

کاربرد مدل سازی فازی با هدف شناسایی آثار دگرسانی گرمابی در منطقه رامند قزوین

سعید عباس‌زاده^۱، بیژن ملکی^۱، سیدرضا مهرنیا^{۲*} و سعیده سنماری^۱

(۱) گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(۲) گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام‌نور، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۱

چکیده

منطقه رامند بخشی از نوار ماگمایی ارومیه- دختر واقع در زون ساختاری ایران مرکزی است که از نظر جغرافیایی در جنوب‌غربی شهرستان بوئین‌زهرا و ضلع جنوبی دانسفهان قرار دارد. منطقه یادشده به‌طور عمده شامل سنگ‌های آذرین اسیدی با ترکیب ریولیتی و ریوداسیتی است. آثار دگرسانی‌های رسی و پیدایش رگه‌های سیلیسی در سنگ‌های آتشفشانی به‌وفور دیده می‌شود. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم منطق فازی و سازوکار تلفیق داده‌های مکانی (در محیط GIS)، نقشه پیش‌داوری از وضعیت توانایی‌های معدنی مرتبط با فعالیت‌های کانه‌زایی ماگمایی- گرمابی تهیه شده است. لایه‌های مورد استفاده شامل اطلاعات زمین‌شناسی، زمین‌ساختی، تصاویر ماهواره‌ای (سنجنده ETM⁺) و شواهد کمی به‌دست آمده از سنجش‌های مغناطیس‌هوا برد هستند که پس از پردازش مقدماتی داده‌ها و دستیابی به نقشه‌های پربندی وزن‌دهی شده (لایه‌های نشانگر)، فایل‌های رستری (سلولی) موجود در قالب شبکه استنتاج فازی و با انتخاب مقدار عملگر گامای $\gamma = 0.75$ تلفیق شده‌اند. بدین ترتیب آثار همراه با دگرسانی و کانه‌زایی منطقه رامند با تأکید بر توان معدنی ذخایر ماگمایی- گرمابی به‌صورت نقشه پیش‌داوری فازی معرفی شده‌اند. در این نقشه نواحی مستعدی وجود دارند که از اولویت پی‌جویی ذخایر فازی در عمق رخساره‌های دگرسانی برخوردارند. لذا در پایان پژوهش، برخی از نتایج و پیشنهادهای لازم با هدف ادامه فعالیت‌های اکتشافی (در فاز تفصیلی) مطرح شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: دگرسانی گرمابی، منطق فازی، رامند

مقدمه

مکانی به‌همراه الگوبرداری از معیارهای اکتشافی، احتمال شناسایی مناطق امیدبخش معدنی را افزایش می‌دهد. سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، محیط مجازی مناسبی را برای طراحی الگوهای معتبر اکتشافی فراهم می‌آورند (San Soleimani et al., 2011). در واقع استفاده از تحلیلگر مکانی GIS، زمینه‌های ساماندهی، پردازش و تلفیق معیارهای زمین‌شناسی، زمین‌ساختی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی را فراهم و توانایی‌های معدنی یک

نخستین گام در تشخیص توانایی‌های معدنی یک منطقه، استفاده از معیارهای زمین‌شناسی، زمین‌ساختی، دورسنجی و ژئوفیزیکی است که در خلال پی‌جویی ناحیه‌ای منطقه موردنظر و با بهره‌گیری از روش‌های آماری و تحلیل داده‌های مکانی (در محیط GIS) زمینه‌های شناسایی دگرسانی‌ها و آثار معدنی مرتبط با آنها را فراهم می‌کند. در واقع تلفیق و تحلیل اطلاعات

اکتشافی را ارزیابی و نتایج متناسب با موضوع را در قالب فایل‌های رستری (سلولی) ارائه می‌کند (Bonham Carter, 1998). پیش شرط لازم برای دستیابی به نقشه توانایی‌های معدنی یک منطقه، وزن‌دهی متناسب با ارزش داده‌های مکانی است که این مهم متأثر از نوع و نحوه دسته‌بندی داده‌ها در محیط GIS است (Hosseinali and Alesheikh, 2008). سازوکار تلفیق داده‌ها با توجه به روش‌های متفاوت و جداگانه‌ای که برای تخمین اوزان نقشه‌های نشانگر به کار می‌روند، به دو دسته داده‌محور و دانش‌محور تقسیم می‌شوند (Bonham Carter, 1998). روش‌های متکی بر داده‌ها، برای محاسبه میزان همبستگی معیارهای اکتشافی از اصول آماری و زمین ریاضی استفاده می‌کنند. تخمین همبستگی به روش نشانگر وزنی^۱، رگرسیون منطقی^۲ و تولید شبکه‌های عصبی^۳ در زمره مهم‌ترین روش‌های داده‌محور هستند. در حالی که در روش‌های دانش‌محور، وزن‌های اختصاص یافته به لایه‌های شاهد، مبتنی بر نظر کارشناسان خبره است و با در نظر گرفتن دانش فنی و تجربه آنها تبیین می‌شوند (Ziaii et al, 2009). به عبارت دیگر، در مناطقی که از سابقه اکتشافی زیادی برخوردار نیستند، اولویت مدل‌سازی با روش‌های دانش پایه بوده و در مقابل برای مناطقی که از پایگاه داده‌های مطلوبی (حجم و تنوع زیاد) برخوردارند، استفاده از روش‌های داده‌محور توصیه شده است (Harris et al, 2001). منطق بولین^۴، شاخص هم‌پوشانی^۵، الگوریتم فازی^۶، نمودارهای درخت تصمیم‌گیری^۷، نظریه دمپستر-شفر^۸ و روش تحلیل سلسله‌مراتبی^۹ در زمره متداول‌ترین روش‌های دانش پایه هستند که با توجه به نوع و حجم داده‌های مکانی این پژوهش (داده‌های زمین‌شناسی، دورسنجی، ژئوفیزیکی و زمین‌ساختی) پیش‌فرض استفاده از الگوریتم فازی برای تولید نقشه توانایی‌های معدنی منطقه رامند مدنظر است. بر اساس نظریه مجموعه فازی، بازه‌ای از مقادیر میان صفر و یک می‌تواند برای

منطقه را در قالب نقشه‌های پیش‌داوری (فایل شبکه) معرفی می‌کند (Bonham Carter, 1998). این پژوهش با به کارگیری روش تلفیق فازی و استفاده بهینه از سوابق اکتشافی منطقه رامند (تأکید بر شواهد دورسنجی و یافته‌های مغناطیسی هوابرد)، توانایی‌های معدنی آن را بازمینی و نقشه پیش‌داوری ذخایر گرمایی را با تأکید بر مکان هندسی رخنمون‌های دگرسانی ارائه کرده است. در واقع هدف از این پژوهش، تعیین مناطق اولویت‌دار و امیدبخش معدنی با استفاده از نقشه پتانسیل مطلوب تولیدشده از روش منطق فازی است. روش منطق فازی (An et al., 1991; Wright and Bonham Carter, 1996; Bonham Carter, 1998; Mukhopadhyay et al., 2002; Porwal et al., 2003; Karimi et al., 2008) به مناطق با توانایی بالا به صورت دقیق اشاره می‌کند که این امر در انجام عملیات اکتشافی، کاهش هزینه و زمان و همچنین فرآیند سرعت در تصمیم‌گیری بسیار مؤثر است. به همین دلیل برای انجام این پژوهش انتخاب شد. مدل‌سازی فازی شامل سه مرحله: جمع‌آوری و تشکیل پایگاه داده‌های مکانی، تجزیه و تحلیل داده‌ها و تلفیق آنها با استفاده از الگوریتم فازی است.

روش مطالعه و داده‌ها

اولین گام پروژه‌های اکتشافی، تهیه نقشه معتبری از توانایی‌های معدنی یک منطقه در رابطه با تمرکز ترجیحی یک یا چند عنصر مشخص (تیپومورفیک) است که در نهایت به ارائه مدلی اکتشافی از ذخایر موجود منجر می‌شود. مراحل عملی تولید مدل‌های اکتشافی با استخراج داده‌های مفید از بانک اطلاعات مکانی یک منطقه آغاز شده است و با پردازش مقدماتی و تکمیلی متغیرهای زمین‌شناسی، ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی ادامه می‌یابد. تلفیق داده‌ها که از آن به‌عنوان تلفیق اطلاعات مکانی در محیط GIS نام برده می‌شود، سازوکاری منطقی است که با استناد بر محاسبات ریاضی، نقاط اشتراک و افتراق معیارهای

1. Weight of Evidences (WofE)
2. Logistic regression
3. Neural networks
4. Boolean logic
5. Index Overlay

6. Fuzzy logic
7. Inference networks and decision trees
8. Demster-Shafer
9. Analytical hierarchy process (AHP)

GIS، نقش عملگرهای منطقی در فرآیند تلفیق داده‌ها حائز اهمیت است. در جدول ۱، برخی از عملگرهای منطقی و نتایج آنها در روش فازی آمده است. چنان که دیده می‌شود، عملگر گاما به دلیل ترکیب مفاهیم پنهان در عملگرهای منطقی Product و Sum، از قابلیت به‌گزینی معیارهای اکتشافی برخوردار است و با تغییرات ضریب گاما (بین مقادیر ۰ تا ۱)، تغییرات قابل توجهی در مدل‌های اکتشافی حاصل می‌شود؛ به طوری که با افزایش گاما، فاصله اطمینان تخمین‌های به‌عمل آمده کاهش یافته و مناطق امیدبخش بیشتری معرفی می‌شوند. در حالی که با کاهش این کمیت، فاصله اطمینان تخمین‌ها بیشتر شده است و مناطق امیدبخش محدود می‌شوند. (Bonham Carter, 1998).

بیان درجه یا میزان ارزش اعضای یک مجموعه به کار روند (Novriadi and Darijanto, 2006). به طوری که مقدار صفر به معنای نبود عضویت کامل و در مقابل مقدار یک به معنای عضویت کامل اعضای مجموعه است. به همین ترتیب دیگر اعضای مجموعه نیز می‌توانند مقداری را بین صفر تا یک (بر اساس درجه عضویشان) در مجموعه موردنظر کسب کنند. بنابراین در بحث اکتشافات معدنی، از توابع عضویت برای نشان دادن اهمیت نسبی هر لایه و همچنین اهمیت نسبی رده‌های هر لایه در تولید نقشه پیش‌داوری (فایل شبکه نهایی) استفاده می‌شود (Bonham Carter, 1998). در عمل از لایه‌های وزن‌دار شده برای بیان معیارهای اکتشافی متناسب با نواحی مستعد استفاده می‌شود که با توجه به تسهیلات نرم‌افزار

جدول ۱. تعریف عملگرهای فازی (μ_i تابع عضویت فازی برای نقشه A_m است ($i=1,2,3,\dots,n$) و μ_A, μ_B, μ_C مقادیر عضویت برای نقشه A, B و C هستند) (Bonham Carter, 1998)

Table 1. The definition of fuzzy operators (μ_i is Fuzzy membership function for i map ($i=1, 2, 3, \dots, n$) and μ_A, μ_B, μ_C are membership values for A,B,C map) (Bonham Carter, 1998)

fuzzy operator	Operator equation	Performance
AND	$\mu_{Combine} = \text{Min}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots)$	The production output map with minimum membership values
OR	$\mu_{Combine} = \text{Max}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots)$	The production output map with maximum membership values
Product	$\mu_{Combine} = \prod_{i=1}^n \mu_i$	Output map values \leq The shared membership values
Sum	$\mu_{Combine} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$	Output map values \geq The shared membership values
Gamma	$\mu_{Combine} = \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma} \times \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^\gamma$ γ is Parameter between zero and one	By correct choice the gamma can be the increasing role of the fuzzy sum and the lowering role of fuzzy multiplied to limited the state of equilibrium

شهرستان بوین‌زهرا و ضلع جنوبی دانشفهان قرار دارد. این منطقه متعلق به گوشه شمال‌غربی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰

زمین‌شناسی منطقه رامند
منطقه رامند بخشی از استان قزوین است که در جنوب‌غربی

ساوه بوده و در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ (خیارج) در مرکز نقشه زمین‌شناسی دانشفهان دیده می‌شود. راه دسترسی به منطقه از مسیر تهران، جاده شهریار، اشتهارد، بوین زهرا و دانشفهان است. با توجه به ناحیه‌بندی رسوبی - ساختاری فلات ایران، منطقه رامند در حاشیه شمال غربی ایران مرکزی قرار گرفته و از دیدگاه زمین‌ساخت صفحه‌ای متعلق به زون ارومیه - دختر است. کوه‌های رامند با وسعت تقریبی ۷۰ کیلومتر مربع بین مدارهای ۳۵° ۴۲' تا ۳۵° ۴۵' شمالی و ۴۹° ۳۷' تا ۴۹° ۴۵' شرقی واقع شده‌اند. این کوه‌ها در واقع چند رشته موازی هم هستند که از شمال غربی به جنوب شرقی امتداد یافته‌اند و تا اندازه‌ای دارای توپوگرافی خشن هستند (Eghlimi et al., 1999). گسل حسن‌آباد مهم‌ترین و قدیمی‌ترین پدیده ساختمانی این منطقه است که از شرق تا غرب گسترش یافته است و در ضلع شمالی آن توپوگرافی نسبتاً خشن (و مرتفع) مشاهده می‌شود (کوه رامند). این گسل متأثر از حرکات نوزمین‌ساختی پالئوژن بوده و در دوره کواترنری تجدید فعالیت کرده است. انشعابات جدیدی از گسل حسن‌آباد با روند غالب شمال غربی - جنوب شرقی در منطقه مورد بررسی یافت شده‌اند که اغلب آنها در شکل‌گیری سازوکارهای تفریق ماگمایی و نفوذ سیالات گرمایی به سطح زمین مؤثر بوده‌اند (Masoudi, 1989). توده‌های نفوذی موجود در منطقه که از نظر پراکندگی بسیار کم هستند و در بعضی مناطق باعث دگرسانی و کانی‌سازی شده‌اند، اغلب در انوسن - الیگوسن تشکیل شده‌اند و شامل دیاباز و دایک‌های آندزیتی هستند. ولکانیسم این منطقه شامل انواع ریولیتی، ریوداسیتی، توف‌های ریوداسیتی، توف بلورین و گدازه‌های جریان‌ی است (شکل ۱). علاوه بر رخساره‌های ماگمایی یادشده، رخنمون‌های متعدد و پراکنده از رسوبات کواترنری (عهد حاضر) در منطقه رامند دیده می‌شوند که اغلب آنها در خلال فعالیت‌های هیدرومورفیکی (به‌صورت آلویال) تشکیل شده‌اند. اغلب واحدهای آتشفشانی رامند (با ترکیب اسیدی تا حدواسط) تحت تأثیر سیالات گرمایی بوده‌اند و آثار دگرسانی مشهودی

دارند. هاله‌های دگرسانی از گسترش نسبتاً خوبی برخوردار بوده و شامل انواع ترکیبات رسی (آرژیلیک)، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن (هم‌یافتی گوتیت - لیمونیت - همتیت) به‌همراه سیلیسی شدن پراکنده هستند و به‌طور عمده بر روی واحد میزبان اصلی منطقه یعنی سنگ‌های آذرین ریوداسیتی و ریولیتی، توف ریوداسیتی، توف بلورین و گدازه‌های جریان‌ی ریوداسیتی دیده می‌شوند. حضور هم‌زمان هاله‌های دگرسانی و رابطه مکانی آنها با محل تلاقی سامانه‌های گسلی از علایم شکل‌گیری فازهای پساماگمایی و تولید سیالات کانه‌دار با منشأ گرمایی است که زمینه‌های دگرسانی سنگ‌ها و کانه‌زایی نوع رگه‌ای را فراهم کرده است (Ezzati et al., 2014). فراوانی آثار معدنی کاتولن در زمره شواهد مهم زمین‌شناسی است که بیانگر حضور سیالات گرمایی و تأثیر وسیع آنها در شست‌وشوی اسیدی سنگ‌های منطقه است (Eghlimi et al., 1999).

بحث و بررسی

پیش‌داوری توانایی‌های معدنی یک منطقه با استفاده از عملیات تلفیق داده‌ها در محیط GIS صورت می‌گیرد که با توجه به اهمیت هر داده و سازوکار تأثیر آن بر سایر داده‌ها، وزن‌دهی متفاوتی انجام می‌شود. در این رابطه و پس از تشکیل پایگاه اطلاعاتی مورد نظر، برخی از پردازش‌های متداول از قبیل رده‌بندی مجدد فایل‌های شبکه و ایجاد شعاع اثر مناسب در اطراف گسل‌ها و عوارض برداری^۱ مرتبط با پدیده‌های دگرسانی - کانه‌زایی انجام می‌شود تا وزن‌دهی معیارهای اکتشافی تنها در قالب فایل‌های رستری^۲ (سلولی) متعارف (استاندارد) باشد. از دیدگاه زمین‌ریاضی، منطق حاکم بر تحلیل‌های مکانی، نیازمند تولید لایه‌های اطلاعاتی با قالب رستری است که در همه آنها از شبکه‌های هم‌بعد (ایزومتریک) و کمیت‌های معین برای توصیف پدیده مورد نظر استفاده می‌شود (Bonham Carter, 1998). در نتیجه، عملیات اشاره‌شده بر روی تمامی داده‌ها اجرا شده است که در ادامه به

1. Vector
2. Raster

آنها اشاره می‌شود:

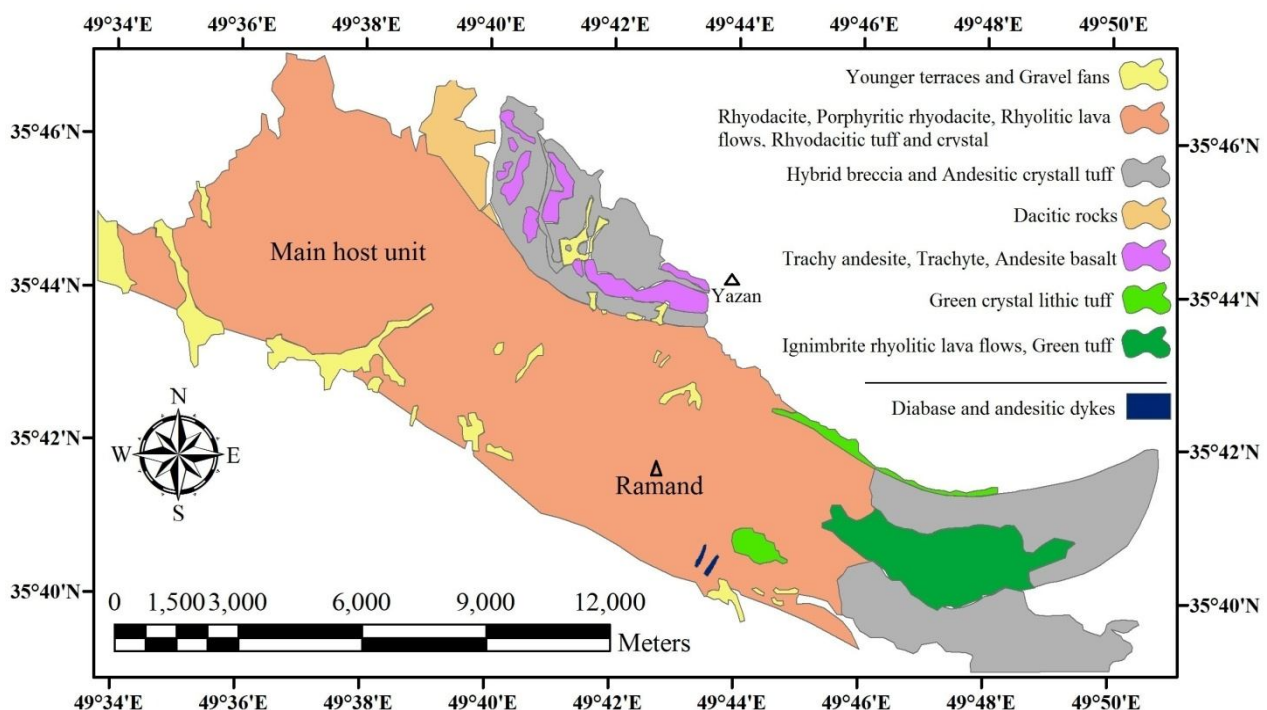
زمین‌شناسی رامند بر اساس شرایط میزبانی، رخداد کانه‌زایی (از نوع گرمایی به صورت فلزی نظیر مس، سرب و روی و... و غیر فلزی نظیر کائولن، باریت و...)، پیدایش آثار دگرسانی (با منشأ گرمایی) و توزیع سامانه‌های گسلی - متقاطع بوده است.

لایه اطلاعاتی دگرسانی‌های گرمایی

شناسایی و تشخیص دگرسانی‌ها به روش دورسنجی یکی از ابزارهای کارآمد در اکتشافات معدنی بوده و کانسارهایی که از هاله‌های وسیع دگرسانی برخوردارند، به‌خوبی در تصاویر ماهواره‌ای مشاهده می‌شوند. برای شناسایی دگرسانی‌های گرمایی منطقه رامند از تصاویر سنجنده ETM^+ متعلق به ماهواره لندست ۷ استفاده شد. بنابراین از دو روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی (Crosta and Moore, 1989) و نسبت‌گیری باندهی M-ratio (Mehrnia, 2015) برای دستیابی به اهداف پژوهش استفاده شده است.

لایه اطلاعاتی واحدهای زمین‌شناسی

از لایه‌های با اهمیت در تهیه نقشه پتانسیل مطلوب معدنی یک منطقه، نقشه واحدهای زمین‌شناسی است. برای تولید لایه اطلاعاتی واحدهای زمین‌شناسی از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ دانسفهان (Eghlimi et al., 1999) استفاده شد که بعد از برازش مکانی با نواحی مستعد رامند، امکان تولید فایل‌های برداری از سازندهای مرتبط با رویداد دگرسانی و کانه‌زایی فراهم شده است (شکل ۱). بعد از دستیابی به فایل‌های برداری، سازوکارهای لازم برای ایجاد شعاع اثر مناسب فراهم شد تا طبق مندرجات جدول ۲، وزن‌دهی لایه‌ها با استناد بر سوابق زمین‌شناسی منطقه باشد. نتیجه این پردازش‌ها، تولید نقشه نشانگر (فاکتور) واحدهای زمین‌شناسی است که مطابق شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل، ملاک امتیازدهی به واحدهای






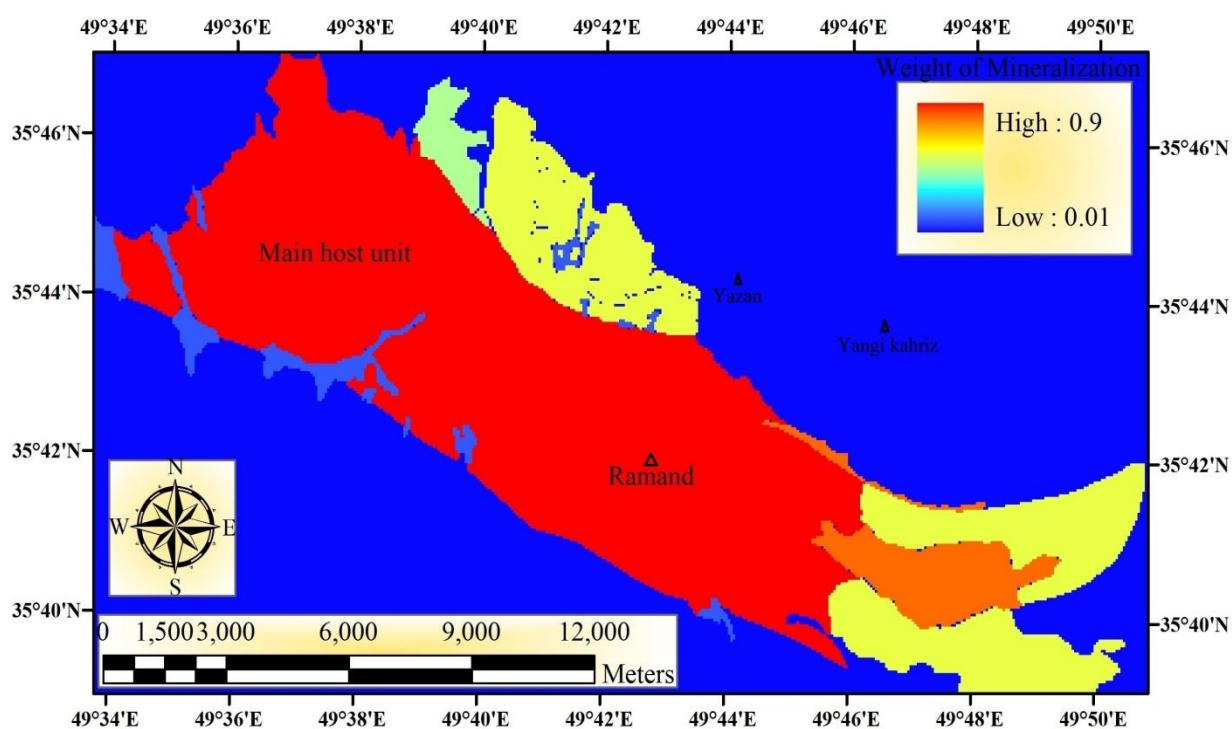
شکل ۱. نقشه واحدهای زمین‌شناسی در منطقه رامند (Eghlimi et al., 1999) (واحد میزبان اصلی: شامل سنگ‌های آذرین ریوداسیتی و ریولیتی، توف ریوداسیتی، توف بلورین و گدازه‌های جریان ریوداسیتی است)

Fig. 1. Geological units map in the Ramand region (Eghlimi et al., 1999) (Main host unit: consist of rhyodacite and rhyolite igneous rocks, rhyodacitic tuff, crystal tuff and rhyodacitic lava flows)

جدول ۲. وزن‌دهی فازی به واحدهای زمین‌شناسی در منطقه رامند

Table 2. The fuzzy weighting to geological units in Ramand area

Geological Units	Observed units in the area	Main unit	Eocene-Oligocene		Rhyodacite, Porphyritic rhyodacite, Rhyolitic lava flows, rhyodacitic tuff and crystal tuff	Weight
		0.9				
		Minor units	Quaternary		Green crystal lithic tuff	0.8
		0.1				
	Observed units around the area	Minor units	Eocene-Oligocene		Younger terraces and Gravel fans	0.6
					0.55	
					0.45	
					0.3	



شکل ۲. نقشه نشانگر مربوط به لایه واحدهای زمین‌شناسی رامند (اولویت اکتشافی لایه‌های زمین‌شناسی به‌روش فازی تعیین شده است؛ به‌طوری‌که رنگ قرمز (بیشترین: ۰/۹) نشان‌دهنده بیشترین و رنگ زرد (کمترین: ۰/۱) بیانگر کمترین تأثیر در کانی‌زایی است)

Fig. 2. Indicator map of the Ramand geological units layer (Exploration priority of geological layers is determined by fuzzy logic so that red color (highest: 0.9) is indicative of the highest and yellow color (least: 0.1) is indicative of the least talent in mineralization)

بازتاب‌شده از سطح زمین، دگرسانی گرمابی را در یک منطقه شناسایی کند. بدین منظور پیش‌فرض کروستا داده‌های سنجنده

– روش کروستا: این روش مبتنی بر تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی^۱ بوده و قادر است بر اساس طیف‌های الکترومغناطیس

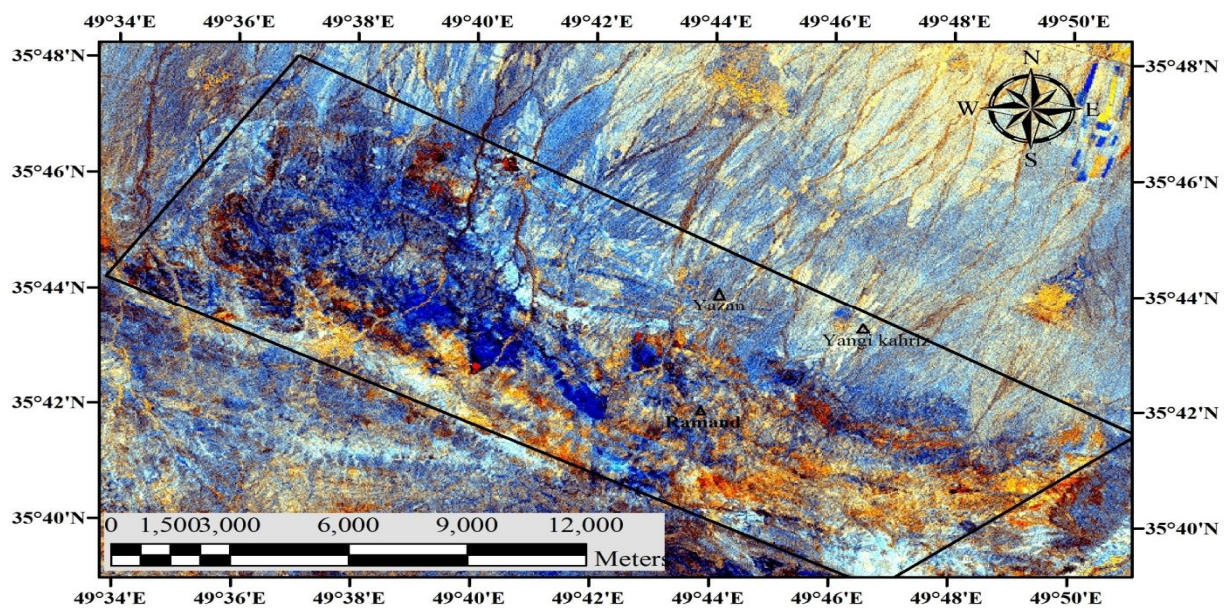
مؤلفه چهارم هریک از گروه‌های یادشده (PC₄) برای تولید باندهای ترکیبی و شناسایی هاله‌های دگرسانی (با منشأ گرمایی) استفاده می‌شوند. در ادامه از یک عملیات محاسباتی ساده برای تجمیع بردارهای متمایز استفاده شده است تا مؤلفه طیفی H+F برای دستیابی به ترکیبات باندی موردنظر فراهم شود.

با توجه به فرمول ارائه‌شده در جدول یادشده، ترکیب رنگی کروستا مطابق شکل ۳ حاصل می‌شود. در این شکل، رنگ قرمز (و قهوه‌ای) بیانگر هاله‌های رسی و رنگ آبی بیانگر هاله‌های اکسید و هیدروکسید آهن است. رنگ سبز نیز طبق جدول یادشده، نشان‌دهنده هاله تجمع‌ی از رس و اکسید آهن است که البته این رنگ در شکل ۳ دیده نمی‌شود.

در شکل یادشده، مناطقی که دارای طیف رنگی زرد و نارنجی مایل به زرد هستند بیانگر اجتماع مکانی رس‌ها و اکسیدهای آهن بوده و به دلیل مطابقت مکانی با رخنمون سنگ میزبان (داسیت، ریوداسیت)، بیانگر آثار دگرسانی با منشأ گرمایی رامند هستند (Crosta and Moore, 1989).

ETM⁺ (متعلق به ماهواره لندست ۷) بوده و مبنای نظری آن وجود همراه با هم هاله‌های رسی و اکسید آهن در مناطق خردشده (محل تلاقی سامانه‌های گسلی جوان) بر روی سازندهای ماگمایی است. کاهش تعداد باندهای ورودی برای تعیین یک مؤلفه اصلی برای رده‌های کانی‌شناختی خاص، از اصول کلیدی این روش است. بنابراین برای انتخاب باندهای مؤثر و نیز حذف دیگر باندها، از ماتریس همبستگی بین باندها استفاده می‌شود. الگوریتم کروستا در پردازش باندهای سنجنده ETM⁺ به این شکل است که از باندهای ۱، ۴، ۵ و ۷ برای نقشه‌برداری هاله‌های رسی و از باندهای ۱، ۳، ۴ و ۵ برای نقشه‌برداری اکسیدهای آهن استفاده می‌کند تا ماهیت هاله‌های دگرسانی اطراف توده نفوذی را مشخص کند.

با این روش دو گروه متمایز از بردارهای شاخص تولید می‌شوند که مطابق جدول ۳ با حروف F (بردار شاخص اکسیدهای آهن) و H (بردار شاخص کانی‌های رسی) معرفی شده‌اند. هر گروه متمایز از بردارهای شاخص دارای چهار مؤلفه است که بر اساس پیشنهاد کروستا و مور (Crosta and Moore, 1989)، تنها



شکل ۳. تصویر ETM⁺ حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی انتخابی به روش کروستا در منطقه رامند (در چهارگوشه مورد بررسی، آثار دگرسانی گرمایی به رنگ‌های زرد و نارنجی مایل به زرد هستند)

Fig. 3. ETM⁺ Image of selective principal components analysis to Crosta method in Ramand region (yellow and orange to yellowish colors indicate hydrothermal alterations in the studied rectangle area)

جدول ۳. نتایج روش کروسا به صورت ترکیب باندی رنگی در منطقه رامند ($F(PC_4)=F(PC_4)$ بردار متمایز مرتبه چهارم مربوط به تغییرات طیفی اکسیدهای آهن در فیلتر آبی، $H(PC_4)=H(PC_4)$ بردار متمایز مرتبه چهارم مربوط به تغییرات طیفی کانی‌های رسی در فیلتر قرمز، $H(PC_4)+F(PC_4)=H(PC_4)+F(PC_4)$ بردار متمایز مرتبه چهارم مربوط به تغییرات طیفی کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن در فیلتر سبز)

Table 3. The Results of Crosta method for color band composition in Ramand region ($F(PC_4)$ = Fourth level of eigenvectors that related to spectral changes of iron oxides in blue filter, $H(PC_4)$ = Fourth level of eigenvectors that related to spectral changes of clay minerals in red filter, $H(PC_4)+F(PC_4)$ = Fourth level of eigenvectors that related to spectral changes of clay minerals and iron oxides in green filter)

Red	Green	Blue
$H(PC_4)$	$H(PC_4)+F(PC_4)$	$F(PC_4)$

مراحل M-ratio با استفاده از تصاویر سنجنده ETM^+ عبارتند از: تولید نسبت‌های باندی $3/1$ و $5/7$ که به ترتیب برای بارزسازی آثار دگرسانی اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی استفاده می‌شوند، تولید نسبت باندی $4/3$ برای افزایش تمایز بین مناطق دگرسانی و غیردگرسانی و در نهایت ترکیب نسبت‌های باندی بر اساس مندرجات جدول ۴ که بعد از اعمال فیلتر کیفی و بالاگذر IHS¹ مطابق عکس نقشه شکل ۴ ارائه شده است.

- **روش نسبت‌گیری باندی M-ratio:** اخیراً از این روش برای افزایش کنتراست تصاویر و بارزسازی تغییرات طیفی مرتبط با پدیده‌های زمین‌شناسی و معدنی استفاده شده است (Mehrnia, 2015). در فرآیند نسبت‌گیری باندی اغلب از دو گستره طیفی متفاوت استفاده می‌شود تا اختلاف طول موج بیشینه (صورت کسر) و کمینه (مخرج کسر) افزایش یافته و شناسایی عارضه موردنظر آسان‌تر شود (Sabins, 2002).

جدول ۴. ترکیب نسبت‌های باندی به روش M-ratio با هدف شناسایی مناطق دگرسانی گرمایی در عکس نقشه‌های رنگی منطقه رامند

Table 4. Combination of band ratios by M-ratio method with the aim of identifying the hydrothermal alteration areas in color photo-maps of Ramand region

Red	Green	Blue
3/1	5/7	4/3

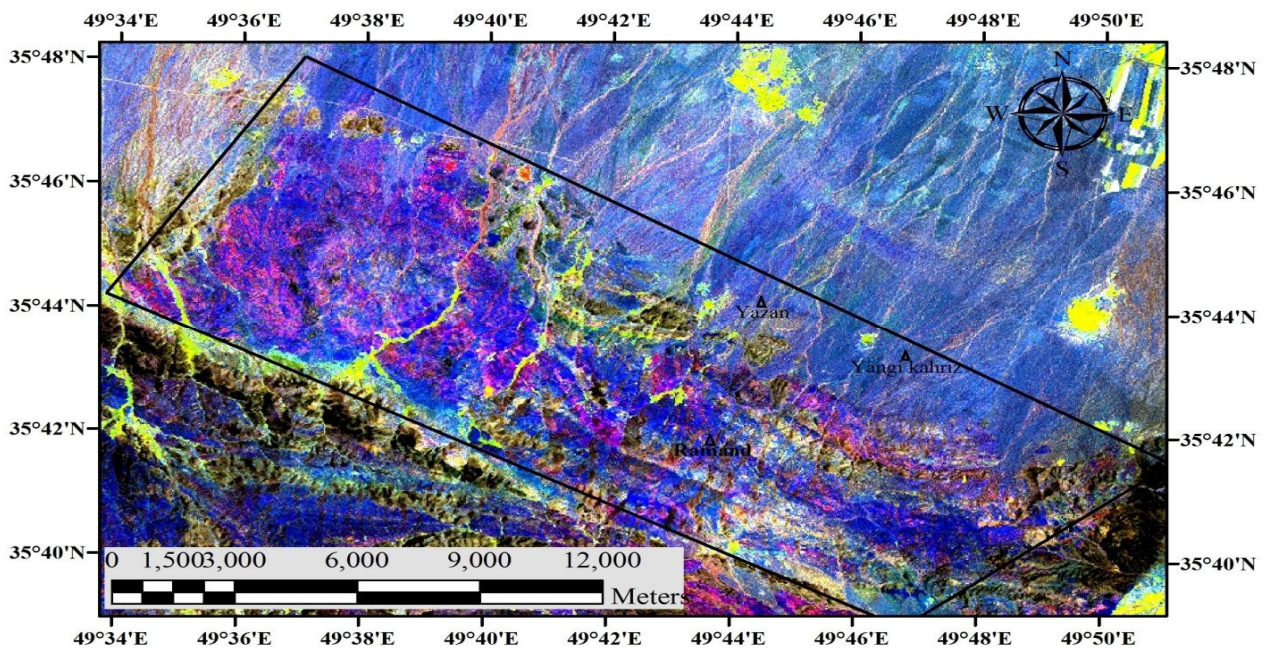
نسبت‌گیری باندی) است که برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، از معیارهای طیفی هر دو روش برای استخراج لایه‌های دگرسانی و وزن‌دهی آنها در محیط GIS استفاده شده است. چنان‌که گفته شد، روش نسبت باندی M-ratio موجب کاهش تعداد و وسعت دگرسانی‌ها می‌شود؛ اما در عین حال شاخص طیفی مؤثری را برای شناسایی سازوکارهای گرمایی منطقه رامند ارائه کرده است. از دیدگاه نظری، رویداد دگرسانی گرمایی محدود به مناطق گسلی و خردشده پوسته است و نسبت به هاله‌های هیدرومورفیکی از وسعت و تنوع کمتری برخوردارند (Hassani Pak, 2010). در عمل برای تشخیص آثار دگرسانی

در تصویر کاذب M-ratio، محدوده‌های قرمز و سبز به ترتیب بیانگر سازندهای حاوی اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی هستند. رنگ آبی برای افزایش تضاد بین طیف‌های قرمز و سبز به کار رفته و نشان‌دهنده مناطقی است که آثار دگرسانی گرمایی ندارند.

در شکل ۴، مناطق متأثر از دگرسانی گرمایی دارای طیف رنگی زرد تا نارنجی هستند که ناشی از هم‌یافتی اکسیدهای آهن و کانی‌های رسی در محل تلاقی گسل‌ها و نواحی خردشده است (Mehrnia, 2015). در مقام مقایسه، گسترش هاله‌های دگرسانی در شکل ۳ (روش کروسا) بیشتر از شکل ۴ (روش

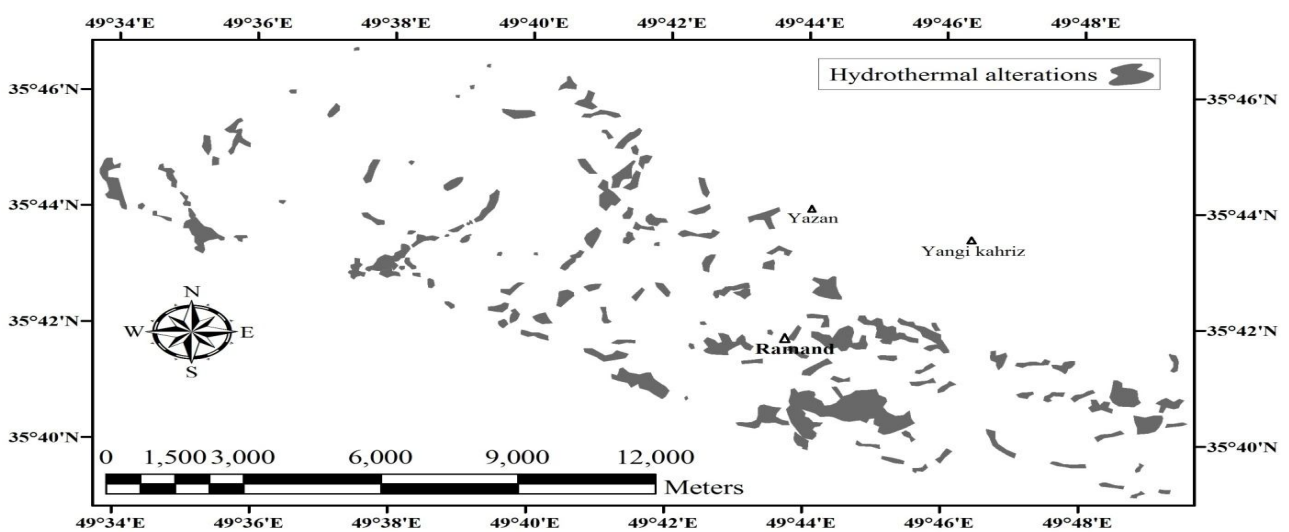
عوارض به‌عنوان لایه اصلی دگرسانی وارد مراحل مدل‌سازی به‌روش فازی شده‌اند.

منطقه رامند (در بررسی‌های دورسنجی) از روش برآزش مکانی نتایج کروس‌تا و نسبت باندهی M-ratio استفاده شده است تا نتایج هم‌پوشانی عوارض معتبر مطابق شکل ۵ ارائه شود. این



شکل ۴. اعمال روش نسبت‌گیری M-ratio در تصاویر ETM⁺ منطقه رامند (مناطق دگرسانی گرمایی در چهارگوشه مورد بررسی، آثار دگرسانی گرمایی به رنگ زرد تا نارنجی هستند)

Fig. 4. Applying M-ratio rationing technique in ETM⁺ Images of Ramand region (yellow to orange colors indicate hydrothermal alterations in the studied rectangle area)



شکل ۵. نقشه مناطق دگرسانی گرمایی در منطقه رامند (این نقشه از هم‌پوشانی دو روش کروس‌تا و M-ratio به‌دست آمده است)

Fig. 5. Hydrothermal alteration areas map in Ramand region (This map is obtained of overlapping the Crosta and M-ratio methods)

موجود در نقشه‌های زمین‌شناسی لحاظ شده‌اند.

لایه خطواره‌های حاصل از داده‌های ماهواره‌ای

معمولاً تشخیص خطواره‌های گسلی در تصاویر ماهواره‌ای دشوارتر از نقشه‌های زمین‌شناسی است. نوفه‌های الکترومغناطیسی و پوشش گیاهی برخی از مناطق اکتشافی مانع از شناسایی خطواره‌ها با روش‌های دورسنجی می‌شوند (Abbasi and Yassaghi, 2011). در این پژوهش با اعمال فیلتر کیفی IHS در نمایه ترکیبی ۳۲۱، امکان تشخیص خطواره‌های گسلی مطابق شکل ۸ فراهم شده است.

در بحث خطواره‌های دورسنجی، نظیر آنچه که درباره گسل‌های زمین‌شناسی گفته شد، الگوی توزیع پدیده‌های ساختمانی به دو گروه اصلی و فرعی تقسیم شده و ملاک تقسیم‌بندی و وزن‌دهی آنها بر اساس رابطه مکانی خطواره‌ها با آثار دگرسانی منطقه رامند است؛ به طوری که به نوع اصلی وزن بیشتری داده شده است، زیرا رابطه نزدیک‌تری با پدیده دگرسانی گرمابی دارند و احتمال کانی‌زایی در این مناطق بیشتر است (و برعکس). شعاع تأثیر خطواره‌های دورسنجی مطابق شکل ۹ اعمال شده است. در این شکل، شعاع تأثیر پدیده‌های ساختمانی، به تناسب شعاع هاله‌های دگرسانی و کانه‌زایی منطقه لحاظ شده و به صورت فایل شبکه، آماده تلفیق با سایر معیارهای اکتشافی شده است.

لایه خطواره‌های گسلی استخراج‌شده از داده‌های

مغناطیس هوابرد

سنجش‌های مغناطیس هوابرد روشی مطمئن و شناخته شده‌ای برای تشخیص خطواره‌های گسلی هستند (Telford et al., 2009). برتری پربندهای مغناطیسی نسبت به سایر شواهد زمین‌ساختی، امکان تشخیص خطواره‌های پنهانی است که اغلب آنها در زیر رسوبات جوان کواترنری مدفون شده‌اند و تظاهرات سطحی ناچیزی دارند. در این پژوهش از نقشه مغناطیس هوابرد (تهیه شده در سال ۷۸-۷۹ در مقیاس ناحیه‌ای (۱:۵۰۰۰۰) توسط واحد ژئوفیزیک سازمان زمین‌شناسی، با فواصل برداشت ۷۵۰۰

در ادامه از شاخص تلاقی سامانه‌های گسلی و نقش آنها در پیدایش آثار دگرسانی گرمابی استفاده شده است که نتایج آن در شکل ۶ دیده می‌شود. در عمل دگرسانی‌هایی که در محل تلاقی یا در نزدیکی گسل‌ها دیده شده‌اند، نسبت به سایر دگرسانی‌ها امتیاز بیشتری کسب کرده و احتمال کانه‌زایی در این مناطق بیشتر است. لذا از این مناطق به عنوان رخنمون‌های اصلی دگرسانی یاد شده و شعاع تأثیر آنها (بافر زون) برای مدل‌سازی و تولید نقشه پیش‌دآوری محاسبه شده است.

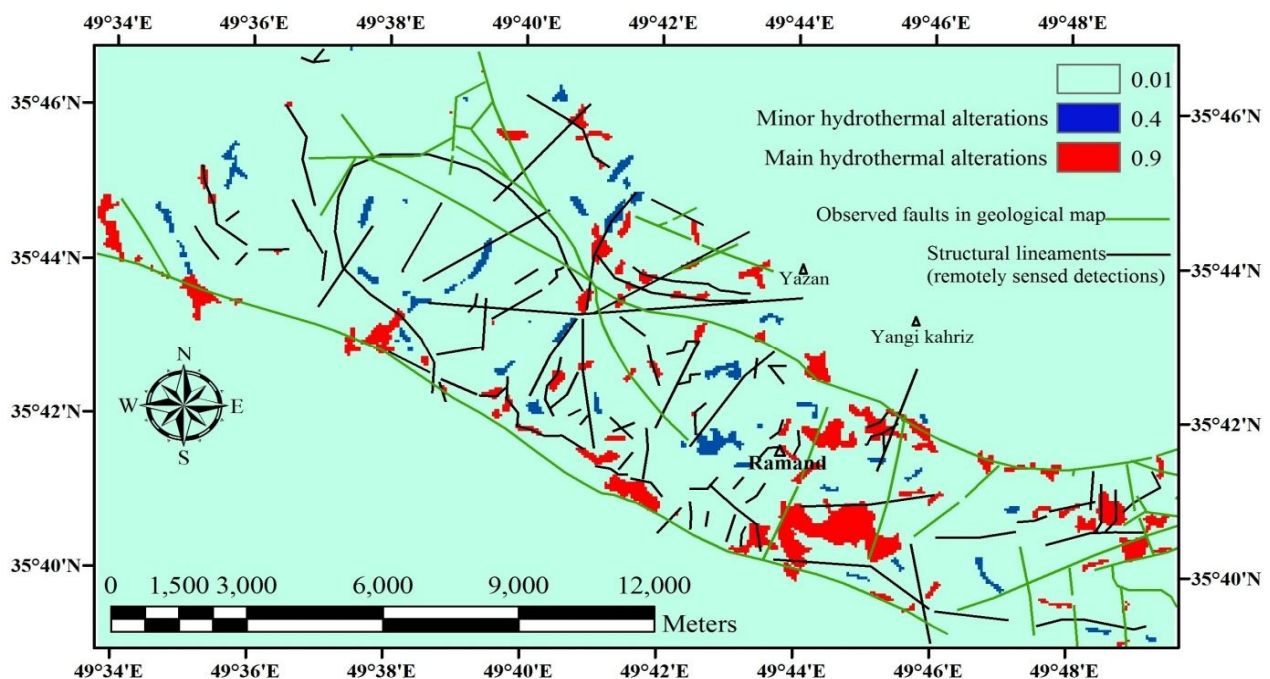
لایه اطلاعاتی گسل‌های مشاهده شده در نقشه زمین‌شناسی منطقه رامند

ساختمان‌های گسلی از عوامل کنترل‌کننده کانی‌سازی در محیط‌های پسامگمایی هستند که اغلب زمینه حرکت و توسعه سیالات گرمابی را در امتداد محور اصلی گسل یا محل تلاقی آنها (نواحی خردشده) فراهم می‌کنند (Karimpour et al., 2012). بخشی از الگوی زمین‌ساختی منطقه رامند بر اساس شواهد گسل‌های موجود در نقشه زمین‌شناسی استخراج (Eghlimi et al., 1999) و در محیط GIS به صورت فایل‌های برداری ذخیره شده است. گسل‌های زمین‌شناسی از اعتبار وزنی بالایی برخوردارند و اساس وزن‌دهی آنها بر اساس رابطه مکانی‌شان با رخنمون‌های دگرسانی منطقه است. بدین ترتیب ساختمانی‌های گسلی به دو زیر گروه اصلی و فرعی تقسیم شده‌اند که به نوع اصلی وزن بیشتری داده شده است؛ چون که رابطه نزدیک‌تری با پدیده دگرسانی گرمابی دارند و احتمال کانی‌زایی در این مناطق بیشتر است (و برعکس). علاوه بر هاله‌های دگرسانی، از وسعت آثار کانه‌زایی برای ایجاد و افزایش شعاع اثر ساختمانی‌های گسلی استفاده شده است. فواصل شعاع تأثیر گسل‌ها ۱۰۰ متر انتخاب شده‌اند و در اطراف ساختمانی‌های اصلی سه لایه ۱۰۰ متری (مجموعاً ۳۰۰ متر) توسعه یافته است تا در نقشه نهایی (پیش‌دآوری فازی)، نقش پدیده‌های ساختمانی در شکل‌گیری دگرسانی‌ها و آثار کانه‌زایی رامند متمایز باشد. شکل ۷، الگوی گسلی توسعه‌یافته در منطقه مورد بررسی است که آثار ساختمانی آن بر اساس شواهد

گسلش در نظر گرفته می‌شوند. در مقابل خطواره‌هایی هستند که با آثار گسل‌های زمین‌شناسی مطابقت نداشته‌اند و به‌عنوان عوارض ساختمانی پنهان (با ضریب اطمینان کمتر) ثبت می‌شوند.

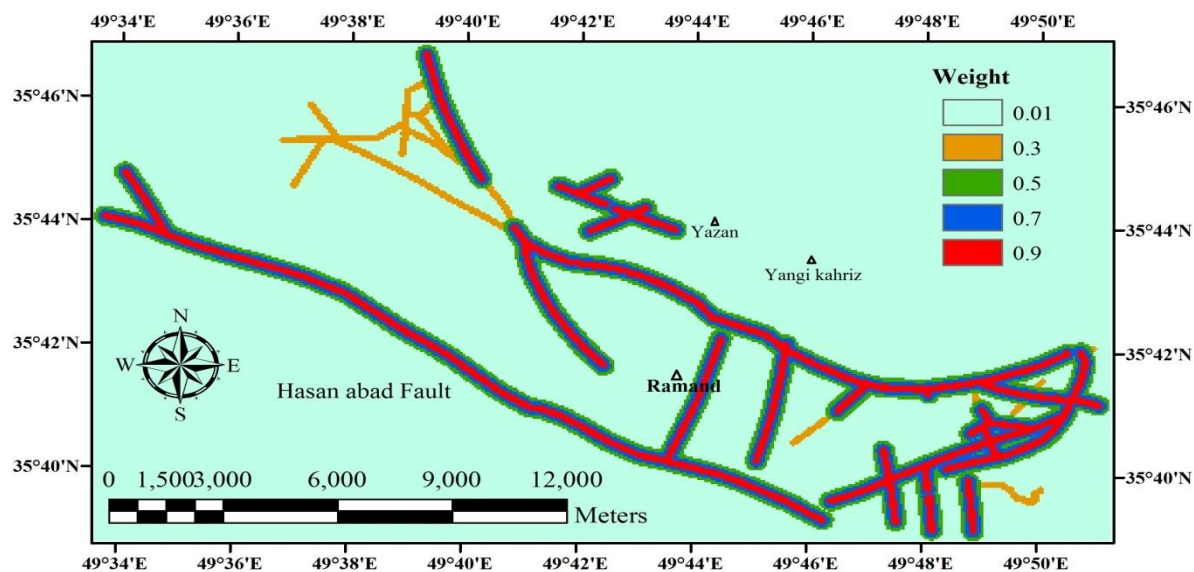
در این لایه نیز با در نظر گرفتن رابطه مکانی خطواره‌ها با گسل‌های زمین‌شناسی و ارتباطشان با آثار دگرسانی منطقه رامند، خطواره‌ها به دو بخش اصلی و فرعی تقسیم شده‌اند و وزن‌دهی متفاوتی (با توجه به دو عامل اشاره‌شده در بالا) بر روی آنها اعمال شده است. شعاع اثر خطواره‌های اصلی (قرمز) ۱۰۰ متر و شعاع اثر انواع فرعی (آبی) (خطواره پنهان) ۵۰ متر است. پس از وزن‌دهی خطواره‌های مغناطیسی، نقشه نشانگر اطلاعات مغناطیس هوابرد با در نظر گرفتن تنوع ساختمان‌های گسلی (اصلی و فرعی) به تفکیک شعاع اثر اعمال‌شده در مدل تلفیقی، مطابق شکل ۱۱ ارائه شده است.

متر و با فواصل ترمیم برداشت ۵۰۰ متر) برای تشخیص خطواره‌های گسلی آشکار و پنهان منطقه رامند استفاده شده است. عملیات درون‌یابی داده‌های جدول با استفاده از الگوریتم‌های زمین ریاضی و تحت سامانه تحلیلی مکانی GIS انجام شده است. شکل ۱۰ نتایج درون‌یابی داده‌های مغناطیسی و خطواره‌های گسلی آن را نشان داده است. برخی از معیارهای استفاده‌شده در تشخیص خطواره‌های مغناطیسی عبارتند از: پیدایش گرادیان‌های سطحی ناشی از تغییرات پربندی در مکان‌های هندسی مشخص، شکل‌گیری فابریک‌های خطی در امتداد گرادیان‌های سطحی و مشاهده قطب مغناطیسی در طرفین پربندهای متراکم (Fadavi and Mehrnia, 2015). بر اساس ملاحظات تجربی، اغلب خطواره‌ها دارای شکل‌های منقطع هستند و به‌صورت زوج‌های موازی با هم یافت می‌شوند (شعاع اثر دارند). خطواره‌هایی که با مکان هندسی گسل‌های زمین‌شناسی مطابقت دارند، به‌عنوان نشانه ژئوفیزیکی مرتبط با



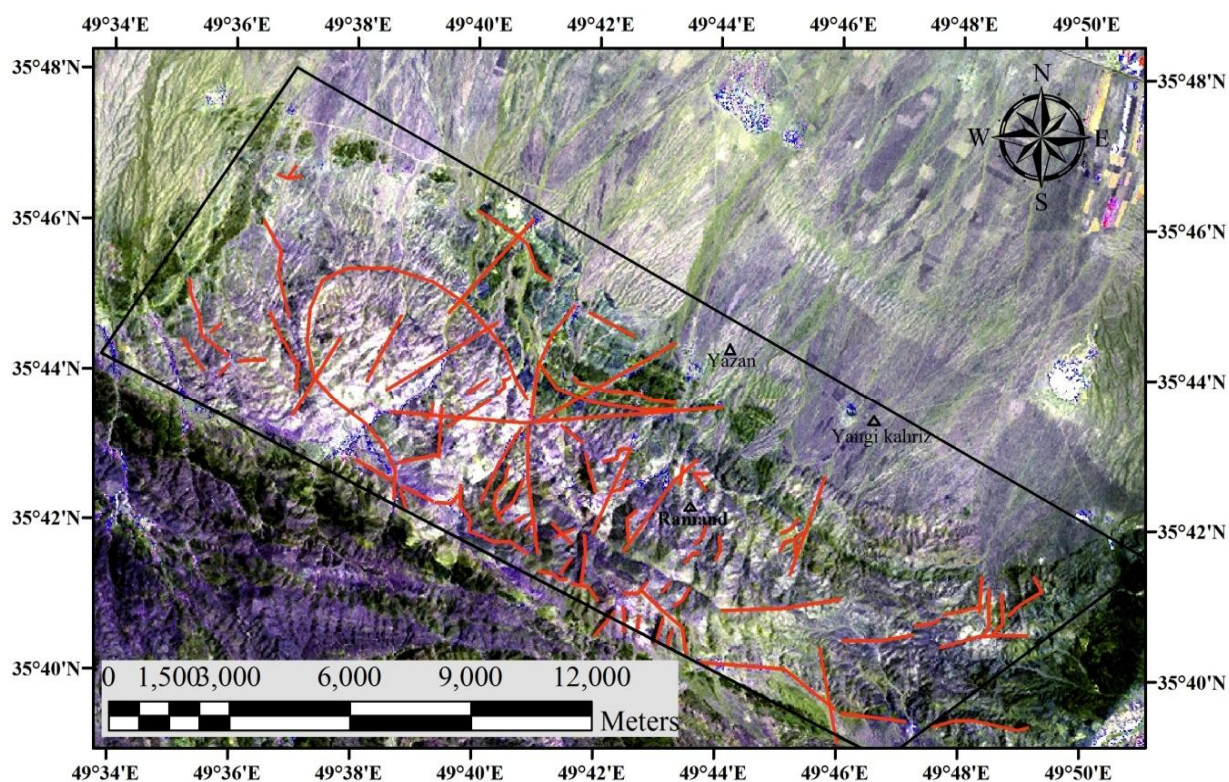
شکل ۶. نقشه نشانگر دگرسانی‌های گرمایی شناسایی‌شده در منطقه رامند (رنگ قرمز= دگرسانی‌های گرمایی اصلی، رنگ آبی= دگرسانی‌های گرمایی فرعی، رنگ سبز= گسل‌های مشاهده‌شده در نقشه زمین‌شناسی، رنگ سیاه= خطواره‌های گسلی شناسایی‌شده از روش دورسنجی)

Fig. 6. Indicator map of detected hydrothermal alterations in Ramand region (red= main hydrothermal alterations, blue= minor hydrothermal alterations, green= observed faults in geological map, black= structural lineaments (remotely sensed detections))



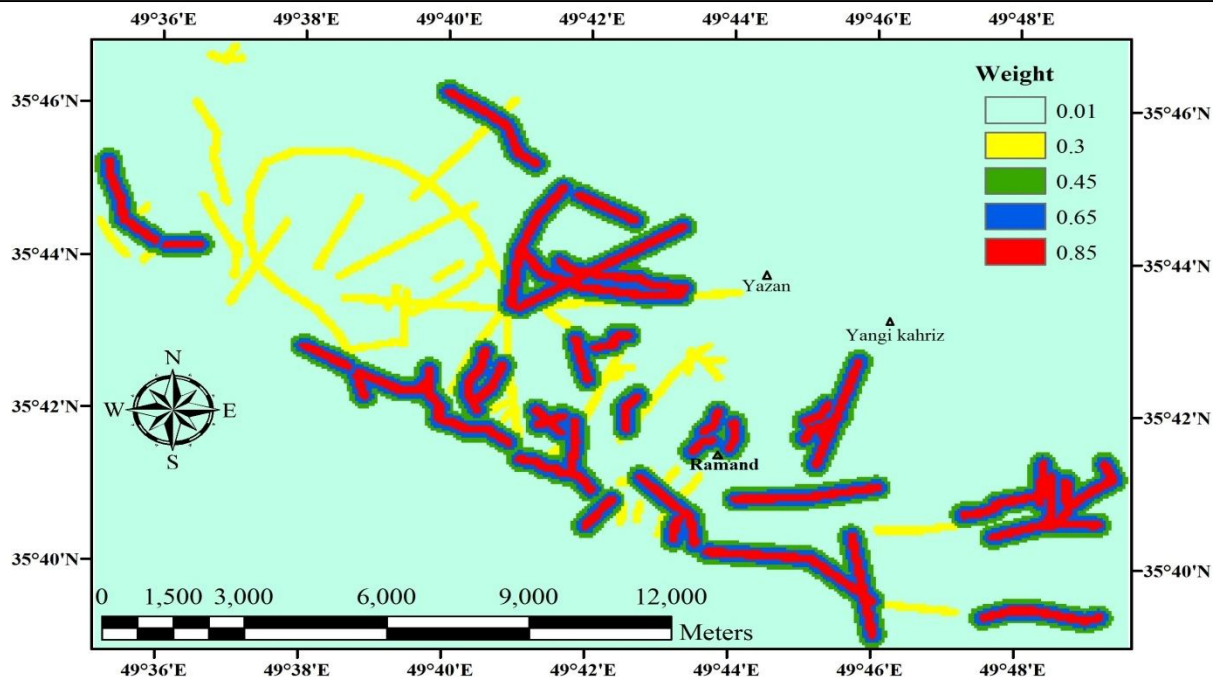
شکل ۷. نقشه نشانگر مربوط به لایه گسل‌های مشاهده‌شده در نقشه زمین‌شناسی منطقه رامند با توجه به ملاحظات زمین‌شناسی (محدوده شعاع اثر برای گسل‌های اصلی: رنگ قرمز = ۰-۱۰۰ متر، رنگ آبی = ۱۰۰-۲۰۰ متر، رنگ سبز = ۲۰۰-۳۰۰ متر و محدوده شعاع اثر برای گسل‌های فرعی: رنگ قهوه‌ای = ۰-۱۰۰ متر)

Fig. 7. Indicator map of observed faults layer in Ramand geological map, according to geological considerations (Buffer range for main faults: red= 0-100 (meter), blue= 100-200 (meter), green= 200-300 (meter) and buffer range for minor faults: brown= 0-100 (meter))



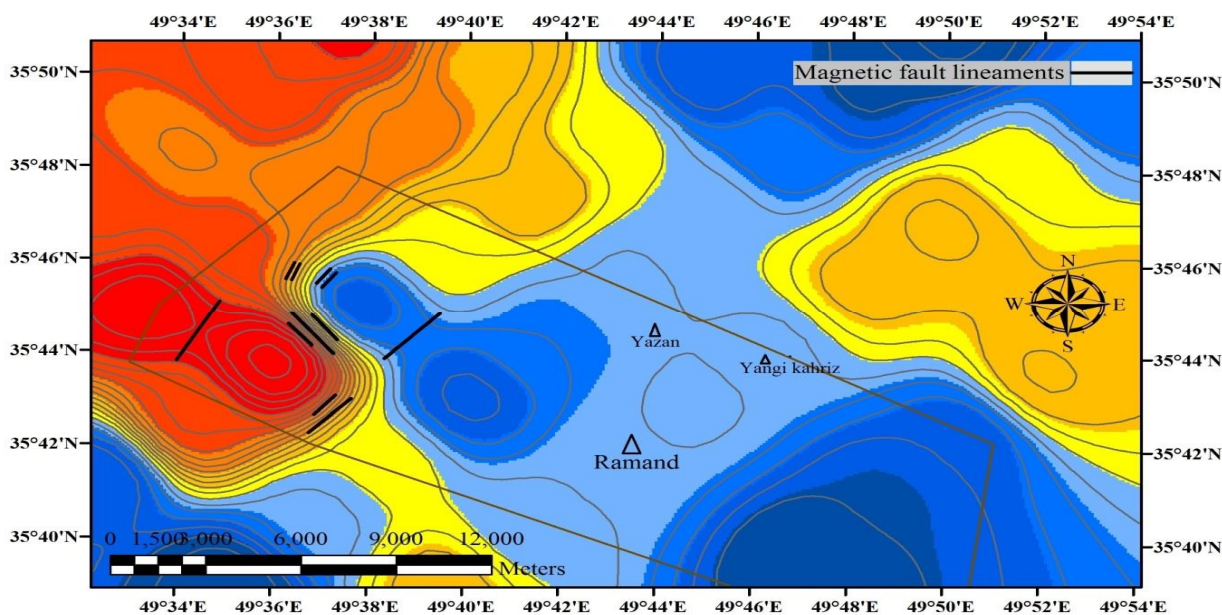
شکل ۸. تشخیص خطواره‌های گسلی (به رنگ قرمز) بر روی تصویر RGB=۳۲۱ تولیدشده از منطقه رامند با اعمال فیلتر IHS

Fig. 8. Detection of structural lineaments (red color) by applying an IHS filter on the RGB=321 image of Ramand region



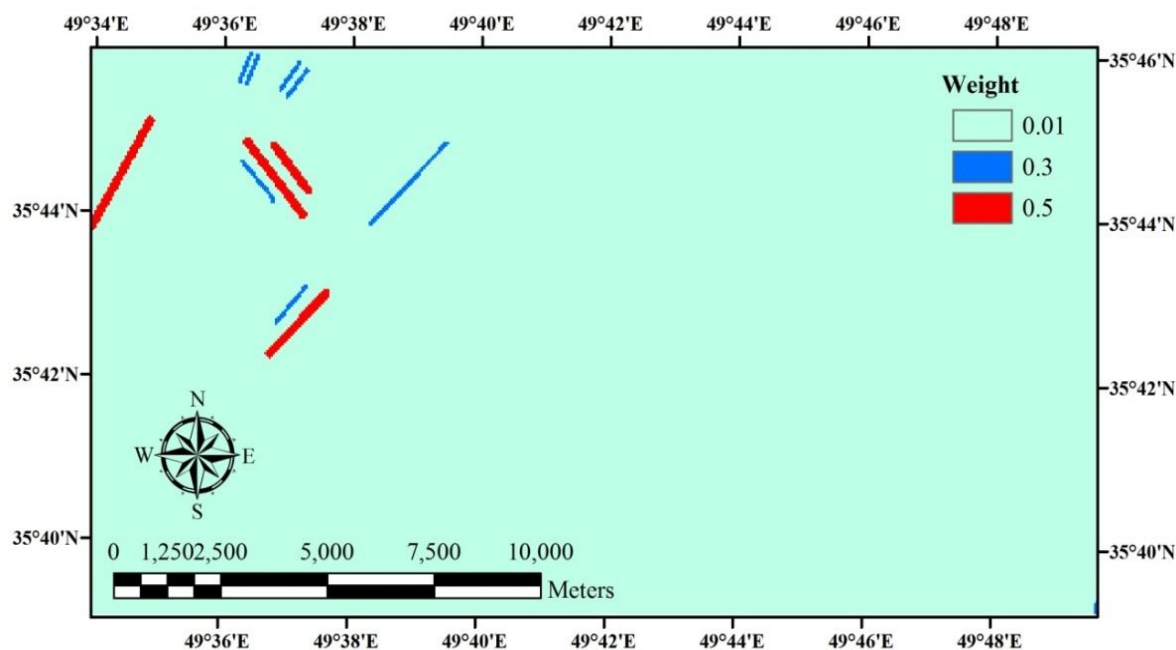
شکل ۹. نقشه نشانگر لایه خطواره‌های گسلی شناسایی شده به روش دورسنجی در منطقه رامند (محدوده شعاع اثر برای خطواره‌های گسلی اصلی: رنگ قرمز = ۰-۱۰۰ متر، رنگ آبی = ۱۰۰-۲۰۰ متر، رنگ سبز = ۲۰۰-۳۰۰ متر و محدوده شعاع اثر برای خطواره‌های گسلی فرعی: رنگ زرد = ۰-۱۰۰ متر)

Fig. 9. Indicator map of structural lineaments layer (remotely sensed detections) in Ramand region (Buffer range for main structural lineaments: red= 0-100 (meter), blue= 100-200 (meter), green= 200-300 (meter) and buffer range for minor structural lineaments: yellow= 0-100 (meter))



شکل ۱۰. خطواره‌های گسلی - مغناطیسی شناسایی شده (خطوط ممتد سیاه رنگ) در محدوده اکتشافی رامند با معیارهای مدنظر بر روی داده‌های مغناطیس هوایرد (راهنمای شکل ۱۰ در جدول ۵ آمده است)

Fig. 10. Magnetic fault lineaments (The black solid lines), detected within Ramand exploration region with considered measures on aeromagnetic data (Fig.10 guide is expressed in Table 5)



شکل ۱۱. لایه نشانگر خطواره‌های استخراج‌شده از داده‌های مغناطیس هوایی منطقه رامند (محدوده شعاع اثر برای خطواره‌های اصلی: رنگ قرمز = ۱۰۰-۰ متر و محدوده شعاع اثر برای خطواره‌های فرعی: رنگ آبی = ۵۰-۰ متر)

Fig. 11. Indicator layer of structural lineaments, detected from Ramand aeromagnetic databases (Buffer range for main lineaments: red= 0-100 (meter) and buffer range for minor lineaments: blue= 0-50 (meter))

مغناطیسی منطقه رامند آمده است. چنان‌که دیده می‌شود، بیشینه وزن‌دهی فازی مربوط به تغییرات آستانه‌ای بوده و مبتنی بر افت خودپذیری مغناطیسی در نواحی دگرسانی است. شکل ۱۲ بیانگر تغییرات مغناطیس هوابرد وزن‌دهی شده (در ۹ رده) به‌روش فازی است که به‌عنوان نشانگر دگرسانی متأثر از افت خودپذیری آماده تلفیق با سایر معیارهای اکتشافی است.

تلفیق لایه‌های اطلاعاتی و تولید نقشه پتانسیل مطلوب معدنی در منطقه رامند

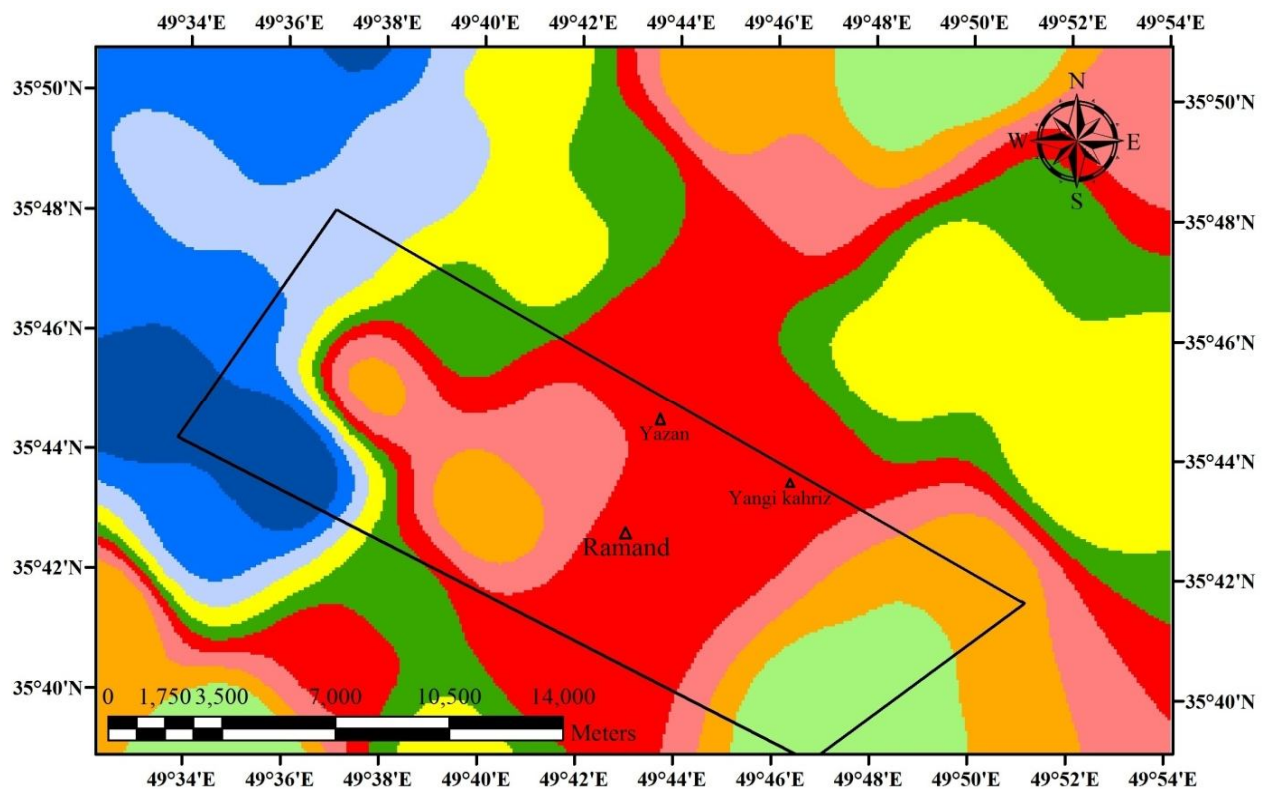
پس از وزن‌دهی لایه‌های نشانگر، کلیه داده‌های مکانی با عملگر منطقی گاما ($\gamma = 0.75$) تلفیق شده‌اند. این عملگر از دو معیار ضرب و جمع جبری متغیرها برای تلفیق اطلاعات استفاده می‌کند (Bonham Carter, 1998). بنابراین، تعیین مقدار گاما به‌صورتی انجام می‌شود که نتایج تلفیق فازی مبالغه‌آمیز نباشند. در واقع انتخاب مقدار گامای نزدیک به ۱ باعث می‌شود که عرصه‌ای وسیع به‌عنوان مکان‌های مناسب انتخاب شود که

لایه تغییرات شدت میدان مغناطیسی (هوابرد)

از دیدگاه مغناطیسی، اغلب پدیده‌های دگرسانی با افت قابل توجه خودپذیری مغناطیسی سنگ میزبان همراه هستند. سازوکار چنین تغییراتی در ارتباط با گرمای ناشی از سامانه‌های ماگمایی-گرمایی و خردشدگی مناطق دگرسانی در خلال شکل‌گیری گسل‌هاست. به عبارت دیگر، نفوذ سیالات داغ و وفور نواحی خردشده، دو عامل اصلی برای کاهش خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها هستند که در اغلب موارد موجب افت مؤلفه کلی شدت میدان مغناطیسی می‌شوند (Norouzi and Mehrnia, 1998). با توجه موارد یادشده، نقشه پربند مغناطیسی منطقه رامند از سه ناحیه‌بندی کمی با عناوین زمینه‌ای، آستانه‌ای و بی‌هنجاری برخوردار است. مکان هندسی اغلب دگرسانی‌ها با تغییرات آستانه‌ای شدت میدان مغناطیسی مطابقت دارد (Telford et al., 2009). البته بخشی از هاله‌های رسی که خواص مغناطیسی بارزی ندارند، در محدوده زمینه قرار می‌گیرند. در جدول ۵، امتیازات متناسب با تغییرات شدت میدان

مقیاس‌های مقدماتی و نیمه تفصیلی) استفاده کرد (Bonham, 1998). در شکل ۱۳ نقشه توانایی‌های معدنی منطقه رامند با استفاده از منطق فازی ارائه شده است. این نقشه حاصل تلفیق لایه‌های نشانگر با عملگر گامای ۰/۷۵ است. از دیدگاه آماری، پیش‌داوری به‌عمل آمده در شکل ۱۳ موجب معرفی مناطق امیدبخش در فاصله اطمینان بزرگ‌تر از ۶۸ درصد شده است که در مقایسه با سایر عملگرهای فازی (ضرب و جمع لایه‌های نشانگر)، تطابق مکانی مطلوبی با پدیده زمین‌شناسی و آثار دگرسانی رامند دارد. در واقع مناطق پتانسیل‌دار به‌صورت عمده در واحد سنگ میزبان (سنگ‌های آذرین ریوداسیتی و ریولیتی، توف ریوداسیتی، توف بلورین و گدازه‌های جریانی ریوداسیتی) و بر روی مناطق دگرسانی گرمایی اصلی قرار گرفته‌اند که در نتیجه این موارد، احتمال کانه‌زایی در این مناطق بسیار است.

همانند عملگر جمع جبری دقت خیلی کمی در مکان‌یابی دارد (فاصله اطمینان کمتر از ۵۰ درصد). در مقابل انتخاب گامای نزدیک به صفر باعث می‌شود که شرایط مشابه عملگر ضربی به‌وجود آید و حساسیت بالایی در مکان‌یابی توانایی‌های معدنی یک منطقه اعمال شود (فاصله اطمینان بزرگ‌تر از ۹۵ درصد) که این حساسیت بالا، دلیل بر مناسب بودن مدل برای مکان‌یابی نیست؛ زیرا که ممکن است عرصه‌های مناسب دیگری هم وجود داشته باشد که به دلیل حساسیت بالای این مدل جزو مناطق مناسب قرار نگیرند. به بیانی دیگر با افزایش گاما (بزرگ‌تر از ۰/۵)، فاصله اطمینان تخمین‌های به‌عمل آمده کاهش یافته است و مناطق امیدبخش بیشتری معرفی می‌شوند (خطای اریبی افزایش می‌یابد). در حالی که با کاهش این کمیت (کوچک‌تر از ۰/۵)، فاصله اطمینان تخمین‌ها بیشتر شده و مناطق امیدبخش محدود می‌شوند (خطای اریبی کاهش می‌یابد). در عمل باید از مقادیر گامای ۰/۵ تا ۰/۸ برای تولید نقشه‌های پیش‌داوری (در





















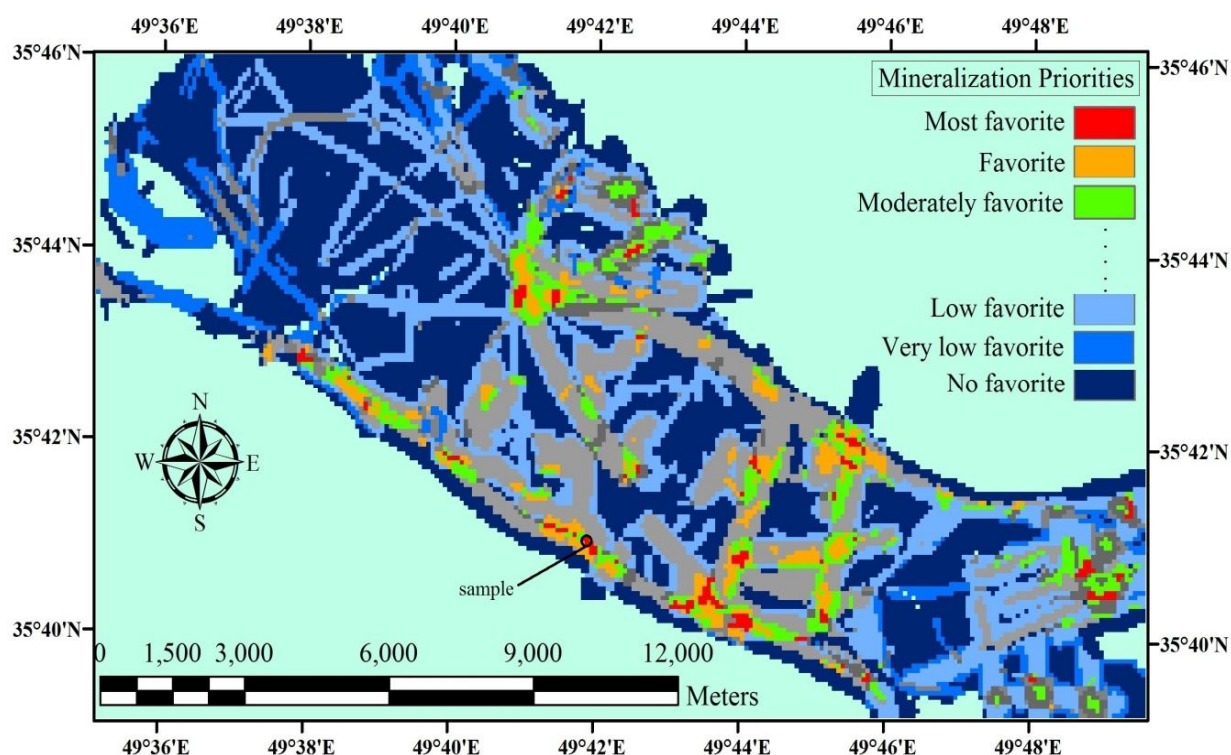
شکل ۱۲. لایه نشانگر افت میدان مغناطیسی در مناطق دگرسانی رامند (راهنمای این شکل در جدول ۵)

Fig. 12. Indicator layer of magnetic field depletion in Ramand alteration zones (This figure guide in Table 5)

جدول ۵. وزن‌دهی فازی به مقادیر شدت میدان مغناطیسی در ۹ رده متفاوت بر اساس وجود آثار دگرسانی گرمابی در منطقه رامند

Table 5. Fuzzy weighting to magnetic intensity values in 9 different classes based on the evidence of hydrothermal alteration in Ramand region

Fig 10	Magnetic intensity (n.t)	Weight	After fuzzification(Fig 12)
	39638.11328-39662.125	0.6	
	39662.12551-39677.88281	0.7	
	39677.88282-39693.35156	0.85	
	39693.35157-39708.875	0.9	
	39708.87501-39726.88281	0.5	
	39726.88282-39755.26172	0.4	
	39775.26173-39787.03125	0.3	
	39787.03126-39819.69141	0.2	
	39819.69142-39862.39063	0.1	

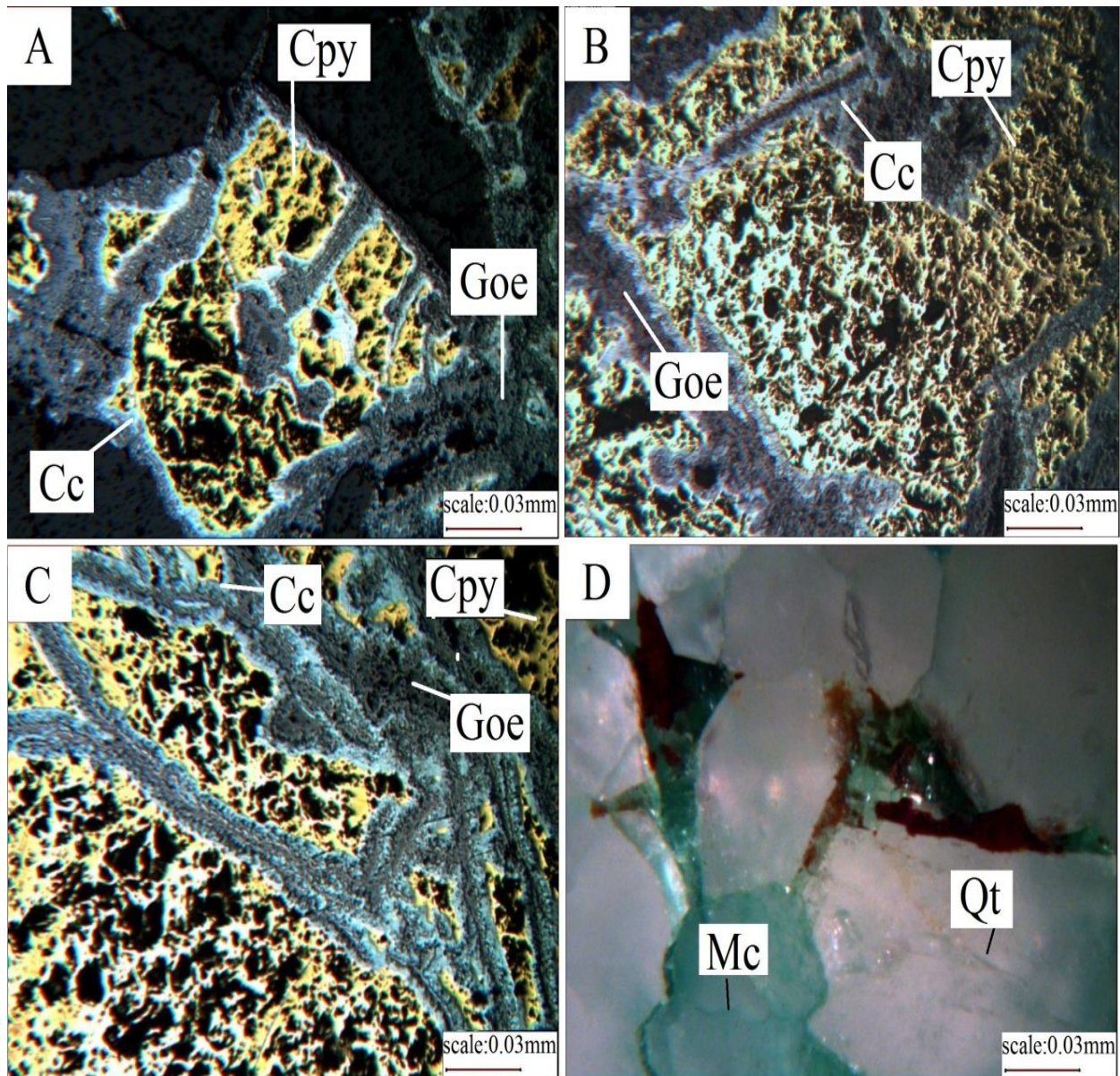


شکل ۱۳. نقشه پتانسیل مطلوب مبتنی بر منطق فازی از پتانسیل‌های کانه‌زایی نوع گرمابی در منطقه رامند (اولویت‌های کانه‌زایی: رنگ قرمز = بسیار مطلوب، رنگ نارنجی = مطلوب، رنگ سبز = مطلوبیت در حد متوسط، آبی کم رنگ = مطلوبیت کم، رنگ آبی = مطلوبیت بسیار کم، رنگ آبی تیره = بدون مطلوبیت)

Fig. 13. Fuzzy- based prognostic map of hydrothermal mineralization potentials in Ramand region (Mineralization priorities: red: most favorite, orange: favorite, green: moderately favorite, light blue: low favorite, blue: very low favorite, dark blue: no favorite)

سازوکار دگرسانی با پیدایش کانی‌های رسی و سیلیسی شدن سنگ میزبان (در امتداد رگه‌ها و رگه‌چه‌ها) همراه بوده است و احتمال غنی‌شدگی درون‌زاد در خلال فرآیندهای پساماگمایی وجود دارد.

شکل ۱۴- A, B, C و D، مقاطع میکروسکوپی یک نمونه کانه‌دار از مجموعه نمونه‌های دگرسان‌شده در منطقه رامند را نشان می‌دهد. آثار فلزات پایه (هم‌یافتی گوتیت، کالکوسیت و کالکوپیریت) در رخنمون‌های دگرسانی این منطقه مشهود است.



شکل ۱۴. مقاطع میکروسکوپی آثار کانه‌زایی فلزات پایه (مس و آهن) در رخنمون‌های دگرسان‌شده منطقه رامند، A، B و C: نیکول موازی، میدان دید ۰/۰۳ میلی‌متر، بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر و D: نیکول عمودی، میدان دید ۰/۰۳ میلی‌متر، بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر. (Cpy: کالکوپیریت، Cc: کالکوسیت، Goe: گوتیت، Qt: کوارتز، Mc: ملاکیت). علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010)

Fig. 14. Microscopic traces of ore mineralization (Fe and Cu) in Ramand altered occurrences, A, B and C: parallel nicols, field of view= 0.03 mm, 200X, D: vertical nicols, field of view= 0.03 mm, 200X. (Cpy: Chalcopyrite, Cc: Chalcocite, Goe: Goethite, Qt: Quartz, Mc: Malachite) Abbreviations after Whitney and Evans (2010)

لایه‌های نشانگر (بر اساس اصول منطقی و محاسبات زمین ریاضی) داشته باشد و بتواند این اطلاعات را در کمترین زمان و با بیشترین دقت مدیریت کند. در این پژوهش با استفاده از منطق فازی و با تأکید بر وزن‌دهی نشانگرهای ژئوفیزیکی، زمین‌شناسی و زمین‌ساختی و نیز بدون نیاز به ساده‌سازی آنها و در کمترین زمان، امکان تلفیق داده‌ها تحت عملگر منطقی گاما فراهم شده است. برتری مهم این روش را می‌توان در مقید نبودن آن به استفاده از نقشه‌های دوتایی (صفر و یک) دانست. امتیاز یادشده این فرصت را برای روش منطق فازی فراهم می‌آورد تا بتواند خود را با ماهیت طبیعی چند رده‌ای بودن داده‌های مکانی سازگار کند. به بیان دیگر برتری مهم این روش، سازگاری آن با شرایط طبیعی (ملاحظات زمین‌شناختی) منطقه مورد بررسی است که بر خلاف الگوریتم تابع بولین (صفر و یک)، فاصله اطمینان بیشتری را برای دستیابی به توانایی‌های معدنی یک منطقه به دست می‌دهد. در واقع، برد اعداد حقیقی بین صفر تا یک، انعطاف‌پذیری منطق فازی را افزایش داده و موجب سازگاری آن با معیارهای زمین‌شناسی و معدنی شده است. بدین ترتیب از وزن‌ها و امتیازات لازم برای طبقه‌بندی داده‌های مکانی و ثبت اولویت‌های اکتشافی منطقه موردنظر استفاده شد و با تلفیق داده‌ها توسط مدل منطق فازی، نقشه پتانسیل مطلوب ذخایر منطقه را به دست آمد که نتیجه آن در شکل ۱۳ دیده می‌شود. تولید نقشه پیش‌داوری منطقه را به دلیل استفاده از منطق فازی، موجب شناسایی توانایی‌های معدنی به صورت دقیق و جزئی در این منطقه شده و نمونه‌برداری از واحدهای دگرسانی گرمابی را تسهیل کرده است (به‌طور خاص سه اولویت اول مشخص شده در شکل ۱۳ برای انجام بررسی‌های بعدی معرفی شده‌اند) که این قضیه در انجام عملیات اکتشافی کمک بهتری می‌کند و در کاهش هزینه‌های مالی و زمانی بسیار مؤثر است. در نتیجه، استفاده از روش تلفیق فازی در محیط GIS در تسریع و دقت تصمیم‌گیری به کارشناس یاری می‌رساند.

نمونه کانه‌دار شکل ۱۴ از منطقه مستعدی واقع در مختصات طولی "۴۵'۴۱'۴۹° و عرض جغرافیایی "۱۰'۴۱'۳۹° به دست آمده که بر اساس نتایج این پژوهش و به‌روش مدل‌سازی فازی شناسایی شده است. در واحدهای دگرسانی جنوب رامند (شکل ۱۳)، مناطق مستعدی شناسایی شده‌اند که با توجه به نتایج اولیه بازدیدهای صحرایی بیانگر وجود رگه‌های سیلیسی - کانه‌دار در زمینه‌ای از کانی‌های رسی، اکسیدهای آهن و کوارتز هستند. بر اساس روش ارائه شده در این پژوهش، آثار جدیدی از دگرسانی گرمابی در بخش‌های جنوبی، جنوب‌غربی و شرق رامند شناسایی شدند که با در نظر گرفتن شواهد میکروسکوپی (شکل ۱۴)، اطمینان لازم را برای توجیه اقدامات به عمل آمده و ادامه فعالیت‌های اکتشافی در فاز تفصیلی به وجود می‌آورد. حفر ترانسه‌های اکتشافی (با تأکید بر اولویت‌های شکل ۱۳) و برداشت سطحی مؤلفه‌های ژئوفیزیکی (با تأکید بر تهیه مقاطع ژئوالکتریک)، امکان ارزیابی دقیق‌تر را در نواحی پیش‌بینی شده فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

یکی از مراحل مهم اکتشافات معدنی، تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی برای تولید نقشه پیش‌داوری و تصمیم‌گیری در خصوص نحوه ادامه فعالیت‌های موردنظر است. با افزایش تعداد و تنوع داده‌های مکانی، روش‌های محاسباتی جایگزین مفاهیم سنتی شده است و توجه فرآیند کانه‌زایی پس از دستیابی به الگوهای اکتشافی معتبر امکان‌پذیر می‌شود.

. دقت و درستی داده‌های مکانی، موجب تولید مدل‌های زمین ریاضی معتبر می‌شود که با ثبت ملاحظات زمین‌شناسی، فاصله اطمینان لازم برای ارائه نقشه‌های پیش‌داوری تأمین می‌شود. داده‌های مکانی را شامل مجموعه پراکنده‌ای از یافته‌های زمین‌شناسی، دورسنجی و ژئوفیزیکی است که استفاده از هر کدام به صورت جداگانه، تصمیم‌گیری برای تعیین نقاط پر پتانسیل و ادامه فعالیت‌های اکتشافی را دشوار می‌کند. بنابراین باید از روشی استفاده شود که توانایی لازم را برای تلفیق

References

- Abbasi, S. and Yassaghi, A., 2011. Using landsat images and magnetic field data in identifying fault lineaments and analysis of their origin in the Lorestan Province, Zagros Folded Belt. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 3(1):19–33. (in Persian)
- An, P., Moon, W.M. and Rencz, A., 1991. Application of fuzzy set theory for integration of geological, geophysical and remote sensing data. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27(1): 1–11.
- Bonham Carter, G.F., 1998. *Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS*. Pergamon Press, Oxford, 398 pp.
- Crosta, A.P. and Moore, J., 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil; A Prospecting Case History in Greenstone Belt Terrain. *Proceedings of the 7th International Conference Applied Geologic Remote Sensing*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, USA.
- Eghlimi, B., Mosavvari, F. and Mehrpartou, M., 1999. Geological map of Danesfehan (Khyarj), scale 1:100,000. Geological Survey of Iran. (in Persian)
- Ezzati, A., Mehrnia, R. and Ajayebi, K. 2014. Detection of Hydrothermal Potential Zones Using Remote Sensing Satellite Data in Ramand Region, Qazvin Province, Iran. *Journal of Tethys*, 2(2): 93–100.
- Fadavi, P. and Mehrnia, S.R., 2015. The Use of Airborne Gravity and Magnetic Data bases for Recognizing of Hidden Seismogenic Faulted Systems in South of Tehran (Ivanky Region). 33rd National Geosciences Symposium, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
- Harris, J.R., Wilkinson, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M.A., Ager, 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. *Natural Resources Research*, 10(2):3–13.
- Hassani Pak, A.A., 2010. *Principles of Geochemical Exploration*. University of Tehran Press, Tehran, 615 pp. (in Persian)
- Hosseinali, F. and Alesheikh, A.A., 2008. Weighting Spatial Information in GIS for Copper Mining Exploration. *American Journal of Applied Sciences*, 5(9):1187–1198.
- Karimi, M., Menhaj, M.B. and Mesgari, M.S., 2008. Preparing mineral potential map using fuzzy logic in GIS environment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVII (B8): 1263–1270.
- Karimpour, M.H., Heidarian shahri, M.R. and Malekzadeh shafaroudi, A., 2012. Ore deposit exploration. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, 632 pp.
- Masoudi, F., 1989. Stratigraphy, petrography and petrology of volcanic rocks at south of Buin-Zahra. M.Sc. Thesis, University of Tarbiat Moallem, Tehran, Iran, 207pp. (in Persian with English abstract)
- Mehrnia, S.R., 2015. Introducing the band ratio of M-ratio and its application in the diagnosis of hydrothermal alterations (case study: Ramand region in the southern of Qazvin province). 19th Congress of Iran Geology and 9th Geology National Conference, Payam Noor University of Tehran, Tehran, Iran. (in Persian)
- Mukhopadhyay, B., Hazra, N., Kumar Das, S. and Sengupta, S.R., 2002. Mineral potential map by a knowledge driven GIS modeling: an example from Singhbhum Copper Belt, Jharkhad. *Proceedings of 5th annual international conference Map India*, Geological Survey of India, New Delhi, India.
- Norouzi, G.H. and Mehrnia, S.R. 1998. Magnetic Data Application for Sar-eyn Geothermal Exploration (Ardabil province). *Journal of Faculty of Engineering, University of Tehran*, 31(1):71–81. (in Persian)
- Novriadi, H.P.M. and Darijanto, T., 2006. Applying Fuzzy Logic Method in Mineral Potential Mapping for Epithermal Gold Mineralization in the Island of Flores, East Nosa Tenggara Using Geographical Information Systems (GIS). *Proceeding of 9th International Symposium on Mineral Exploration*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.
- Porwal, A., Carranza, E.J.M. and Hale, M., 2003. Knowledge-driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 12(1):

- 1-25.
- Sabins, F.F., 2002. Remote sensing principle and interpretation. William H. Freeman & Company, New York, 494 pp.
- San soleimani, A., Asadi Haroni, H., Tabatabaei, S.H. and Samari, H., 2011. Mineral potential mapping at 1:10000 scale geological map of Kahak using Fuzzy Logic method. 5th National Conference of Geology and Environment, Islamic Azad University, Eslamshahr, Iran. (in Persian with English abstract)
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A. (translated by Zomorrodian, H. and Hajeb-Hosseini, H.), 2009. Applied Geophysics. Vol.1, University of Tehran Press, Tehran, 689 pp. (in Persian)
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185-187.
- Wright, D.F. and Bonham Carter, G.F., 1996. VHMS favorability mapping with GIS-based integration models, Chisel-Andersen Lake area. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 426(1): 339-376.
- Ziaii, M., Pouyan, A. and Ziaei, M., 2009. A Computational Optimized Extended Model for Mineral Potential Mapping Based on Wofe Method. *American Journal of Applied Sciences*, 6(2): 200-203.



Application of fuzzy modeling to identify the hydrothermal alterations in the Ramand region of Qazvin

Saeed Abbaszadeh¹, Bijan Maleki¹, Seyed Reza Mehrnia^{2*} and Saeedeh Senemari¹

1) Department of Mining, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2) Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Submitted: May 17, 2016

Accepted: Dec. 21, 2016

Keywords: *Hydrothermal Alteration, Fuzzy logic, Ramand*

Introduction

Complete recognition of exploration criteria is considered as an important step in the systematic and scientific analysis of mineral potential mapping. The starting point of this analysis is recognition of the mineral potentials and the mechanism of their formation in different geological areas. In order to achieve such goals we can benefit from the known mineralization information. Integrating and analyzing all the data in the geographic information systems (GIS) can lead to the identification of promising mineral areas for future studies (San Soleimani et al., 2011). GIS can be used to organize, process, analyze and integrate the results of geological, geochemical and geophysical, tectonic and alteration studies in order to identify and evaluate the potential of different minerals (Bonham Carter, 1998). The aim of this paper is to apply the fuzzy integration method in GIS with using all the information, without the need to simplify them, in less time and with acceptable accuracy in order to recognize mineral potentials in the Ramand region. Investigation of mineral potentials in this area with using fuzzy logic in addition to the scientific-research aspects, can provide the discovery of appropriate patterns for other mineral resources in Iran.

Materials and method

The first step in any exploration project is that mapping is done with the aim of optimal potential to provide a model for the exploration of possible

deposits in the region. This process in next steps will be continued with an extraction of useful information from various data that are contained in the database and this done work is done based on the properties of the elements under prospecting and the relevant exploration models. However, in the final stage, the combination of these maps is based on different models (Bonham Carter, 1998). The pre-requisite for the production of the mineral potential map, is to determine the weight and value which reflects the relative importance of the data classification (Hosseinali and Alesheikh, 2008). According to the study's default that is modeling with using fuzzy logic, a range of values between zero and one can be used to express the degree or the value of a collection (Novriadi and Darijanto, 2006) This is such that zero means lack of full membership and value of one is meant to be a full member of the collection. So, other set members can also be allocated values between zero and one and based on the degree of their membership to the set. So, it can be said that in the mining exploration, membership values are used to indicate the relative importance of each map as well as the relative importance of each class of a single map (Bonham Carter, 1998). Exploratory layers produced in GIS (in the fuzzy theory section), appear in the role of fuzzy sets and are combined by fuzzy operators (Table 1). The combining layers in the fuzzy method express the concept from the optimal options.

Discussion

In this study, some of the geo-referenced data

*Corresponding authors Email: r_mehrniya@pnu.ac.ir

consisting of geological data, remote sensing, tectonic and geophysical data have been used. Geological data for separate lithological units in the region and the identification of faults, remote sensing data to identify hydrothermal alterations and fault lineaments and airborne geophysical data in order to detect magnetic fault lineaments and check the changes of magnetic susceptibility related to hydrothermal alterations are used so that after collecting and entering data, processing the necessary studies has been carried out on them. Finally, by combining the results of each layer and giving the fuzzy weighting to them based on their importance in mineralization and the use of the fuzzy algorithm and gamma (the fuzzy operator) in GIS, the final map is obtained to identify the potential areas with using it in the Ramand region. The possibility to acquire the exploration pattern of base and precious metals is provided in the mineral-prone areas.

Results

In this study, there was a lot of exploration of information such that the decision to determine the potential points and continuing the exploration activities had been made very difficult. Thus, with use of the fuzzy integration method in GIS, all of the information were managed without any need to simplify them, in less time and with acceptable accuracy. Fuzzy logic is a method based on expert knowledge that is used for integration of exploration data and producing the optimal potential map of the Ramand regional reserves. It

points to promising and priority areas for accurate and detailed information. Therefore, it is better to carry out exploration operations and reduces the cost and time as well as expedition to decision-making. And accuracy is very effective.

References

- Bonham Carter, G.F., 1998. Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS. Pergamon Press, Oxford, 398 pp.
- Hosseinali, F. and Alesheikh, A.A., 2008. Weighting Spatial Information in GIS for Copper Mining Exploration. *American Journal of Applied Sciences*, 5(9):1187–1198.
- Novriadi, H.P.M. and Darijanto, T., 2006. Applying Fuzzy Logic Method in Mineral Potential Mapping for Epithermal Gold Mineralization in the Island of Flores, East Nosa Tenggara Using Geographical Information Systems (GIS). *Proceeding of 9th International Symposium on Mineral Exploration*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.
- San soleimani, A., Asadi Haroni, H., Tabatabaei, S.H. and Samari, H., 2011. Mineral potential mapping at 1:10000 scale geological map of Kahak using Fuzzy Logic method. 5th National Conference of Geology and Environment, Islamic Azad University, Eslamshahr, Iran. (in Persian with English abstract)