

کاربرد روش‌های دورسنجی و منطق فازی برای شناسایی تراورتن‌های منطقه آبگرم قزوین

سید رضا مهرنیا^{۱*}، سعید عباس زاده^۲

۱- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور تهران
۲- کارشناسی ارشد، مهندسی معدن (اکتشاف)، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

(دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۰۹، پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۱۷)

چکیده

در بررسی حوزه زمین گرمایی منطقه آبگرم قزوین که با هدف شناسایی سازندهای تراورتن و آثار دگرسانی آن‌ها انجام گرفته است، از تصاویر ماهواره Terra، سنجنده ASTER استفاده شد. عکس نقشه‌های ترکیبی با استفاده از روش نسبت‌گیری بانندی و تحلیل طیفی مولفه‌های اصلی تولید و مکان هندسی هاله‌های دگرسانی (با منشاء گرمایی) معرفی شدند. نتایج مطالعات دورسنجی موبد همبافتی رخساره‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن با کانی‌های رسی است که از نقطه نظر ژئوشیمیایی، ملاک مناسبی برای تشخیص رخساره‌های گرمایی است. بدین ترتیب پس از تشکیل پایگاه داده‌های مکانی شامل گسل‌ها، خطواره‌های ساختمانی، سازندهای زمین‌شناسی و عکس نقشه‌های ASTER، مناطق مستعد تراورتن‌زایی شناسایی و برای تولید نقشه پیش‌دآوری به روش فازی آماده شدند. برای تعیین درجه عضویت متغیرهای فازی از تابع Large استفاده شد. امتیازدهی تغییرات سازندی (ملاک‌های لیتولوژیکی) بر اساس تنوع سن و جنس آن‌ها انجام گرفت. همچنین برای وزن‌دهی معیارهای زمین‌ساختی (چگالی گسل‌ها) و تلفیق آن‌ها با تغییرات سازندی، از عملگر فازی And استفاده شده است. مطابق نتایج این تحقیق، بخشی از اطلاعات ساختاری و تحولات سازندی منطقه توسط نقشه‌های مغناطیسی استنتاج شده است که در تلفیق نهایی با معیارهای دورسنجی، زمین‌شناسی و زمین‌ساختی، امکان شناسایی هاله‌های دگرسانی مرتبط با کانی‌سازی تراورتن را به همراه درج اولویت اکتشافی آن‌ها به وسیله عملگر فازی گاما فراهم کرده است. بدین ترتیب اولین نقشه جامع تراورتن‌های منطقه آبگرم با استفاده از عکس نقشه‌ها، یافته‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی مطابق شکل ۱۵ ارائه شده است که در آن ارتباط مکانی آثار تراورتن‌زایی با رخنمون سنگ‌های آتشفشانی سنوزوییک در حومه شهر آبگرم مشاهده می‌شود.

کلمات کلیدی

آبگرم، منطق فازی، دگرسانی گرمایی، دورسنجی، تراورتن.

۱- مقدمه

آن با احتمال شکل‌گیری تراورتن‌ها و سایر منابع زمین‌گرمایی در عمق رخساره‌های دگرسانی مطابقت دارد [۱۱]. چهارگوشه مطالعاتی این تحقیق (جنوب غربی استان قزوین) در مختصات متریک بوده و شامل گستره‌های طولی ۳۳۳۰۰۰ تا ۳۷۳۵۰۰ (مولفه رو به شرق) و تغییرات عرضی ۳۹۵۴۰۰۰ تا ۳۹۸۵۰۰۰ (مولفه رو به شمال) است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از عملیات پردازش تصاویر سنجنده ASTER (باندهای ۱ تا ۹) برای شناسایی هاله‌های توام رسی (مونتموریلونیت-کائولینیت) و اکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت، لیمونیت) استفاده شده است. همچنین برای تکمیل نقشه دگرسانی منطقه (تشخیص هاله پروپیلیتیک)، پردازش خاصی با تاکید بر حضور رخساره کلریتی انجام گرفته که مراحل آن به شرح زیر است.

۲-۱- انجام تصحیحات متعارف

در این تحقیق از روش‌های تصحیح هندسی، تصحیح جوی و حذف پوشش گیاهی برای بهبود کیفیت تصاویر و کاهش اثر نوفه‌ها استفاده شده است [۱۲]. تصحیحات هندسی مطابق روش تطبیق داده‌های سنجنده ETM (لندست ۷) با سنجنده ASTER انجام گرفته و اعوجاجات هندسی تا حد ممکن برطرف شده‌اند [۱۳].

ز میان روش‌های متفاوتی که برای تصحیح جوی داده‌های ASTER استفاده می‌شود، از روش لگاریتم باقیمانده استفاده شد تا به‌طور موثر امکان حذف تابش‌های غیر عادی (پراش‌های جوی) فراهم شود [۱۲]. همچنین با توجه به ضرورت شناسایی هاله‌های رسی و اختلال ناشی از پوشش‌های گیاهی جوان، آثار رخنمون‌های گیاهی منطقه آبگرم شناسایی و حذف شد. در این مطالعه از شاخص (NDVI)^۶ به عنوان مهم‌ترین شاخص پوشش گیاهی و به‌واسطه تغییرات طیفی باندهای قرمز و نزدیک مادون قرمز، شناسایی نوفه‌های گیاهی و حذف آن‌ها انجام گرفته است [۱۲]. این شاخص با استفاده از تفاوت بین طیف نزدیک مادون قرمز (که قویا به‌وسیله گیاهان بازتابش می‌شود) و نور قرمز (که به‌وسیله گیاهان جذب می‌شود) امکان نمایان کردن نقاط دارای پوشش گیاهی را دارد. این شاخص برای مناطقی که تراکم پوشش گیاهی متوسط و بالا باشد مناسب است زیرا نسبت به خاک زمینه روشن و اثرات

تشخیص کانی‌های تشکیل دهنده سنگ‌هایی که در رابطه با فعالیت‌های زمین‌گرمایی^۱ شکل می‌گیرند، می‌تواند پیش از هر بازدید زمینی، محل و جهت ساختارهای کنترل کننده سیالات گرمایی^۲ را ممکن سازد. بدین ترتیب می‌توان مناطق دارای استعداد شکل‌گیری حوزه‌های زمین‌گرمایی را با توجه به نتایج دورسنجی و همچنین GIS^۳ از موقعیت و تعدد رخنمون‌های سنگی (در این تحقیق تراورتن) تعیین کرد.

در مناطق زمین‌گرمایی واکنش سنگ میزبان با سیالات گرم منجر به تحولات ژئوشیمیایی منطقه شده و پدیده‌های تبلور مجدد، انحلال و رسوب‌گذاری در مقیاس محلی و ناحیه‌ای مشاهده می‌شوند. به‌طور مثال رسوب‌گذاری کانی‌های حاصل از فعالیت چشمه‌های آب گرم در بسیاری از حوزه‌های زمین‌گرمایی موجب تشکیل و تجمع سازندهای تراورتن می‌شود که ملاک لیتوژئوشیمیایی مهمی برای اکتشاف منابع زمین‌گرمایی است [۱]. یکی از آثار وجود منابع زمین‌گرمایی، تنوع واحدهای دگرسانی^۴ و گسترش آن‌ها در سطح فرسایش کنونی است. بنابراین با استفاده از روش‌های پردازش تصاویر ماهواره‌ای امکان شناسایی و تفکیک هاله‌های دگرسانی قبل از آغاز عملیات اکتشاف صحرایی فراهم شده است [۴-۲]. در این تحقیق بعد از شناسایی آثار تراورتن‌زایی به روش دورسنجی، از روش تلفیق فازی اطلاعات مکانی با استناد بر سوابق اکتشافی منطقه آبگرم (دورسنجی و مغناطیسی)، برای تشخیص استعداد کانه‌زایی و ارایه نقشه پیش‌داوری^۵ تراورتن‌های منطقه آبگرم (شاخص دگرسانی زمین‌گرمایی) استفاده شده است [۸-۵]. همچنین برخی از متخصصین، برای اکتشاف ذخایر طلائی اپی‌ترمال فیلیپین از الگوریتم فازی استفاده کرده‌اند [۹]. برای اکتشاف نهشته‌های معدنی نوع می‌سی‌سی‌پی در کانادا، پیش‌داوری‌های متعددی به روش فازی انجام شده‌اند [۱۰]. در همه این موارد، منطق فازی موجب شناخت استعدادهای معدنی شده و تصمیم‌گیری برای ادامه عملیات اکتشاف را آسان کرده است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق، تشخیص مناطق دگرسانی (آثار تراورتن‌زایی) با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای و در ادامه تعیین مکان هندسی مناطق امیدبخش معدنی با استفاده از الگوریتم فازی است. شهر آبگرم یکی از مناطق گردشگری استان قزوین است که از دیدگاه رخنمون چشمه‌های معدنی و آثار پراکنده از تراورتن‌های فسیل شده (پالئوتراورتن)، مورد توجه زمین‌شناسان بوده و شواهد صحرایی

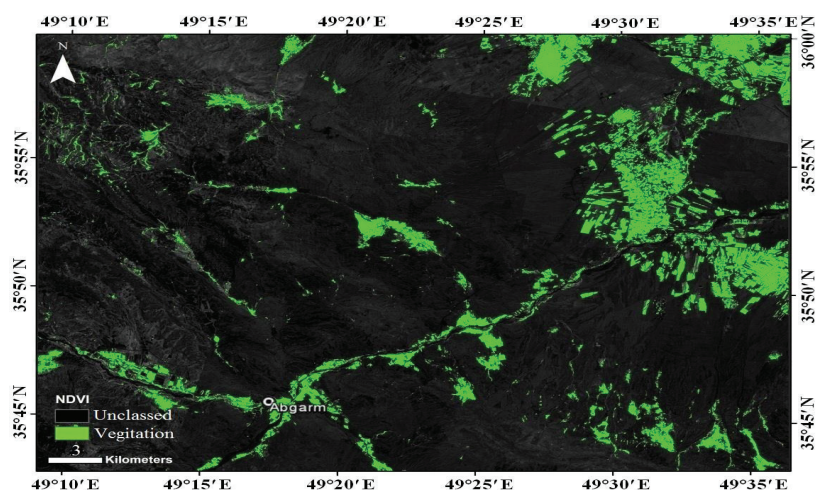
توسعه هاله پروپلیتیک^۱ در اطراف هاله‌های رسی از نشانه‌های فعالیت‌های گرمابی در حوزه‌های زمین گرمایی است [۱]. مطابق شکل ۲، در این تحقیق از ترکیب باندهای ۴، ۶ و ۸ (سنجنده ASTER) در گستره طیف مرئی قرمز، سبز و آبی برای دستیابی به ترکیب کاذب RGB^۲-۴۶۸ استفاده شده است. هدف از تولید این تصویر، کاهش اثر نوفه‌ها (داده‌های کم ارزش) با بیشینه اطلاعات مفید برای تشخیص پدیده‌های زمین‌شناسی منطقه بوده است. در این شکل، بازتاب کانی‌های هیدروکسیلی در باند ۴ بیشینه بوده و مناطق حاوی دگرسانی رس به رنگ صورتی دیده می‌شوند.

اتم‌سفر حساسیت کمتری دارد. مطابق شکل ۱، تغییرات طیف مرئی سبز (مقادیر پیکسل بزرگتر از ۰٫۲) بیانگر پوشش گیاهی منطقه آبگرم بوده و مکان هندسی آن‌ها در فرآیند تشخیص هاله‌های رسی در نظر گرفته نشده است.

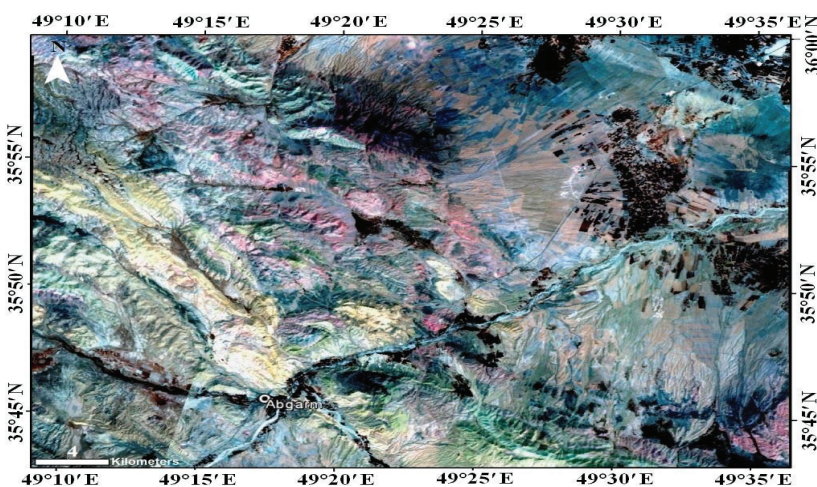
۲-۲- پردازش تصاویر ماهواره‌ای

۲-۲-۱- ترکیب رنگی کاذب

برای بارسازی پدیده‌های زمین‌شناسی و شناسایی مناطق رسی و کلریت‌زایی آبگرم از ترکیب طیف‌های الکترومغناطیسی^۳ و تولید نقشه‌های رنگی استفاده شده است.



شکل ۱: نمایش محدوده پوشش گیاهی به رنگ سبز در تصویر با زمینه سیاه و سفید (پیکسل بزرگتر از ۰٫۲ معرف پوشش گیاهی جوان)



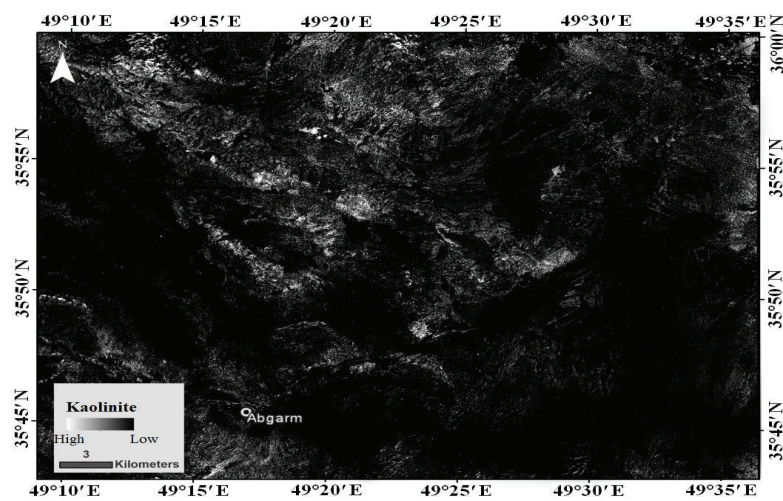
شکل ۲: تصویر رنگی کاذب RGB-468 (داده ماهواره‌ای استر) رنگ صورتی معرف دگرسانی‌های رسی و رنگ سبز معرف دگرسانی کلریت است.

۲-۲-۲- نسبت‌گیری باندی^۱

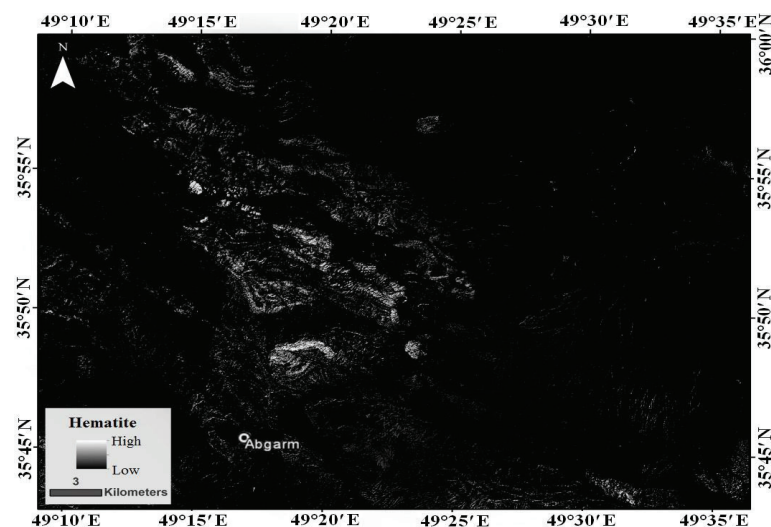
۷٫۵ و ۲٫۱ به ترتیب برای شناسایی کانی‌های رسی و ترکیبات اکسیدی- هیدروکسیدی آهن استفاده شده است. همچنین در این قسمت برای تکمیل نقشه دگرسانی منطقه، پردازشی با استفاده از نسبت باندی ۶٫۸ برای تشخیص رخساره کلریتی انجام گرفته است (شناسایی هاله پروپیلیتیک، شکل ۵).

در نمایه‌های تک باندی (سیاه و سفید) توزیع مکانی دگرسانی‌ها مبالغه‌آمیز بوده و رابطه آن‌ها در تجمیع با یکدیگر نامشخص است [۱۲]. در این نمایه‌ها وسعت مناطق دگرسانی

در این روش با استفاده از ویژگی بیشینه جذب و بازتاب طیفی منسوب به کانی‌های دگرسانی، امکان شناسایی هاله‌های دگرسانی (ترکیب رس و اکسیدهای آهن) به وجود می‌آید. بنابراین برای جدا کردن واحدهای سنگی و تفکیک دگرسانی‌ها از نسبت‌های معینی در صورت و مخرج کسرها استفاده می‌شود که هر یک معرف نوع خاصی از کانی‌زایی است [۱۳، ۱۲]. بدین ترتیب مطابق شکل‌های ۳ و ۴ از نسبت‌های



شکل ۳: تصویر خروجی نسبت باندی ۷٫۵ برای بارسازی کائولینیت (دگرسانی رسی) (محدوده طیفی منسوب به رس‌ها به رنگ سفید مایل به خاکستری دیده می‌شود).



شکل ۴: تصویر خروجی نسبت باندی ۲٫۱ برای بارسازی اکسیدهای آهن (محدوده طیفی منسوب به اکسیدهای آهن به رنگ سفید مایل به خاکستری دیده می‌شود).

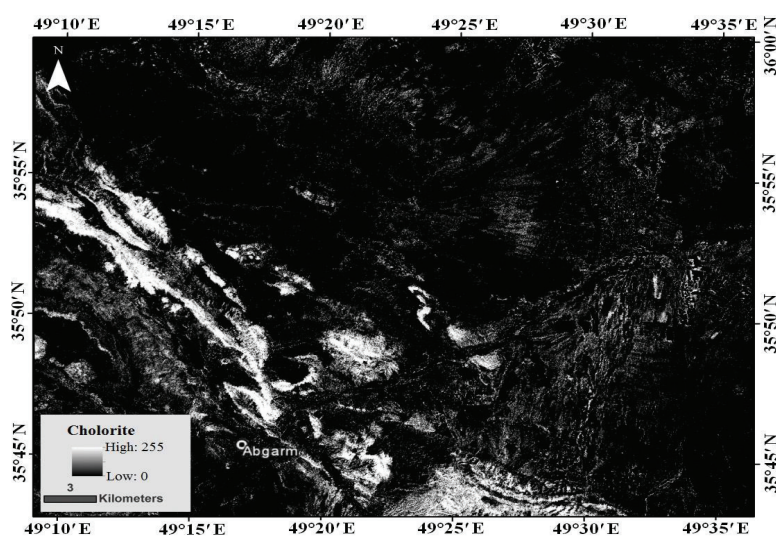
مقایسه با رخساره اکسید آهن گسترش بیشتر و وضوح طیفی بالاتری دارد. همچنین با توجه به شکل ۷، آثار پراکنده و محدودی از دگرسانی اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در شمال غرب منطقه آبرگرم یافت شده است.

۲-۳- روش فیلتر تطبیق یافته

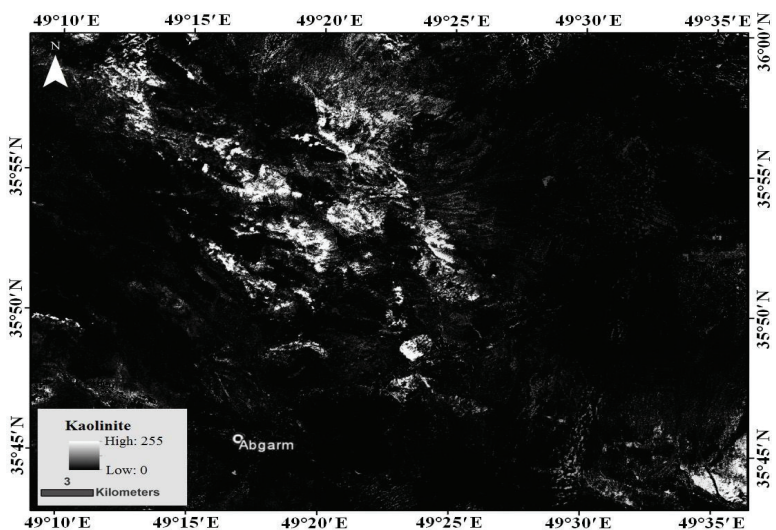
در این مرحله برای افزایش بازتاب طیفی کانی‌های تعریف شده و کمینه کردن نوفه‌های طیفی (بازتاب‌های مزاحم و

بیش از حد انتظار است و احتمال خطای آریبی در شناسایی رخساره‌های گرمایی (از انواع هوازدگی) وجود دارد [۱۳]. بنابراین مطابق شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب از نسبت‌های ترکیبی $۷,۶+۴,۵$ برای شناسایی دقیق ترس‌ها و از نسبت‌های ترکیبی $۴,۳+۲,۱$ برای تشخیص دقیق تر رخنمون‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن استفاده شده است.

بر اساس مندرجات شکل ۶، دگرسانی رسی نسبتاً وسیعی در شمال غربی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود که در



شکل ۵: تصویر خروجی نسبت بانندی ۶/۸ برای بارزسازی کلریت (دگرسانی پروپیلیتیک) (محدوده طیفی منسوب به کلریت به رنگ سفید مایل به خاکستری دیده می‌شود).



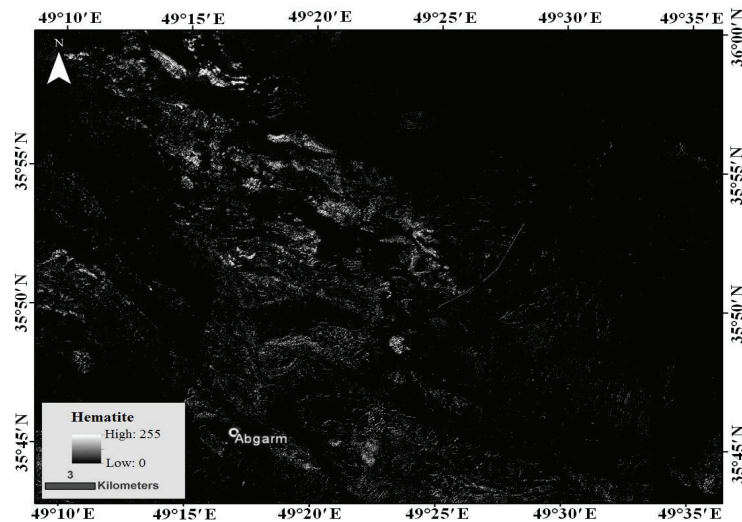
شکل ۶: تصویر خروجی نسبت بانندی $۷,۶+۴,۵$ برای بارزسازی کائولینیت (دگرسانی آرژلیک)

یا کمبود اطلاعات طیفی منطقه دشوار است. بنابراین با استناد بر نقشه‌های زمین‌شناسی، یافته‌های ژئومغناطیسی و شواهد صحرایی، نمونه‌برداری محدود و غیرمنظمی از سازندهای مستعد منطقه به عمل آمد تا از شاخص تغییرات طیفی آن‌ها برای اصلاح تصاویر دورسنجی استفاده شود. شکل ۹، حاصل تطبیق اطلاعات صحرایی با پردازش‌های طیفی منطقه آبگرم است. در این شکل از بازتاب‌های طیفی اصلاح شده (در شکل ۸) برای تشخیص موقعیت تراورتن‌های آبگرم استفاده شده است.

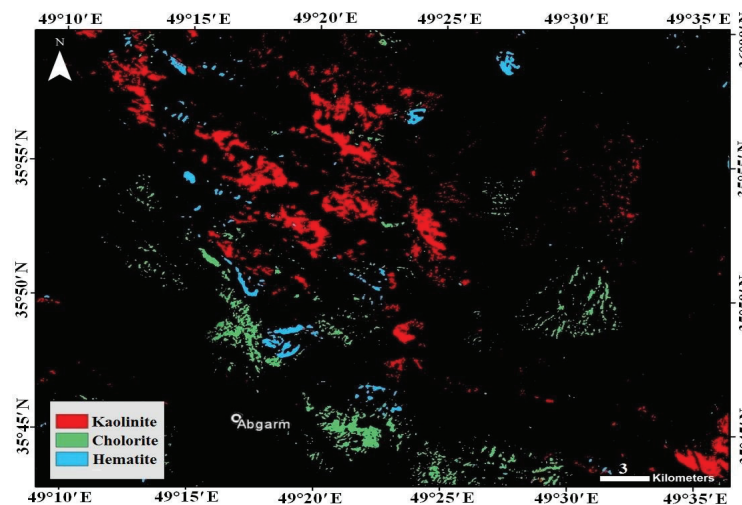
ناشناخته)، از روش فیلتر تطبیق یافته استفاده شد [۱۳]. در این روش ابتدا نمونه پیکسل‌های حاوی طیف دگرسانی (آثار مشهود) از متن تصویر استخراج و با طیف‌های مرجع^{۱۱} مقایسه می‌شوند. در منطقه آبگرم از روش یاد شده بر اساس رفتارهای طیفی استخراج شده استفاده و نتایج آن با هدف شناسایی دگرسانی‌های منطقه آبگرم مطابق شکل ۸ ارایه شده است.

۳- شناسایی واحدهای تراورتن

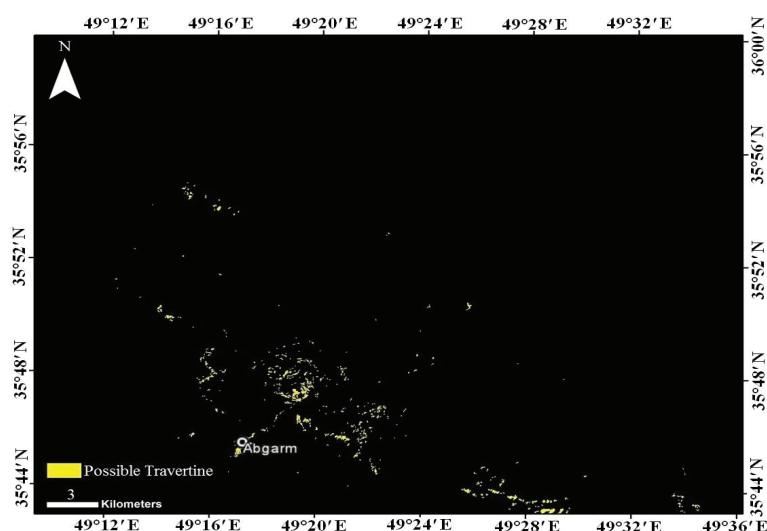
در عمل، شناسایی تراورتن‌های منطقه آبگرم به علت نبود



شکل ۷: تصویر خروجی نسبت باندهی ۴/۳+۲/۱ برای بارزسازی هماتیت (دگرسانی اکسید آهن)



شکل ۸: نتایج روش فیلتر تطبیق یافته برای دگرسانی‌های منطقه آبگرم (در این تصویر، کانی‌زایی کلریت (هاله پروپیلیتیک) به رنگ سبز، اکسیدهای آهن به رنگ آبی و کانی‌های رسی به رنگ قرمز مشاهده می‌شوند).



شکل ۹: تصویر خروجی روش فیلتر تطبیق یافته برای مناطق مشکوک به تراورتن

و مرز لایه‌های زمین شناسی (اطلاعات مکانی گسسته)، اعمال شعاع تاثیر بردارها (بافرینگ)، امکان کاهش عدم قطعیت پیش داوری فراهم می‌گردد [۱۶]. در عمل از لایه‌های وزن‌دار شده برای بیان معیارهای اکتشافی متناسب با نواحی مستعد استفاده می‌گردد که با توجه به تسهیلات نرم‌افزار GIS، نقش عملگرهای منطقی در فرآیند تلفیق داده‌ها حائز اهمیت است. در جدول ۱، برخی از عملگرهای منطق فازی و نتایج آن‌ها درج شده‌اند.

۲-۴- شناسایی واحدهای سنگی مطلوب

مطالعات زمین‌شناسی یک ناحیه مستعد زمین گرمایی، نه تنها برای ارزیابی توان تراورتن‌زایی کاربرد دارد، بلکه در پردازش و تفسیر اطلاعات دورسنجی و ژئوفیزیکی نقش مهمی را ایفا می‌نماید. معمولاً شناسایی مناطق مستعد با بررسی فعالیت‌های آتشفشانی (سن و شدت آن‌ها)، تنوع رخساره‌های ماگمایی و گوناگونی الگوهای زمین‌ساختی (گسل‌ها) صورت می‌گیرد [۱۱]. سنگ‌های آذرین به عنوان نشانه‌هایی از فعالیت‌های آتشفشانی و ماگمایی در دوران‌های مختلف زمین‌شناسی، نقش به‌سزایی در شکل‌گیری حوزه‌های زمین گرمایی ایفا می‌نمایند. در حقیقت، وجود سنگ‌های آتشفشانی به عنوان ملاکی برای افزایش احتمال پیدایش تراورتن‌ها محسوب می‌گردد. از طرف دیگر، شکل‌گیری سنگ تراورتن از بارزترین نشانه‌های سیالات گرمایی است که اغلب به صورت چشمه‌های آب گرم رخنمون دارند [۱۱].

۴- آماده سازی لایه‌های اکتشافی و تولید نقشه پیش داوری به روش فازی

۴-۱- آشنایی با روش منطق فازی

روش منطق فازی از روش‌های متکی بر دانش است که برای تخمین اوزان نقشه‌های نشانگر، تلفیق آن‌ها و در نهایت تولید نقشه نهایی به کار می‌رود. در این روش اوزان اختصاص یافته به لایه‌های شاهد مبتنی بر نظر کارشناسان خبره بوده و با در نظر گرفتن دانش فنی و تجربه آن‌ها تبیین می‌گردند [۱۴]. براساس نظریه مجموعه فازی، بازه‌ای از مقادیر میان صفر و یک می‌توانند برای بیان درجه یا میزان ارزش اعضای یک مجموعه بکار روند [۱۵]. به طوری که مقدار صفر به معنای عدم عضویت کامل و در مقابل مقدار یک به معنای عضویت کامل اعضای مجموعه می‌باشد. به همین ترتیب دیگر اعضای مجموعه نیز می‌توانند مقادیری را بین صفر تا یک (بر اساس درجه عضویتشان) در مجموعه مورد نظر افراز نمایند. بنابراین در بحث اکتشافات معدنی، از توابع عضویت پیوسته برای کاهش خطای پیش داوری ها استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که منطق فازی به دلیل بهره‌گیری از برد تصادفی صفر تا یک خود، الگوریتم پیش فرضی را برای ایجاد پیوستگی یا بهبود آن در لایه‌های شاهد ارائه می‌نماید. رهیافت این منطق در مواجهه با فایل‌های نرده‌ای و برداری متفاوت است. بطوریکه برای تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های پربندی، بیشینه پیوستگی برقرار بوده اما برای فایل‌های برداری مثل گسل‌ها

جدول ۱: تعریف عملگرهای فازی (تابع عضویت فازی برای نقشه i ام و μ_A, μ_B, μ_C مقادیر عضویت برای نقشه A, B و C هستند) [۱۶]

عملگر فازی	تعریف	عملکرد
AND (اشتراک منطقی)	$\mu_{Combine} = \text{Min}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots)$	تهیه نقشه خروجی با حداقل مقادیر عضویت فازی
OR (اتحاد منطقی)	$\mu_{Combine} = \text{Max}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots)$	تهیه نقشه خروجی با حداکثر مقادیر عضویت فازی
Product (حاصل ضرب جبری)	$\mu_{Combine} = \prod_{i=1}^n \mu_i$	تهیه نقشه خروجی با تمامی مقادیر عضویت مشترک مقادیر نقشه خروجی \geq مقادیر عضویت مشترک (اثر کاهش)
Sum (حاصل جمع جبری)	$\mu_{Combine} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)$	مکمل حاصل ضرب جبری / دو شاهدهی که فرضیه خاصی را تقویت و تایید می کنند اثر همدیگر را شدت بخشیده و تاثیر مثبت بیشتری را نسبت به حالت انفرادی خود اعمال می کنند. مقادیر نقشه خروجی \leq مقادیر عضویت مشترک (اثر افزایشی)
Gamma (عملگر گاما)	$\mu_{Combine} = \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma} \times \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \right)^\gamma$	γ مقداری بین صفر و یک / با انتخاب صحیح گاما می توان نقش فزاینده جمع فازی و نقش کاهشنده ضرب فازی را به یک حالت تعادل نزدیک ساخت.

عوارض سطحی (در قالب کمیت‌های نرده‌ای) ارائه شده‌اند. برای دستیابی به این مهم از شاخص چگالی گسل‌های آبگرم استفاده گردیده و شعاع اثر خطواره‌ها با درج شعاع پایه ۱۰۰ متر مطابق شکل ۱۲ محاسبه شده است. در این شکل فواصل سطوح گسلی بر حسب تغییرات چگالی سطحی آنها بوده و در ۱۰ کلاس طبقه‌بندی شده‌اند (جمعاً ۲۰۰۰ متر در طرفین هر گسل لحاظ گردیده که این فاصله بر اساس مشاهدات زمین شناسی و شعاع اثر هاله پروپیلیتیک با بیشینه دگرسانی گرمایی در شکل ۸ انتخاب شده است).

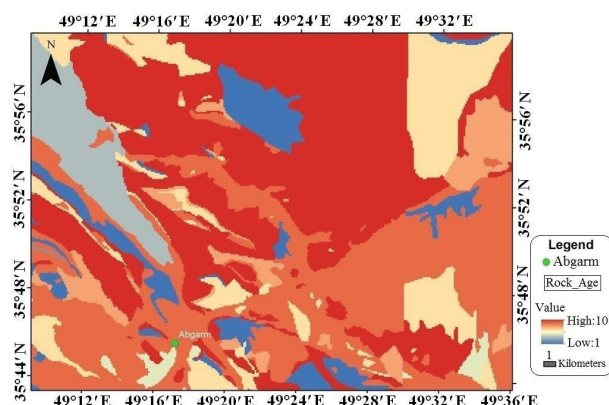
۴-۴- لایه اطلاعاتی شاخص ژئومغناطیسی

یافته‌ها و روش‌های ژئوفیزیکی مختلفی به منظور شناسایی حوزه‌های زمین گرمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این میان، نقش اطلاعات ژئومغناطیسی (با تاکید بر برداشت‌های هوایی) به دلیل رابطه تغییرات خودپذیری سنگ‌های مغناطیسی با ظهور و حرکت سیالات گرمایی قابل توجه است. در واقع از دیدگاه مغناطیسی، اغلب پدیده‌های دگرسانی با افت قابل توجه خودپذیری مغناطیسی سنگ میزبان همراه هستند [۱]. سازوکار چنین تغییراتی در ارتباط با گرمای ناشی

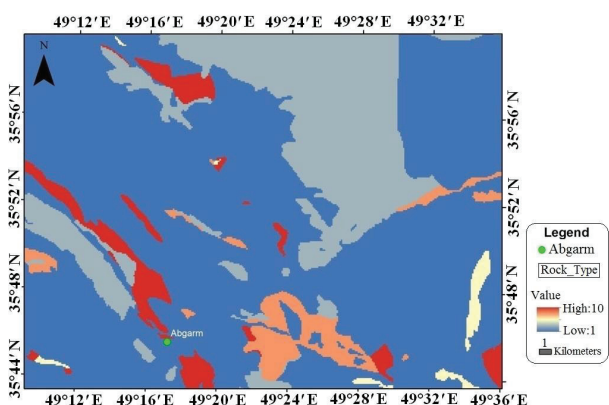
ملاک‌های زمین‌شناسی منطقه آبگرم قزوین بر اساس مندرجات نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ انتخاب گردیده و سازندهای مستعد (به تفکیک جنس و سن آنها) طبقه بندی شدند. اطلاعات این بخش به صورت فایل‌های برداری^{۱۲} استخراج گردیده و با استفاده از الگوریتم توسعه شعاع تاثیر داده‌های مکانی^{۱۳} به شکل فایل‌های نرده‌ای (رستری^{۱۴}) در آمدند. مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱، کلاسه‌بندی تغییرات سازندی بر حسب جنس و سن سازندها ارائه شده است. لازم به ذکر است که سنگ‌های آذرین بیرونی با ترکیب اسیدی که متعلق به نئوژن^{۱۵} و کواترنری^{۱۶} باشند از بیشترین وزن فازی برای مدل‌سازی منابع زمین گرمایی برخوردارند.

۴-۳- لایه اطلاعاتی فاکتور ساختاری

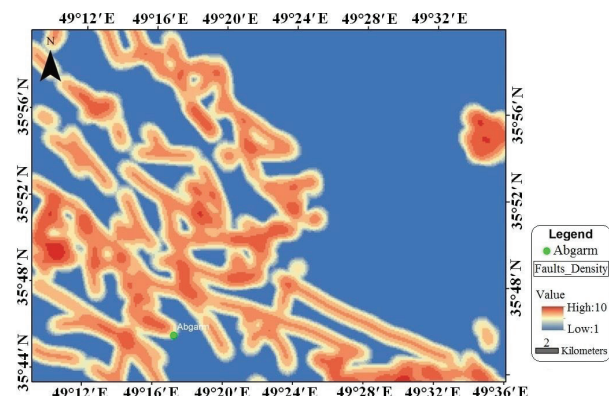
گسل‌ها و شکستگی‌ها عامل اصلی انتقال سیالات گرمایی در میادین زمین گرمایی هستند [۱۱]. با استفاده از نقشه زمین‌شناسی (در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰) و تصاویر ماهواره‌ای، خطواره‌های گسلی منطقه مورد مطالعه به صورت خطوط برداری استخراج شده‌اند که به دلیل نقش آنها در افزایش تراوایی سنگ میزبان میادین زمین گرمایی، به صورت



شکل ۱۰: نقشه کلاسه‌بندی و درجه اهمیت نسبی توزیع واحدهای سنگی بر اساس جنس (اسیدی بیرونی = ۱۰، متوسط بیرونی = ۹، بازیک بیرونی = ۸، اسیدی درونی = ۷، متوسط درونی = ۶، بازیک درونی = ۵، اسیدی پیروکلاستیک = ۴، متوسط پیروکلاستیک = ۳، تراس ها و آبرفت‌ها = ۲، سنگ‌های رسوبی = ۱). در هنگام امتیازدهی، بیشینه امتیاز میزبانی ذخایر زمین گرمایی متعلق به سنگ آذرین بیرونی با ترکیب اسیدی است.



شکل ۱۱: نقشه کلاسه‌بندی و درجه اهمیت نسبی توزیع واحدهای سنگی بر اساس سن (قبل از کرتاسه = ۱، کرتاسه = ۲، پالئوژن تفکیک نشده = ۴، پالئوسن = ۵، انوسن = ۶، الیگوسن = ۷، میوسن = ۸، نئوژن تفکیک نشده = ۹، کوارترنر = ۱۰). واحدهای کواترنری (جوان) از استعداد بیشتری برای میزبانی حوزه‌های زمین گرمایی برخوردارند و در هنگام امتیازدهی، امتیاز فازی بالاتری به آنها تعلق می‌گیرد.



شکل ۱۲: نتایج برآورد شعاع اثر سامانه‌های گسلی در منطقه آبگرم قزوین (پدیده‌های ساختمانی بر اساس شواهد زمین‌شناسی و تفسیر پربندهای مغناطیسی استخراج شده‌اند). کلاسه‌بندی و تولید فایل نرده‌ای بر اساس امتیازدهی به تغییرات چگالی گسل‌ها بوده است.

سیالات داغ موجب بروز تغییرات شیمیایی وسیعی می‌شود که آثار آن به صورت دگرسانی‌های درون‌زا در سطح فرسایش کنونی قابل مشاهده است [۱]. پیدایش کانی‌های رسی و همیافتی آنها با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن از علایم وجود سیالات گرمابی در مناطق مستعد زمین‌شناختی است. در این تحقیق برای شناسایی و تفکیک مناطق دگرسانی از روش‌های دورسنجی استفاده شده است (در بخش ۲ اشاره شده است) که نتایج آن در شکل ۱۴ ملاحظه می‌گردد. اطلاعات دورسنجی در قالب فایل‌های نرده‌ای (رستری) تهیه گردیده و مستقیماً وارد الگوریتم مدل‌سازی فازی خواهد شد. کمیت‌های طیفی مرتبط با دگرسانی منطقه آبگرم به صورت کلاسه‌بندی شده درآمده‌اند و معرف سازندهای تراورتن (وزن بیشینه) در همیافتی مکانی با ترکیبات رسی، اکسیدهای آهن و کلریت هستند.

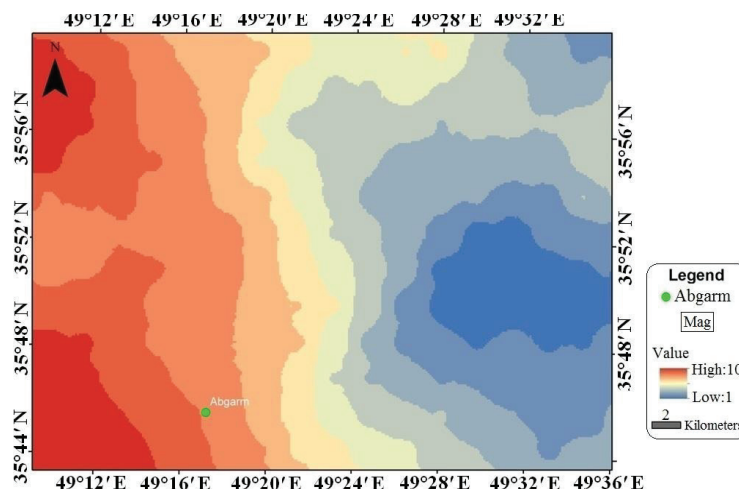
۴-۶- تلفیق لایه‌ها با استفاده از مدل منطق فازی

نقشه‌های شاهد مورد استفاده، پیش از تلفیق به گونه‌ای کلاسه‌بندی شده‌اند که کلاس‌های دارای اهمیت بیشتر دارای ارزش عددی بیشتری باشند. به همین جهت، در تعیین درجه عضویت فازی این لایه‌ها از تابع Large استفاده گردیده است و در نهایت کلاسه‌های هر لایه بر اساس تئوری منطق فازی و اهمیتشان امتیازی بین صفر و یک دریافت کرده‌اند. تابع Large با در نظر گرفتن یک نقطه میانی به عنوان نقطه تقاطع

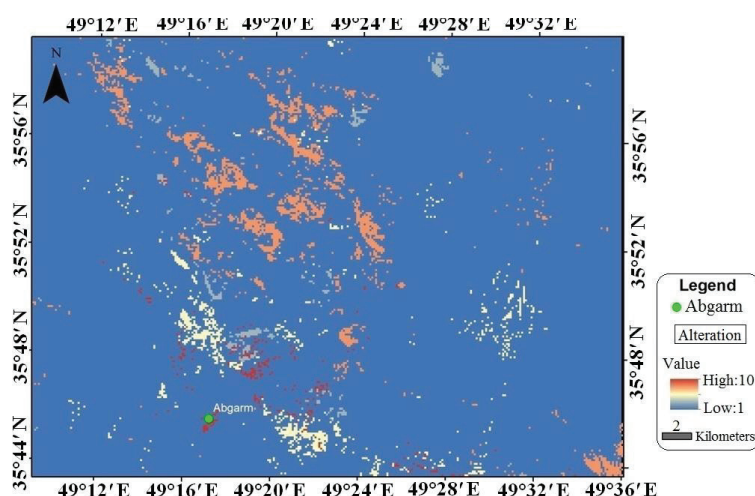
از سامانه‌های ماگمایی-گرمابی و خردشدگی مناطق دگرسانی در خلال شکل‌گیری گسل‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر، نفوذ سیالات داغ و وفور نواحی خرد شده دو عامل اصلی برای کاهش خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها هستند که در اغلب موارد موجب افت مولفه کلی شدت میدان می‌شوند [۱۷]. در این تحقیق از سطوح پربند^{۱۳} مغناطیسی (هوایی) منطقه آبگرم به منظور شناسایی خطواره‌های پنهان و شناسایی مناطق با افت میدان مغناطیسی (به دلیل دگرسانی سیالات گرمابی) استفاده شده است. پربندهای مذکور از فایل شبکه داده‌های مغناطیسی بدست آمده‌اند. فایل جدول مغناطیسی متعلق به سامانه برداشت هوایی سازمان زمین‌شناسی بوده (GSI, ۱۹۹۶) و داده‌های موجود پس از اعمال تصحیحات ضروری (کاهش در قطب، طول و عرض جغرافیایی و ارتفاعی) در محیط GIS درون‌یابی شده‌اند. لازم به ذکر است که حدود آستانه تغییرات مغناطیسی منطقه آبگرم به عنوان بی‌هنجاری متناسب با حوزه‌های زمین گرمایی مد نظر بوده است. به عبارت دیگر مکان هندسی اغلب دگرسانی‌ها با تغییرات آستانه‌ای شدت میدان مغناطیسی مطابقت دارد [۱۸]. در نهایت با استفاده از روش وارونه‌سازی، عملیات کلاسه‌بندی کمیت‌های مغناطیسی مطابق شکل ۱۳ انجام شده است.

۴-۵- لایه اطلاعاتی شاخص دگرسانی

در مناطق زمین گرمایی، واکنش بین سنگ میزبان و



شکل ۱۳: نقشه پربند مغناطیسی کلاسه‌بندی شده در منطقه مورد مطالعه (حدود آستانه‌ای تغییرات مغناطیسی، محدوده نارنجی تا زرد، منسوب به نواحی امیدبخش با آثار دگرسانی گرمابی هستند).



شکل ۱۴: نقشه اولویت‌بندی (کلاسه‌بندی) مناطق دگرسانی در محدوده مورد مطالعه

بخش معدنی افزایش می‌یابد. از دیدگاه آماری، افزایش و کاهش کمیت گاما موجب بروز خطاهای نوع اول و دوم می‌شود که در هر دو حالت با عدم موفقیت روش تلفیق فازی در دستیابی به نقشه پیش داوری مناسب مواجه خواهیم بود. لذا تعیین مقدار گاما طوری انجام می‌شود که نتایج تلفیق فازی مبالغه‌آمیز نباشد. در واقع انتخاب مقدار گامای نزدیک به ۱ باعث می‌شود که عرصه وسیعی به عنوان مناطق امیدبخش معدنی انتخاب شوند که همانند عملگر جمع جبری دقت خیلی کمی در مکان‌یابی دارد. در نتیجه فاصله اطمینان تخمین‌های به عمل آمده کاهش می‌یابد (خطای اریبی افزایش می‌یابد). در مقابل انتخاب گامای نزدیک به صفر باعث می‌شود که شرایط مشابه عملگر ضربی بوجود آمده و حساسیت بالایی در مکان‌یابی پتانسیل‌های معدنی یک منطقه اعمال شود که این حساسیت بالا، دلیل بر مناسب بودن مدل برای مکان‌یابی نمی‌باشد؛ چرا که ممکن است عرصه‌های مناسب دیگری هم وجود داشته باشد که به دلیل حساسیت بالای این مدل جزو مناطق مناسب قرار نگیرند. در نتیجه فاصله اطمینان تخمین‌ها بیشتر شده و مناطق امیدبخش محدود می‌گردند (خطای اریبی کاهش می‌یابد). در عمل می‌بایست از مقادیر گامای ۰/۵ تا ۰/۸ برای تولید نقشه‌های پیش داوری (در مقیاس‌های مقدماتی و نیمه تفصیلی) استفاده نمود [۱۶]. شکل ۱۵ نقشه پیش داوری منطقه آبگرم قزوین را با تاکید بر آثار تراورتن‌زایی آن نشان داده است.

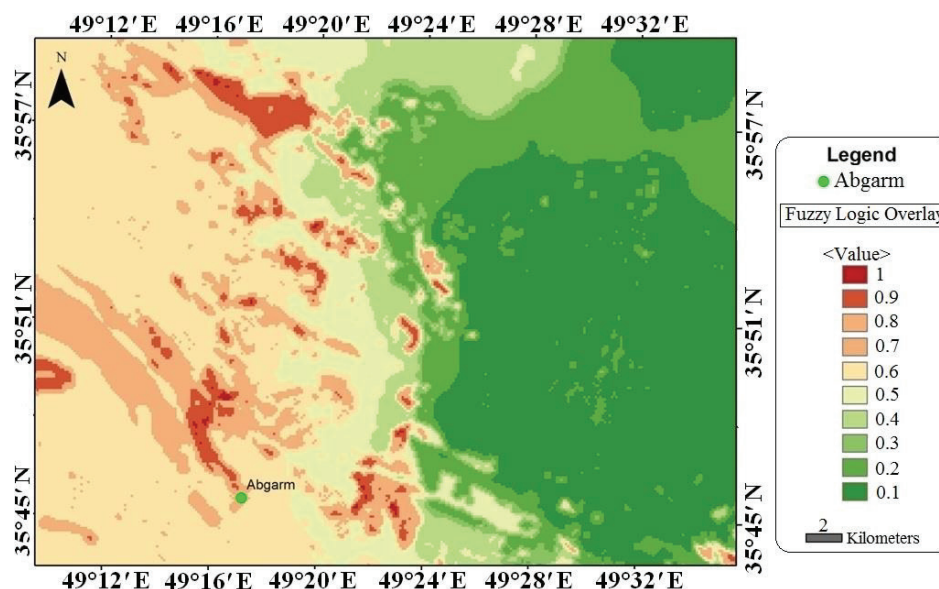
(مقدار عضویت ۰/۵)، مقادیر بزرگتر از نقطه میانی را دارای اهمیت و ارزش بیشتری برای عضویت در یک مجموعه می‌داند و بالعکس [۱۹]. وزن‌دهی سنگ میزبان (لایه سنگ شناسی) بر حسب وضعیت سن و جنس آنها صورت گرفته است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). در فرآیند وزن‌دهی لایه زمین‌شناسی از عملگر منطقی AND استفاده شده است (به مانند معیارهای زمین‌ساختی). این عملگر سطح خطای اریبی (عدم قطعیت) متغیرها را کاهش داده و نتایج حاصل از آن کمینه خواهند بود (فاصله اطمینان را بالا می‌برد) [۵]. شاخص دگرسانی مطابق الگوریتم فازی طبقه بندی گردیده و بیشترین امتیاز به دگرسانی‌های توام رس و اکسید آهن اختصاص یافته است (سطح توزیع دگرسانی از نوع پیوسته است و عدم قطعیت پیش داوری را کاهش می‌دهد) [۷]. همچنین در وزن‌دهی پدیده‌های ساختمانی توجه خاصی به محل تلاقی گسل‌ها و خطواره‌های مغناطیسی شده است تا سطوح متناظر با واحدهای ساختمانی در حین فرآیند باقرسازی جایگزین مولفه‌های خطی شوند (کاهش خطا در مدلسازی داده‌های برداری) [۶]. در ادامه از شاخص تغییرات ژئومغناطیسی برای تعیین هاله اثر دگرسانی‌ها و تشخیص خطواره‌های پنهان استفاده گردیده که ملاک وزن‌دهی آنها بر اساس میانگین تغییرات کمی در جوامع زمینه و آستانه می‌باشد (شکل ۱۳). برای تلفیق نهایی کمیت‌های زنده‌ای (لایه‌های مورد استفاده)، از منطق حاکم بر عملگر گاما با ضریب اطمینان ۰/۷۵ استفاده شده است. در محدوده این ضریب، فاصله اطمینان لازم برای دستیابی به نقاط امید

۵- نتیجه گیری

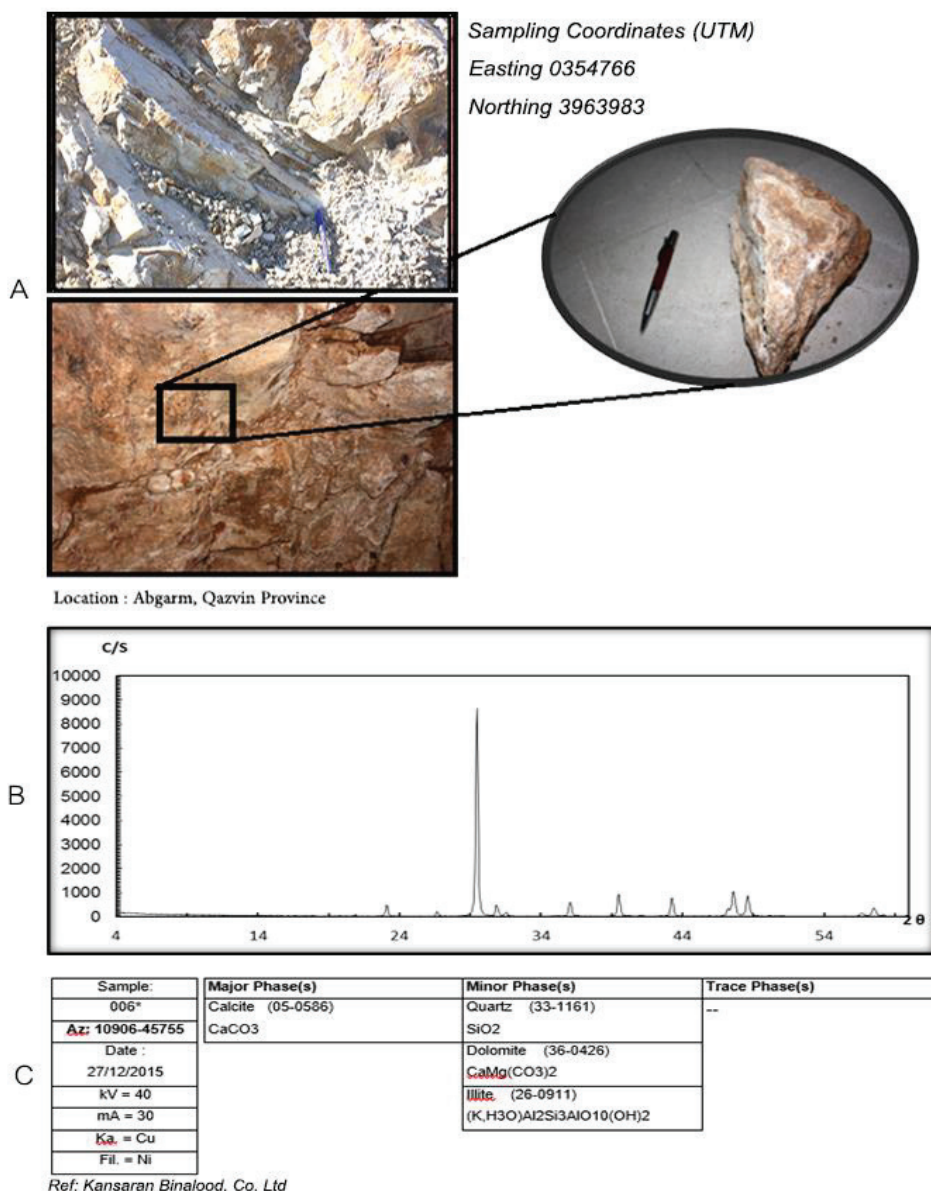
اغلب آثار دگرسانی گرمایی در منطقه آبگرم دارای روند شمال غرب- جنوب شرق هستند و این شهر محل تلاقی چندین سامانه گسلی با آثار مشهود دگرسانی و تراورتن‌زایی است. اغلب مناطق دگرسانی در بخش فوقانی واحدهای رسوبی- آتشفشانی سنوزوئیک^{۱۸} مشاهده می‌شوند. از دیدگاه تئوری احتمال، وجود منابع زمین گرمایی در عمق سنگ‌های آتشفشانی بیش از سایر سازندهای زمین شناسی است. مرز میان واحدهای آذرین و سازندهای کربناتی مناطق مستعدی برای تراورتن‌زایی بوده و آثار دگرسانی گرمایی به صورت همیافتی کانی‌های رسی با اکسیدهای آهن مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر وجود سنگ میزبان آهنی به همراه توسعه ساختمان‌های گسلی متقاطع از عوامل موثر در شکل‌گیری تراورتن‌ها و توسعه هاله‌های دگرسانی منسوب به فعالیت‌های زمین گرمایی آبگرم است.

مطابق شکل ۱۶، یافته‌های دورسنجی (طیف نشری تراورتن در سنجنده ASTER) و مدل فازی ارائه شده از منطقه، بیانگر منشاء زمین گرمایی تراورتن‌ها و گسترش آنها در حریم مسکونی شهر آبگرم است. برای تشخیص ماهیت تراورتن‌ها و نحوه توزیع آنها در منطقه

مورد مطالعه، از الگوریتم فازی به منظور تلفیق لایه گسل‌ها با خطواره‌های ساختمانی، سازندهای زمین‌شناسی، نقشه پریند مغناطیسی (تغییرات ژئومغناطیسی) و نتایج دورسنجی (عکس نقشه‌های ASTER) استفاده شده است. مناطق مستعد تراورتن‌زایی با تولید نقشه پیش داوری شناسایی شدند. با توجه به پراکندگی داده‌های مکانی منطقه آبگرم و در نظر گرفتن این نکته که استفاده از هر کدام به صورت جداگانه، تصمیم‌گیری برای تعیین نقاط پتانسیل و ادامه فعالیت‌های اکتشافی را دشوار می‌نماید، در نتیجه می‌بایست از روشی استفاده می‌شد که توانایی لازم را برای تلفیق لایه‌های نشانگر (بر اساس اصول منطقی و محاسبات زمین ریاضی) داشته باشد و بتواند این اطلاعات را در کمترین زمان با بیشترین دقت مدیریت نماید. لذا با استفاده از منطق فازی و بدون نیاز به ساده‌سازی داده‌ها و در کمترین زمان، امکان تلفیق داده‌ها تحت عملگر منطقی گاما فراهم شده است. بدین ترتیب از وزن‌ها و امتیازات لازم برای طبقه‌بندی داده‌های مکانی و درج اولویت‌های اکتشافی منطقه مورد نظر استفاده گردید و با تلفیق داده‌ها توسط مدل منطق فازی، نقشه پتانسیل آثار تراورتن‌زایی آبگرم بدست آمد که نتیجه آن در شکل ۱۵ ملاحظه و منطبق با شواهد صحرایی و رخنمون‌های زمین شناسی منطقه است. تولید نقشه پیش



شکل ۱۵: نقشه پیش داوری مبتنی بر مدل تلفیق فازی در منطقه آبگرم قزوین (اولویت‌های تراورتن‌زایی در نقشه: مناطق قرمز رنگ با مقدار ۱ از بیشترین احتمال تراورتن‌زایی برخوردارند. با کاهش مقدار به سمت صفر نیز احتمال وجود تراورتن در مناطق مربوط کاهش می‌یابد به طوری که مناطق سبز رنگ با مقدار ۰/۱ کمترین احتمال را برای تراورتن‌زایی دارند. به طور خاص سه اولویت نخست برای بررسی‌های بیشتر معرفی می‌شوند.)



شکل ۱۶: نمونه برداری و ارزیابی مدل پیش داوری فازی از حومه شهر آبگرم استان قزوین (A): رخنمون تراورتن با آثار فراوانی از کانی های اکسید و سیلیس، B: نتایج آنالیز پراش رونتگن از نمونه تراورتن آبگرم، C: کانی شناختی نمونه ارسال شده به آزمایشگاه پراش رونتگن

تراورتن در بخش‌های متعددی از منطقه آبگرم شناسایی شدند که اطمینان لازم را برای توجیه اقدامات بعدی و ادامه فعالیت‌های اکتشافی در فاز تفصیلی به دست می‌دهد. به همین دلیل نمونه‌برداری و بررسی‌های زمینی در منطقه مورد بررسی (با تاکید بر اولویت‌های شکل ۱۵)، به همراه مغزه‌گیری از گمانه‌های اکتشافی و برداشت‌های ژئوفیزیکی سیستماتیک برای تسریع و تسهیل فازهای اکتشافی و ارزیابی هر چه دقیق‌تر از نواحی پیش‌بینی شده پیشنهاد می‌شود.

داوری منطقه آبگرم به واسطه استفاده از منطق فازی، موجب شناسایی پتانسیل‌های تراورتن به صورت دقیق و جزئی در این منطقه شده و نمونه‌برداری از واحدهای دگرسانی گرمایی را تسهیل کرده است (به طور خاص سه اولویت اول مشخص شده در شکل ۱۵ برای انجام مطالعات بعدی معرفی می‌شوند) که مطابق مندرجات شکل ۱۶، این قضیه در انجام عملیات تفصیلی موجب کاهش هزینه‌های مالی و زمان است. بر اساس روش ارائه شده در این تحقیق، آثاری از وجود

۶- مراجع

ایران، ص ۲۵۱.

- [12] Sabins, F. F. (2002). "Remote sensing principle and interpretation". W.H. Freeman & Company, New York, 3rd edition, pp. 494.
- [13] Vincent, R. K. (1993). "Fundamentals of Geological and Environmental Remote Sensing". Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Keith C. Clarke Editor, Bowling Green State University, Ohio, USA, 45-48.
- [14] 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.
- [15] 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, Bandung, Indonesia, 1: 62-68.
- [16] Bonham Carter, G. F. (1998). "Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS". Pergamon Press, Oxford, pp. 398.
- [۱۷] نوروزی، غ.ح؛ مهرنیا، س.ر؛ ۱۳۷۷؛ "کاربرد مغناطیس در اکتشاف زمین گرماییهای سریع، اردبیل". نشریه دانشکده فنی، تهران، دوره سی و یکم، شماره ۱، ص ۸۱-۷۱.
- [۱۸] زمردیان، ح؛ حاجب حسینی، ح؛ ۱۳۸۷؛ "ژئوفیزیک کاربردی". دوره ۱، انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ص ۶۸۹.
- [19] Baglio, S., Fortuna, L., Graziani, S., and Muscato, G. (1994). "Membership function shape and the dynamic behaviour of systems". Adaptive Control Signal Process, 8: 369-377.
- [1] Hedenquist, J. W. (2009). "The geochemistry of newly developed geothermal systems in Japan". Geochemical Journal, 25: 199-202.
- [2] Ferrier, G., White, K., Griffiths, G., Bryant, R., and Stefouli, M. (2001). "The mapping of hydrothermal alteration zones on the island of Lesbos, Greece using an integrated remote sensing dataset". International Journal of Remote Sensing, 14: 1-16.
- [3] Bodruddoza, M. D. and Fujimitsu, Y. (2012). "Mapping Hydrothermal Altered Mineral Deposit Using Landsat ETM+ Image in and Around Kuju Volcano, Kyushu, Japan". Journal of Earth System, 4: 1049-1057.
- [4] Ezzati, A., Mehrnia, R., and Ajayebi, K. (2014). "Detection of Hydrothermal Potential Zones Using Remote Sensing Sattelite Data in Ramand Region, Qazvin Province, Iran". Journal of Tethys, 2(2): 93-100.
- [5] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2017). "Union score and fuzzy logic mineral prospectivity mapping using discretized and continuous spatial evidence values". Journal of African Earth Sciences, 128: 47-60.
- [6] Almasi, A., Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2017). "Prospectivity analysis of orogenic gold deposits in Saqez-Sardasht Goldfield, Zagros Orogen, Iran". Ore Geology Reviews, 91: 1066-1080.
- [7] Yousefi, M., and Carranza, E. J. M. (2015). "Geometric average of spatial evidence data layers: a GIS-based multi-criteria decision-making approach to mineral prospectivity mapping". Computers & Geosciences, 83: 72-79.
- [8] 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". Proceeding of 5th Annual International Conference, New Delhi, India, 405-411.
- [9] Carranza, E. J. M., and Hale, M. (2001). "Geologically constrained fuzzy mapping of gold mineralization potential, Baguio district, Philippines". Natural Resources Research, 10: 125-136.
- [10] Eddy, B. G., Bonham-Carter, G. F., and Jefferson, C. W. (1995). "Mineral resource assessment of the Parry Islands, high Arctic, Canada: a GIS based fuzzy logic model". Proceeding of GIS Conference, Ottawa, Canada, 4-7.
- [۱۱] مهرنیا، س.ر؛ ۱۳۹۴؛ "منابع زمین گرمایی". نشر دانشگاه پیام نور،

^۱ geothermal^۲ hydrothermal^۳ Geographic Information System^۴ alteration^۵ prognostic map^۶ electromagnetic spectrums^۷ propylitic^۸ false color composite^۹ modified reflective spectrums

- ^{۱۰} Fuzzy logic
- ^{۱۱} random influence
- ^{۱۲} raster files
- ^{۱۳} vector Files
- ^{۱۴} contoured maps
- ^{۱۵} Buffering radius
- ^{۱۶} Neogene
- ^{۱۷} Quaternary
- ^{۱۸} Cenozoic