع مقادیر GMPI نشان می‌دهند.



شکل ۴-۱۳. انواع نقشه‌های توزیع مقادیر GMPI

#### ۴-۶- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات صورت گرفته در فصل حاضر، بعد از شناسایی بهترین ترکیب چند عنصری معرف کانی‌سازی مورد جستجو با استفاده از روش SFA، استفاده از تابع لجستیکی به منظور انتقال غیر خطی مقادیر امتیاز فاکتوری معرف کانی‌سازی به بازه ۰ و ۱ و تولید مقادیر GMPI، می‌تواند به نحو مؤثری به آنومالی‌های ژئوشیمیایی یک وزن فازی اختصاص داده و هم‌زمان تفکیک و جداسازی جوامع مختلف ژئوشیمیایی و شدت بخشی به آنومالی‌ها را بهبود دهد.

GMPI می‌تواند برای تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مورد استفاده قرار گیرد. در این خصوص برتری یک نقشه توزیع مقادیر GMPI در این است که در آن

تخصیص وزن بدون اعمال قضاوت کارشناس و همچنین بدون استفاده از مشخصات اندیس‌های شناخته شده در داخل منطقه مورد مطالعه صورت می‌گیرد. بنابراین این روش می‌تواند در مناطقی که حتی هیچ اندیس شناخته شده‌ای وجود ندارد برای تولید یک نقشه وزن‌دار ژئوشیمیایی و فازی‌سازی مقادیر وزن‌ها بدون قضاوت کارشناسی مورد استفاده قرار گیرد.

با استفاده از روش GMPI، نقشه‌های وزن‌دار قابل اعتمادتر برای پی‌جویی ذخیره مورد جستجو تولید می‌گردد زیرا این شاخص پس از حذف عناصر و ترکیبات غیر معرف در روش SFA، تولید شده است که باعث بهبود شناسایی ترکیب پیش‌گوی معرف می‌شود.

با استفاده از روش GMPI در واقع نقشه‌های احتمالی تولید می‌شوند که به عنوان یک شاهد، حضور یا عدم حضور یک نوع ذخیره مورد جستجو را در قسمت‌های مختلف یک منطقه نشان می‌دهند.

روش GMPI، در کنار افزایش نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی و افزایش شدت آنومالی‌های ژئوشیمیایی و در نتیجه افزایش موفقیت اکتشاف، یک روش قابل اعتمادتر و قدرتمندتر از روش‌های تحلیل فاکتوری معمولی (و همچنین مرحله‌ای) برای وزن‌دهی و فازی‌سازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای به منظور تولید یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی بهبود یافته و قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی است.

باید خاطر نشان شود که علاوه بر بهبودهایی که توسط روش GMPI حاصل می‌شود، مهم‌ترین قابلیت آن تخصیص وزن، با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی (دانش‌محور) و همچنین بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده (داده‌محور) می‌باشد.

## فصل پنجم

حوضه‌های آبریز وزن دار (WDCB) روشی بهبود

یافته برای به‌نقشه درآوردن آنومالی‌های

ژئوشیمیایی

## ۵-۱- مقدمه

با توجه به این که هر یک از دو روش مهم درون‌یابی یا منحنی میزان و تخصیص حوضه آبریز بالادست هر نمونه به عنوان سطح تاثیر آن (SCB)، که برای به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای معایبی هستند و این معایب به‌خصوص در مدل‌سازی پتانسیل معدنی یعنی تلفیق لایه شاهد ژئوشیمیایی با سایر لایه‌های اکتشافی باعث از دست رفتن برخی نواحی با اهمیت شده و یا نواحی امیدبخش به طور اشتباهی تعیین می‌شوند، بنابراین در فصل حاضر ضمن بیان مشکلات روش‌های موجود، روش جدیدی با عنوان حوضه‌های آبریز وزن‌دار (WDCB) توسعه داده شده که نسبت به روش‌های قبلی بهبود یافته بوده و موفقیت اکتشاف را نیز افزایش می‌دهد.

## ۵-۲- به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی

اکتشافات ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌های روشی مؤثر برای شناسایی مناطق آنومال به خصوص در مراحل اولیه اکتشاف ذخایر کشف نشده رخنمون‌دار و پنهان است. شناسایی آنومالی‌های با اهمیت در اکتشافات ژئوشیمیایی، بر اساس داده‌های حاصل از تجزیه نمونه‌های رسوب آبراه‌ای و تعیین غلظت عناصر، به منظور تولید لایه شاهد ژئوشیمیایی و تلفیق آن با سایر لایه‌های اکتشافی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی یک تیپ ذخیره مشخص، بسیار مهم است (Carranza, 2010c). در این خصوص محققین بسیاری، حل مسائل و مشکلات و یا توسعه روش‌های بهتر نسبت به روش‌های قبلی را، برای تشخیص و به نقشه درآوردن مناطق آنومال و زمینه در محیط‌های ژئوشیمیایی مختلف مد نظر قرار داده‌اند (Carranza, 2004a, 2008, 2010a, 2010c, 2011; Moon, 1999; Bonham-Carter, 1994; Spadoni et al., 2004; Spadoni, 2006). نمایش پراکندگی عناصر شیمیایی که حاصل از اندازه‌گیری غلظت عناصر در یک نقطه (در این‌جا نمونه رسوب آبراه‌ای) هستند با استفاده از

روش‌های مختلفی از جمله تولید نقشه‌های نمادین<sup>۱</sup>، منحنی میزان (Govett, 1983)، SCB (Carranza and Hale, 1997؛ Bonham-Carter and Goodfellow, 1984, 1986)؛ روش‌های مختلف (Carranza, 2010c؛ Spadoni et al., 2004)؛ نحوه آرایش آبراهه‌ها<sup>۲</sup> (Carranza, 2004a) و روش بسط یافته حوضه آبریز بالادست نمونه‌ها<sup>۳</sup> یا ESCB (Spadoni, 2006) مدل شده‌اند. به علت پیچیدگی فرآیندهای فرسایش و رسوب، تاثیر آلودگی‌ها (Bogen et al., 1992)؛ Macklin et al., 1994؛ Spadoni, 2006) و تاثیر ترکیب و نحوه توزیع پوشش‌ها (سنگ‌پوش‌ها) و همچنین سنگ بستر، جزئیات کنترل کننده تغییرات ترکیب در رسوبات آبراهه‌ای ناشناخته بوده و یا به طور بسیار ضعیفی شناخته شده است. بعضی از مهمترین عوامل کلی که تغییرات ترکیب رسوبات آبراهه‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهد شامل آب و هوا، پستی و بلندی سطح زمین و شکل آن و همچنین نحوه این‌گونه تغییرات در زیر سطح، تغییرات زمین‌شناسی و عوامل انسانی هستند (Spadoni, 2006). در روش‌های موجود برای تحلیل داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای به منظور اکتشاف مواد معدنی، عمدتاً پراکنش سطحی عناصر ژئوشیمیایی مدنظر قرار گرفته و از آن برای بیان کمی تاثیر عوامل زمین‌شناسی، پستی و بلندی و شکل زمین در تغییرات ترکیب عناصر و شناسایی آنومالی‌های وابسته به کانی‌سازی استفاده می‌شود (Hawkes, 1976؛ Moon, 1999)؛ Spadoni, 2006). همچنین در این خصوص هیچ معادله یا رابطه ریاضی به طور کامل و کافی پراکنش سطحی و زیر سطحی را به منظور مدل‌سازی تغییرات ترکیب عناصر در رسوبات آبراهه‌ای ارائه نمی‌دهد.

به طور تئوری تمرکز غلظت عناصر معرف در رسوبات آبراهه‌ای با افزایش فاصله از منشأ آنومالی (به عنوان مثال یک ذخیره معدنی) کاهش می‌یابد ولی در موارد بسیاری، شیب تغییرات غلظت عناصر در طول آبراهه‌ها خطی نیست زیرا فاکتورهای تاثیرگذار بر غلظت عناصر به طور غیر خطی تغییر می‌کنند

---

<sup>1</sup> Symbolic

<sup>2</sup> Stream orders

<sup>3</sup> Extended sample catchment basins



و پراکنش را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Xie et al., 2010؛ Yilmaz, 2003). بنابراین پیچیدگی الگوی آنومالی و پراکنش در اکثر مواقع وجود دارد. از این قبیل پیچیدگی‌ها می‌توان پنهان شدن یک آنومالی با شدت ضعیف در میان تغییرات زیادی از زمینه، وجود مقادیر زمینه در میان نواحی آنومالی و همچنین شرایطی را که در آن رسوبات آبراهه‌ای بلافاصله بعد از ذخایر معدنی غلظت در حد آنومالی نشان نمی‌دهند، را نام برد (Cheng, 2007). با وجود مشکلات فوق در مطالعات بسیاری از درون‌یابی مقدار غلظت (منحنی میزان) و همچنین از روش SCB، برای به نقشه درآوردن سطح تأثیر نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای و مدل‌سازی پراکنش سطحی (Hawkes, 1976؛ Moon, 1999؛ Spadoni, 2006) و همچنین جداسازی مناطق زمینه از آنومال (Moon, 1999؛ Bonham-Carter et al., 1987, 1988؛ Carranza and Hale 1997؛ Rantitsch, 2004؛ Spadoni et al., 2004؛ Ódor et al., 1997) استفاده می‌شود. در این خصوص با توجه به این‌که الگوی آنومالی‌های ناشی از فرآیندهای کانی‌سازی، توزیع فضایی و فراوانی آن‌ها می‌تواند بسیار پیچیده باشد (Zuo et al., 2009)، بنابراین در موارد زیادی این امکان وجود دارد که نمونه‌های با غلظت آنومالی در فواصل دور از کانی‌سازی مشاهده شوند (Hawkes, 1976؛ Moon, 1994) در حالی که در فواصل نزدیک‌تر ممکن است نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای غلظتی کم‌تر از حد آنومالی را نشان دهند این موارد متأثر از عواملی نظیر پستی و بلندی، شکل زمین و همچنین زمین‌شناسی و غیره است. (Hawkes (1976) و Solovov (1987) بیان کردند که تحلیل آنومالی‌های ژئوشیمیایی با استفاده از روش SCB، عمدتاً در مناطقی که در سرشاخه آبراهه‌ها قرار دارند و پراکنش سطحی غالب است، قابل کاربرد می‌باشد ولی در مناطقی که دور از سرشاخه‌های اولیه هستند و پراکنش عناصر تحت تأثیر آب‌های زیر سطحی بوده و یا به طور کلی پراکنش زیر سطحی غالب است، مناسب نمی‌باشند. علاوه بر این مهم‌ترین معایب روش‌های درون‌یابی و روش SCB، وابستگی آن‌ها به محل و چگالی نمونه‌برداری است. در روش SCB، سطح تأثیر هر نمونه رسوب آبراهه‌ای، حوضه بالادست آن تا نمونه بعدی بالایی است که از روی پستی و بلندی تعیین می‌گردد. در این خصوص با افزایش تعداد نمونه‌ها

و پیچیدگی شبکه آبراهه‌ها، تعیین حوضه آبریز بالادست هر نمونه رسوب آبراهه‌ای برای مدل‌سازی آنومالی‌های ژئوشیمیایی به روش SCB، بسیار پیچیده خواهد بود (Carranza, 2004a). زیرا هنوز روش کاملاً خودکار و مؤثر در این خصوص توسعه نیافته و تعیین سطح تأثیر باید به طور دستی با در نظر گرفتن هم‌زمان محل نمونه‌ها نسبت به هم، پستی و بلندی، شیب و شکل زمین (توپوگرافی) و همچنین شبکه آبراهه‌ها صورت گیرد. بنابراین روش‌های SCB و درون‌یابی ممکن است موجب خطا و اشتباه در تخمین نواحی زمینه و در نتیجه خطا در شناسایی منشأ آنومالی گردند (Pazand et al., 2011; Carranza, 2011; Zuo et al., 2009; Ranasinghe et al., 2008; Zuo, 2011). علاوه بر این تشخیص منشأ آنومالی‌ها از روی غلظت‌های رقیق شده عناصر در رسوبات آبراهه‌ها، به خصوص در مناطقی که پیچیدگی زمین‌شناسی وجود دارد، بسیار مشکل است. با در نظر گرفتن مسائل فوق در به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی و همچنین ارتباط پیچیده بین غلظت عناصر در رسوبات آبراهه‌ای و منشأ آن‌ها، هدف از فصل حاضر توسعه یک روش جدید به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای، با نام حوضه‌های آبریز وزن‌دار (WDCB)، به منظور دسترسی به مناطق کانی‌سازی و به خصوص آماده‌سازی نقشه شاهد ژئوشیمیایی قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی است.

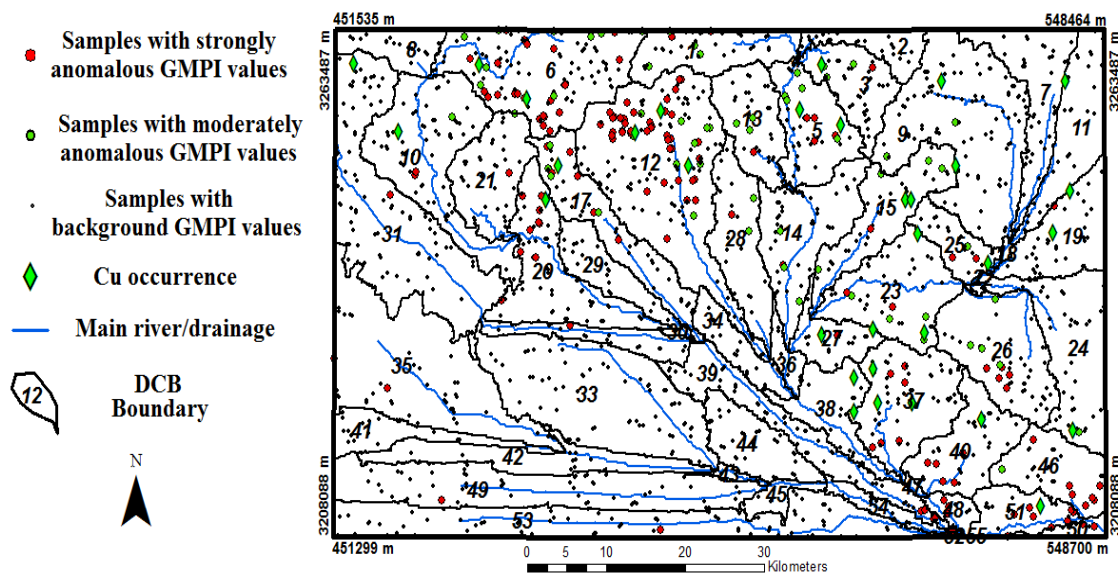
### ۵-۳- حوضه‌های آبریز وزن‌دار

در روش WDCB به جای استفاده از نمونه‌ها برای تعیین حوضه بالادست آن، از آبراهه‌های اصلی برای مشخص کردن مرز حوضه آبریز استفاده می‌شود. از حوضه‌های آبریز آبراهه‌های اصلی در مدل‌سازی و مطالعه آلودگی‌ها، فرسایش، پراکنش هیدروژئوشیمیایی، مهاجرت آب‌های زیرزمینی و بررسی منشأ رسوبات، بیش‌تر از روش SCB استفاده شده است (Matějček et al., 2003; Biondić et al., 2006; McKergow et al., 2005; Sidorchuk et al., 2003; Prtoljan et al., 2012). در این روش هر رودخانه (آبراهه اصلی) یک حوضه آبریز دارد. نقطه خروجی

هر آبراهه اصلی که در واقع نقطه تلاقی آن با دیگر آبراهه‌های اصلی است، نقطه شروع برای تعیین حوضه آبریز بالادست آن است. بنابراین تمام ناحیه بالادست نقطه خروجی یک آبراهه اصلی به عنوان حوضه آبریز آن آبراهه تلقی می‌گردد. در این صورت برخلاف روش SCB، در روش حوضه آبریز آبراهه‌ای، مرز حوضه به محل و چگالی نمونه‌ها مرتبط نیست.

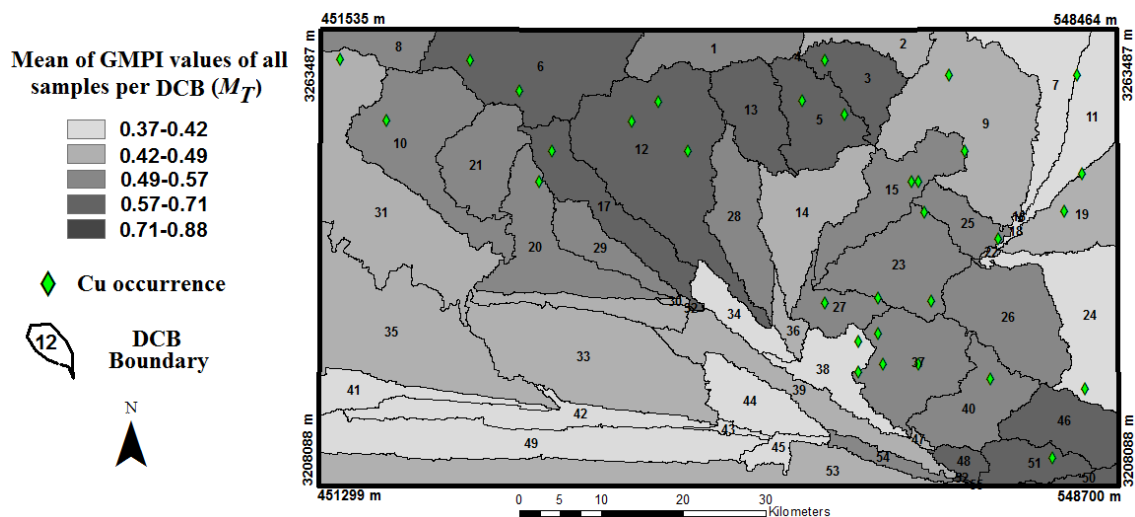
در روش حوضه آبریز آبراهه‌های اصلی، شبکه آبراهه‌ها در یک منطقه به حوضه‌های آبریز کوچک‌تر تقسیم می‌شوند که معرف یک سطح و محدوده‌ای از مدل پستی و بلندی و شکل زمین (Matějčíček et al., 2003) برای بررسی و مطالعه پارامترهای وابسته (Sidorchuk et al., 2003) مثل پراکنش ژئوشیمیایی است. رسوبات آبراهه‌ای شامل اطلاعاتی درباره نحوه پراکنش عناصر ژئوشیمیایی در حوضه آبریز خود هستند (Xie et al., 2010) زیرا ترکیب مواد تشکیل دهنده یک نمونه رسوب، از هوازگی و فرسایش (Howarth and Thornton, 1983؛ Ohta et al., 2005؛ Carranza, 2010c) و پراکنش تمام مواد داخل حوضه آبریز مشتق شده است. در این خصوص (Spadoni, 2006) ثابت کرد که ناحیه تحت تأثیر یک نمونه رسوب آبراهه‌ای می‌تواند هم در بالادست و هم در پایین‌دست محل نمونه باشد و همچنین بحث کرده که مقدار متغیرهای ژئوشیمیایی بلافاصله در پایین‌دست محل هر نمونه رسوب آبراهه‌ای، با محل خود نمونه اختلاف زیادی ندارد. بنابراین سطح تحت پوشش هر حوضه آبریز آبراهه‌ای به لحاظ پستی و بلندی و شکل زمین، محدوده تحت نفوذ کلیه نمونه‌های رسوب داخل آن می‌باشد. در این خصوص (Hawkes, 1976) و (Moon, 1999) تمام سطح یک حوضه آبریز را برای پیشنهاد روابط و معادلات ارزیابی آنومالی و زمینه در نظر گرفته‌اند. بنابراین وقتی که کل یک حوضه آبریز تحت تأثیر تمام نمونه‌های رسوب داخل آن است، نمونه‌های رسوب حوضه‌های آبریز دارای کانی‌سازی، طبیعتاً باید مقدار غلظت و تمرکز بالاتری را از عناصر، نسبت به رسوبات حوضه‌های فاقد کانی‌سازی نشان دهند. بنابراین باید از غلظت عناصر و یا سایر متغیرهای ژئوشیمیایی مربوط به تمام نمونه‌های داخل یک حوضه برای ارزیابی اهمیت نسبی آن‌ها به منظور پی‌جویی ذخایر معدنی استفاده نمود. در این صورت در حوضه‌های آبریز دارای کانی‌سازی، میانگین غلظت عناصر یا سایر متغیرهای

ژئوشیمیایی عموماً باید بالاتر از حوضه‌های فاقد کانی‌سازی باشد. برای اثبات فرضیه فوق و همچنین ارزیابی روش WDCB در این فصل، از داده‌های GMPI تولید شده برای پی‌جویی مس، به عنوان یک متغیر ژئوشیمیایی استنتاج شده برای هر نمونه رسوب آبراهه‌ای، در منطقه کرمان (تشریح شده در فصل‌های قبل) استفاده شده است. به این منظور ابتدا حوضه‌های آبریز آبراهه‌های اصلی مشخص گردید که تعداد آن‌ها ۵۵ بوده و در شکل ۵-۱ نشان داده شده‌اند. همچنین از شکل ۴-۱۱ برای انتخاب دو حد آستانه GMPI یعنی ۰/۸ و ۰/۸۶ برای جداسازی ۳ جامعه از مقادیر GMPI استفاده شد (شکل ۵-۱). همان طور که در شکل ۵-۱ مشخص است این ۳ جامعه شامل آنومالی قوی، جامعه با آنومالی متوسط و جامعه زمینه می‌باشند.



شکل ۵-۱. حوضه‌های آبریز آبراهه‌ای و توزیع ۳ جامعه از نمونه‌های ژئوشیمیایی به صورت نمادین. در این شکل از مقادیر ۰/۸ و ۰/۸۶ برای جداسازی ۳ جامعه GMPI استفاده شده است

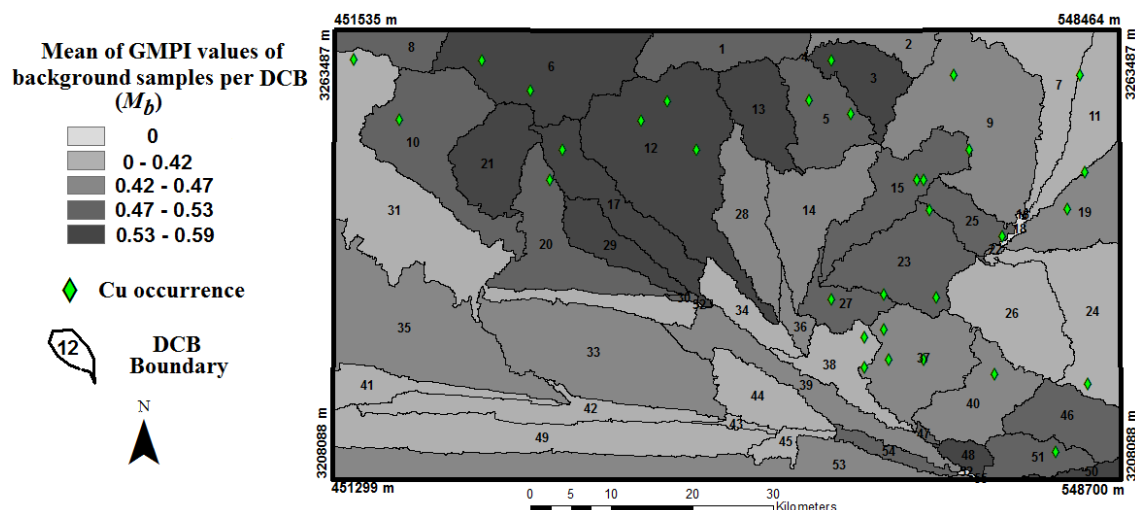
پس از مشخص شدن ۳ جامعه از GMPI، برای حوضه‌های آبریز آبراهه‌ای نشان داده شده در شکل ۵-۱، میانگین مقادیر GMPI ( $M_T$ ) با در نظر گرفتن تمام نمونه‌های داخل هر یک از این حوضه‌ها محاسبه و به نقشه تبدیل شد (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۲. مقدار میانگین شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی ( $M_T$ ) تمام نمونه‌ها در هر حوضه آبریز نشان داده شده در شکل ۵-۱

همان طور که از شکل ۵-۲ مشخص است مقدار  $M_T$  برای حوضه‌های آبریز دارای اندیس شناخته شده مس (حوضه‌های با شماره ۶، ۱۷، ۱۲، ۵، ۳، ۱۵، ۲۵، ۵۱، ۳۷، ۲۷، ۴۰، ۲۳، ۱۹، ۱۰ و ۲۰) عموماً بالاتر از دیگر حوضه‌ها است. همچنین در شکل ۵-۲ حوضه‌های آبریزی وجود دارد که در آن‌ها اندیس شناخته شده دیده نمی‌شود ولی مقدار  $M_T$  آن‌ها قابل مقایسه با مقدار  $M_T$  حوضه‌های دارای اندیس شناخته شده است (مانند حوضه‌های شماره ۱، ۸، ۱۳، ۲۸، ۲۹، ۲۱، ۲۶، ۴۶، ۴۸، ۵۰ و ۵۴). بنابراین این حوضه‌ها می‌توانند برای پی‌جویی بیش‌تر مورد توجه قرار گیرند.

علاوه بر مورد فوق برای هر حوضه آبریز، میانگین مقادیر GMPI فقط برای نمونه‌های زمینه داخل آن ( $M_b$ ) نیز محاسبه و به نقشه تبدیل شد (شکل ۵-۳). یعنی برای محاسبه  $M_b$  فقط از نمونه‌های دارای مقدار GMPI کوچک‌تر از ۰/۸ استفاده شد.



شکل ۳-۵. مقدار میانگین شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی نمونه‌های زمینه ( $M_b$ ) در هر حوضه آبریز

از مقایسه نقشه‌های شکل‌های ۲-۵ و ۳-۵ مشخص می‌شود که توزیع مقادیر  $M_T$  و  $M_b$  مانند هم هستند. بنابراین ثابت می‌شود که حتی سطح زمینه متغیرهای ژئوشیمیایی در حوضه‌های آبریز دارای کانی‌سازی بالاتر از حوضه‌های فاقد کانی‌سازی است. شباهت شکل‌های ۲-۵ و ۳-۵ نشان می‌دهد که اگر به جای استفاده از بالادست هر نمونه رسوب آبراهه‌ای به عنوان منطقه تحت تأثیر آن، از روش حوضه آبریز آبراهه‌ای استفاده شود، علی‌رغم ساده‌سازی و اجتماع تمام نمونه‌های هر حوضه آبریز برای به نقشه درآوردن متغیرهای ژئوشیمیایی، شناسایی مناطق دارای کانی‌سازی به نحو مطلوبی صورت می‌گیرد.

پس از بیان مشکلات و مسائل روش‌های موجود در قسمت‌های قبل و اثبات این که مقدار میانگین کل نمونه‌ها و همچنین میانگین زمینه متغیرهای ژئوشیمیایی در حوضه‌های آبریز دارای کانی‌سازی بالاتر از سایر حوضه‌های آبریز است که باید مورد توجه قرار گیرد، سوال این است که چگونه باید از آن در به نقشه درآوردن متغیرهای ژئوشیمیایی و همچنین آماده‌سازی یک لایه شاهد وزن‌دار ژئوشیمیایی قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی بهره‌گرفت؟ با توجه به این که نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای در هر حوضه آبریز دارای سطح غلظت متفاوتی از عناصر هستند، مقادیر غلظت عناصر در جوامع مختلف

ژئوشیمیایی باید مد نظر قرار گیرد. بنابراین برای محاسبه یک ارزش پی‌جویی ( $C_x$ ) برای هر حوضه آبریز رودخانه‌ای، می‌توان از رابطه (۱-۵) استفاده نمود.

$$C_x = \sum_{i=1}^L i \left( M_i \frac{n_i}{N_T} \times 100 \right) \quad (1-5)$$

در رابطه (۱-۵)،  $L$  تعداد جوامع ژئوشیمیایی در نظر گرفته شده برای متغیر ژئوشیمیایی مورد نظر در مجموعه داده‌های مورد استفاده است.  $M_i$  مقدار میانگین غلظت عناصر (یا مقدار میانگین متغیر ژئوشیمیایی مورد استفاده مثلاً امتیاز فاکتوری یا GMPI) در جامعه  $i$  می‌باشد.  $n_i$  تعداد نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای در هر حوضه آبریز می‌باشد که در جامعه  $i$  طبقه‌بندی می‌شوند و  $N_T$  تعداد کل نمونه‌های رسوب در هر حوضه آبریز می‌باشد. در این حالت  $i$  برابر ۱ معادل جامعه با حداقل مقدار غلظت یا جامعه کاملاً زمینه است و همچنین  $i$  برابر  $L$  معادل جامعه با حداکثر غلظت یا جامعه کاملاً آنومالی است. بنابراین  $M_L$  مقدار میانگین غلظت عناصر (یا مقدار میانگین متغیر ژئوشیمیایی مورد استفاده مثلاً امتیاز فاکتوری یا GMPI) در بالاترین جامعه ژئوشیمیایی (حداکثر آنومالی یا  $L$ ) می‌باشد و  $n_L$  تعداد نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای در هر حوضه آبریز می‌باشد که در جامعه با حداکثر آنومالی ( $L$ ) طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به متغیرهای فوق در رابطه (۱-۵) مقدار  $C_x$ ، به سطح غلظت عناصر یا متغیرهای ژئوشیمیایی در تمام نمونه‌های رسوب برای هر حوضه آبریز آبراهه‌ای مرتبط می‌شود. بنابراین یک نقشه مقادیر  $C_x$  مانند یک نقشه درون‌یابی شده بوده در حالی که همچنان یک مدل گسسته می‌باشد زیرا مقادیر  $C_x$  به هر یک از حوضه‌های آبریز تخصیص می‌یابد. در رابطه (۱-۵) تعداد نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای طبقه‌بندی شده در هر جامعه از متغیرهای ژئوشیمیایی، در تخصیص وزن به حوضه‌های آبریز آبراهه‌ای تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال اگر در یک حوضه آبریز تعداد نمونه‌های آنومالی، نسبت به سایر حوضه‌های آبریز بیشتر باشد، مقدار  $C_x$  آن عموماً بیش‌تر از بقیه خواهد بود. در رابطه (پ ۲) شکل بسط یافته رابطه (۱-۵) آمده است. در مورد داده‌های مطالعه موردی مس، بر اساس شکل ۱-۵ از ۳ جامعه از آنومالی‌های ژئوشیمیایی شامل آنومالی با شدت بالا و

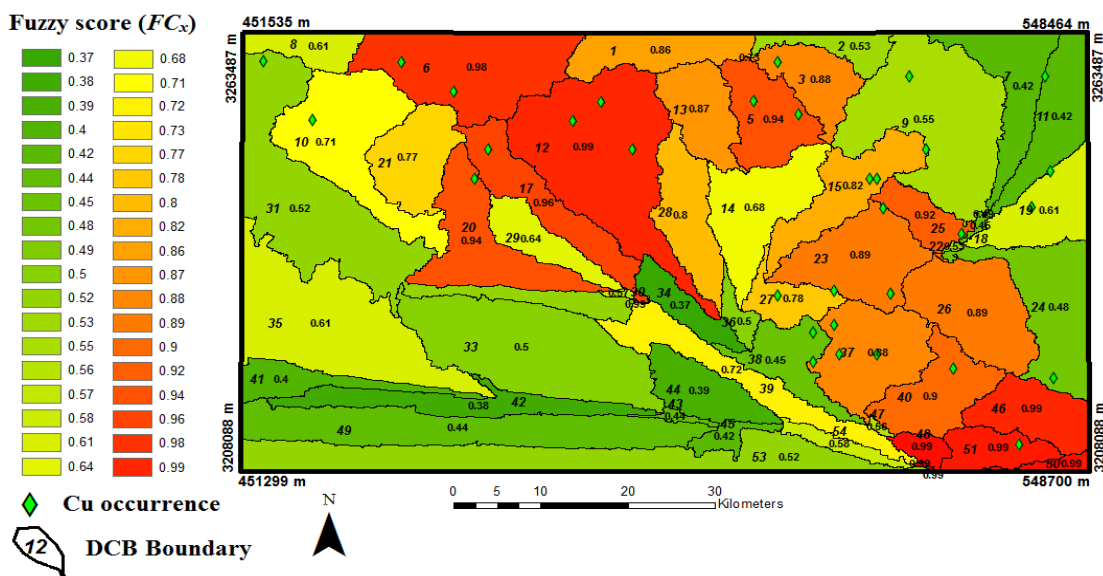
قوی (s)، آنومالی با شدت متوسط (m) و مقادیر زمینه (b) برای محاسبه  $C_x$  هر حوضه آبریز استفاده شده است. بنابراین رابطه (۱-۵) به صورت رابطه (۲-۵) برای داده‌های مطالعه موردی نوشته می‌شود.

$$C_x = \left( M_b \frac{n_b}{N_T} \times 100 \right) + 2 \left( M_m \frac{n_m}{N_T} \times 100 \right) + 3 \left( M_s \frac{n_s}{N_T} \times 100 \right) \quad (2-5)$$

با استفاده از رابطه (۲-۵)، برای هر یک از ۵۵ حوضه آبریزهای یک وزن  $C_x$  محاسبه گردید که در جدول ۱-۵ آمده است. همان طور که از این جدول مشخص است، مقادیر  $C_x$  مربوط به حوضه‌های آبریز، خارج از بازه ۰ و ۱ قرار داشته و بنابراین غیر احتمالی بوده و برای نمایش احتمالی حضور یا عدم حضور کانی‌سازی در هر حوضه آبریز مناسب نیستند. بنابراین به منظور تولید وزن‌های احتمالی بین ۰ و ۱ و قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش منطق فازی، مقادیر  $C_x$  با استفاده از تابع لجستیکی رابطه (۳-۵) به فضای ۰ و ۱ انتقال یافتند.

$$FC_x = \frac{1}{1 + e^{-s(C_x - i)}} \quad (3-5)$$

در رابطه (۳-۵)،  $FC_x$  ارزش فازی حوضه آبریز بوده و  $i$  و  $s$  نیز مانند فصل‌های قبل به ترتیب نقطه عطف و شیب تابع لجستیکی هستند. در مطالعه حاضر از ۰/۰۶۵ و ۴۵ به ترتیب برای مقادیر  $s$  و  $i$  استفاده شد. مقادیر  $FC_x$  در جدول ۱-۵ آمده و همچنین توزیع آن‌ها به نقشه تبدیل شده و در شکل ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵. نقشه حوضه‌های آبریز وزن‌دار، توزیع مقادیر وزن فازی ( $FC_x$ )



جدول ۵-۱. پارامترهای محاسبه شده برای هر حوضه آبریز:  $N_T$  تعداد نمونه‌ها،  $M_T$  میانگین مقادیر GMPI،  $n_s$  تعداد نمونه‌های با مقدار GMPI آنومالی قوی،  $M_s$  میانگین مقادیر GMPI آنومالی قوی،  $n_m$  تعداد نمونه‌های با مقدار GMPI آنومالی متوسط،  $M_m$  میانگین مقادیر GMPI آنومالی متوسط،  $n_b$  تعداد نمونه‌های با مقدار GMPI زمینه،  $M_b$  میانگین مقادیر GMPI زمینه،  $C_x$  ارزش حوضه آبریز،  $FC_x$  ارزش فازی حوضه آبریز

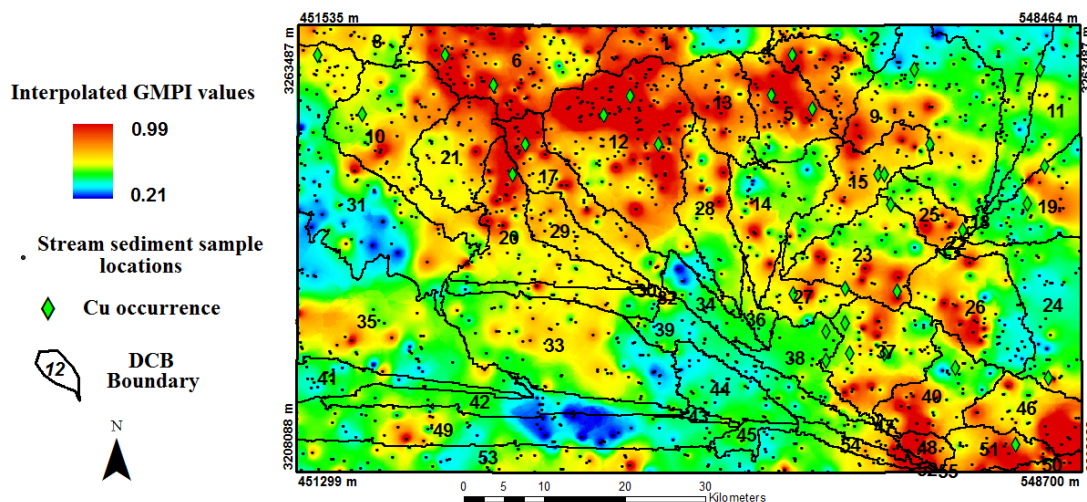
DCB ID	$N_T$	$M_T$	$N_s$	$M_s$	$n_m$	$M_m$	$n_b$	$M_b$	$C_x$	$FC_x$
1	39	0.56	2	0.92	4	0.84	33	0.5	73.45	0.86
2	22	0.47	0	0	0	0	22	0.47	47	0.53
3	33	0.62	1	0.93	3	0.84	29	0.59	76.1	0.88
4*	0	0.52	0	0	0	0	0	0.49	60.22	0.73
5	41	0.60	4	0.89	5	0.83	32	0.53	88.33	0.94
6	106	0.66	22	0.89	9	0.84	75	0.57	110.1	0.98
7	36	0.4	0	0	0	0	36	0.4	40	0.42
8	17	0.52	0	0	0	0	17	0.52	52	0.61
9	89	0.46	0	0	2	0.84	87	0.45	48.3	0.55
10	63	0.52	2	0.94	1	0.83	60	0.5	59.3	0.71
11	30	0.4	0	0	0	0	30	0.4	40.29	0.42
12	139	0.7	42	0.91	9	0.84	88	0.58	130	0.99
13	31	0.61	1	0.87	3	0.84	27	0.58	74.92	0.87
14	44	0.47	1	0.89	3	0.82	40	0.43	56.77	0.68
15	36	0.54	1	0.86	4	0.82	31	0.5	68.8	0.82
16*	0	0.43	0	0	0	0	0	0.43	44.15	0.49
17	48	0.62	6	0.92	5	0.84	37	0.54	93.79	0.96
18*	0	0.42	0	0	0	0	0	0.41	42.22	0.45
19	35	0.46	1	0.88	0	0	34	0.45	51.74	0.61
20	56	0.57	9	0.96	0	0	47	0.5	88.75	0.94
21	36	0.57	1	0.86	1	0.85	34	0.55	63.72	0.77
22	1	0.47	0	0	0	0	1	0.47	47	0.53
23	33	0.56	2	0.89	4	0.83	27	0.5	77.4	0.89
24	37	0.41	0	0	1	0.84	36	0.4	43.87	0.48
25	17	0.55	2	0.94	1	0.82	14	0.48	82.75	0.92
26	43	0.5	5	0.88	4	0.84	34	0.4	78.68	0.89
27	14	0.51	1	0.93	0	0	13	0.48	64.61	0.78
28	22	0.501	1	0.86	2	0.84	19	0.45	66.15	0.8
29	24	0.54	0	0	0	0	24	0.54	54.28	0.64
30	3	0.49	0	0	0	0	3	0.49	49.24	0.57
31	108	0.43	2	0.93	0	0	106	0.42	46.13	0.52
32	1	0.83	0	0	1	0.83	0	0	166.27	0.99
33	68	0.45	0	0	0	0	68	0.45	44.77	0.5
34	19	0.37	0	0	0	0	19	0.37	36.96	0.37
35	50	0.45	2	0.89	0	0	48	0.43	52.12	0.61
36	5	0.45	0	0	0	0	5	0.45	45.24	0.50
37	48	0.53	6	0.93	0	0	42	0.47	75.92	0.88
38	19	0.42	0	0	0	0	19	0.42	41.9	0.45
39	56	0.46	4	0.9	0	0	52	0.43	59.37	0.72
40	35	0.54	5	0.94	0	0	30	0.47	80.23	0.90
41	18	0.39	0	0	0	0	18	0.39	38.65	0.4
42	17	0.37	0	0	0	0	17	0.37	37.31	0.38
43	4	0.41	0	0	0	0	4	0.41	41.42	0.44
44	28	0.38	0	0	0	0	28	0.38	38.1	0.39
45	5	0.4	0	0	0	0	5	0.40	40.32	0.42
46	26	0.63	7	0.93	1	0.80	18	0.51	117.06	0.99
47	1	0.49	0	0	0	0	1	0.49	48.88	0.56
48	8	0.71	3	0.94	0	0	5	0.58	142.88	0.99
49	69	0.39	1	0.86	0	0	68	0.38	41.58	0.44
50	8	0.69	3	0.94	0	0	5	0.54	140.04	0.99
51	18	0.65	7	0.88	0	0	11	0.51	133.68	0.99
52	1	0.88	1	0.88	0	0	0	0	265.54	0.99
53	85	0.44	1	0.95	0	0	84	0.43	46.35	0.52
54	10	0.5	0	0	0	0	10	0.5	49.82	0.58
55*	0	0.66	0	0	0	0	0	0.22	155.94	0.99

\* مقادیر  $M_T$ ،  $M_b$  و  $C_x$  حوضه‌های شماره ۴، ۱۶، ۱۸ و ۵۵ که سطح بسیار کوچکی دارند و از آن‌ها نمونه‌برداری نشده است، بر اساس میانگین مقادیر دو حوضه بالادست محاسبه شده است.

همان طور که از نقشه شکل ۴-۵ مشخص است حوضه‌های آبریز دارای اندیس شناخته شده مس، دارای مقادیر  $FC_x$  بالا بوده و همچنین تعدادی از حوضه‌ها مانند حوضه‌های ۴۶، ۲۶، ۱۳، ۱، ۲۸، ۵۰ و ۴۸ که در آن‌ها اندیس شناخته شده وجود ندارد نیز دارای مقدار  $FC_x$  بالا هستند. نقشه شکل ۴-۵ در واقع یک نقشه وزن‌دار حوضه‌های آبریز بوده که برای پی‌جویی مس تولید شده و به همین صورت می‌تواند به عنوان یک نقشه فازی با سایر لایه‌های اکتشافی در مدل‌سازی پتانسیل معدنی تلفیق گردد.

#### ۴-۵- مقایسه روش WDCB با نقشه‌های منحنی میزان و روش SCB

به منظور اثبات برتری روش WDCB نسبت به نقشه‌های منحنی میزان و روش SCB، جهت تحلیل الگوهای آنومالی پیچیده و بهبود نتایج مدل‌سازی پتانسیل معدنی، ابتدا نقشه درون‌یابی شده مقادیر GMPI ترسیم گردید که در شکل ۵-۵ نشان داده شده است.

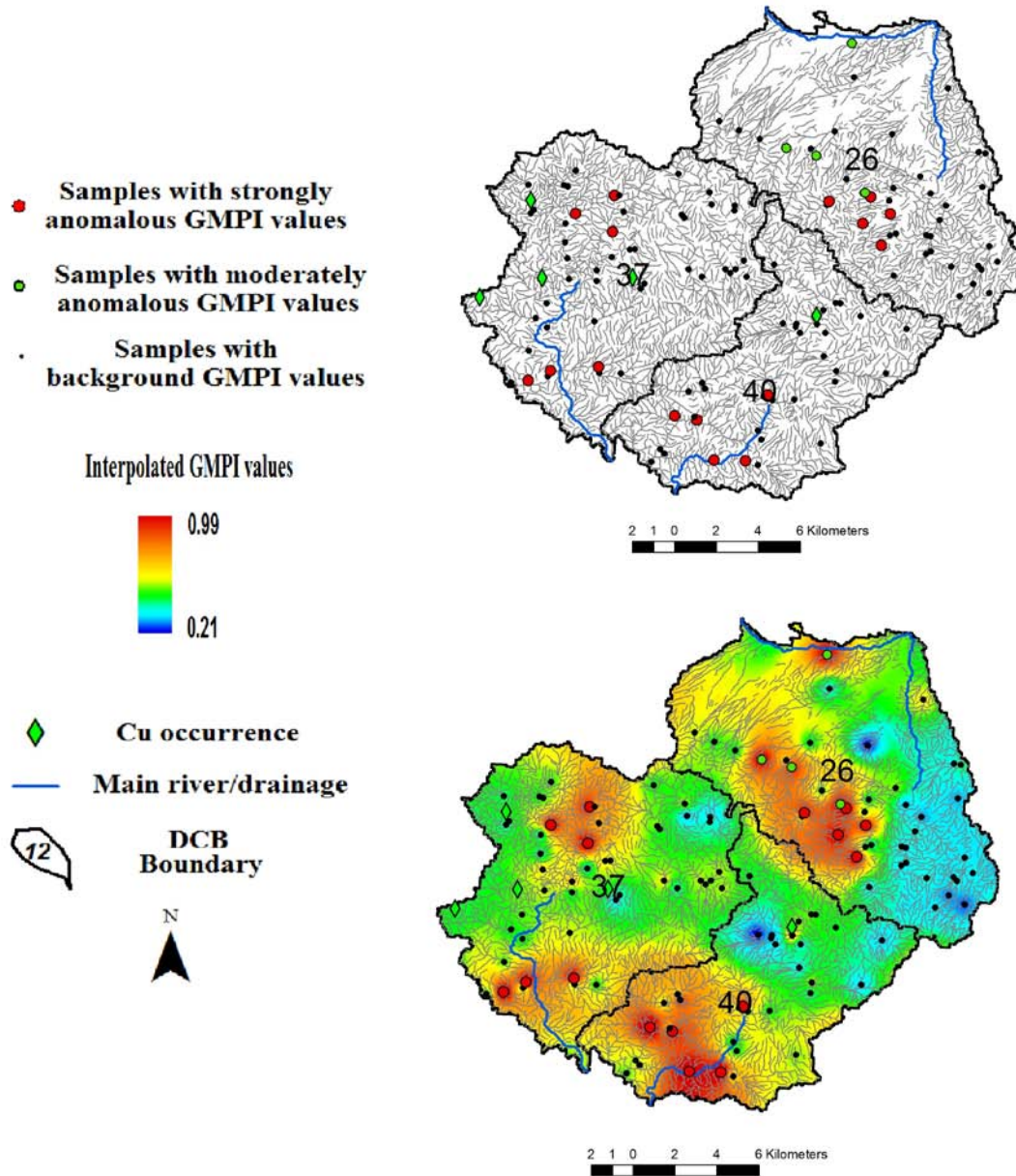


شکل ۵-۵. مقادیر درون‌یابی شده شاخص احتمالی کانی‌سازی ژئوشیمیایی مس

همان‌طور که از نقشه شکل ۵-۵ مشخص است با توجه به این‌که این نقشه از درون‌یابی مقادیر GMPI برای نمایش توزیع آن استفاده کرده است در برخی موارد نتوانسته اندیس‌های شناخته شده را

در مناطق با مقادیر GMPI بالا برای پی‌جویی مس مورد شناسایی قرار دهد. به منظور مقایسه نتایج، این نقشه با نقشه حوضه آبریز وزن‌دار (شکل ۵-۴)، به عنوان مثال حوضه‌های آبریز شماره‌های ۱۲، ۱۵، ۳۷، ۴۰ (دارای اندیس شناخته شده) و همچنین حوضه آبریز شماره ۲۶ (بدون اندیس شناخته شده)، مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در این خصوص در حوضه شماره ۱۲، بلافاصله در پایین‌دست اندیس‌های شناخته شده، نمونه‌های آنومالی قرار دارند. بنابراین در نقشه درون‌یابی شده شکل ۵-۵ این اندیس‌ها جزء مناطق با اهمیت و دارای مقدار بالای GMPI قرار گرفته‌اند. در حالی که در حوضه‌های آبریز شماره‌های ۱۵، ۳۷ و ۴۰ بلافاصله در پایین‌دست اندیس‌های شناخته شده، نمونه‌های آنومالی وجود ندارد که باعث شده موقعیت این اندیس‌ها به عنوان مناطق آنومالی قوی طبقه‌بندی نشود. به منظور بارزسازی مطلب فوق حوضه‌های شماره ۳۷، ۴۰ و ۲۶ با مقیاس بزرگ در شکل ۵-۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۶ دیده می‌شود، در حوضه‌های ۳۷ و ۴۰ نمونه‌های آنومالی دور از اندیس‌های شناخته شده و در پایین دست آن‌ها قرار دارند. بنابراین مناطق مجاور اندیس‌های شناخته شده در این دو حوضه جزء مناطق آنومال قوی طبقه‌بندی نشده‌اند. یعنی بعضی مناطق دارای اهمیت و بسیار مهم از اولویت اکتشاف حذف شده‌اند. به عنوان مثال تعداد ۸ اندیس شناخته شده در حوضه‌های ۱۵، ۳۷ و ۴۰ در صورتی که از روش درون‌یابی استفاده شود از دست می‌روند (شکل‌های ۵-۵ و ۶-۵). همچنین همان‌طور که در شکل‌های ۱-۵، ۵-۵ و ۶-۵ مشخص است اگر از روش حوضه آبریز بالادست هر نمونه رسوب آبراهه‌ای به عنوان سطح تأثیر آن استفاده شود همچنان تعداد ۸ اندیس شناخته شده در حوضه‌های ۱۵، ۳۷ و ۴۰ جزء مناطق کم اهمیت طبقه‌بندی می‌گردند. این مسئله به خوبی و به نحو بسیار بارزی از شکل ۵-۶ قابل برداشت است. زیرا به عنوان مثال بین نمونه‌های آنومالی و اندیس‌های شناخته شده در حوضه‌های ۳۷ و ۴۰ تعدادی نمونه با مقدار GMPI در حد زمینه قرار دارند که اگر از روش SCB، برای به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی استفاده شود، در این حوضه‌ها در بالادست نمونه‌های آنومالی، مناطق آنومال حداکثر تا قبل از نمونه‌های با مقدار GMPI در حد زمینه گسترش یافته و اندیس‌های شناخته شده

موجود در این گونه حوضه‌ها (مثلاً ۳۷ و ۴۰) جزء مناطق زمینه طبقه‌بندی و در مراحل بعدی اکتشاف در اولویت قرار نمی‌گیرند. در مورد حوضه ۲۶ نمونه‌های آنومالی در بخش‌های بالایی حوضه قرار دارند که کل آن بخش‌ها امیدبخش هستند. این حوضه با حوضه شماره ۱۲ قابل مقایسه است.



شکل ۵-۶. توزیع نمونه‌های آنومالی و زمینه در حوضه‌های آبریز ۲۶، ۳۷ و ۴۰ و مقایسه روش درون‌یابی و روش SCB

با توجه به توضیحات فوق روش‌های درون‌یابی متغیرهای ژئوشیمیایی و روش SCB در مقایسه با روش WDCB دارای ضعف، به‌خصوص در شرایط حضور آنومالی‌های با الگوی پیچیده و در مواردی

است که بلافاصله بعد از کانی‌سازی، نمونه‌های رسوب برداشت شده غلظت در حد آنومالی نشان نمی‌دهند. در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود که چنین حوضه‌هایی از ارزش بالایی در روش WDCB، برخلاف روش‌های درون‌یابی و روش SCB، برخوردار بوده و در اولویت اکتشافی قرار می‌گیرند. شکل پ ۱۱ پیوست، عدم کارایی مناسب روش SCB را در حالت الگوی آنومالی پیچیده نشان می‌دهد.

## ۵-۵- نتیجه‌گیری

بررسی‌های صورت گرفته در فصل حاضر نشان می‌دهد که در حالت‌های با الگوی آنومالی پیچیده (به عنوان مثال در حالتی که بلافاصله در پایین دست منطقه کانی‌سازی شده نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای، غلظت در حد آنومالی نشان نمی‌دهند و یا محل آنومالی‌ها از کانی‌سازی فاصله دارند)، نقشه‌های درون‌یابی شده و همچنین استفاده از روش SCB باعث از دست رفتن مناطق کانی‌سازی در اکتشافات بعدی شده و برخی نواحی مهم و کانی‌سازی شده از اولویت اکتشاف حذف می‌گردد. دلیل از دست رفتن کانی‌سازی در این شرایط، عدم کارایی مناسب دو روش قبلی در به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای یعنی در شرایط مواد انتقال یافته و همچنین در مناطق با الگوی آنومالی پیچیده است زیرا به علت تفاوت در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی (برای مثال تحرک) عناصر ژئوشیمیایی، نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای با تمرکز در حد آنومالی می‌توانند در محل‌های مختلفی در پایین دست کانی‌سازی قرار گیرند. بنابراین با توجه به این که روش WDCB از تمام ناحیه یک حوضه به همراه تمام نمونه‌های برداشت شده از آن و حتی از تمام جوامع مختلف ژئوشیمیایی مربوطه، برای تخصیص ارزش اکتشافی آن حوضه در مقایسه با سایر حوضه‌ها استفاده می‌کند، باعث می‌شود که برخی از کانی‌سازی‌ها با الگوی آنومالی پیچیده از دست نروند. بنابراین نقشه‌های WDCB مؤثرتر از نقشه‌های درون‌یابی شده و SCB در به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی عمل می‌کنند. یک نقشه WDCB می‌تواند برای تحلیل‌های تک متغیره و یا متغیرهای استنتاج شده چند

عنصری ژئوشیمیایی مثل تحلیل فاکتوری و یا GMPI ترسیم گردد. برتری‌های روش WDCB نسبت به روش درون‌یابی و SCB را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

۱- آنومالی‌های به دست آمده از روش WDCB همراهی بیش‌تری را با اندیس‌های معدنی نشان می‌دهند.

۲- در روش WDCB به هر حوضه آبریز یک وزن فازی تخصیص می‌یابد که اهمیت نسبی آن را نسبت به سایر حوضه‌ها برای پی‌جویی یک تیپ کانی‌سازی مشخص نشان می‌دهد. بنابراین یک نقشه WDCB به عنوان یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی، می‌تواند مستقیماً در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش منطق فازی در تلفیق با سایر لایه‌های اکتشافی استفاده شود.

۳- با استفاده از روش WDCB مهم‌ترین مشکل روش‌های درون‌یابی و SCB، یعنی وابستگی به محل و چگالی نمونه‌برداری مرتفع می‌شود. بنابراین این روش می‌تواند به طور مؤثرتری در به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی در مراحل اولیه اکتشاف و حتی با چگالی کم نمونه‌برداری مورد استفاده قرار گیرد.

۴- در روش WDCB به منظور تخصیص وزن به حوضه‌های مختلف از موقعیت اندیس‌های شناخته شده و همچنین از قضاوت کارشناسی در تخصیص وزن استفاده نمی‌شود. بنابراین این روش می‌تواند برای تولید یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار فازی برای استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مناطق فاقد اندیس شناخته شده و بدون قضاوت کارشناسی مورد استفاده قرار گیرد.

لازم به ذکر است که در فصل بعد، از نقشه WDCB (شکل ۴-۵) و همچنین از نقشه شکل ۵-۵، در تلفیق با سایر لایه‌های اکتشافی به منظور ارزیابی و مقایسه آن‌ها در مدل‌سازی پتانسیل معدنی استفاده شده و کارایی بیش‌تر روش WDCB به طور بارزتر به اثبات رسیده است.

## فصل ششم

تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار در

مدل‌سازی پتانسیل معدنی بدون استفاده از

اندیس‌های شناخته شده و قضاوت کارشناسی

## ۶-۱- مقدمه

از آنجا که علاوه بر توسعه روش‌های بهبود مدل‌های پتانسیل معدنی، تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل یک محدوده مورد مطالعه و بدون (یا با حداقل) قضاوت کارشناسی، یکی دیگر از اهداف رساله حاضر می‌باشد تا با استفاده از آن بتوان در مناطق فاقد اندیس شناخته شده نیز مدل‌سازی پتانسیل معدنی را به نحو مطلوبی انجام داد. بنابراین پس از تولید نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار بهبود یافته در فصل‌های قبل، در فصل حاضر ابتدا دو روش برای تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار فازی بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و بدون قضاوت کارشناسی برای دو لایه گسل و زمین‌شناسی (توده‌های نفوذی)، که قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش منطق فازی می‌باشد، توسعه داده شده است. همچنین با توجه به این‌که در روش‌های قبلی تولید نقشه‌های وزن‌دار علاوه بر مسئله دخالت قضاوت کارشناس یا جهت‌دار شدن وزن‌ها به طرف اندیس‌های شناخته شده، تخصیص وزن گسسته بوده یعنی به کل یک دامنه از فاصله از ساختارها وزن یکسانی تعلق می‌گیرد (به عنوان مثال مسئله تشریح شده در مورد فاصله از گسل و حریم‌بندی در فصل اول) که غیر واقعی است، در این فصل به حل این مشکل پرداخته می‌شود.

پس از تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار فازی، به منظور مدل‌سازی پتانسیل معدنی باید این نقشه‌های وزن‌دار بهبود یافته با هم تلفیق شوند تا مناطق امیدبخش و اهداف اکتشافات بعدی مشخص گردند. در این خصوص اگر روش وزن دهی به لایه‌های اکتشافی و تولید هر یک از نقشه‌های شاهد به نحو مطلوبی صورت گیرد و به اصطلاح بهبود یافته باشد، مدل نهایی پتانسیل معدنی نیز بهبود یافته بوده و مناطق امیدبخش معرفی شده در آن بیش‌تر قابل اعتماد خواهند بود. البته برتری لایه‌های شاهد بهبود یافته به عنوان مثال برتری روش SFA نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی، برتری روش GMPI نسبت به روش خطی وزن‌دار نمودن لایه‌ها، برتری روش WDCB در به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی نسبت به روش منحنی میزان و روش SCB در فصل‌های قبل به اثبات رسیده و



مقایسه‌های لازم صورت گرفته است. بنابراین استفاده از این لایه‌های شاهد و نقشه‌های وزن‌دار بهبود یافته در تلفیق با سایر لایه‌های وزن‌دار موجب تولید مدل پتانسیل معدنی بهبود یافته خواهد شد. در این راستا در فصل حاضر با توجه به نقشه‌های شاهد بهبود یافته تولید شده در فصل‌های قبل (لایه ژئوشیمی) و همچنین دو لایه تولید شده وزن‌دار در این فصل، این نقشه‌ها با استفاده از عملگرهای فازی با هم تلفیق شده‌اند. این دو روش ضمن اجرا برای محدوده‌های مورد مطالعه در این رساله یعنی کانی‌سازی فلورین و مس، در ادامه تشریح می‌گردند. در این خصوص از لایه چگالی گسل به عنوان یک معیار برای پی‌جویی کانی‌سازی فلورین و از لایه زمین‌شناسی (فاصله از توده‌های نفوذی) به عنوان یک معیار اکتشافی برای پی‌جویی کانی‌سازی مس استفاده شده است.

## ۶-۲- تولید نقشه شاهد وزن‌دار فازی گسل‌ها

در بسیاری از کانی‌سازی‌ها گسل‌ها نقش مهمی را به عنوان مجرای عبور سیالات کانه‌دار بر عهده دارند. بنابراین در موارد بسیاری در مدل‌سازی پتانسیل معدنی از گسل‌ها به عنوان یک لایه شاهد اکتشافی (با توجه به نوع کانی‌سازی مورد جستجو) استفاده می‌گردد. در این خصوص به دو صورت از گسل‌ها استفاده می‌شود: یا فاصله از گسل مهم است (با توجه به نوع کانی‌سازی مورد جستجو) که در این صورت باید به فواصل مختلف از گسل وزن مناسب تخصیص یابد و یا چگالی گسل‌ها<sup>۱</sup> (FD) اهمیت دارد که در این صورت نیز باید یک نقشه وزن‌دار گسل تولید شود تا اهمیت نسبی مناطق مورد ارزیابی قرار گیرد.

در رساله حاضر از چگالی گسل‌ها به عنوان یک لایه شاهد کانی‌سازی فلورین استفاده شده است. زیرا نواحی گسل خورده و دارای شکستگی برای اکتشاف فلورین در منطقه مورد مطالعه انتخاب شده (فصل اول)، دارای اهمیت و ارزش اکتشافی بالا هستند (Ghazban and Moritz 2001)؛ وهاب‌زاده، ۱۳۸۶). برای تولید نقشه چگالی گسل‌ها، ابتدا مجموع طول گسل‌ها در هر سلول واحد از

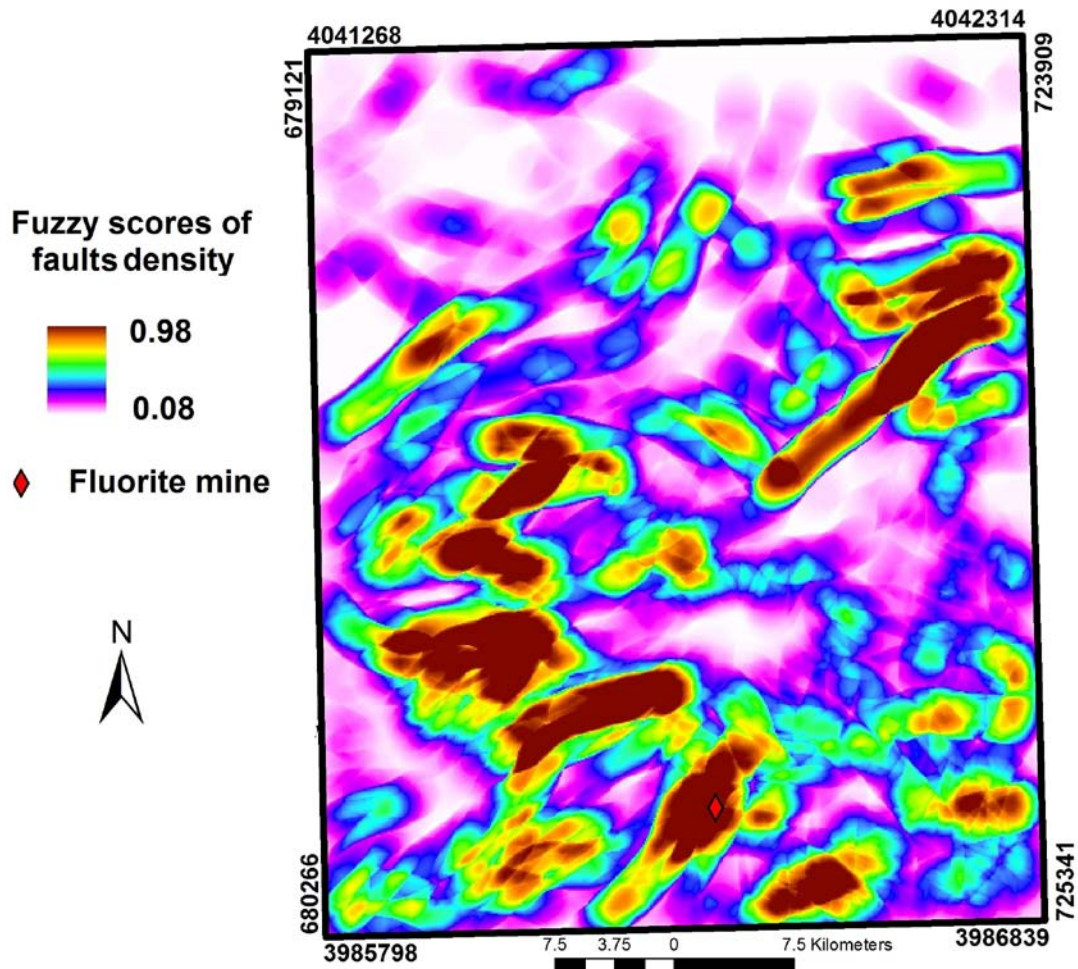
---

<sup>۱</sup> Fault density

منطقه مورد مطالعه محاسبه می‌شود. سپس با توجه به این که مقادیر چگالی غیر فازی بوده و خارج از بازه ۰ و ۱ می‌باشد، برای انتقال مقادیر FD به داخل دامنه ۰ و ۱ و تولید اعداد احتمالی فازی، مانند فصل‌های قبل از یک تابع لجستیکی به صورت رابطه (۱-۶) استفاده می‌شود.

$$F_{FD} = \frac{1}{1 + e^{-s(FD-i)}} \quad (1-6)$$

در رابطه فوق  $F_{FD}$  یک وزن (ارزش) فازی برای چگالی گسل در هر سلول از منطقه مورد مطالعه است و  $i$  و  $s$  نیز مانند قبل به ترتیب نقطه عطف و شیب تابع هستند. در مطالعه حاضر برای  $s$  و  $i$  به ترتیب مقدار  $0/0004$  و  $5000$  انتخاب گردید. بنابراین با استفاده از رابطه (۱-۶) به مقادیر چگالی گسل‌ها در هر سلول از منطقه مورد مطالعه یک وزن فازی تخصیص یافت. نقشه فازی شده چگالی گسل‌ها یعنی توزیع مقادیر  $F_{FD}$  در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱. نقشه شاهد وزن دار فازی برای چگالی گسل‌ها، توزیع مقادیر  $F_{FD}$

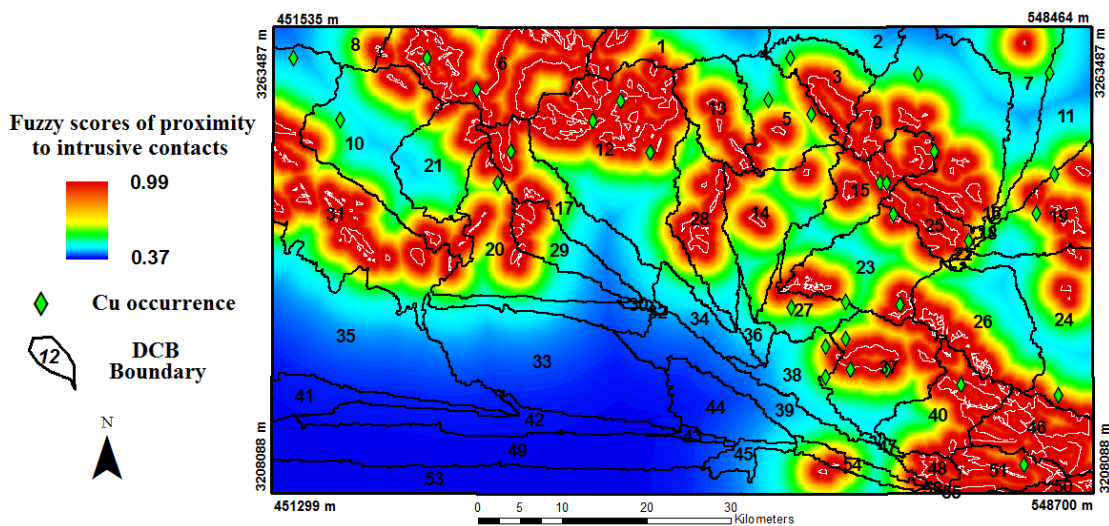
با توجه به این که نقشه شکل ۶-۱ یک لایه شاهد وزن دار و دارای وزن فازی است بنابراین می‌تواند در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش منطق فازی با سایر لایه‌های شاهد اکتشافی وزن دار تلفیق شود.

### ۶-۳- تولید نقشه شاهد وزن دار فازی از لایه زمین‌شناسی

نقشه‌های زمین‌شناسی می‌توانند اطلاعات با ارزشی را از قبیل سنگ میزبان کانی‌سازی و توزیع آن‌ها و همچنین مجاورت و محل تماس واحدهای سنگی مختلف در اختیار بگذارند. بنابراین در مدل‌سازی پتانسیل معدنی از اطلاعات حاصله از تحلیل بر روی این نقشه‌ها و تولید نقشه‌های شاهد وزن دار مربوطه، به عنوان یک لایه اکتشافی مفید و مؤثر استفاده می‌شود. در خصوص کانی‌سازی مس

پرفیری، منابع بسیاری وجود دارد که ارتباط و وابستگی فضایی بین توده‌های نفوذی و این تیپ کانی‌سازی را تأیید می‌کند (Lundmark et al., 2005؛ Hezarkhani, 2006a,b؛ Atapour and Aftabi, 2007؛ Boomeri et al., 2009؛ Hezarkhani, 2009). در منطقه مورد مطالعه برای مس پرفیری نیز که بر روی نوار ارومیه- دختر قرار دارد ارتباط ذخایر مس با پرفیری‌های نفوذی و توده‌های آذرین تأیید شده است (Hezarkhani, 2009؛ Peytcheva et al., 2009) زیرا حاشیه داخلی و خارجی این نفوذی‌ها دارای درز و شکاف فراوانی بوده و بنابراین سیالات هیدروترمال را قادر می‌سازد تا حرارت و مواد تشکیل دهنده خود را با سنگ میزبان مبادله کنند و باعث دگرسانی گردند (Guillou-Frottier and Burov, 2003). بنابراین مناطق مجاور محل تماس این توده‌های نفوذی با سایر واحدهای زمین‌شناسی، از ارزش اکتشافی بیشتری برای تشکیل کانی‌سازی مس پرفیری نسبت به مناطق دورتر برخوردار بوده (Campos et al., 2002؛ Xiaoming et al., 2007؛ Peytcheva et al., 2009) و توده‌های نفوذی استنتاج شده از نقشه زمین‌شناسی و به خصوص مرز آن‌ها با سایر واحدها، به عنوان یک شاهد مهم قابل استفاده است. به این منظور ابتدا کلیه توده‌های نفوذی به صورت یک لایه جداگانه از نقشه زمین‌شناسی مورد مطالعه کرمان (از نقشه ۱-۲) جداسازی و تفکیک شد. سپس مرز آن‌ها به عنوان یک شاهد مهم جدا گردید. در مرحله بعد نقشه‌ای برحسب فاصله از مرز توده‌های نفوذی و سایر واحدهای زمین‌شناسی تولید شد که هر قسمت آن فاصله از مرز توده‌های نفوذی را نشان می‌دهد. سپس در نقشه اخیر از عکس فاصله برای نمایش اهمیت هر نقطه از منطقه مورد مطالعه برای پی‌جویی مس پرفیری استفاده شد (یعنی عدد ۱ تقسیم بر فاصله هر نقطه در نقشه فوق) زیرا مجاورت و نزدیک محل تماس توده‌های نفوذی با سایر واحدهای سنگی از ارزش بیشتری برای پی‌جویی مس پرفیری نسبت به فواصل دورتر برخوردار است (Xiaoming et al., 2007؛ Carranza and Hale, 2002a, b؛ Carranza, 2002, 2004b؛ Carranza et al., 2008). بنابراین در این نقشه اخیر مناطق نزدیک‌تر به مرز توده‌های نفوذی از مقدار عددی (ارزش) بالاتری برخوردارند. در مرحله بعد برای انتقال مقادیر به دست آمده عکس فاصله در

هر سلول، به بازه ۰ و ۱ و تولید وزن فازی قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش منطق فازی، از یک تابع لجستیکی مانند رابطه (۶-۱) استفاده شده که در آن به جای کمیت FD (چگالی گسل)، کمیت عکس فاصله از مرز توده‌های نفوذی جایگزین شده است. بنابراین یک نقشه وزن‌دار فازی برای شاهد زمین‌شناسی یعنی فاصله از مرز توده‌های نفوذی، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده و بدون قضاوت کارشناسی در تخصیص وزن به شواهد مختلف، تولید شد. این نقشه در شکل ۶-۲ نشان داده شده است.



شکل ۶-۲. نقشه وزن‌دار فازی تولید شده برحسب فاصله از مرز توده‌های نفوذی با سایر واحدهای زمین‌شناسی، خطوط سفید رنگ مرز توده‌های نفوذی را نشان می‌دهد

#### ۶-۴- تولید سایر لایه‌های وزن‌دار فازی بدون قضاوت کارشناسی و بدون کاربرد اندیس‌های شناخته شده

در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به منظور شناسایی اهداف اکتشافی و تمرکز بر روی آن‌ها در مراحل بعدی، با توجه به مدل مفهومی ذخیره مورد جستجو، ممکن است از داده‌های اکتشافی مختلف برای تولید لایه‌های شاهد وزن‌دار استفاده شود. در این صورت اگر هدف تولید مدل پتانسیل معدنی برای یک منطقه فاقد اندیس شناخته شده و بدون دخالت قضاوت کارشناس باشد، مانند ۳ لایه وزن‌دار فازی تولید شده در رساله حاضر (برای چگالی گسل‌ها، توده‌ها نفوذی و لایه شاهد ژئوشیمیایی) باید از

روش‌هایی استفاده شود که در آن از اندیس‌های شناخته شده و قضاوت کارشناس استفاده نشود. از این‌رو می‌توان روش‌های زیر را برای تولید چنین نقشه‌هایی به کار گرفت:

#### ۶-۴-۱- عوارضی که فاصله از آن‌ها اهمیت دارد

در بسیاری موارد محل‌های نزدیک عوارض خاصی از محیط‌های زمین‌شناسی دارای اهمیت اکتشافی بیشتری نسبت به فواصل دورتر هستند. از این قبیل عوارض می‌توان دایک‌ها، توده‌های نفوذی، گسل‌های با امتداد خاص، مرز و محل تماس بین واحدهای سنگی مختلف (به عنوان مثال محل تماس توده‌های نفوذی و آهک‌ها برای پی‌جویی کانسارهای اسکارن)، دگرسانی‌ها (که در آن فواصل نزدیک به دگرسانی اهمیت بیشتری دارد) و... را نام برد. در این حالت برای تولید نقشه شاهد وزن‌دار فازی بدون استفاده از اندیس شناخته شده و با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی می‌توان از روشی که برای تولید نقشه شاهد توده‌های نفوذی در رساله حاضر استفاده شده، یعنی ابتدا تولید نقشه فاصله از عارضه مربوطه، سپس تولید نقشه عکس فاصله و در نهایت استفاده از یک تابع لجستیکی مناسب برای فازی‌سازی آن استفاده نمود.

#### ۶-۴-۲- عوارضی که چگالی آن‌ها اهمیت دارند

در برخی موارد با توجه به مدل مفهومی ذخیره مورد جستجو ممکن است چگالی یک عارضه خاص زمین‌شناسی اهمیت داشته باشد. از این قبیل موارد به عنوان مثال می‌توان چگالی گسل‌ها (حضور درز و شکاف بیش‌تر دارای ارزش بیش‌تر در برخی کانی‌سازی‌های فلزی و یا چگالی کم‌تر مثلاً در اکتشاف سنگ نما)، چگالی دایک‌ها و ... را نام برد. در این حالات نیز برای تولید نقشه شاهد وزن‌دار فازی بدون استفاده از اندیس شناخته شده و با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی می‌توان از روش استفاده شده برای تولید نقشه شاهد چگالی گسل‌ها در رساله حاضر استفاده نمود.

### ۶-۴-۳- حالاتی که مقدار عددی یک متغیر اهمیت دارد

در مواردی که مقدار عددی یک متغیر اندازه‌گیری شده و یک داده مکانی به منظور پی‌جویی یک ماده معدنی خاص مانند غلظت یک عنصر ردیاب و یا معرف، متغیرهای چند عنصری استنتاج شده برای یک تیپ کانی‌سازی خاص (امتیازات فاکتوری و ...) و یا مقادیری که در روش‌های مختلف ژئوفیزیکی اهمیت دارند، می‌توان از روش استفاده شده برای تولید GMPI در رساله حاضر استفاده نمود. البته با توجه به نوع داده‌های اکتشافی باید ملاحظاتی در نظر گرفته شود مثلاً در اکتشافات ژئوشیمیایی، این که روش رسوب آبراه‌های مدنظر است یا نمونه‌های سنگی و یا در مورد داده‌های ژئوفیزیکی، نوع روش انتخاب شده و نحوه پاسخ ژئوفیزیکی کانی‌سازی مورد جستجو باید مد نظر قرار گیرد.

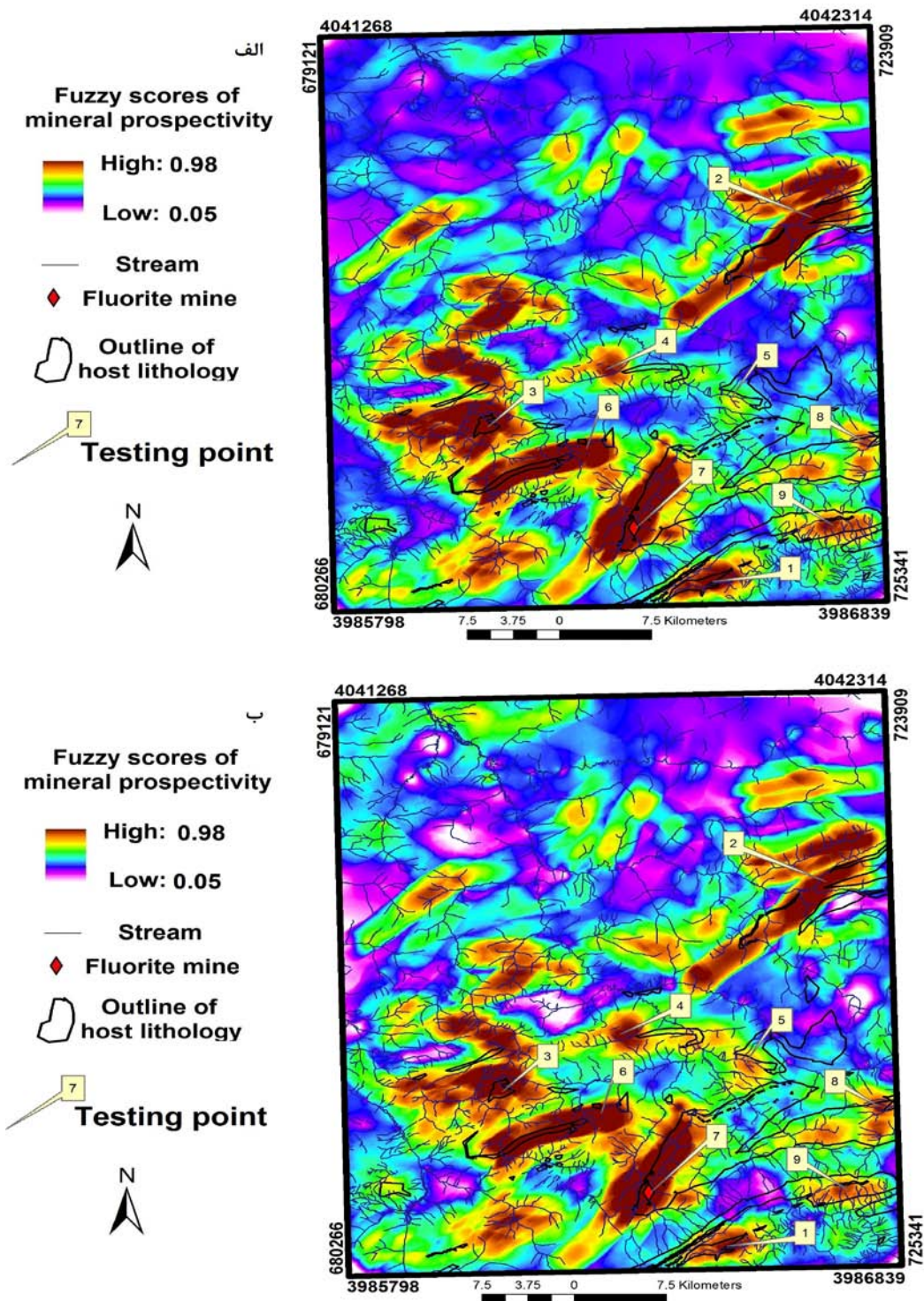
لازم به ذکر است که انتخاب نوع داده‌هایی که باید استفاده شوند و همچنین نوع و تعداد لایه‌های شاهد اکتشافی، با توجه به خصوصیات ماده معدنی مورد اکتشاف و مدل مفهومی آن و نیز کیفیت داده‌های موجود، صورت می‌گیرد.

### ۶-۵- تلفیق لایه‌های شاهد وزن دار در مدل‌سازی پتانسیل معدنی فلورین

از آنجایی که نقشه GMPI برای فلورین (شکل ۴-۱ د) یک نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن دار فازی و بهبود یافته بوده که بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و همچنین بدون و یا با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی تولید شده است و برتری آن نسبت به روش‌های قبلی در فصل‌های قبل به اثبات رسیده است، بنابراین می‌تواند با سایر لایه‌های شاهد وزن دار فازی مانند نقشه شاهد چگالی گسل‌ها (شکل ۶-۱) که آن نیز یک لایه شاهد وزن دار فازی است و بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و همچنین بدون و یا با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی تولید شده است، تلفیق شود. در این راستا نقشه وزن دار فازی چگالی گسل (شکل ۶-۱) با دو نوع نقشه شاهد ژئوشیمیایی وزن دار فازی یکی نقشه GMPI فلورین (شکل ۴-۱ د) و دیگری نقشه وزن دار فازی ژئوشیمیایی که به طور خطی



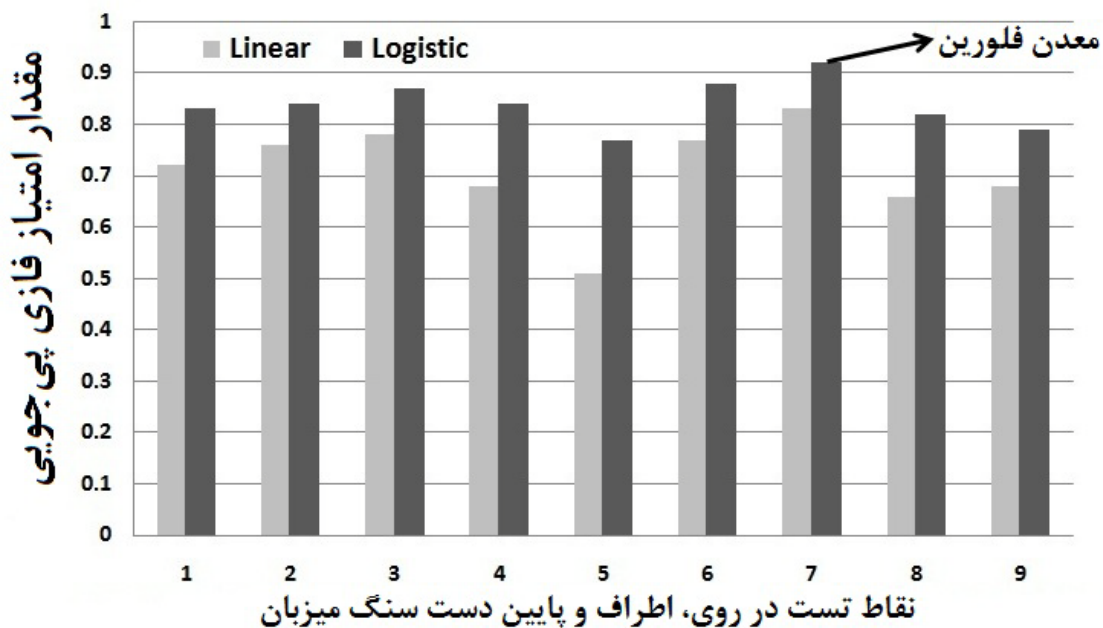
وزن دار شده است (شکل ۴-۱ ج) با استفاده از عملگر "گاما" (برابر ۰/۹) فازی تلفیق شدند تا دو نقشه مدل پتانسیل معدنی برای فلورین تولید شود. این دو نقشه در شکل ۶-۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۶-۳. مدل پتانسیل معدنی فلورین حاصل از تلفیق نقشه شاهد چگالی گسل با الف) نقشه وزن دار حاصل از انتقال خطی مقادیر امتیازات فاکتوری به بازه ۰ و ۱ (ب) نقشه GMPI (انتقال غیر خطی امتیازات فاکتوری به بازه ۰ و ۱)



از مقایسه دو نقشه الف و ب در شکل ۳-۶، مجدداً همان نتایج به دست آمده در مقایسه دو نقشه ۱-۴ ج و د حاصل می‌شود. یعنی برتری روش SFA و پیرو آن روش GMPI نسبت به تحلیل فاکتوری معمولی و انتقال خطی امتیازات فاکتوری به دامنه ۰ و ۱ به منظور وزن‌دار نمودن آن‌ها به اثبات می‌رسد. مثلاً می‌توان به مناطق حداکثر و حداقل امتیاز پی‌جویی توجه نمود که در نقشه ۳-۶ ب مرز آن‌ها به طور بارزتری قابل تفکیک بوده و با دقت بیشتری قابل جداسازی هستند. علاوه بر این به منظور بارز شدن بیش‌تر برتری نقشه ۳-۶ ب نسبت به ۳-۶ الف، در تفکیک نواحی اهداف اکتشاف، نمودار شکل ۴-۶ تهیه شد. از آنجایی که منطقه مورد مطالعه انتخاب شده برای پی‌جویی فلورین، یک منطقه کم اکتشاف شده محسوب می‌شود که در آن تنها یک معدن شناخته شده وجود دارد، امتیاز پی‌جویی در تعدادی نقطه (نقاط مشخص شده در شکل ۳-۶) در اطراف و پایین دست سنگ میزبان کانی‌سازی یعنی سازندهای الیکا و تیزکوه به منظور مقایسه دو نقشه فوق انتخاب شدند که امتیاز پی‌جویی آن‌ها در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. منظور از امتیاز پی‌جویی در این قسمت ارزش نهایی، پس از تلفیق تمام لایه‌های شاهد وزن‌دار برای نقطه مورد نظر می‌باشد.



شکل ۴-۶. امتیاز پی‌جویی دو مدل پتانسیل معدنی فلورین در نقاط انتخابی اطراف سنگ میزبان کانی‌سازی

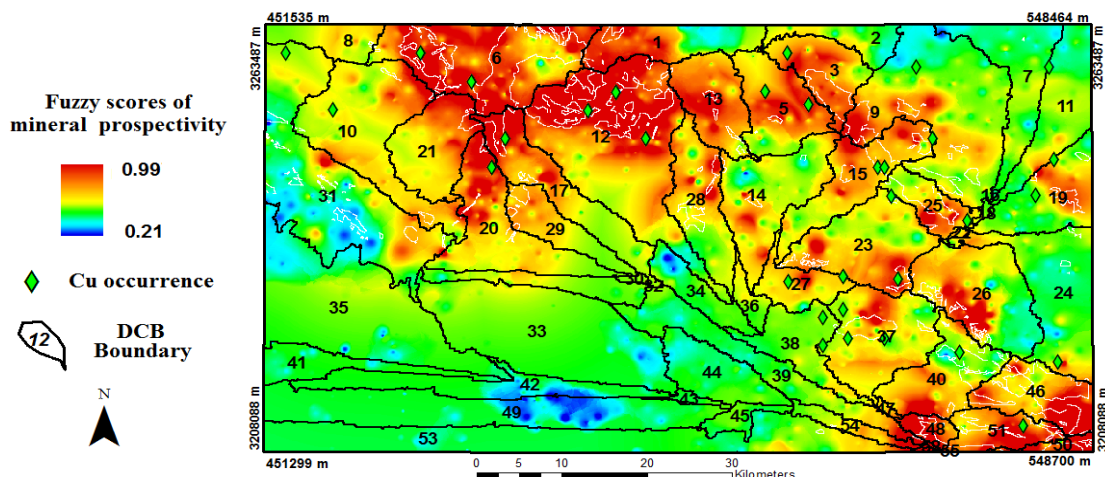
شکل ۴-۶ نشان می‌دهد که امتیاز پی‌جویی در روی سنگ میزبان، همچنین اطراف و پایین‌دست آن در مدل پتانسیل معدنی تولید شده بر اساس نقشه GMPI (شکل ۳-۶ ب) که در آن وزن‌ها با استفاده از تابع لجستیکی محاسبه شده‌اند، بالاتر از این امتیاز در مدل پتانسیل معدنی تولید شده بر اساس نقشه وزن‌داری است که به صورت خطی تولید شده است (شکل ۳-۶ الف). بنابراین کاربرد نقشه GMPI در تلفیق با سایر لایه‌های شاهد وزن‌دار نسبت به سایر نقشه‌ها از قبیل امتیازات فاکتوری یا نقشه‌های وزن‌دار که به طور خطی فازی شده‌اند، نتایج بهتری به دست می‌دهد.

لازم به ذکر است که نقشه شکل ۳-۶ الف نیز خود نیز یک نقشه بهبود یافته نسبت به یک نقشه امتیاز فاکتوری می‌باشد زیرا حاصل روش SFA است و در این‌جا با نقشه GMPI مقایسه می‌شود تا برتری روش غیر خطی در انتقال داده‌ها به بازه ۰ و ۱ نسبت به روش خطی بیش‌تر اثبات شود. البته همان‌طور که گفته شد این مسئله نیز در فصل‌های قبل (سوم و چهارم) به تفصیل به اثبات رسیده است و هدف اصلی مقایسه روش تحلیل فاکتوری معمولی (روش قبلی) با روش‌های SFA, GMPI و WDCB (روش‌های جدید) است.

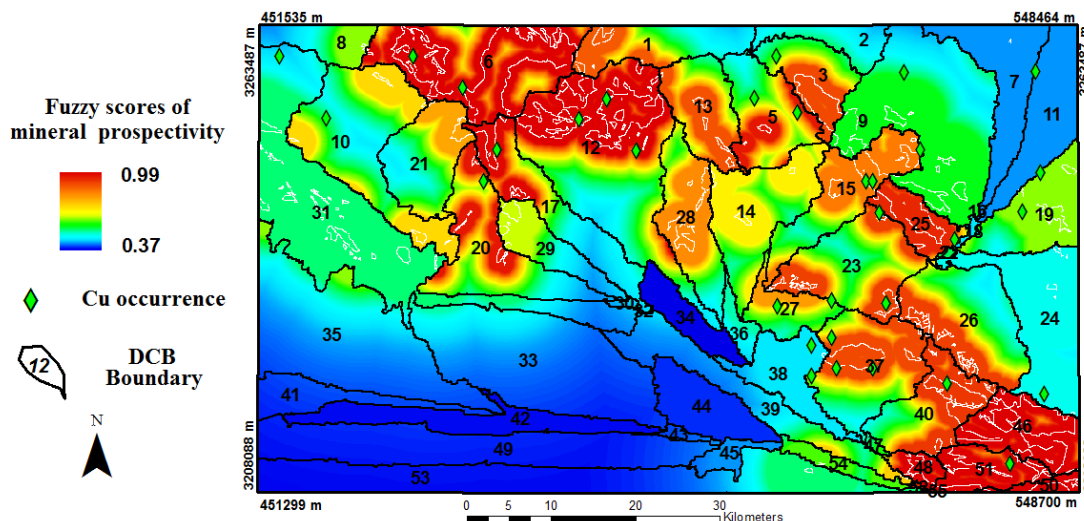
## ۶-۶- تلفیق لایه‌های شاهد وزن‌دار در مدل‌سازی پتانسیل معدنی مس

در خصوص مدل‌سازی پتانسیل معدنی کانی‌سازی مس در منطقه مطالعاتی انتخاب شده در استان کرمان، همان‌طور که قبلاً بیان گردید، این منطقه دارای تعدادی اندیس و معدن شناخته شده می‌باشد که می‌توان از موقعیت آن‌ها برای ارزیابی و مقایسه نتایج روش‌های مختلف استفاده نمود. در این خصوص پس از استنتاج بهترین ترکیب‌های چند عنصری معرف با استفاده از روش بهبود یافته SFA که برتری آن در فصل سوم به اثبات رسید و همچنین پس از انتقال مقادیر امتیازات فاکتوری بهبود یافته به بازه ۰ و ۱ و تخصیص وزن فازی به آن‌ها با استفاده از روش GMPI که خود نیز مجدداً باعث بهبود نقشه ژئوشیمیایی حاصله گردید (موضوع فصل چهارم)، نقشه توزیع مقادیر GMPI، که یک نقشه وزن‌دار فازی است، می‌تواند در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به خصوص در مدل‌سازی به روش

منطق فازی مستقیماً با سایر لایه‌های شاهد فازی تلفیق شود. به این منظور نقشه درون‌یابی شده (منحنی میزان) مقادیر GMPI، نقشه تولید شده بر اساس روش SCB و همچنین نقشه WDCB (موضوع فصل ۵) می‌توانند به عنوان یک لایه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به این‌که در فصل پنجم اثبات شده که روش WDCB بهتر از سایر روش‌ها برای به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی عمل می‌کند، در این قسمت به منظور اثبات بیش‌تر کارایی روش WDCB از آن (شکل ۴-۵) و همچنین از نقشه شاهد ژئوشیمیایی شکل ۵-۵ (تولید شده به روش درون‌یابی و قابل مقایسه با روش SCB که در شکل ۶-۵ تشریح شده) در تلفیق با نقشه وزن‌دار فازی توده‌های نفوذی (وزن‌دار شده بر حسب فاصله از توده نفوذی که در شکل ۶-۲ ارائه شده) برای تولید مدل پتانسیل معدنی استفاده شد تا دو نقشه مدل پتانسیل معدنی تولید شده و نتایج مورد ارزیابی و مقایسه قرار گیرند. به منظور تلفیق نقشه‌ها از عملگر "AND" فازی استفاده شد. تلفیق نقشه درون‌یابی شده GMPI با نقشه شاهد توده‌های نفوذی وزن‌دار در شکل ۶-۵ نشان داده شده است. همچنین تلفیق نقشه WDCB با نقشه شاهد توده‌های نفوذی وزن‌دار در شکل ۶-۶ نشان داده شده است.



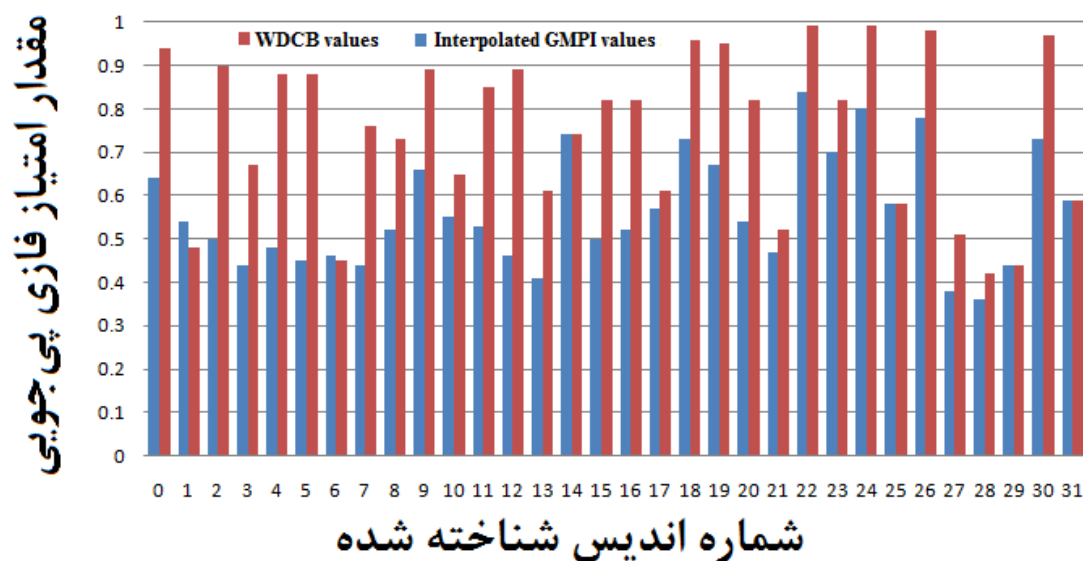
شکل ۶-۵. مدل پتانسیل معدنی تولید شده حاصل از تلفیق نقشه درون‌یابی شده مقادیر GMPI با نقشه شاهد توده‌های نفوذی وزن‌دار



شکل ۶-۶. مدل پتانسیل معدنی تولید شده حاصل از تلفیق نقشه WDCB با نقشه شاهد توده‌های نفوذی وزن‌دار

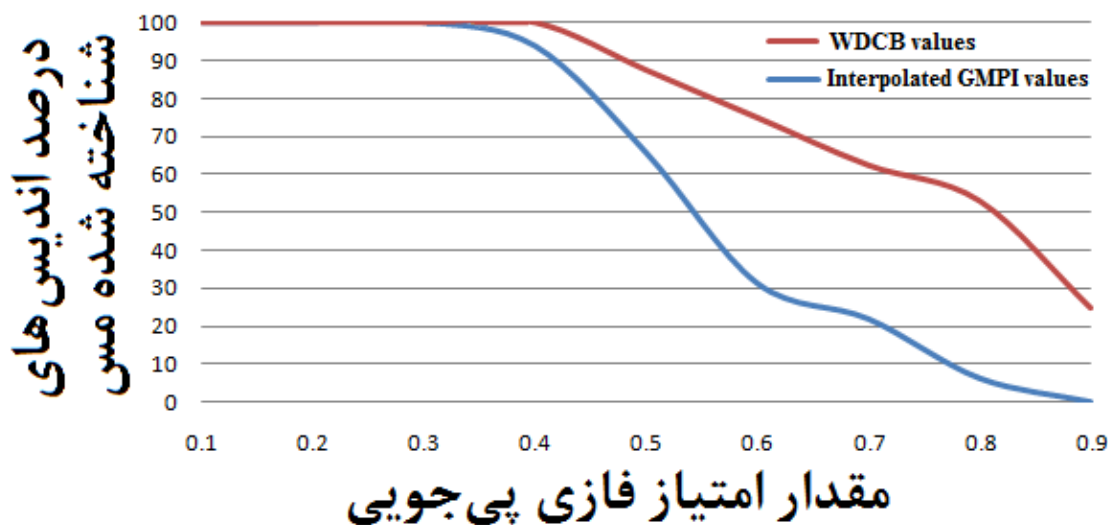
به منظور مقایسه دو مدل فوق (دو نقشه شکل ۶-۵ و ۶-۶) مجدداً حوضه‌های شماره ۱۲، ۱۵، ۳۷ و ۴۰ که دارای اندیس‌های شناخته شده می‌باشند، در نظر گرفته شدند (مانند مقایسه صورت گرفته در فصل ۵). همان‌طور که از روی دو شکل فوق دیده می‌شود چون در حوضه ۱۲ بلافاصله بعد از اندیس‌ها، نمونه‌های آنومالی وجود داشته (به طوری که در شکل ۱-۵ نیز مشاهده می‌شود) بنابراین در مدل پتانسیل معدنی تولید شده نیز در اطراف این اندیس‌ها امتیاز پی‌جویی مقدار بالایی را نشان می‌دهد و اندیس‌های داخل این حوضه با هر دو روش مورد پیش‌بینی قرار گرفته‌اند. اما در مورد حوضه‌های شماره‌های ۱۵، ۳۷ و ۴۰ از آنجایی که بلافاصله بعد از اندیس‌های شناخته شده، نمونه‌های آنومالی دیده نمی‌شود (به شکل‌های ۱-۵ و ۶-۵ رجوع شود) و نمونه‌های آنومالی از موقعیت اندیس‌ها فاصله دارند (الگوی آنومالی پیچیده) در روش درون‌یابی و یا روش SCB، محل اندیس‌ها جزء مناطق با امتیاز پی‌جویی بالا طبقه‌بندی نشده (همان‌طور که در شکل‌های ۵-۵ و ۶-۵ مشاهده می‌شود) و این مناطق در مدل پتانسیل معدنی تولید شده نیز پیش‌بینی نمی‌شوند و در نتیجه از اولویت اکتشاف حذف می‌گردند اما در مدل پتانسیل معدنی که حاصل تلفیق نقشه WDCB با نقشه توده‌های نفوذی وزن‌دار است محل ذخایر شناخته شده با مقدار امتیاز پی‌جویی بالا مورد پیش‌بینی قرار می‌گیرند و همچنین حد جدایش ناحیه امیدبخش با غیر امیدبخش به طور بارزتری

قابل تفکیک است. به منظور بارزسازی بهتر در شکل ۶-۷ مقدار ارزش پی‌جویی در موقعیت ۳۲ اندیس شناخته شده مس در منطقه با استفاده از هر دو روش مورد استفاده در تولید مدل پتانسیل معدنی بر روی یک نمودار رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که در نزدیکی و اطراف اندیس‌ها امتیاز پی‌جویی در مدل حاصل از تلفیق نقشه WDCB بالاتر از مدل حاصله از تلفیق نقشه درون‌یابی یا SCB با سایر لایه‌های اکتشافی است. نقشه شماره اندیس‌ها در شکل پ ۱۰ پیوست نشان داده شده است.



شکل ۶-۷. امتیاز پی‌جویی در مدل پتانسیل معدنی تولید شده با دو روش WDCB و منحنی میزان (یا SCB) در محل اندیس‌های شناخته شده مس

همان‌طور که از نمودار شکل ۶-۷ مشخص است مقدار ارزش پی‌جویی، در موقعیت تعداد زیادی از اندیس‌ها، در مدل حاصل از روش WDCB بالاتر است. علاوه بر این درصد پیش‌بینی اندیس‌های شناخته شده بر اساس حد آستانه مختلف از مقادیر ارزش پی‌جویی در نمودار شکل ۶-۸ نشان می‌دهد که نرخ پیش‌بینی در مدل پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از روش WDCB از نرخ پیش‌بینی در مدل پتانسیل معدنی تولید شده با استفاده از نقشه‌های درون‌یابی شده و یا نقشه‌های SCB بالاتر است.



شکل ۶-۸. درصد پیش‌بینی اندیس‌های شناخته شده بر اساس حد آستانه مختلف از مقادیر ارزش پی جویی برای دو روش WDCB و روش منحنی میزان

## ۶-۷- نتیجه گیری

- با مطالعات صورت گرفته در فصل حاضر می‌توان نتایج زیر را به طور خلاصه بیان نمود:
- ۱- تولید نقشه‌های شاهد وزن دار فازی برای چگالی گسل‌ها و توده‌های نفوذی در فصل حاضر و همچنین نقشه شاهد وزن دار فازی ژئوشیمیایی در فصل‌های قبل نشان داد که امکان تخصیص وزن به عوارض زمین‌شناسی و تولید نقشه‌های وزن دار، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و بدون دخالت کارشناسی حتی در مناطق فاقد اندیس شناخته شده نیز وجود دارد.
  - ۲- تخصیص وزن به فواصل پیوسته (بدون حریم‌بندی و سپس تخصیص یک وزن به یک دامنه) در فصل حاضر (مانند فاصله‌های وزن دار نسبت به توده‌های نفوذی) نیز روش جدیدی است که در آن مشکل روش‌های قبلی یعنی تخصیص یک وزن ثابت به کل یک دامنه از فاصله مرتفع شده است.
  - ۳- نحوه تولید نقشه‌های شاهد وزن دار فازی برای پی جویی یک تیپ ذخیره مشخص در رساله حاضر (به عنوان مثال نقشه شاهد وزن دار فازی چگالی گسل‌ها، نقشه شاهد وزن دار فازی توده‌های نفوذی و همچنین نقشه شاهد وزن دار فازی ژئوشیمیایی بهبود یافته)، نقطه آغازی

برای توسعه روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی داده‌محور در مناطق ناشناخته و یا فاقد اندیس معدنی، بدون و یا با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی در تخصیص وزن به شواهد است.

۴- نتایج فصل حاضر نشان می‌دهد که در حالت‌های با الگوی آنومالی پیچیده نقشه WDCB بیش‌تر از یک نقشه درون‌یابی شده یا SCB در به نقشه‌درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی مفید است.

## فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات



## ۷-۱- مقدمه

همان طور که قبلاً نیز گفته شد، هدف اصلی از رساله حاضر شناسایی مناطق اهداف اکتشافی یک ماده معدنی خاص نبوده، بلکه هدف توسعه روش‌های بهبود خروجی مدل‌های پتانسیل معدنی با استفاده از بهبود روش‌های پردازش و تفسیر داده‌های اکتشافی، بهبود روش‌های تخصیص وزن به لایه‌های ورودی و به نقشه درآوردن متغیرهای اکتشافی به منظور تولید لایه شاهد وزن‌دار بهبود یافته در تلفیق با سایر لایه‌ها است. بدیهی است که اگر روش‌های پردازش و تفسیر در هر یک از لایه‌های اکتشافی بهبود یابد و لایه شاهد وزن‌دار بهبود یافته تولید گردد، در این صورت مدل پتانسیل معدنی خروجی نیز بهبود می‌یابد. در این خصوص در ادامه نتایج حاصل شده از رساله حاضر در قالب بخش‌های مختلف به تفکیک در زیر ارائه می‌گردد.

## ۷-۲- بهبود شناسایی بهترین ترکیب(های) چند عنصری معرف کانی‌سازی

نتایج تحلیل فاکتوری معمولی عموماً شامل چندین فاکتور و چند ترکیب مختلف از همراهی عناصر می‌باشد که در بسیاری مواقع انطباق بین آن‌ها وجود ندارد و باعث مشکل در تفسیر می‌شود. در این خصوص استفاده از روش SFA باعث بهبود شناسایی اثرهای چند عنصری معرف و در نتیجه شناسایی آنومالی‌های ژئوشیمیایی با اهمیت یک نوع کانی‌سازی با تیپ مشخص می‌گردد که قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی است زیرا در روش SFA، مرحله به مرحله عناصر غیر معرف شناسایی و از تجزیه و تحلیل حذف می‌شوند تا بهترین ترکیب یا ترکیب‌های معرف شناسایی شوند. بنابراین با استفاده از روش SFA، شناسایی ترکیب یا ترکیب‌های معرف برای پی‌جویی یک تیپ ذخیره مشخص، به منظور آماده سازی لایه ژئوشیمیایی شاهد در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، نسبت به روش قبلی یعنی تحلیل فاکتوری معمولی بهبود می‌یابد.

### ۷-۳- بهبود روش تخصیص وزن به آنومالی‌های ژئوشیمیایی

نتایج رساله حاضر نشان داد که پس از شناسایی بهترین ترکیب یا ترکیب‌های چند عنصری معرف یک تیپ کانی‌سازی مورد جستجو، از یک تابع لجستیکی مناسب می‌توان برای انتقال مقادیر امتیازات فاکتوری هر یک از نمونه‌های رسوب آبراه‌ای به بازه ۰ و ۱ و در نتیجه تخصیص وزن فازی به آن‌ها استفاده نمود. در این صورت تخصیص وزن به نمونه‌ها و پیرو آن تولید لایه شاهد ژئوشیمیایی وزن‌دار، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده در محدوده مطالعاتی و همچنین با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی خواهد بود. انتقال مقادیر امتیازات فاکتوری به بازه ۰ و ۱ با استفاده از یک تابع لجستیکی مناسب (همان‌طور که در فصل چهارم به اثبات رسید)، نه تنها مشکل تخصیص وزن به نمونه‌های رسوب آبراه‌ای را مرتفع می‌کند بلکه خود نیز باعث بهبود بیش‌تر نقشه خروجی و شدت‌بخشی به آنومالی‌ها و همچنین تفکیک بهتر بین جوامع مختلف ژئوشیمیایی می‌گردد که خود باعث می‌شود تا هنگامی که لایه وزن‌دار تولید شده با دیگر لایه‌ها در مدل‌سازی پتانسیل معدنی تلفیق می‌شود، لایه خروجی بیش‌تر قابل اعتماد باشد.

### ۷-۴- توسعه و بهبود روش به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی

#### رسوبات آبراه‌ای

از آن‌جایی که آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای، حاصل مواد انتقال یافته هستند، در حالی که بسیاری دیگر از شواهد و عوارض زمین‌شناسی مثل واحدهای سنگی و یا توده‌های نفوذی، برجا هستند بنابراین آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای، در بسیاری مواقع منطبق با محل حضور دیگر شواهد معرف کانی‌سازی نظیر زمین‌شناسی و ... و یا مانند فصل پنجم توده‌های نفوذی نیستند. در این خصوص ترکیب نقشه‌های شاهد حاصل از داده‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراه‌ای، با دیگر لایه‌های شاهد اکتشافی ممکن است در خروجی مدل‌سازی پتانسیل معدنی نتایج خوبی به دست

ندهد و نرخ پیش‌بینی کم باشد. بنابراین در مناطق مورد اکتشاف به‌خصوص با الگوی پیچیده پراکندگی عناصر و آنومالی‌ها، نظیر حوضه‌های آبریز شماره ۱۵، ۳۷ و ۴۰ در فصل‌های قبل، برخی نواحی مهم و کانی‌سازی شده از اولویت اکتشاف حذف می‌شوند. دلیل حذف مناطق با اهمیت علاوه بر حضور الگوی آنومالی پیچیده، عدم وجود یک روش مناسب در به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی رسوبات آبراهه‌ای یعنی در شرایط مواد انتقال یافته است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که پس از شناسایی بهترین ترکیب یا ترکیب‌های معرف کانی‌سازی مورد جستجو و همچنین انتقال مقادیر امتیاز فاکتوری نمونه‌ها به بازه ۰ و ۱ و تخصیص وزن به آن‌ها، برای به نقشه درآوردن آنومالی‌ها و تولید نقشه شاهد وزن‌دار فازی ژئوشیمیایی قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، بهتر است از روش حوضه‌های آبریز وزن‌دار ارائه شده در فصل ۵ به جای روش منحنی میزان (درون‌یابی) و روش SCB استفاده شود. زیرا در این صورت نرخ پیش‌بینی در مدل پتانسیل معدنی نهایی افزایش خواهد یافت. دلیل افزایش نرخ پیش‌بینی در روش WDCB این است که اگرچه WDCB یک روش مدل‌سازی گسسته (مانند روش SCB) است ولی از آن‌جا که از تمام نمونه‌های داخل یک حوضه آبریز برای تخصیص وزن استفاده می‌کند مزیت روش درون‌یابی (منحنی میزان) را نیز دارد.

## ۷-۵- کاربرد لایه‌های وزن‌دار در انواع روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی

با توجه به ارائه روش‌های بهبود یافته برای شناسایی ترکیب یا ترکیب‌های چند عنصری معرف یک تیپ کانی‌سازی مورد پی‌جویی و تخصیص وزن به آنومالی‌های ژئوشیمیایی، نقشه توزیع مقادیر GMPI و همچنین نقشه WDCB تولید شده با استفاده از مقادیر GMPI، می‌توانند در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش‌های زیر مورد استفاده قرار گیرد:

- ۱ - مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش منطق فازی که در آن وزن (GMPI) هر قسمت از نقشه شاهد ژئوشیمیایی (مقادیر عضویت فازی) بدون استفاده از قضاوت کارشناسی و بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده، محاسبه می‌شود.
- ۲ - در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش تحلیل سلسله مراتبی که در آن GMPI یک وزن برای هر قسمت از لایه شاهد ژئوشیمیایی می‌باشد.
- ۳ - در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش توابع برآورد که در آن GMPI می‌تواند به عنوان مقدار اعتماد<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار گیرد.
- ۴ - در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش عکس فاصله که در آن از GMPI برای فازی‌سازی نقشه شاهد ژئوشیمیایی می‌توان استفاده نمود.
- ۵ - در مدل‌سازی پتانسیل معدنی به روش شاخص هم‌پوشانی چند کلاسه و همچنین شاخص هم‌پوشانی دوتایی که در آن نقشه ژئوشیمیایی وزن‌دار حاصله قابل تلفیق با سایر لایه‌ها در روابط مربوطه خواهد بود.
- ۶ - در مدل‌سازی به روش منطق بولین که در آن مناطق با مقادیر بالای GMPI یا WDCB می‌توانند برای تولید نقشه‌های دوتایی استفاده شوند.

## ۶-۷- کاربرد نتایج در مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مناطق فاقد اندیس

### شناخته شده و بدون قضاوت کارشناسی

روش‌های معرفی شده برای تفسیر لایه‌های ژئوشیمیایی در رساله حاضر، شامل تحلیل فاکتوری SFA، GMPI و WDCB، مناطق جدیدی را به عنوان آنومالی معرفی می‌کنند که توسط روش‌های قبلی جزء مناطق در اولویت بالا قرار نمی‌گیرند. مناطق جدید معرفی شده با شواهد زمین‌شناسی منطبق بوده و با استفاده از این روش‌ها نرخ پیش‌بینی بالا می‌رود. بنابراین این روش‌ها باعث بهبود خروجی

---

<sup>1</sup> Belief

مدل‌های پتانسیل معدنی شده و موفقیت اکتشاف را افزایش می‌دهند. علاوه بر این روش‌های معرفی شده، روش‌های جدیدی هستند که در آن‌ها شناسایی ترکیب‌های معرف یک تیپ کانی‌سازی مورد جستجو، تخصیص وزن به نمونه‌ها و تولید نقشه‌های شاهد وزن‌دار فازی با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی و بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده مطالعاتی صورت می‌گیرد. بنابراین این روش‌ها قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی در مناطق فاقد اندیس شناخته شده، بدون دخالت قضاوت کارشناسی می‌باشند که خود باعث مرتفع شدن مشکلات روش‌های داده‌محور و دانش‌محور مدل‌سازی بیان شده در فصل اول می‌گردند.

یادآوری می‌گردد که علاوه بر تولید روش‌های جدید و بهبود یافته، هر یک از این روش‌ها، خود چندین نتیجه بهبود یافته به دست می‌دهند که در پایان هر فصل به خصوص در قسمت نتیجه‌گیری فصل‌های سوم، چهارم و پنجم به تفصیل بیان گردیده است.

## ۷-۷- پیشنهادات

همان‌طور که در فصل‌های مختلف رساله حاضر به اثبات رسید با توسعه چند روش جدید، خروجی مدل‌های پتانسیل معدنی بهبود یافته و در خروجی مدل‌های پتانسیل معدنی این روش‌ها بهتر از روش‌های قبلی در شناسایی مناطق اهداف اکتشاف عمل کرده و سبب افزایش نرخ پیش‌بینی اندیس‌های معدنی و افزایش موفقیت اکتشاف می‌شوند. در این خصوص اگرچه روش‌های ارائه شده تا حد زیادی بهتر از روش‌های قبلی عمل می‌کنند ولی از آن‌جا که تمرکز اصلی رساله حاضر بر بهبود لایه‌های ژئوشیمیایی وزن‌دار بوده است، بنابراین می‌توان روش‌های جدیدتری را برای بهبود سایر لایه‌های اکتشافی وزن‌دار مورد استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی توسعه داد. در این خصوص پیشنهادات زیر قابل ارائه است:

### - تولید لایه شاهد وزن دار ژئوفیزیکی بهبود یافته

مانند روش ارائه شده برای تولید لایه شاهد ژئوشیمیایی وزن دار بهبود یافته، می‌توان یک روش مشابه برای تولید یک لایه شاهد ژئوفیزیکی وزن دار و بهبود یافته قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی طراحی و اجرا نمود. در این خصوص باید پس از انجام مطالعات کافی بر روی پاسخ ژئوفیزیکی کانی‌سازی یا کانی‌سازی‌های مورد جستجو و همچنین با در نظر گرفتن انواع روش‌های ژئوفیزیکی قابل استفاده برای ماده معدنی مورد نظر، ابتدا لایه‌های ژئوفیزیکی بهبود یافته تولید شود و سپس با استفاده از روش‌های مناسب به دامنه‌های مختلف از متغیرهای ژئوفیزیکی وزن مناسب تخصیص یابد. در نهایت با تلفیق لایه‌های مختلف وزن دار ژئوفیزیکی با استفاده از روش مناسب، یک لایه شاهد ژئوفیزیکی وزن دار بهبود یافته قابل استفاده در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، در تلفیق با سایر لایه‌های اکتشافی تولید شود.

### - تولید لایه شاهد وزن دار زمین‌شناسی بهبود یافته

داده‌های اکتشافی مورد استفاده برای تولید لایه‌های شاهد وزن دار در مدل‌سازی پتانسیل معدنی، با توجه به نوع و تیپ ماده معدنی مورد جستجو و مدل مفهومی آن، انتخاب می‌شوند. بنابراین با توجه به نوع ماده معدنی مورد پی‌جویی می‌توان انواع دیگر از لایه‌های بهبود یافته به عنوان مثال ارائه روش بهبود تخصیص وزن به واحدهای سنگی مختلف و لایه زمین‌شناسی وزن دار بهبود یافته، را توسعه داد.

### - تکمیل توسعه تولید مدل‌سازی پتانسیل معدنی بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده

#### و بدون یا با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی

در رساله حاضر علاوه بر بهبود روش‌های شناسایی ترکیب یا ترکیب‌های چند عنصری معرف کانی‌سازی و توسعه روش بهبود یافته به نقشه درآوردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی، تخصیص وزن و تولید تمام لایه‌های شاهد وزن دار مورد استفاده شامل لایه ژئوشیمیایی، لایه چگالی گسل‌ها و لایه

زمین‌شناسی (در این‌جا با توجه به نوع ماده معدنی یعنی مس پرفیری، تخصیص وزن به فواصل مختلف از توده‌های نفوذی)، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و همچنین با حداقل دخالت قضاوت کارشناسی صورت گرفته است. بنابراین اگر تمام لایه‌های شاهد وزن‌دار، بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده داخل محدوده و بدون دخالت قضاوت کارشناسی تولید گردد، یک روش جدید مدل‌سازی پتانسیل معدنی توسعه می‌یابد که در آن بدون یا با حداقل دخالت قضاوت کارشناس می‌توان مدل نهایی پتانسیل معدنی را حتی در مناطق فاقد اندیس شناخته شده تولید نمود. در این خصوص با توجه به این‌که در رساله حاضر برای لایه ژئوشیمی، چگالی گسل‌ها و فاصله از توده‌های نفوذی چنین روشی توسعه داده شده و همچنین این روش‌ها می‌توانند برای تولید لایه‌های شاهد وزن‌دار بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و بدون دخالت قضاوت کارشناسی در مواردی دیگری که فاصله از یک عارضه اهمیت دارد (نظیر فاصله از گسل‌ها، دایک‌ها، دگرسانی و ...)، در مواردی که چگالی عوارض اهمیت دارد (نظیر چگالی دایک‌ها و ...) و یا مواردی که مقدار عددی یک متغیر اکتشافی اهمیت دارد (نظیر مقادیر غلظت عناصر ژئوشیمیایی در واحدهای سنگی در روش لیتوژئوشیمی و حتی ژئوفیزیک البته با اعمال برخی ملاحظات و شاید بهبودها و پردازش‌های اولیه و ...)، نیز مورد استفاده قرار گیرند ولی در مورد تولید برخی دیگر از لایه‌های شاهد وزن‌دار نظیر تخصیص وزن به واحدهای سنگی مختلف و همچنین لایه‌های وزن‌دار ژئوفیزیکی و یا حتی روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای (به منظور شناسایی واحدهای سنگی دارای پتانسیل، گسل‌ها و دگرسانی‌ها) و در نهایت تولید لایه شاهد وزن‌دار حاصل از مطالعات سنجش از دور، باید روش‌های جدیدی توسعه یابد تا چرخه تولید مدل پتانسیل معدنی بدون استفاده از اندیس‌های شناخته شده و بدون دخالت قضاوت کارشناسی، کامل گردد. در این خصوص الگوهای ارائه شده (روش‌های توسعه یافته) در رساله حاضر می‌توانند برای سایر لایه‌های اکتشافی نیز مورد استفاده قرار گیرند یعنی ابتدا با توجه به نوع ماهیت روش اکتشافی، روش‌های پردازش و تفسیر بهبود یابند و سپس با استفاده از روش‌های معرفی شده در این رساله وزن مناسب تخصیص یابد.

## - توسعه برنامه‌های نرم‌افزاری

با توجه به این‌که روشهای توسعه داده شده در رساله حاضر، جدید بوده و هنوز برای آنها برنامه نرم‌افزاری توسعه داده نشده است. محاسبات مربوط به این روش‌ها باید به طور دستی اجرا گردد. بنابراین نوشتن و طراحی برنامه‌های نرم‌افزاری می‌تواند به منظور اجرای سریع‌تر، سیستماتیک و خودکار این روش‌ها مفید باشد.



## منابع

- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۵۱ الف)، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ساردویه.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۵۱ ب)، نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ بافت.
- علیرضایی، س. (۱۳۶۶)، پایان‌نامه ارشد، "پژوهشی در زمینه‌شناسی و چگونگی پیدایش کانسارهای فلوئور، سرب و باریوم در تریاس شرق البرز مرکزی"، دانشگاه تهران.
- وحدتی دانشمند، ف. (۱۳۸۱)، "نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ پل سفید"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- وهاب‌زاده، ق. (۱۳۸۶)، رساله دکتری، "کانی‌شناسی و ژئوشیمی کانی‌سازی‌های فلورین در بخش شرقی البرز مرکزی در شهرستان سوادکوه"، دانشگاه شهید بهشتی.
- یوسفی، م. و کامکار روحانی، ا. (۱۳۸۹)، "اصول روش‌های مدل‌سازی پتانسیل معدنی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی"، انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر، ۲۱۵ صفحه.
- Abedi, M., Norouzi, G.M., and Bahroudi, A., (2012). "Support vector machine for multi-classification of mineral prospectivity areas". **Comput. Geosci.**, **46**, 272-283.
- Agterberg, F.P., (1992). "indicator patterns in weights of evidence modeling for resource evaluation". **Nonrenewable Resources**, **1**, 39-50.
- Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F., Cheng, Q., and Wright, D.F., (1993). Weights of evidence modeling and weighted logistic regression in mineral potential mapping, pp. 13-32, In: "**Computers in Geology**", Davis, J.C. and Herzfeld, U.C. (Eds.), Oxford University Press, New York.
- Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F., and Wright, D.F., (1990). Statistical pattern integration for mineral exploration, pp. 1-21, In: "**Computer Applications in Resource Estimation**", Gaál, G. and Merriam, D.F. (Eds.), Pergamon Press, Oxford.
- Agterberg, F.P., and Cheng, Q., (2002). "Conditional independence test for weights-of-evidence modeling". **Nat. Resour. Res.**, **11**, 249-255.

- Aitchison, J. and Egozcue, J.J. (2005). “Compositional data analysis: where are we and where should we be heading?” **Math. Geol.**, **37**, 829–850.
- Alpaydm, E. (2004). “**Introduction to Machine Learning**”. The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, pp. 415.
- Arribas, A.J., (1995). “Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines”. **Geology**, **23**, 337-340.
- Atapour, H., and Aftabi, A., (2007). “The geochemistry of gossans associated with Sarcheshmeh porphyry copper deposit, Rafsanjan, Kerman, Iran: Implications for exploration and the environment”. **J. Geochem. Explor.**, **93**, 47-65.
- Berberian, M., and King, G.C., (1981). “Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran”. **Can. J. Earth Sci.**, **18**, 210-265.
- Berthold, M. and Hand, D. J. (2002). “**Intelligent Data Analysis**”. 2nd Ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 514.
- Billa, M., Cassard, D., Lips, A.L.W., Bouchot, V., Tourlière, B., Stein, G., and Guillou-Frottier, L., (2004). “Predicting gold-rich epithermal and porphyry systems in the central Andes with a continental-scale metallogenic GIS”. **Ore Geol. Rev.**, **25**, 39-67.
- Biondić, B., Biondić, R., and Kapelj, S., (2006). “Karst groundwater protection of the Kupa River catchment area and sustainable development”. **Environ. Geol.**, **49**, 828–839.
- Bishop, C. M. (2006). “**Pattern Recognition and Machine Learning**”. Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, pp. 738.
- Bogen, J., Bölviken, B., and Ottesen, R.T., (1992). Environmental studies in western Europe using overbank sediments, pp. 317-325, In: “**Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins**”, Bogen, J., Walling, D.E., and Day, T.J. (Eds.), International Association of Hydrological Sciences Publication 210.
- Bonham-Carter, G.F. (1994). “**Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**”. Pergamon, Oxford, pp. 398.

- Bonham-Carter, G.F., and Agterberg, F.P., (1990). Application of a microcomputer-based geographic information systems to mineral potential mapping, pp. 49-74, In: **“Microcomputer Applications in Geology, Vol. 2”**, Hanley, T. and Merriam, D.F. , (Eds.), Pergamon Press, Oxford.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., and Wright, D.F. (1988). “Integration of geological datasets for gold exploration Nova Scotia”. **PHOTOGRAMM ENGINEERING, 54, 1585-1592.**
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P., and Wright, D.F., 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential, pp. 171-183, In: **“Statistical Applications in the Earth Sciences”**, Agterberg, F.P., and Bonham-Carter, G.F., (Eds.), Geological Survey of Canada, Paper 89-9.
- Bonham-Carter, G.F., and Goodfellow, W.D., (1984). Autocorrelation structure of stream sediment geochemical data: interpretation of Zn and Pb anomalies, Nahanni river area, Yukon – Northwest Territories, Canada, pp. 817-829, In: **“Geostatistics for Natural Resources Characterization. Part 2”**, Verly, G., David, M., Journel, A.G., and Marechal, A., (Eds.), Reidel, Dordrecht.
- Bonham-Carter, G.F., and Goodfellow, W.D., (1986). “Background corrections to stream geochemical data using digitized drainage and geological maps: application to Selwyn Basin, Yukon and Northwest Territories”. **J. Geochem. Explor., 25, 139-155.**
- Bonham-Carter, G.F., and Chung, C.F., (1983). “Integration of mineral resource data for Kasmere Lake area, Northwest Manitoba, with emphasis on uranium”. **Math. Geol. 15, 25-45.**
- Bonham-Carter, G.F., Rogers, P.J. and Ellwood, D.J. 1987. “Catchment basin analysis applied to surficial geochemical data, Cobequid Highlands, Nova Scotia”. **J. Geochem. Explor., 29, 259-278.**
- Boomeri, M., Nakashima, K., and Lentz, D. R., (2009). “The Miduk porphyry Cu deposit, Kerman, Iran: A geochemical analysis of the potassic zone including halogen element systematics related to Cu mineralization processes”. **J. Geochem. Explor., 103, 17–29.**

- Bouch, J.E., Naden, J., Shepherd, T.J., McKervey, J.A., Young, B., Benham, A.J. and Sloane, H.J. (2006). “Direct evidence of fluid mixing in the formation of stratabound Pb–Zn–Ba–F mineralisation in the Alston Block, North Pennine Orefield (England)”. **Miner. Deposita**, **41**, 821–835.
- Brown, W.M., Gedeon, T.D., and Groves, D.I., (2003). “Use of noise to augment training data: a neural network method for mineral-potential mapping in regions of limited known deposit examples”. **Nat. Resour. Res.** **12**, 141-152.
- Brown, W.M., Gedeon, T.D., Groves, D.I., and Barnes, R.G., (2000). “Artificial neural networks: a new method for mineral prospectivity mapping”. **Aust.J. Earth Sci.** **47**, 757- 770.
- Campos, E., Touret, J.L.R., Nikogosian, I., and Delgado, J., (2002). “Overheated, Cu-bearing magmas in the Zaldívar porphyry-Cu deposit, Northern Chile: geodynamic consequences”. **Tectonophysics**, **345**, 229-251.
- Cardellach, E., Canals, A. and Grandia, F. (2002). “Recurrent hydrothermal activity induced by successive extensional episodes: the case of the Berta F–(Pb–Zn) vein system (NE Spain)”. **Ore Geol. Rev.**, **22**, 133–141.
- Carranza, E.J.M. (2002). Ph.D. Thesis, “Geologically-Constrained Mineral Potential Mapping (Examples from the Philippines)”, Delft University of Technology, The Netherlands, ITC (International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation) Publication No. 86, Enschede.
- Carranza, E.J.M., (2004a). “Usefulness of stream order to detect stream sediment geochemical anomalies”. **Geochem.: Explor. Environ., Anal.** **4**, 341-352.
- Carranza, E.J.M., (2004b). “Weights of evidence modeling of mineral potential: a case study using small number of prospects, Abra, Philippines”. **Nat. Resour. Res.** **13**, 173-187.
- Carranza, E.J.M. (2008). “**Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS, Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry**”, Vol. 11, Elsevier, Amsterdam, pp. 351.
- Carranza, E.J.M. (2010a). “Catchment basin modeling of stream sediment anomalies revisited: incorporation of EDA and fractal analysis”. **Geochem.: Explor. Environ., Anal.**, **10**, 365-381.

- Carranza, E.J.M. (2010b). “Improved wildcat modelling of mineral prospectivity”. **Resource Geology**, **60**, 129-149.
- Carranza, E.J.M. (2010c). “Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geochemical landscapes”. **Geochem.: Explor. Environ., Anal.**, **10**, 171-187.
- Carranza, E.J.M. (2011). “Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values”. **J. Geochem. Explor.**, **110**, 167–185.
- Carranza, E.J.M. and Hale, M. (1997). “A catchment basin approach to the analysis of reconnaissance geochemical-geological data from Albay Province, Philippines”. **J. Geochem. Explor.**, **60**, 157-171.
- Carranza, E.J.M. and Hale, M. (2001). “Geologically-constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines”. **Nat. Resour. Res.**, **10**, 125-136.
- Carranza, E.J.M., and Hale, M., (2002a). “Where are porphyry copper deposits spatially localized? A case study in Benguet province, Philippines”. **Nat. Resour. Res.** **11**, 45-59.
- Carranza, E.J.M. and Hale, M. (2002b). “Wildcat mapping of gold potential, Baguio district, Philippines”. **Trans. Inst. Min. Metall., Sect. B– Applied Earth Science**, **111**, 100-105.
- Carranza, E.J.M., and Hale, M., (2003). “Evidential belief functions for geologically constrained mapping of gold potential, Baguio district, Philippines”. **Ore Geol. Rev.**, **22(1-2)**: 117-132.
- Carranza, E.J.M., Hale, M., and Faassen, C., (2008). “Selection of coherent deposit-type locations and their application in data-driven mineral prospectivity mapping”. **Ore Geol. Rev.**, **33**, 536-558.
- 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”. **Nat. Resour. Res.** **14**, 47-63.
- Chandrajith, R., Dissanayake, C.B. and Tobschall, H.J. (2001). “Application of

- multi-element relationships in stream sediments to mineral exploration: a case study of Walawe Ganga Basin, Sri Lanka". **Appl. Geochem.**, **16**, 339–350.
- Cheng, Q., (2007). "Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China". **Ore Geol. Rev.**, **32**, 314-324.
- Cheng, Q., and Agterberg, F.P., (1999). "Fuzzy weights of evidence and its application in mineral potential mapping". **Nat. Resour. Res.** **8**, 27-35.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., and Ballantyne, S.B. (1994). "The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods". **J. Geochem. Explor.**, **54**, 109-130.
- Chico-Olmo, M., Abarca, F., and Rigol, J.P., (2002). "Development of a decision support system based on remote sensing and GIS techniques for gold-rich area identification in SE Spain". **Int. J. Remote Sens.** **23(22)**: 4801-4814.
- Chung, C.F., and Agterberg, F.P., (1980). "Regression models for estimating mineral resources from geological map data". **Math. Geol.** **12**, 472-488.
- Chung, C.F., and Agterberg, F.P., (1988). Poisson regression analysis and its application, pp. 29-36, In: "**Quantitative Analysis of Mineral and Energy Resources**", Chung, C.F., Fabbri, A.G., and Sinding-Larsen, R., (Eds.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht.
- Chung, C.F., and Fabbri, A.G., (1993). "The representation of geoscience information for data integration". **Nonrenewable Resources**, **2**, 122-139.
- Chung, C.F., and Keating, P.B., (2002). "Mineral potential evaluation based on airborne geophysical data". **Explor. Geophys.**, **33**, 28-34.
- Chung, C.F., and Moon, W.M., (1991). "Combination rules of spatial geoscience data for mineral exploration". **Geoinformatics** **2**, 159-169.
- Cline, J. S., and Bodnar, R. J., (1991). "Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt". **J. Geophys. Res.-Solid Earth and Planets** **96 (B5)**, 8113 – 8126.
- Cooke, D.R., Hollings, P., and Walshe, J.L., (2005). "Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls". **Econ. Geol.**, **100**, 801–818.
- Cox, D.R., and Snell, E.J., (1989). "**Analysis of Binary Data**", 2nd ed. Chapman and

- Hall, London, pp. 236.
- D’Ercole, C., Groves, D.I. and Knox-Robinson, C.M. (2000). “Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralization”. **Aust. J. Earth Sci., 47, 913-927.**
- D’Ercole, C., Groves, D.I., and Knox-Robinson, C.M., (2000). “Using fuzzy logic in a Geographic Information System environment to enhance conceptually based prospectivity analysis of Mississippi Valley-type mineralization”. **Aust.J. Earth Sci., 47, 913-927.**
- Daneshfar, B., Desrochers, A., and Budkewitsch, P. (2006). “Mineral-potential mapping for MVT deposits with Limited data sets using Landsat data and geological evidence in the Borden Basin, Northern Baffin Island, Nunavut, Canada”. **Nat. Resour. Res., 15, 129-149.**
- Darwish, M.A.G. and Poellmann, H. (2010). “Geochemical exploration for gold in the Nile Valley Block (A) area, Wadi Allaqi, South Egypt”, **Chem. Erde, 70, 353-362.**
- De Araújo, C.C., and Macedo, A.B., (2002). “Multicriteria geologic data analysis for mineral favorability mapping: application to a metal sulphide mineralized area, Ribeira Valley metallogenic province, Brazil”. **Nat. Resour. Res. 11(1): 29-43.**
- Dempster, A.P., (1967). “Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping”. **Ann Math Stat, 38, 325-339.**
- Dilles, J.H., (1987). “Petrology of the Yerington Batholith, Nevada— evidence for evolution of porphyry copper ore fluids”. **Econ. Geol., 82, 1750–1789.**
- Dimitrijevic, M.D., (1973). Geology of Kerman region. Geological Survey of Iran Report YU/52, 247 pp.
- Dimitrijevic, M.D., and Djokovic, I., (1973). Geological Map of Kerman Region (1:500,000). Geological Survey of Iran publication.
- Eddy, B.G., Bonham-Carter, G.F. and Jefferson, C.W. (2006). Mineral potential analyzed and mapped at multiple scales – a modified fuzzy logic method using digital geology, pp. 143-162, In: “**GIS for the Earth Sciences**”, Harris, J.R. (ed),. Geological Association of Canada Special Publication 44, Geological Association of Canada, St. John’s.
- Egozcue, J.J., Pawlowsky-Glahn, V., Mateu-Figueras, G. and Barceló-Vidal, C. (2003).

- “Isometric logratio transformations for compositional data analysis”. **Math. Geol.**, **35**, 279–300.
- Evans, M.E., (1987). **“An Introduction to Ore Geology”**. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 358 pp.
- Filzmoser, P. and Hron, K. (2009). “Correlation analysis for compositional data”. **Math. Geosci.**, **41**, 905–919.
- Filzmoser, P., Hron, K. and Reimann, C. (2009a). “Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: problems and possibilities”. **Sci. Total Environ.**, **407**, 6100–6108.
- Filzmoser, P., Hron, K. and Reimann, C. (2009b). “Principal components analysis for compositional data with outliers”. **Environmetrics**, **20**, 621–632.
- Filzmoser, P., Hron, K. and Reimann, C. (2010). “The bivariate statistical analysis of environmental (compositional) data”. **Sci. Total Environ.**, **408**, 4230–4238.
- Filzmoser, P., Hron, K., Reimann, C. and Garrett, R. (2009c). “Robust factor analysis for compositional data”. **Comput. Geosci.**, **35**, 1854–1861.
- Fink, G.A. (2007). **“Markov Models for Pattern Recognition”**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 248.
- Garrett, R.G. and Grunsky, E.C. (2001). “Weighted sums – knowledge based empirical indices for use in exploration geochemistry”. **Geochem.: Explor. Environ., Anal.**, **1**, 135–141.
- Ghazban, F. and Moritz, R. (2001). “Nature of carbonate-hosted F-BA-Pb deposits in central Alborz Iran: genetic relationships”. XVICROFI European Current Research on Fluid Inclusion, Porto.
- Govett, G.J.S., (1983). **“Handbook of Exploration Geochemistry. Statistics and Data Analysis in Geochemical Prospecting”**. Elsevier, New York.
- Grunsky, E.C., Drew, L.J. and Sutphin, D.M. (2009). “Process recognition in multi-element soil and stream-sediment geochemical data”. **Appl. Geochem.**, **24**, 1602–1616.
- Guangsheng, Y., Ruizhao, Q., Changyun, L., and Nokleberg, W. J., et al., (2007). “Quantitative Assessment of the Resource Potential of Porphyry Copper Systems in China”. **Earth Sci. Front.** **14**, 27–41.
- Guillou-Frottier, L., and Burov, E., (2003). “The development and fracturing of plutonic



- apexes: implications for porphyry ore deposits”. **Earth Planet. Sci. Lett.** **214**, 341-356.
- Gustafson, L.B., and Hunt, J.P., (1975). “The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile”. **Econ. Geol., and the Bulletin of the Society of Economic Geologists** **70**, 857– 912.
- Halter, W. E., Bain, N., Becker, K., Heinrich, C. A., Landtwing, M., VonQuadt, A., Clark, A. H., Sasso, A. M., Bissig, T., and Tosdal, R. M., (2004). “From andesitic volcanism to the formation of a porphyry Cu-Au mineralizing magma chamber: the Farallo’n Negro Volcanic Complex, northwestern Argentina”. **J. Volcanol. Geotherm. Res.**, **136**, 1– 30.
- Harris, D.P., Zurcher, L., Stanley, M., Marlow, J., and Pan, G., (2003). “A comparative analysis of favourability mappings by weights of evidence, probabilistic neural networks, discriminant analysis, and logistic regression”. **Nat. Resour. Res.**, **12**, 241-255.
- Harris, J.R., Wilkinson, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M.A., Ayer, J., and Dahn, R., (2001). “Application of GIS processing techniques for producing mineral prospectivity maps – a case study: mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontario, Canada”. **Nat. Resour. Res.** **10**, 91-124.
- Hawkes, H.E., (1976). “The downstream dilution of stream sediment anomalies”. **J. Geochem. Explor.**, **6**, 345-358.
- Helvoort, P.J., Filzmoser, P. and Gaans, P.F.M. (2005). “Sequential Factor Analysis as a new approach to multivariate analysis of heterogeneous geochemical datasets: An application to a bulk chemical characterization of fluvial deposits (Rhine–Meuse delta, The Netherlands)”. **Appl. Geochem.**, **20**, 2233–2251.
- Hezarkhani, A., (2006a). “Mineralogy and fluid inclusion investigations in the Reagan Porphyry System, Iran, the path to an uneconomic porphyry copper deposit”. **J. Asian Earth Sci.**, **27**, 598–612.
- Hezarkhani, A., (2006b). “Petrology of the intrusive rocks within the Sungun Porphyry Copper Deposit, Azerbaijan, Iran”. **J. Asian Earth Sci.**, **27**, 326–340.
- Hezarkhani, A., (2009). “Hydrothermal fluid geochemistry at the Chah-Firuzeh porphyry copper deposit, Iran: evidence from fluid inclusions”. **J. Geochem.**

**Explor., 101, 254-264.**

Hezarkhani, A., Williams-Jones, A.E., and Gammons, C.H., (1999). "Factors controlling copper solubility and chalcopyrite deposition in the Sungun porphyry copper deposit, Iran". **Miner. Deposita** **34, 770– 783.**

Hill, G.T., Campbell, A.R., and Kyle, P.R. (2000). "Geochemistry of southwestern New Mexico fluorite occurrences implications for precious metals exploration in fluorite-bearing systems". **J. Geochem. Explor., 68, 1–20.**

Hosseinali, F., and Alesheikh, A.A., (2008). "Weighting spatial information in GIS for copper mining exploration", **Am J App Sci., 5, 1187-1198.**

Howarth, R.J., and Thornton, I., (1983). Regional geochemical mapping and its application to environmental studies, pp. 41-73, In: "**Applied Environmental Geochemistry**" Thornton, I., (Ed.), Academic Press, London.

Hronsky, J.M.A., and Groves, D.I., (2008). "Science of targeting: definition, strategies, targeting and performance measurement". **Aust.J. Earth Sci., 55, 3-12.**

Kaiser, H.F. (1958). "The varimax criteria for analytical rotation in factor analysis". **Psychometrika, 23, 187–200.**

Knox-Robinson, C.M. (2000). "Vectorial fuzzy logic: a novel technique for enhanced mineral prospectivity mapping with reference to the orogenic gold mineralisation potential of the Kalgoorlie Terrane, Western Australia". **Aust.J. Earth Sci., 47, 929-942.**

Kumru, M.N. and Bakac, M. (2003). "R-mode factor analysis applied to the distribution of elements in soils from the Aydin basin, Turkey". **J. Geochem. Explor., 77, 81–91.**

Landtwing, M. R., Pettke, T., Halter, W. E., Heinrich, C. A., Redmond, P. B., Einaudi, M. T., and Kunze, K., (2005). "Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic–hydrothermal fluids: The Bingham porphyry", **Earth Planet. Sci. Lett. 235, 229– 243.**

Lepeltier, c. (1969). "A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation". **Econ. Geol., 64, 538-550.**

Levinson, A.A. (1974). "**Introduction to Exploration Geochemistry**". Applied Publishing Ltd., Calgary, pp. 612.

Liu, L.M., and Peng, S.L., (2003). "Prediction of hidden ore bodies by synthesis of

- geological, geophysical and geochemical information based on dynamic model in Fenghuangshan ore field, Tongling district, China”, **J. Geochem. Explor.**, **81**, **81–98**.
- Lundmark, C., Stein, H., and Weihed, P., (2005). “The geology and Re–Os geochronology of the Palaeoproterozoic Vaikijaur Cu–Au–(Mo) porphyry-style deposit in the Jokkmokk granitoid, northern Sweden”. **Miner. Deposita** **40**, **396-408**.
- Macklin, M.G., Ridgway, J., Passmore, D.G., and Rumsby, B.T., (1994). “The use of overbank sediment for geochemical mapping and contamination assessment: results from selected Welsh floodplains”. **Appl. Geochem.** **9**, **698-700**.
- Matějčíček, L., Benešová, L., and Tonika, J., (2003). “Ecol. Modell, of nitrate pollution in small river basins by spreadsheets and GIS”. **Ecol. Modell**, **170**, **245–263**.
- McCammon, R.B., Botbol, J.M., Sinding-Larsen, R., and Bowen, R.W., (1983). “Characteristics analysis – 1981: final program and a possible discovery”. **Math. Geol.**, **15**, **59-83**.
- McKergow, L.A., Prosser, I.P., Hughes, A.O., and Brodie, J., (2005). “Sources of sediment to the Great Barrier Reef World Heritage Area”. **Mar Pollut Bull**, **51**, **200–211**.
- Micheli-Tzanakou, E. (1999). “**Supervised and unsupervised Pattern Recognition**”. CRC Press LLC., Corporate Blvd., N.W., Boca Raton, Florida, pp. 367.
- Mitchell, A.H.G., (1973). “Metallogenic belts and angle of dip of Benioff zones”. **Nature** **245**, **49–52**.
- Moon, C.J., (1999). “Towards a quantitative model of downstream dilution of point source geochemical anomalies”, **J. Geochem. Explor.**, **65**, **111-132**.
- Moon, W.M., (1990). “Integration of geophysical and geological data using evidential belief function”. **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, **28**, **711-720**.
- Moon, W.M., Chung, C.F., and An, P., (1991). “Representation and integration of geological, geophysical and remote sensing data”. **Geoinformatics**, **2**, **177-188**.
- Moreira, F.R.S., Almeida-Filho, R., and Câmara, G., (2003). “Spatial analysis techniques applied to mineral prospecting: an evaluation in the Poços de Caldas

- Plateau”. **Revista Brasileira de Geociências** **33(2-Suppl.): 183-190.**
- Niazi, M., and Asoudeh, I., (1978). “The depth of seismicity in the Kermanshah region of the Zagros Mountains (Iran)”. **Earth Planet. Sci. Lett.** **40, 270–274.**
- Nykänen, V., (2008). “Radial basis functional link nets used as a prospectivity mapping tool for orogenic gold deposits within the Central Lapland Greenstone Belt, Northern Fennoscandian Shield”. **Nat. Resour. Res.**, **17, 29-48.**
- Nykänen, V., Groves, D.I., Ojala, V.J., Eilu, P. and Gardoll, S.J. (2008a). “Reconnaissance scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper – gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland”. **Aust.J. Earth Sci.**, **55, 25-38.**
- Nykänen, V., Groves, D.I., Ojala, V.J., Eilu, P., and Gardoll, S.J., (2008b). “Combined conceptual/empirical prospectivity mapping for orogenic gold in the northern Fennoscandian Shield, Finland”. **Aust.J. Earth Sci.**, **55, 39-59.**
- Ódor, L., Horváth, I., and Fügedi, U., (1997). “Low-density geochemical mapping in Hungary”. **J. Geochem. Explor.**, **60, 55-66.**
- Ohta, A., Imai, N., Terashima, S. and Tachibana, Y. (2005). “Influence of surface geology and mineral deposits on the spatial distributions of elemental concentrations in the stream sediments of Hokkaido, Japan”. **J. Geochem. Explor.**, **86, 86–103.**
- Pan, G.C., and Harris, D.P., (2000). “**Information Synthesis for Mineral Exploration**”, Oxford University Press, Inc., New York, pp. 461.
- Pan, G.C., and Portefield, B., (1995). “Large-scale mineral potential estimation for blind precious metal ore deposits”. **Nonrenewable Resources**, **4, 187-207.**
- Pannalal, S.J., Symons, D.T.A. and Misra, K.C. (2003). “Sweetwater Ba-F-Zn district, eastern Tennessee: a paleomagnetic age for dolomitisation from fluid flow”. **J. Geochem. Explor.**, **78-79, 235–241.**
- Partida, E. G., Chavez, A. C., Grimmer, J.O.W., Pironon, J., Mutterer, J. and Levress, G. (2003). “Fluorite deposits at Encantada–Buenavista, Mexico: products of Mississippi Valley type processes”. **Ore Geol. Rev.**, **23, 107–124.**
- Pazand, K., Hezarkhani, A., Ataei, M., and Ghanbari, Y., (2011). “Application of multifractal modeling technique in systematic geochemical stream sediment survey to identify copper anomalies: a case study from Ahar, Azarbaijan, Northwest Iran”.

**Chem. Erde 71, 397-402.**

Peytcheva, I., Quadt, A.V., Neubauer, F., Frank, M., Nedialkov, R., Heinrich, C., and Strashimirov, S., (2009). “U-Pb dating, Hf-isotope characteristics and trace-REE-patterns of zircons from Medet porphyry copper deposit, Bulgaria: implications for timing, duration and sources of ore-bearing magmatism”. **Mineral. Petrol., 96, 19-41.**

Pirajno, F., (1992). “**Hydrothermal Mineral Deposits, Principles and Fundamental Concepts for the Exploration Geologists**”, Springer-Verlag, Berlin, pp. 709.

Porwal, A, Carranza, E.J.M., and Hale, M., (2004). “A hybrid neuro-fuzzy model for mineral potential mapping”. **Math. Geol. 36, 803-826.**

Porwal, A. and Sides, E.J. (2000). “A predictive model for base metal exploration in a GIS environment”. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIII(B7), 1178-1184.*

Porwal, A., (2006). Ph.D. Thesis, “Mineral Potential Mapping with Mathematical Geological Models”, University of Utrecht, The Netherlands, ITC (International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation) Publication No. 130, Enschede, 289 pp.

Porwal, A., Carranza, E.J.M. and Hale, M. (2003). “Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping”. **Nat. Resour. Res., 12, 1-25.**

Porwal, A., Carranza, E.J.M. and Hale, M. (2006). “A hybrid fuzzy weights-of-evidence model for mineral potential mapping”. **Nat. Resour. Res., 15, 1-15.**

Porwal, A., Carranza, E.J.M., and Hale, M., (2003a). “Extended weights-of-evidence modelling for predictive mapping of base metal deposit potential in Aravalli province, western India”. **Explor. Min. Geol., 10, 155-163.**

Porwal, A., Carranza, E.J.M., and Hale, M., (2003b). “Artificial neural networks for mineral potential mapping: A Case Study from Aravalli Province, Western India”. **Nat. Resour. Res., 155-171.**

Porwal, A., Carranza, E.J.M., and Hale, M., (2006a). “Bayesian network classifiers for mineral potential mapping”. **Comput. Geosci., 32, 1-16.**

- Prtoljan, B., Kapelj, S., Dukarić, F., Vlahović, I., and Mrinjek, E., (2012). “Hydrogeochemical and isotopic evidences for definition of tectonically controlled catchment areas of the Konavle area springs (SE Dalmatia, Croatia)”. **J. Geochem. Explor.**, **112**, 285–296.
- R Development Core Team, (2008). “R: A language and environment for statistical computing”. Vienna. <http://www.r-project.org>.
- Raines, G.L., (1999). “Evaluation of weights of evidence to predict epithermal gold deposits in the Great Basin of the western United States”. **Nat. Resour. Res.**, **8**, 257-276.
- Ranasinghe, P.N., Fernando, G.W.A.R., Dissanayake, C.B., and Rupasinghe, M.S., (2008). “Stream sediment geochemistry of the Upper Mahaweli River Basin of Sri Lanka – geological and environmental significance”. **J. Geochem. Explor.**, **99**, 1-28.
- Ranjbar, H. and Honarmand, M. (2004). “Integration and analysis of airborne geophysical and ETM+ data for exploration of porphyry type deposits in the Central Iranian Volcanic Belt using fuzzy classification”. **Int. J. Remote Sens.**, **25**, 4729-4741.
- Ranjbar, H., Honarmand, M., and Moezifar, Z., (2004). “Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt”. **J. Asian Earth Sci.**, **24**, 237–243.
- Rantitsch, G., (2004). “Geochemical exploration in a mountainous area by statistical modeling of polypopulational data distributions”. **J. Geochem. Explor.**, **82**, 79-95.
- Reimann, C. and Filzmoser, P. (2000). “Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data”. **Environ. Geol.**, **39**, 1001–1014.
- Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett, R.G. (2002). “Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities”. **Appl. Geochem.**, **17**, 185–206.
- Reimann, C., Filzmoser, P. and Garrett, R.G. (2005). “Background and threshold: critical comparison of methods of determination”. **Sci. Total Environ.**, **346**, 1-16.
- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R., and Dutter, R., (2008). “**Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R**”. John Wiley and

- Sons, Chichester, pp. 362.
- Rogge, D.M., Halden, N.M. and Beaumont-Smith, C. (2006). Application of data integration for shear hosted Au potential modelling: Lynn Lake Greenstone Belt, Northwestern Manitoba, Canada, pp. 191-210, In: **“GIS for the Earth Sciences”**, Harris, J.R. (ed), Geological Association of Canada Special Publication 44, St. John’s.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979). **“Geochemistry in Mineral Exploration”**, 2nd edn., Academic Press, London, pp. 657.
- Sánchez, F. G., Camprubí, A., Partida E. G., Solís, R. P., Canet, C., García, E. C. and Atudorei, V. (2009). “Regional stratigraphy and distribution of epigenetic stratabound celestine, fluorite, barite and Pb–Zn deposits in the MVT province of northeastern Mexico”. **Miner. Deposita**, **44**, 343–361.
- Sasmaz, A., Yavuz, F., Sagiroglu, A., and Akgul, B. (2005). “Geochemical patterns of the Akdagmadeni (Yozgat, Central Turkey) fluorite deposits and implications”. **J. Asian Earth Sci.**, **24**, 469–479.
- Sidorchuk, A., Märker, M., Moretti, S., and Rodolfi, G., (2003). “Gully erosion modelling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland”. **Catena**, **50**, 507– 525.
- Sillitoe, R.H., (1972). “A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits”. **Econ. Geol.**, **67**, 184–197.
- Sillitoe, R.H., (1993). Gold-rich porphyry copper deposits; geological model and exploration implications, pp. 465– 478, In: **“Mineral deposit modeling Special Paper”** Kirkham, R.V., Sinclair W.D. Thorpe, R.I., and Duke, J.M. (Eds.), Geological Association of Canada, Toronto, ON, Canada.
- Sinclair, A.J. (1974). “Selection of thresholds in geochemical data using probability graphs”. **J. Geochem. Explor.**, **3**, 129–149.
- Sinclair, A.J. (1991). “A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited”. **J. Geochem. Explor.**, **41**, 1–22.
- Singer D A, Berger V I, and Moring B C., (2005). “Porphyry copper deposits of the world: database, map, grade and tonnage models”. U.S. Geological Survey. Open-file Report, 1005–1060.
- Singer, D.A., (1993). “Basic concepts in three-part quantitative assessments of

- undiscovered mineral resources”. **Nonrenewable Resources**, **2**, 69-81.
- Singer, D.A., and Kouada, R., (1999). “A comparison of the weights-of-evidence method and probabilistic neural networks”. **Nat. Resour. Res.**, **8**, 287-298.
- Solovov, A.P., (1987). “**Geochemical Prospecting for Mineral Deposits**” (Kuznetsov, V.V., Translation) (English Edition). Mir, Moscow, pp. 288.
- Sotnikov, V.I., Sorokin, A.A., Ponomarchuk, V.A., Gimon, V.O., and Sorokin, A.P., (2007). “Porphyry Cu-Mo-(Au) mineralization: the age and relationship with igneous rock complexes of the Borgulikan ore field (upper-Amur region)”. **Russ. Geol. Geophys.**, **48**, 177–184.
- Souissi, F., Souissi, R. and Dandurand, J. (2010). “The Mississippi Valley-type fluorite ore at Jebel Stah (Zaghouan district, north-eastern Tunisia): contribution of REE and Sr isotope geochemistries to the genetic model”. **Ore Geol. Rev.**, **37**, 15–30.
- Spadoni, M., (2006). “Geochemical mapping using a geomorphologic approach based on catchments”. **J. Geochem. Explor.**, **90**, 183-196.
- Spadoni, M., Cavarretta, G., and Patera, A., (2004). “Cartographic techniques for mapping the geochemical data of stream sediments: the “sample catchment basin” approach”. **Environ. Geol.**, **45**, 593-599.
- Sridic, A., Dimitrijevic, M.N., Cvetic, S., and Dimitrijevic, M.D., (1972). “Geological Map of Baft (1:100,000)”. Geological Survey of Iran publication.
- Stanley, C.R. and Sinclair, A.J. (1987). “Anomaly recognition for multi-element geochemical data - a background characterization approach”. **J. Geochem. Explor.**, **29**, 333–353.
- Tangestani, M.H. and Moore, F. (2003). “Mapping porphyry copper potential with a fuzzy model, northern Shahr-e-Babak, Iran. Aust”. **J. Earth Sci.**, **50**, 311-317.
- Tangestani, M.H., and Moore, F., (2002a). “Porphyry copper alteration mapping in the Meiduk area, Iran”. **Int. J. Remote Sens.** **23**, 4815–4825.
- Tangestani, M.H., and Moore, F., (2002b). “The use of Dempster-Shafer model and GIS in integration of geoscientific data for porphyry copper potential mapping, north of Shahr-e-Babak, Iran”. **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.**, **4**, 65-74.
- Templ, M., Filzmoser, P. and Reimann, C. (2008). “Cluster analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities”. **Appl. Geochem.**, **23**, 2198–2213.
- Templ, M., Hron, K. and Filzmoser, P. (2009). “robCompositions: Robust estimation for

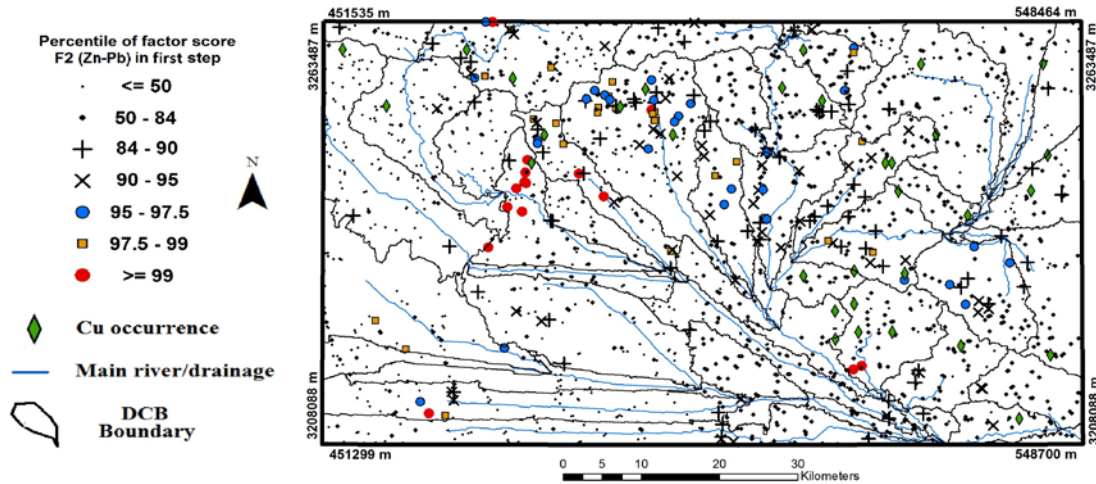


- compositional data, R package version 1.2". <http://www.r-project.org>.
- Theodoridis, S. and Koutroumbas, K. (2006). **"Pattern Recognition"**, 3th Ed., Academic Press, Elsevier, USA, pp. 837.
- Thiart, C., and De Wit, M., (2000). "Linking spatial statistics to GIS: exploring potential gold and tin models of Africa". **S. Afr. J. Geol.**, **103**, 215-230.
- Thió-Henestrosa, S. and Martín-Fernández, J.A. (2005). "Dealing with compositional data: the freeware codapack". **Math. Geol.**, **37**, 773–793.
- Treiblmaier, H. and Filzmoser, P. (2010). "Exploratory factor analysis revisited: How robust methods support the detection of hidden multivariate data structures in IS research". **Inf. Manage. Sci.**, **47**, 197–207.
- Tripathi, V.S. (1979). "Factor analysis in geochemical exploration". **J. Geochem. Explor.**, **11**, 263–275.
- Tukey, J.W. (1977). **"Exploratory Data Analysis"**. Addison-Wesley, Reading, pp. 688.
- Van den Boogaart, K.G. and Tolosana-Delgado, R. (2008). "compositions: a unified R package to analyze compositional data". **Comput. Geosci.**, **34**, 320–338.
- Van den Boogaart, K.G., Tolosana, R. and Bren, M. (2009). "compositions: Compositional data analysis, R package version 1.01-1". <http://www.r-project.org>.
- Venkataraman, G., Babu Madhavan, B., Ratha, D.S., Antony, J.P., Goyal, R.S., Banglani, S. and Sinha Roy, S. (2000). "Spatial modeling for base-metal mineral exploration through integration of geological data sets". **Nat. Resour. Res.**, **9**, 27-42.
- Weixuan, F., Shefeng, Y., Zhengtao, L., and Baochen, Z., (2007). "Geochemical characteristics and significance of major elements, trace elements and REE in mineralized altered rocks of large-scale Tsagaan Suvarga Cu-Mo porphyry deposit in Mongolia". **J. Rare Earths**, **25**, 759 – 769.
- Wilde, A.R, Bierlein, F.P. and Pawlitschek, M. (2004). "Litho-geochemistry of orogenic gold deposits in Victoria, SE Australia: a preliminary assessment for undercover exploration". **J. Geochem. Explor.**, **84**, 35–50.
- Xiaoming, Q., Hou, Z., Zaw, K., and Youguo, L., (2007). "Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Preliminary geochemical and geochronological results". **Ore Geol. Rev.**, **31**, 205–223.
- Xie, S., Cheng, Q., Xing, X., Bao, Z., and Chen, Z., (2010). "Geochemical multifractal distribution patterns in sediments from ordered streams". **Geoderma**, **160**, 36-46.
- Yang, Z., Hou, Z., White, N. C., Chang, Z., Li, Z., and Song, Y., (2009). "Geology of

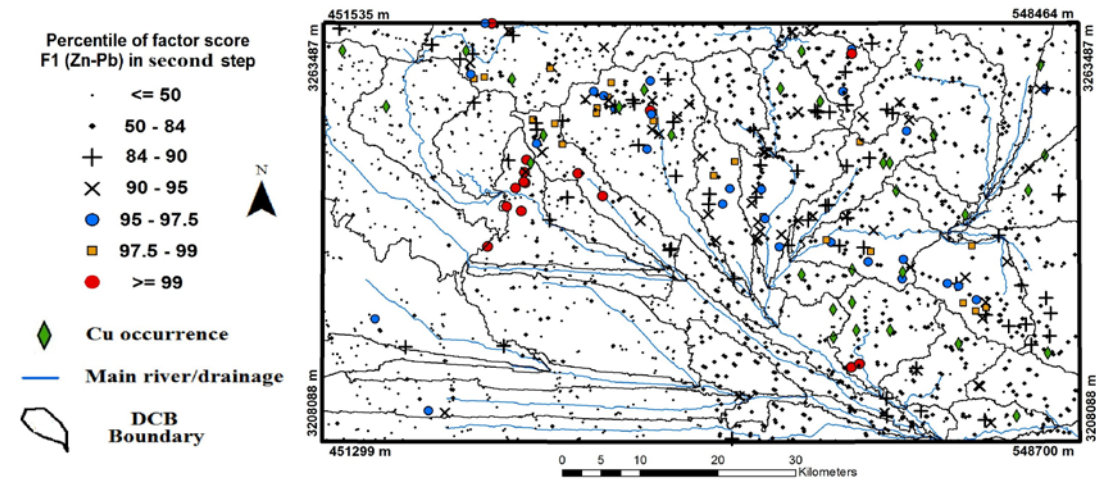
- the post-collisional porphyry copper–molybdenum deposit at Qulong, Tibet”. **Ore Geol. Rev.**, **36**, 133–159.
- Yilmaz, H., (2003). “Geochemical exploration for gold in western Turkey: success and failure”. **J. Geochem. Explor.**, **80**, 117-135.
- Zadeh, L.A. (1965). “Fuzzy sets”. **IEEE Information and Control**, **8(3)**, 338-353.
- Zimmermann, H.J., (1991). “**Fuzzy Set Theory - and Its Applications**”, Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 399 pp.
- Zolanj, S., Dimitrijevic, M.N., Cvetic, S., and Dimitrijevic, M.D., (1972). Geological Map of Sarduiyeh (1:100,000), Geological Survey of Iran publication.
- Zuo, R., (2011). “Identifying geochemical anomalies associated with Cu and Pb–Zn skarn mineralization using principal component analysis and spectrum–area fractal modeling in the Gangdese Belt, Tibet (China)”. **J. Geochem. Explor.**, **111**, 13-22.
- Zuo, R., and Carranza, E.J.M., (2011). “Support vector machine: A tool for mapping mineral prospectivity”. **Comput. Geosci.**, **37**, 1967-1975.
- Zuo, R., Cheng, Q., Agterberg, F.P., and Xia, Q., (2009). “Application of singularity mapping technique to identify local anomalies using stream sediment geochemical data, a case study from Gangdese, Tibet, western China”. **J. Geochem. Explor.**, **101**, 225-235.

# پیوست

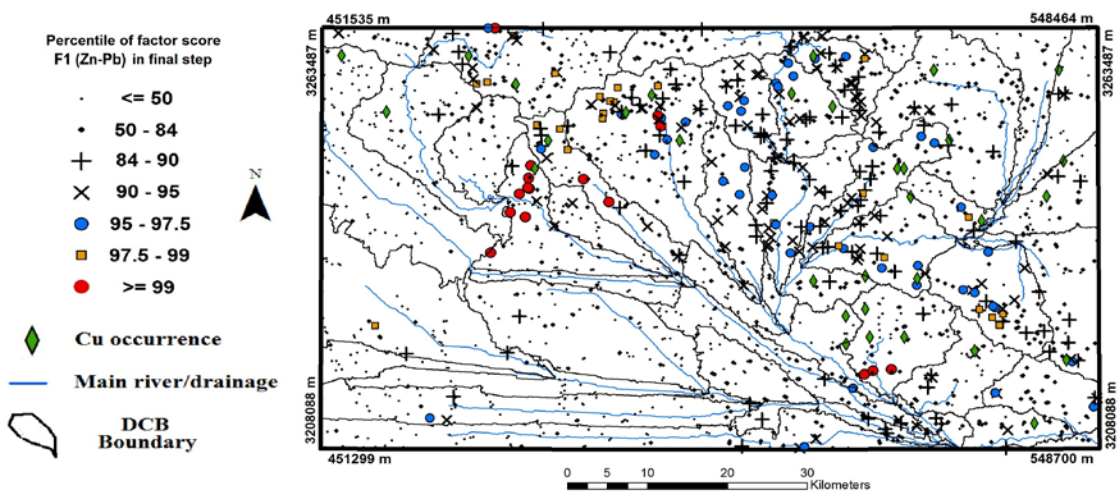
نقشه‌های پراکندگی نمونه‌های آنومالی در مراحل مختلف تحلیل فاکتوری مرحله‌ای، مقایسه روش منحنی میزان با حوضه آبریز بالادست نمونه‌ها، شماره و موقعیت اندیس‌های شناخته شده مس و روابط تبدیل ایزومتریک و وزن حوضه آبریز



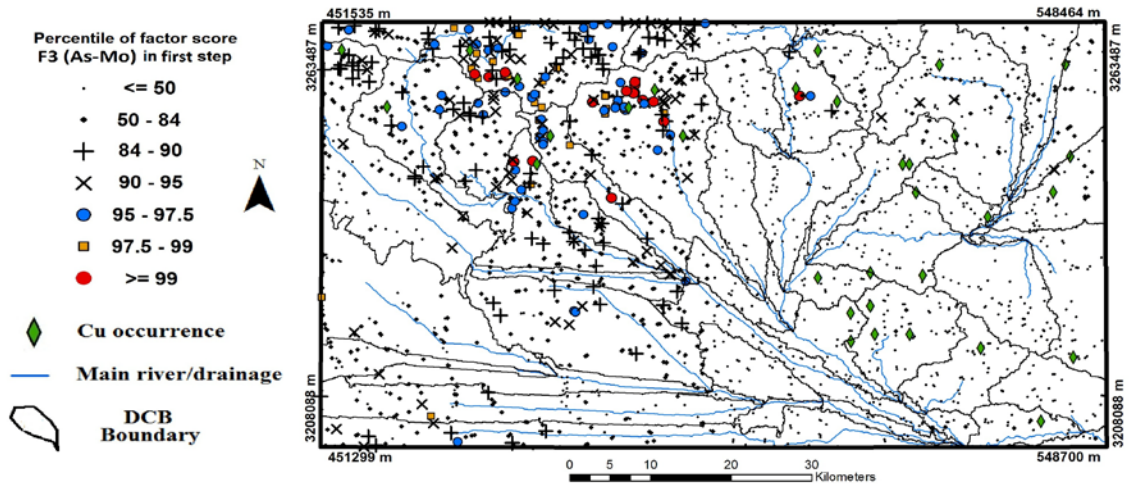
شکل پ ۱. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله اول روش SFA برای فاکتور Zn-Pb



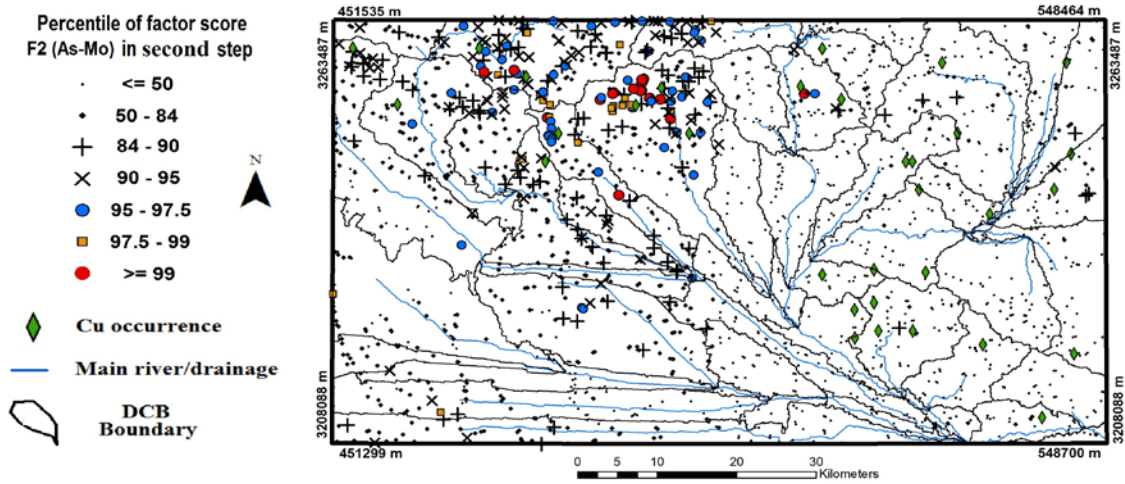
شکل پ ۲. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله دوم روش SFA برای فاکتور Zn-Pb



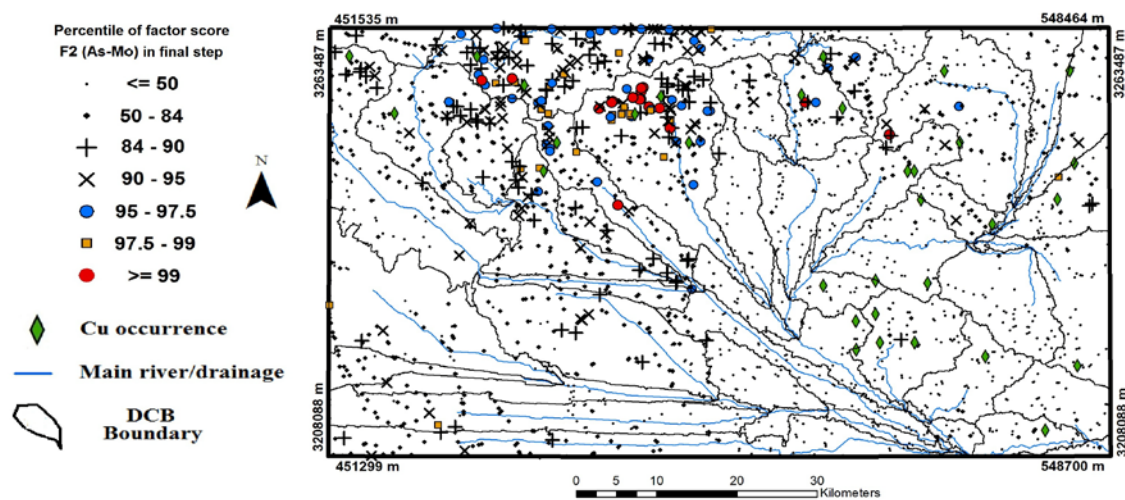
شکل پ ۳. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی Zn-Pb



شکل پ ۴. پراکنندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله اول روش SFA برای فاکتور As-Mo

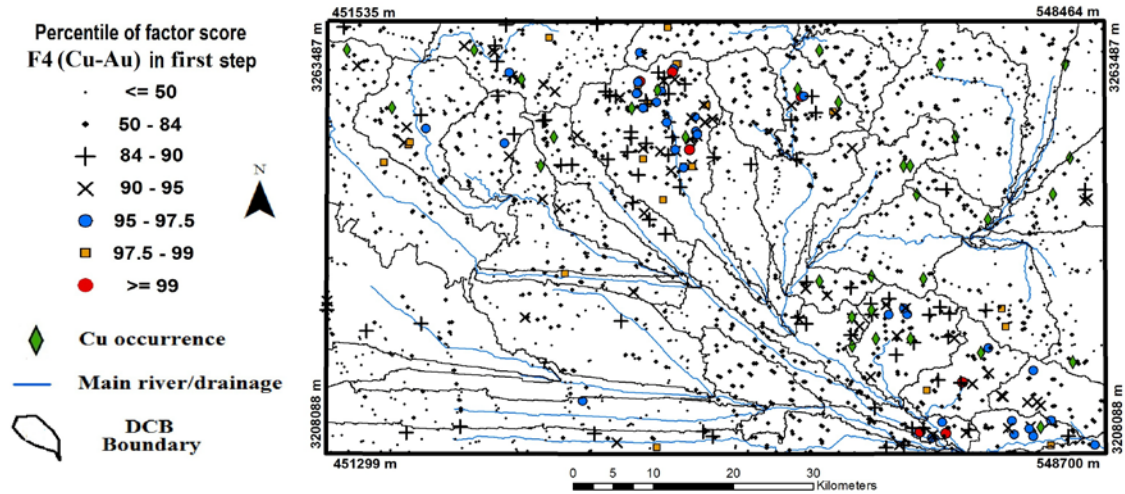


شکل پ ۵. پراکنندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله دوم روش SFA برای فاکتور As-Mo

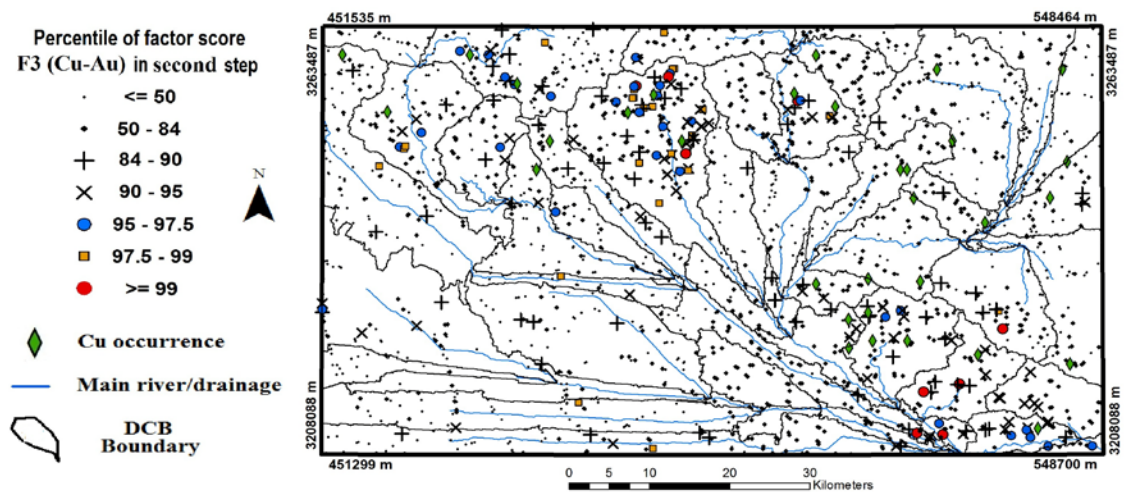


شکل پ ۶. پراکنندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی As-Mo

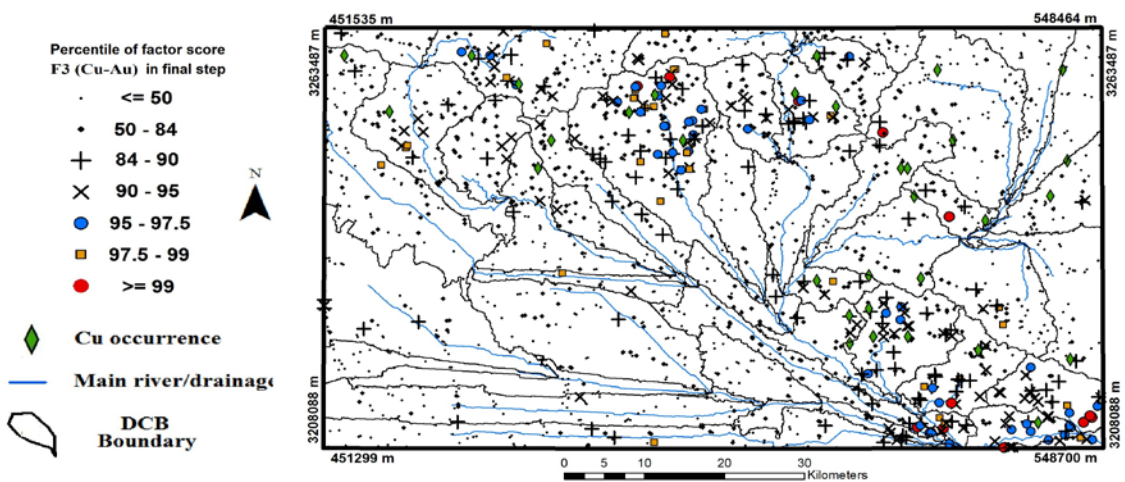




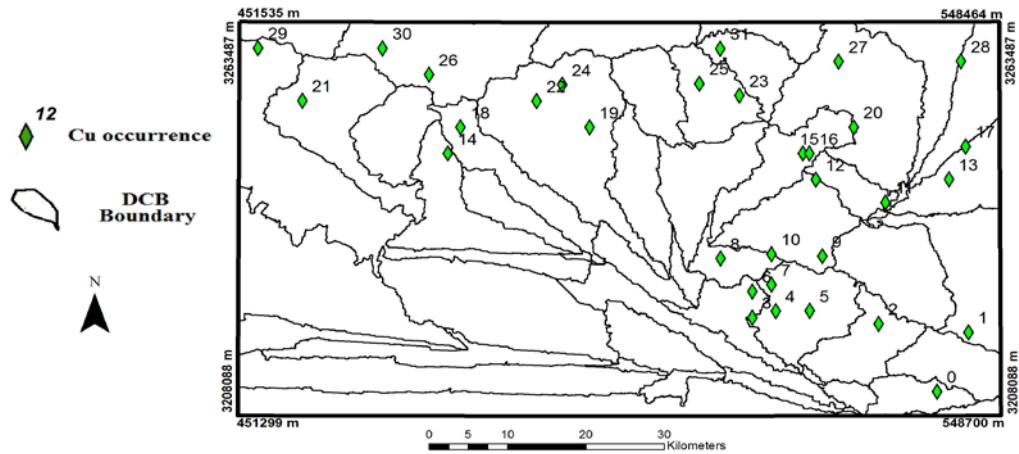
شکل پ ۷. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله اول روش SFA برای فاکتور Cu-Au



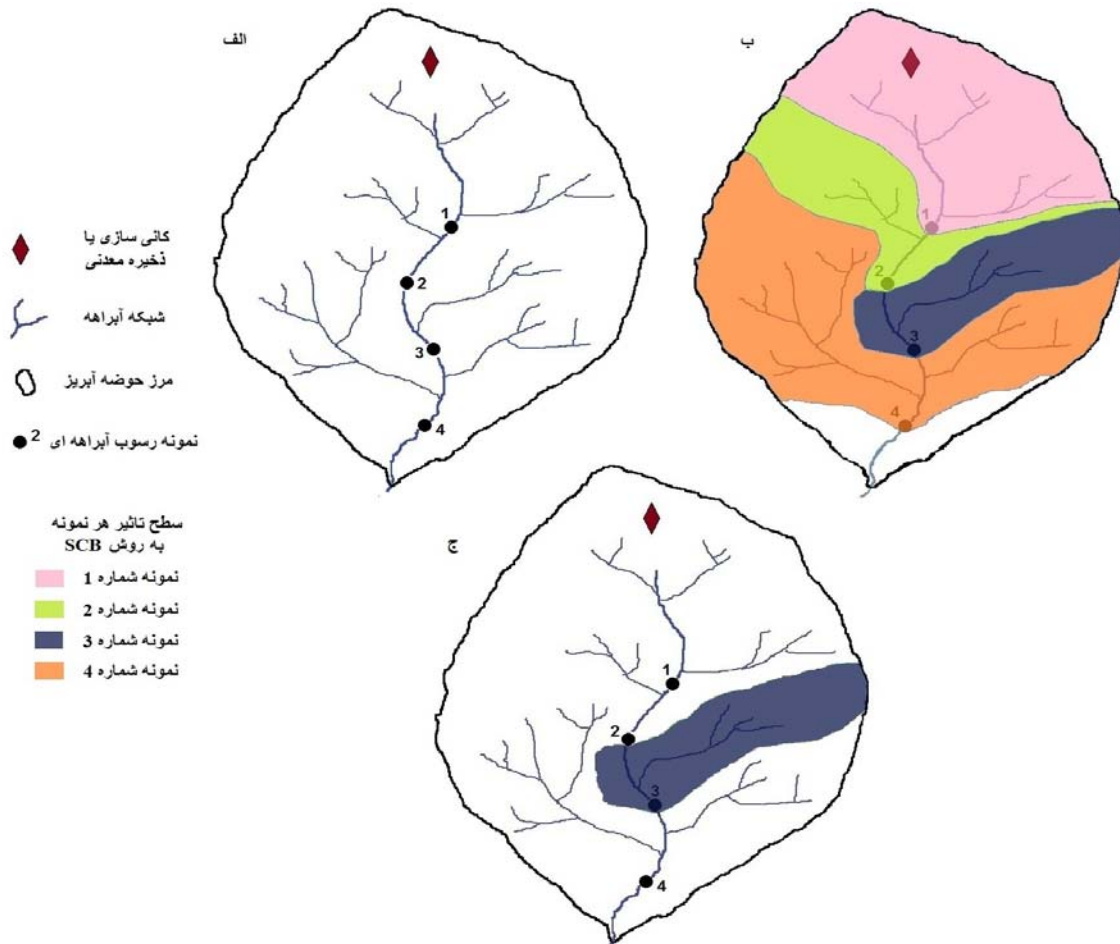
شکل پ ۸. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله دوم روش SFA برای فاکتور Cu-Au



شکل پ ۹. پراکندگی نمادین نمونه‌های آنومالی به ازای مقادیر مختلف فراوانی تجمعی در مرحله نهایی روش SFA برای فاکتور کلیدی Cu-Au



شکل پ ۱۰. موقعیت اندیس‌های شناخته شده مس و شماره آن‌ها



شکل پ ۱۱. نمایش نمادین عدم کارایی روش SCB در شناسایی و به نقشه درآوردن محل کانی‌سازی در حالت الگوهای آنومالی پیچیده. الف) موقعیت ذخیره معدنی و ۴ نمونه رسوب آبراهه‌ای در یک حوضه آبریز، ب) سطح تاثیر هر نمونه رسوب آبراهه‌ای با روش SCB، ج) نقشه نهایی مناطق آنومال به روش SCB. در شکل پ ۱۱ فرض این است که به علت الگوی آنومالی پیچیده، نمونه شماره ۳ غلظت در حد آنومالی داشته و سایر نمونه‌ها (یعنی نمونه‌های شماره‌های ۱ و ۲) در حد فاصل بین نمونه آنومالی (نمونه شماره ۳) و محل ذخیره معدنی دارای محتوی کم‌تر از حد آنومالی هستند. شکل پ ۱۱ ج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از روش SCB، محل ذخیره معدنی در مناطق آنومالی طبقه‌بندی نشده و از اولویت اکتشاف حذف می‌شود.

رابطه (پ ۱): تبدیل نسبت لگاریتم ایزومتری

$$z_i = \sqrt{\frac{D-i}{D-i+1}} \ln \frac{x_i}{\sqrt[D]{\prod_{j=i+1}^D x_j}}, \text{ for } i = 1, \dots, D-1.$$

رابطه (پ ۱) برای انتقال یک داده ترکیبی  $X$  شامل  $D$  قسمت (بخش) می‌باشد. در این حالت یک مقدار اولیه  $X_i$  با استفاده از رابطه فوق به فضای تبدیل یافته  $Z_i$ ، با استفاده از رابطه تبدیل نسبت لگاریتم ایزومتری، انتقال می‌یابد.

رابطه (پ ۲): شکل بسط یافته رابطه (۵-۱)

$$C_x = L \left( M_L \frac{n_L}{N_T} \times 100 \right) + \left( (L-1) \left( M_{L-1} \frac{n_{L-1}}{N_T} \times 100 \right) \right) + \left( (L-2) \left( M_{L-2} \frac{n_{L-2}}{N_T} \times 100 \right) \right) + \dots + \left( \left( M_{L-L+1} \frac{n_{L-L+1}}{N_T} \times 100 \right) \right)$$

رابطه (پ ۲) شکل بسط یافته رابطه (۵-۱) می‌باشد. در این رابطه  $L$  تعداد جوامع ژئوشیمیایی در نظر گرفته شده برای متغیر ژئوشیمیایی مورد نظر در مجموعه داده‌های مورد استفاده است.  $M_L$  مقدار میانگین غلظت عناصر (یا مقدار میانگین متغیر ژئوشیمیایی مورد استفاده مثلاً امتیاز فاکتوری یا GMPI) در بالاترین جامعه ژئوشیمیایی (حداکثر آنومالی یا  $L$ ) می‌باشد.  $n_L$  تعداد نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای در هر حوضه آبریز می‌باشد که در جامعه با حداکثر آنومالی ( $L$ ) طبقه‌بندی می‌شوند.  $N_T$  تعداد کل نمونه‌های رسوب در هر حوضه آبریز می‌باشد.  $L-1$  و  $L-2$  نشان دهنده سایر جوامع ژئوشیمیایی می‌باشد که به ترتیب سطح آنومالی در آن‌ها کاهش می‌یابد تا جایی که  $L-L+1$  نشان دهنده جامعه با کمترین غلظت یا کاملاً زمینه است. بنابراین در رابطه فوق مقدار  $C_x$ ، به سطح غلظت عناصر یا متغیرهای ژئوشیمیایی در تمام نمونه‌های رسوب برای هر حوضه آبریز آبراهه‌ای مرتبط می‌شود.



## **Abstract**

Mineral potential mapping (MPM) deals with the analysis and integration of spatial evidence layers derived from individual multi-source datasets to map and rank prospective areas for further exploration of the mineral deposit-type sought. To assign weights to classes of spatial evidence layers in order to create predictor maps, either knowledge- or data-driven methods, as two common approaches for MPM are used. In knowledge-driven methods, which are appropriate in greenfield (or poorly explored) areas, subjective judgment of an expert analyst is used in assigning weights to classes of a spatial evidence layer. In the result of data-driven MPM methods, the positions of generated target areas in final prospectivity models are affected by the spatial positions of known mineral occurrences that is, in fact, a systematic error in data-driven MPM. Maps of geochemical anomalies are among the common spatial evidence layers used in MPM, which can be derived independent of methods for MPM. In this regard, the way of generating geochemical evidential map is a challenging issue. The main topic of the present research thesis is (a) analysis of stream sediment geochemical data to derive a multi-element anomalous signature of the mineral deposit-type sought, (b) objective assignment of fuzzy weights to classes of derivative geochemical values for integration with other spatial evidence layers in MPM and (c) mapping stream sediment geochemical variables. In this regard, three new approaches including staged factor analysis (SFA) to derive best multi-element anomalous signatures of the mineral deposit-type sought, geochemical mineralization probability index (GMPI) to assign weights to classes of geochemical variables objectively, and weighted drainage catchment basin approach (WDCB) to map stream sediment geochemical variables, have been developed. Beside the foregoing approaches, a new concept, called discrimination index (DI) has been developed to evaluate the methods of anomaly separation in geochemical exploration. Furthermore, two approaches for assigning objective weights to fault density maps, and also maps of distances from geological features have been developed. As a result, the present thesis highlights the following findings in an attempt to improve existing methods for mineral prospectivity mapping especially, in representation of geochemical evidence: (a) Staged factor analysis increases the percentage of total explained data variance by recognition and removal of non-indicator components and elements. (b) Anomaly intensity, especially near and around known mineral deposit occurrences, is enhanced in the GMPI approach compared to ordinary factor analysis. (c) The GMPI approach can be used in knowledge-driven mineral potential mapping as a new exploratory data analysis tool to generate a weighted evidential map. (d) Anomalies mapped in WDCB models of stream sediment geochemical landscapes exhibits stronger positive spatial associations with other indicative geological features of the mineral deposit-type sought, and a map of WDCB can directly be used in fuzzy logic MPM as a weighted geochemical evidence layer. (e) Using the WDCB approach, the disadvantage of mapping anomalies through SCB modeling or contouring in terms of strong dependence on sample locations and sampling density is avoided. Finally, using the new approaches, developed in this thesis, the prediction rate and the probability of exploration success in mineral potential mapping have been enhanced and improved in comparison with previous methods.