مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته

بهار ۹۱، شماره ۳، جلد ۱

پتانسیل یابی منابع زمین‌گرمایی استان آذربایجان شرقی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ با استفاده از GIS داده‌های زمین‌شناسی و اکتشافی در محیط

صبا کی‌نژاد، احمدرضا مختاری، نادر فتحیان‌پور، محمدرضا ایران نژادی

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۱/۱ تاریخ پذیرش: ۹۱/۳/۲۲

ar.mokhtari@cc.iut.ac.ir

Archive of SID

چکیده

در این پژوهش، نقشه توزیع مناطق دارای پتانسیل بالای زمین‌گرمایی در استان آذربایجان شرقی با استفاده از دو روش مختلف تلفیق داده ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، تهیه گردیده است. هدف از این مطالعه، معرفی مناطق دارای پتانسیل بالای زمین‌گرمایی در استان، جهت انجام فازهای بعدی در یک برنامه سیستماتیک اکتشافی می‌باشد. به این منظور، در ابتدا لایه‌های اطلاعاتی نشانگر وجود منابع زمین‌گرمایی در منطقه به عنوان شواهد اکتشافی، شناسایی و مطالعه شدند. سپس این لایه‌ها در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ در سه گروه زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و دورسنجی آماده و مورد پردازش قرار گرفتند.داده‌های موجود با استفاده از دو روش تلفیقی دانش محور بولین و هم‌پوشانی وزن‌دار تلفیق و نتایج حاصل مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج به دست آمده، مناطق دارای پتانسیل بالا جهت انجام مراحل بعدی اکتشاف را مشخص نمود. این مناطق که درصد بسیار کمی از استان را در بر می‌گیرند، با یکدیگر و با شواهد زمینی موجود به خوبی همخوانی دارند. بر اساس مطالعات آماری انجام گرفته بر روی نتایج حاصل از دو روش تلفیق به کار گرفته شده و لایه واقعیت زمینی چشمه های آبگرم شناخته شده، روش بولین ۱۰۰ درصد سطح لایه واقعیت زمینی را در پوشش می‌دهد در حالیکه این سطح پوشش در مورد روش هم‌پوشانی وزن‌دار به ۸۱/۳٪ می‌رسد که این کاهش ناشی از انعطاف پذیری بالاتر این روش نسبت به مدل بولین و کارآیی بیشتر این مدل در شرایط کمبود داده و وجود عدم قطعیت در داده ها می‌باشد.

واژگان کلیدی: *پتانسیل منابع زمین‌گرمایی، آذربایجان شرقی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تلفیق داده‌ها، مدل‌های داده و دانش محور*

مقدمه

انرژی زمین‌گرمایی بخشی از انرژی حرارتی زمین است که می‌تواند مورد استفاده و بهره برداری قرار گیرد. این انرژی، حرارت داخلی زمین است که به وسیله یک سیال مانند بخار یا آب داغ یا هر دو به سطح زمین انتقال می‌یابد. در بعضی نقاط، فعالیت‌های تکتونیکی باعث جاری شدن گدازه‌های داغ یا مذاب به سمت سطح‌زمین و در نهایت تشکیل منابعی با درجه حرارت بالا در سطح قابل دسترس از زمین می‌شود. این انرژی در امتداد مرزهای صفحات تکتونیکی، در نواحی شناخته شده آتشفشانی و زلزله‌خیز که دارای شکستگی‌ها و گسل‌های فراوانی هستند، از تمرکز بیشتری برخوردار است (Huenges, 2009). یافتن مناطق امیدبخش از نقطه نظر زمین‌گرمایی در ایران از سال ۱۳۵۴ آغاز شد و تا سال ۱۳۷۸، چهارده منطقه امیدبخش در رابطه با نقاط آتشفشانی کشف شد. پس از مطالعات دقیق‌تر در سال ۱۳۸۷، جمعاً ۱۸ نقطه در شمال غرب، مرکز، جنوب، شرق و جنوب‌شرقی ایران به عنوان مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی، جهت انجام مطالعات و بررسی‌های بیشتر به ثبت رسیدند (Yousefi et al., 2010). یافتن این‌گونه مناطق مستعد، پس از یک ارزیابی کلی و با حذف نواحی کم اهمیت در مراحل اکتشافی پی‌درپی صورت می‌گیرد. در حقیقت عملیات اکتشاف منابع زمین‌گرمایی همانند اکتشاف منابع معدنی، فرآیندی است گام به گام که با اتمام هر مرحله‌ی اکتشافی، محدوده‌ی مورد اکتشاف کوچک‌تر شده و عملیات مرحله‌ی بعد در مناطق با پتانسیل بالاتر

www.SID.ir

و با استفاده از روش‌ها و ابزارهای دقیق‌تر انجام می‌پذیرد. استفاده از منابع زمین‌گرمایی، سابقه‌ای تاریخی دارد به گونه‌ای که استفاده‌ی مستقیم از چشمه‌های آب گرم به دوران پارینه سنگی (Cataldi, 2009) و اکتشاف منابع زمین‌گرمایی به منظور بهره برداری از انرژی گرمایی آن در تبدیل به انرژی الکتریکی به ابتدای قرن بیستم در ایتالیا برمی‌گردد (نوراللهی و همکاران، ۱۳۷۷). استفاده از یک سیستم اطلاعات جغرافیایی[1] (GIS) به عنوان یک ابزار قدرتمند در پردازش و تفسیر داده‌های علوم زمین، به ویژه در امر اکتشاف، در پردازش و ارزیابی دقیق و کاهش خطاهای انسانی بسیار سودمند می‌باشد. در حقیقت استفاده از این رویکرد در اکتشاف منابع معدنی، از طریق جمع آوری لایه‌های اطلاعاتی مرتبط با روش‌های اکتشافی مختلف، با موفقیت مورد استفاده‌ی متخصصان علوم زمین قرار گرفته است. بونهام کارتر و دیگران (۱۹۸۸)، اگتربرگ (۱۹۸۹)، کاتز (۱۹۹۱)، چونگ و دیگران (۱۹۹۲) از جمله کسانی هستند که از GIS جهت تعیین مناطق مطلوب کانی‌زایی و تصمیم‌گیری در رابطه با مراحل اکتشافی بعدی استفاده نمودند (Bonham-Carter et al., 1988; Agterberg, 1989; Katz, 1991; Chung et al., 1992). با توجه به وجود پتانسیل بالای زمین‌گرمایی در استان آذربایجان شرقی (Yousefi et al., 2010)، در این پژوهش سعی بر این است تا با بررسی دقیق این منطقه و شناسایی عوامل کلیدی مرتبط با تشکیل ذخایر زمین‌گرمایی در آن، لایه‌های اطلاعاتی مربوطه تهیه و پردازش گردند. با تلفیق این لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از روش‌های متفاوت در محیط GIS می‌توان مناطق مستعد جهت بهره‌برداری از انرژی زمین‌گرمایی را مشخص نمود.

شواهد سطحی منابع زمین‌گرمایی در اکتشاف

ولکانیسم و توده‌های نفوذی

در استان آذربایجان شرقی آتشفشان سهند با گسترش جانبی وسیع خود عمدتاً از جنس گدازه‌های ریولیتی، داسیتی و آندزیتی تشکیل شده که در بین آن‌ها توف‌ها و خاکسترهای فراوان دیده می‌شود. وجود خاکستر با قطعات پامیس در فواصل بسیار دور از قله (مراغه، میانه، بستان آباد) نشان می‌دهد که فوران‌های انفجاری سهند بسیار شدید بوده است (آقانباتی، ۱۳۸۳).

تکتونیک

گسل‌ها و شکستگی‌ها به عنوان عامل اصلی انتقال سیالات زیر سطحی هیدروترمال در میادین زمین‌گرمایی، از مراحل اولیه‌ی اکتشاف تا آخرین مراحل بهره برداری مورد توجه متخصصان علوم زمین قرار می‌گیرد. در حقیقت، آگاهی از نقش گسل‌ها در کنترل جریان سیالات زیر سطحی، یکی از کلیدهای تشخیص مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی می‌باشد. علاوه بر نقش گسل‌ها در انتقال سیالات هیدروترمال به سطح، ارتباط مستقیم آن‌ها با فعالیت‌های تکتونیکی منطقه نیز از دیگر دلایل اهمیت ویژه‌ی گسل‌ها در اکتشافات زمین‌گرمایی می‌باشد.

آلتراسیونهای مرتبط با فرایند زمین‌گرمایی

رسوب‌گذاری کانی‌های حاصله از فعالیت چشمه‌های آب گرم (کانی‌های رسی یا سولفیدی و تشکیل اکسیدهای آهن) در بسیاری از مناطق زمین‌گرمایی قابل مشاهده می‌باشند. رخنمون‌های سطحی سنگ‌هایی که تحت تأثیر آلتراسیون قرار گرفته‌اند می‌توانند به عنوان معیاری از نظر وسعت و شدت عملکرد سیستم‌های زمین‌گرمایی در نظر گرفته شوند.

چشمه های آبگرم

چشمه‌های آب گرم از جمله شواهد سطحی هستند که وجود یک منبع گرمای زیر سطحی را تأیید می‌نمایند. از آنجا که شاخصه‌ی یک سنگ مخزن زمین‌گرمایی، تراوایی وتخلخل ناچیز می‌باشد، راهیابی سیالات هیدروترمال به سطح زمین مستلزم وجود شکستگی‌هایی در سنگ مخزن می‌باشد

سنگ‌های تراورتن

تراورتن نوعی از سنگ آهک است که در چشمه‌های غنی از مواد معدنی و به ویژه چشمه‌های آب گرم مرتبط با انرژی زمین گرمایی شکل می‌گیرد (Coolbaugh et al., 2009). نهشته‌های تراورتن از بارزترین شواهد سطحی در اکتشافات منابع زمین‌گرمایی به شمار می‌روند. در نقشه‌های زمین شناسی مورد مطالعه، سنگ‌های تراورتن در شمال و شرق ارومیه وجود دارد که به دلیل اهمیت آن، به عنوان یکی از نشانه‌های اکتشافی در لایه‌ی لیتولوژی در نظر گرفته شد.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی استان آذربایجان شرقی

از دیدگاه زمین‌شناسی ساختمانی و بر اساس تقسیم بندی‌های انجام شده استان آذربایجان شرقی از دو بخش ساختاری تشکیل گردیده است. بخش غربی و جنوب غربی آن دنباله‌ی پلاتفرم پالئوزوئیک ایران مرکزی و البرز غربی است. این بخش شامل کوه‌های بزگوش- سهند و ارتفاعات شمال تبریز (کوه‌های میشو و مرو) و ارتفاعات غرب جلفا است. بخش شمال شرق آذربایجان ظاهراً فاقد رخساره‌های پلاتفرمی پالئوزوئیک شبیه سایر قسمت‌های ایران بوده و رخساره‌های فلیش مزوزوئیک در آن گستردگی زیادی داشته و در بخشی نیز رخساره رسوبات ترشیر از ویژگی خاصی برخوردار است. این بخش، حوضه‌ی رسوبی دشت مغان و ارتفاعات اطراف اهر و خروانق را تشکیل می‌دهد. سنگ‌ها و سازندهای دوران دیرینه زیستی بیشتر از انواع سنگ‌های رسوبی و آذرین از نوع درونی هستند که تقریباً در تمامی کوه‌های این استان به ویژه کوه‌های مروداغی و میشو داغی، صوفیان و بخش‌هایی از شمال مرند و غیره دیده می‌شوند. سنگ‌ها و سازندهای زمان میانه زیستی نیز بیشتر رسوبی هستند. در

1-Geographic Information System

Archive of SID
www.SID.ir

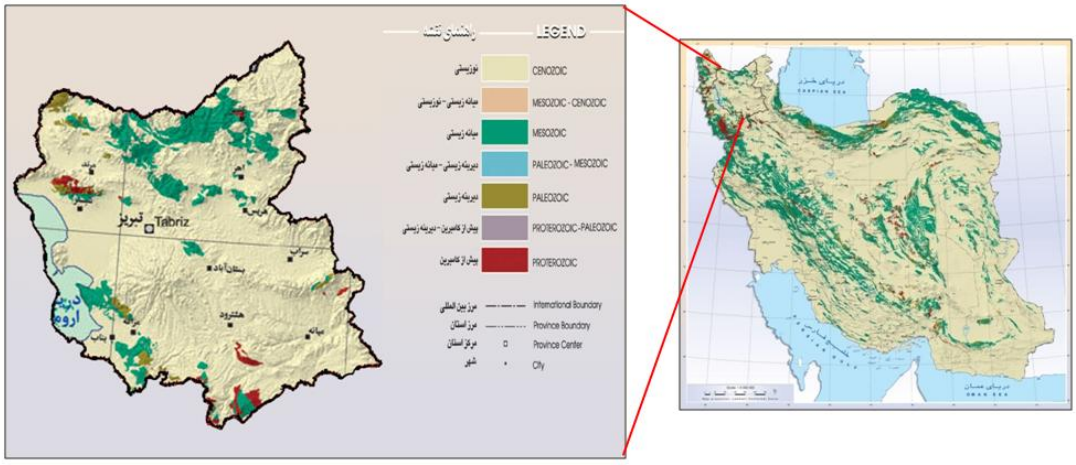
دوران نوزیستی سنگ‌های آذرین (درونی و بیرونی) به‌ویژه بیرونی و آذر آواری مانند انواع توف‌ها و برش‌های ولکانیکی پهنه‌های وسیعی از این استان را زیر پوشش دارند (آقانباتی، ۱۳۸۳). توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی، که از شاخصه‌های اصلی وجود پتانسیل زمین‌گرمایی می‌باشند، سطح وسیعی از استان را به خود اختصاص می‌دهند که در این میان سنگ‌های آتشفشانی حد واسط ائوسن تا میوسن از بیشترین سهم برخوردارند (شکل ۱).

تولید لایه‌های اطلاعاتی شاهد

استفاده از یک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، یکی از سودمندترین ابزارهای تصمیم‌گیری در پتانسیل‌یابی میادین زمین‌گرمایی می‌باشد. این ابزار بر اساس همراهی و همبستگی مکانی و نیز اهمیت عوامل کلیدی در تشکیل یک ذخیره زمین‌گرمایی، مناطق امیدبخش را در هر مرحله از عملیات اکتشافی محدودتر کرده تا در نهایت نقاط مناسب جهت حفاری چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری مشخص شوند. از مهم‌ترین ویژگی‌های این سیستم، قابلیت آن در پردازش حجم انبوهی از داده‌ها و جلوگیری از وقوع خطاهای انسانی در تهیه‌ی نقشه‌های مختلف از داده‌های مکانی است (Yousefi et al., 2007). پیش‌نیاز اصلی به کارگیری این ابزار، تهیه، پردازش و تفسیر لایه‌های اکتشافی متناسب با منطقه و هدف مورد مطالعه است. این لایه‌ها عبارتند از کلیدهای اکتشافی حاصل از مطالعات زمین‌شناسی، برداشت‌های زمین‌شیمیایی، زمین‌فیزیکی و دورسنجی که با توجه به شرایط منطقه‌ی مورد مطالعه، بودجه و امکانات در دسترس و تحت نظر افراد کارشناس تعیین می‌گردند. لایه‌های اطلاعاتی این مطالعه در سه گروه زمین شناسی، ژئوفیزیک و دورسنجی قرار می‌گیرند که هریک شامل چند زیر مجموعه بشرح زیر می‌باشند. بررسی، تلفیق و سایر عملیات بر روی لایه‌های رستری در محیط نرم‌افزار Arc GIS 9.3 انجام گرفت.

داده‌های زمین‌شناسی

مطالعات زمین شناسی نه تنها جهت شناسایی پتانسیل منطقه و بهره برداری و توسعه‌ی مخازن زمین‌گرمایی دارای کاربرد می‌باشد، بلکه در پردازش و تفسیر نتایج حاصل از کاربرد سایر روش‌های اکتشافی نیز نقش به‌سزایی را ایفا می‌نمایند. شناسایی مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی از طریق مشاهدات زمین شناسی در اولین مراحل اکتشاف، با بررسی شاخصه‌هایی همچون ولکانیسم منطقه (سن و شدت فعالیت)، سنگ‌های آذرین و گسل‌ها و شکستگی‌ها صورت می‌پذیرد. بیشتر شاخصه‌های زمین شناختی کنترل کننده و در رابطه با یکدیگر می‌باشند. به عنوان مثال از تلفیق نقشه‌ی گسل‌های فعال ایران با گستره‌ی برونزدهای سنگ‌های آذرین ائوسن و کواترنری (اعم از ولکانیک یا پلوتونیک)، می‌توان دریافت که اغلب این سنگ‌های آذرین توسط گسل‌های فعال کنترل می‌شوند به نحوی که در بسیاری نقاط می‌توان مجموعه‌های ولکانیک و پلوتونیک را در امتداد گسل‌های فعال پیگیری نمود. نکته‌ی جالب توجه این است که در بسیاری از نقاط، پراکندگی چشمه‌های آب گرم نیز با این روند همخوانی دارد (نوراللهی و همکاران، ۱۳۷۷). در این پژوهش، داده‌های زمین شناسی استان آذربایجان شرقی، مشتمل بر سه لایه‌ی اطلاعاتی واحدهای سنگی، گسل‌ها، و مراکز آتشفشانی می‌باشدکه با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی استان در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ تهیه شده‌اند. در تمامی موارد، شعاع تأثیر و یا شعاع جستجو در محاسبه چگالی، بر پایه‌ی واحد اندازه سلولی به کار رفته (۲۵۰ متر) اعمال گشته‌اند (Raines and Bonham-Carter, 2006).



شکل ۱. موقعیت جغرافیائی و زمین شناسی محدوده ی مورد مطالعه

Archive of SID
www.SID.ir

داده‌های ژئوفیزیک

کاربرد اصلی روش‌ها و بررسی‌های ژئوفیزیکی در امور مربوط به اکتشاف انرژی زمین گرمایی، طرح و توصیف میدان‌های زمین‌گرمایی و تعیین مکان‌های مناسب جهت حفاری‌های مختلف می‌باشد که بوسیله آن می توان سیالات داغ را مورد بررسی و بهره برداری قرار داد. معمولاً در بررسی‌های اکتشافی چندین تکنیک متفاوت ژئوفیزیکی به کار گرفته می‌شوند و تلفیق روش‌های مختلف موجب افزایش ضریب اطمینان در مشخص نمودن یک هدف می‌گردد (نوراللهی و همکاران، ۱۳۷۷). با توجه به توانایی روش‌های ژئوفیزیکی در آشکارسازی و تعیین ابعاد و موقعیت نهشته‌ها و ساختارهای مدفون و غیر قابل رویت، اکتشاف منابع زمین گرمایی بدون انجام مطالعات ژئوفیزیکی، پرهزینه، گمراه کننده و حتی بی‌نتیجه خواهد بود. به طوری که امروزه در اکتشافات منابع زمین گرمایی، هیچ چاه اکتشافی و یا بهره‌برداری در میادین زمین‌گرمایی، پیش از بررسی‌های مفصل ژئوفیزیکی حفر نمی‌گردد (نوراللهی و همکاران، ۱۳۷۷). در این پژوهش، داده‌های ژئوفیزیکی مغناطیسی و لرزه‌ای، پس از انجام پردازش‌های مورد نیاز، مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته و نهایتاً با سایر داده‌ها تلفیق گشتند.

داده‌های مغناطیس سنجی هوابرد

از روش مغناطیس سنجی به فراوانی در اکتشافات زمین گرمایی و پی‌جویی استفاده می‌گردد زیرا بیشتر منابع زمین‌گرمایی در نواحی فعال تکتونیکی قرار دارند و در این نواحی، فعالیت‌های گسترده آذرین درونی و بیرونی سبب ایجاد ناهنجاری‌های مغناطیسی مشخص و قابل تمایز در میدان مغناطیسی می‌گردد (نوراللهی و همکاران، ۱۳۷۷). به همین دلیل اصلی‌ترین هدف پی‌جویی‌های مغناطیسی در اکتشافات زمین‌گرمایی، تعیین پراکندگی جانبی و عمقی توده‌های آذرین نفوذی در منطقه می‌باشد. امروزه استفاده از روش مغناطیس سنجی هوایی به اندازه‌ای گسترش یافته است که در ابتدای هر مطالعه‌ی ژئوفیزیکی اکتشافی به عنوان روش صحرایی راهنما مورد بحث قرار می‌گیرد. در ایران سازمان زمین‌شناسی کشور متولی تهیه‌ی داده‌ها و نقشه‌های مغناطیس سنجی هوایی است که نتایج این مطالعات به صورت نقشه‌های سراسری با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ در دسترس محققین و پژوهشگران می‌باشد. در این پژوهش تنها از داده‌های مغناطیس هوابرد استان آذربایجان شرقی در دسترس در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ استفاده شده است. بین سال‌های ۱۳۵۵ و ۱۳۵۳ میلادی دو برداشت مغناطیس هوابرد با حساسیت بالا (یک نانوتسلا) توسط شرکت ایروسرویس (Aero Service Houston, Texas) برای سازمان زمین شناسی صورت گرفته است که در مجموع بیشترین قسمت‌های ایران را تحت پوشش قرار می‌دهد.

داده‌های لرزه‌ای

زمین لرزه‌ها یکی دیگر از پدیده‌هایی هستند که برای اکتشافات زمین‌گرمایی می‌توانند به عنوان راهنمایی مفید در جهت پی بردن به مناطق مستعد مورد بررسی قرار گیرند. هر زمین لرزه دارای یک مرکز رهایی یا آزاد شدن انرژی به نام کانون ژرفی است که نزدیکترین نقطه‌ی سطح زمین به این مرکز را مرکز سطحی زمین لرزه می‌نامند. از جمله عوامل وقوع زمین لرزه‌ها، فعالیت‌های آتشفشانی و یا تکتونیکی می‌باشند (نوراللهی و همکاران، ۱۳۷۷). داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده، از نتایج ثبت شده توسط شبکه لرزه نگاری کشور و داده های ثبت شده جهانی (دستگاهی و تاریخی (قبل از ۱۹۰۰ میلادی)) به دست آمده‌اند. شبکه لرزه نگاری کشوری از سال ۱۳۴۷ با افتتاح موسسه ژئوفیزیک آغاز به کار نموده است و تا کنون ۶۷ ایستگاه راه اندازی شده است. لرزه نگارها دستگاه‌های بسیار حساسی هستند که قادرند حرکات فوق العاده ضعیف زمین ناشی از زمین‌لرزه ها را با حساسیت زیاد ثبت کنند. نسل جدید دستگاه های لرزه نگار از سال۱۳۵۴ آغاز به کار نمودند که دارای دقت بالاتری نسبت به داده های نسل قدیمی تر می باشند.

دورسنجی

یکی از معمول‌ترین کاربردهای سنجش از دور در تشخیص ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه مانند تشخیص واحدهای سنگی و آلتراسیون‌هاست. در مناطق زمین‌گرمایی واکنش بین سنگ‌های موجود در یک میدان آب گرم یا بخار منجر به یک سری تحولات و تغییرات نظیر تبلور مجدد، انحلال و رسوبگذاری در مقیاس موضعی و یا ناحیه‌ای می‌شود که به این تغییرات دگرسانی گرمابی (هیدروترمال) اطلاق می‌شود.در این مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌ی ETM^+ ماهواره‌ی Landsat 7 استفاده شده است. قدرت تفکیک طیفی و مکانی و ابعاد منظر سنجنده ETM^+ برای مطالعه‌ی آنومالی حرارتی و بررسی اولیه‌ی آلتراسیون‌های هیدروترمال و اکسیدهای آهن، در مقیاس پی‌جویی در سطح استان آذربایجان شرقی، از دلایل انتخاب این سنجنده جهت انجام مطالعات دورسنجی می‌باشد. داده‌های سنجش از دور ETM^+توسط ماهواره لندست ۷ برداشت می‌شود و دارای هشت باند است که باند شش دارای دقت سلولی ۶۰ متری و باند هشت (پانکروماتیک) دارای دقت سلولی ۱۵ متری است و بقیه باندها دقت سلولی ۳۰ متری دارند (علیزاده ربیعی، ۱۳۸۰). داده‌های دورسنجی، با هدف دستیابی به سه لایه‌ی اطلاعاتی آلتراسیون هیدروترمال، اکسیدهای آهن و دمای سطحی در محیط ENVI 4.3 مورد پردازش قرار گرفتند. پیش از انجام پردازش بر روی داده‌های دورسنجی تصحیحات هندسی، توپوگرافی و اتمسفری بروشهای متداول شامل تفریق جسم سیاه (DO)، حذف نسبت باندی، آنالیز مولفه های اصلی و برازش حداقل مربعات بر تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

پردازش داده‌ها

واحدهای سنگی

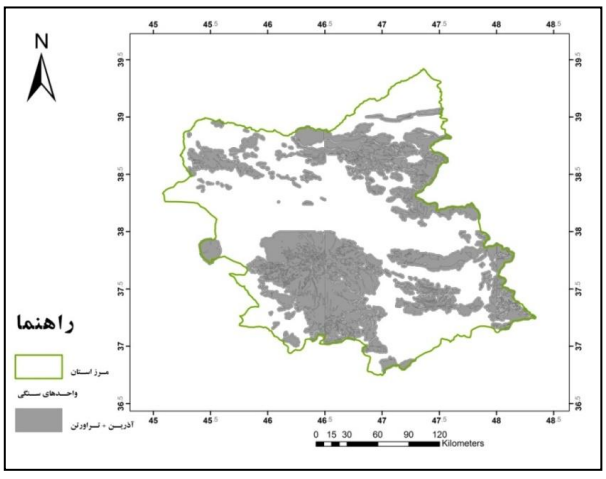
وجود سنگ‌های آتشفشانی در منطقه، به عنوان دلیلی بر افزایش احتمال وجود منابع زمین‌گرمایی محسوب می‌گردد (Yousefi et al., 2007). از طرف دیگر، شکل گیری سنگ تراورتن، از بارزترین نشانه‌های وجود فعالیت هیدروترمال می‌باشد که در اکثر مناطق دارای چشمه‌های آب گرم، رخ می‌دهد (Sundhoro et al., 2010). با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ استان، سنگ‌های آذرین درونی و بیرونی مربوط به دوران ائوسن تا عهد حاضر و سنگ‌های تراورتن که در دوران کواترنری شکل گرفته‌اند، رقومی شده و پس از ترسیم چهار شعاع تأثیر ۲۵۰ متری (بدلیل قدرت تفکیک نقشه های زمین شناسی در دسترس در مقیاس استان)، به صورت رستر آماده گشتند. سنگ‌های آذرین بر اساس جنس (اسیدی، بازی و حد واسط) و سن (کواترنری و پیش از آن)، که هریک دارای ارزش متفاوتی در شناسایی منابع زمین‌گرمایی یک منطقه می‌باشند، تفکیک گشتند. در شکل (۲) ، تصویر نهایی آماده شده به صورت رستر آورده شده است.

مراکز آتشفشانی

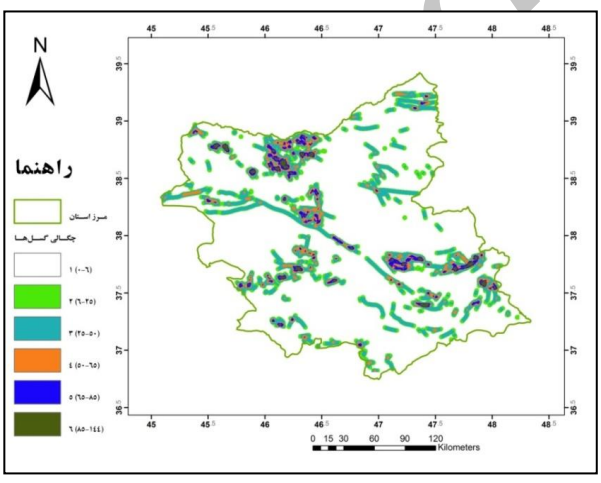
کالدراها و کراترها از نشانه‌های مستقیم وجود منبع گرما (اتاقک ماگمایی) در نزدیکی سطح و یا راه یافته به سطح می‌باشند و با توجه به نحوه‌ی شکل گیری آن‌ها، می‌توان دریافت منطقه شاهد فعالیت‌های شدید آتشفشانی در دوران شکل گیری و فعالیت این مراکز بوده است. بر اساس نقشه‌های تهیه شده، جمعاً ۲۹ مرکز آتشفشانی در استان آذربایجان شرقی وجود دارد که ۹ عدد از آن‌ها کالدرا و ۲۰ عدد کراترهای آتشفشانی‌اند. پس از رقومی سازی داده‌های این لایه، شعاع تأثیری به فاصله‌ی ۲۰۰۰ متر (بدلیل قدرت تفکیک نقشه های زمین شناسی در دسترس در مقیاس استان)، برای هریک رسم گردیده و سپس به صورت رستر و به عنوان لایه‌ی اعتبار سنجی مورد استفاده قرار گرفتند.

گسل‌ها

اصلی‌ترین گسل این منطقه در استان آذربایجان شرقی گسل تبریز نام دارد که دارای حالت ترکیبی می‌باشد، بدین معنا که خود از به هم پیوستن چند گسل دیگر تشکیل شده است. آخرین حرکت این گسل از نوع راست‌گرد بوده و طول آن از جنوب ابهر تا کوه آرارات بیش از ۶۰۰ کیلومتر است. حرکات و جا به جایی گسل تبریز در فوران‌های آتشفشانی پلیو-کواترنر سهند تاثیر داشته بدنبال آن چشمه‌های آب گرم بستان آباد بوجود آمده است (درویش زاده، ۱۳۷۰). با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی استان آذربایجان شرقی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰، گسل‌های موجود اعم از اصلی و فرعی، به صورت خطوط شکسته رقومی گشتند. با توجه به تأثیر گسل‌ها به عنوان عامل اصلی ایجاد تخلخل و تراوایی در میادین زمین‌گرمایی در مقیاس ناحیه‌ای، از معیار تراکم و چگالی گسل‌های منطقه استفاده شد. بدین ترتیب تأثیر پذیری هر پیکسل تصویر از گسل‌هایی در شعاع جستجوی ۲۰۰۰ متری تعیین گردیده است. تصویر رستر نهایی بر اساس میزان تراکم گسل‌ها کلاسه بندی و آماده‌ی تلفیق گشت (شکل ۳).



شکل ۲. تصویر رستر نهایی واحدهای سنگی



شکل ۳. تصویر رستر نهایی چگالی گسل‌ها

www.SID.ir
Archive of SID

شواهد مغناطیسی

داده‌های مغناطیسی پس از برش در محدوده مرز استان آذربایجان شرقی در محیط GIS، جهت تعیین پراکندگی جانبی و عمقی در محیط نرم افزار Geosoft, Oasis Montaj 6.4.2 مورد پردازش قرار گرفتند.

سیگنال تحلیلی

یکی از اهداف در تفسیر داده‌های مغناطیسی، ساده سازی نتایج حاصل از این داده‌هاست به طوری که نقشه‌ی حاصل از پردازش داده‌ها، به سادگی نمایشگر شدت میدان مغناطیسی توده‌ها به عنوان تابعی از خاصیت مغناطیسی توده باشد. تصویر حاصل از پردازش داده‌ها توسط سیگنال تحلیلی، مستقل از جهت مغناطیدگی و به مرکزیت توده‌ی آنومالی خواهد بود و شدت آن بر روی کنتاکت توده‌های مغناطیسی دارای مقدار بیشینه می‌گردد (Macleod et al., 1994).

دکانوولوشن اویلر

در این روش با انتخاب یک پنجره با پهنای مناسب روی داده ها و حرکت این پنجره روی شبکه، جواب‌های معادله اویلر را برای هر پنجره به دست می‌آوریم (El Dawi et al., 2004; Dewangan et al., 2007). داده‌های مغناطیس باقیمانده استان آذربایجان شرقی، پس از آماده‌سازی به فرم شبکه ای، توسط روش دکانوولوشن اویلر مورد پردازش قرار گرفت و بدین ترتیب عمق و پراکندگی جانبی توده‌های نفوذی جوان به صورت نقشه‌هایی به فرم رستر آماده‌ی تلفیق گردید (اشکال ۴ و ۵).

داده‌های لرزه‌ای

داده‌های لرزه‌ای مورد استفاده در این مطالعه، زمین لرزه‌های طبیعی رخ داده در منطقه هستند. این لرزه‌ها که به عنوان زمین لرزه‌های دستگاهی شناخته می‌شوند، توسط دستگاه‌های لرزه نگار و از سال ۱۹۰۰ تا به امروز ثبت شده‌اند. مراکز سطحی این لرزه‌ها در محیط GIS به مرز استان آذربایجان شرقی محدود گشته و بر اساس مطالعات آماری صورت گرفته، مقادیر شدت لرزه‌ای کمتر از ۴، به عنوان ریز لرزه‌هایی که در ارتباط با هدایت گرما در فرآیندهای هیدروترمال می‌باشند، پس از محاسبه‌ی چگالی نقطه‌ای با شعاع جستجوی ۵۰۰۰ متری (بدلیل دقت پائین موقعیت مکانی داده های لرزه‌ای و بویژه بخش تاریخی آن)، و کلاسه بندی، به فرم رستر تبدیل گشتند (شکل ۶).

دورسنجی

دگرسانی هیدروترمال و اکسیدهای آهن

برای تعیین مناطق تحت تأثیر آلتراسیون هیدروترمال، تکنیک‌های نسبت باندی، آنالیز مؤلفه‌ی اصلی و برازش حداقل مربعات بر روی داده‌های منطقه اعمال گشتند که با مقایسه با مناطق شاهد، مشخص شد که روش برازش حداقل مربعات از صحت بیشتری نسبت به دو روش دیگر برخوردار می‌باشد. با توجه به اختلاف ناچیز میان نتایج حاصل از پردازش مؤلفه‌ی اصلی و برازش حداقل مربعات در مورد اکسیدهای آهن، در این مورد نیز روش اخیر مورد استفاده قرار گرفت (اشکال ۷ تا ۱۰). تکنیک برازش کمترین مربعات از کوواریانس داده‌های ورودی برای تخمین باند انتخابی (باند شاخص آنومالی مورد نظر)، به عنوان ترکیبی خطی از باندهای تخمین‌گر جهت تعیین مناطق دارای آنومالی استفاده می‌نماید. تفاوت (باقیمانده) میان باند اصلی و باند مدل شده، محاسبه شده و به عنوان تصویر نمایش داده می‌شود. پیکسل‌های نمایشگر بیشترین اختلاف (مثبت و یا منفی)، نشانه‌ی وجود خصوصیات پیش بینی نشده یا همان آنومالی می‌باشند. نتایج حاصل از این پردازش‌ها در نهایت به صورت رستر آماده و کلاسه بندی گشتند.

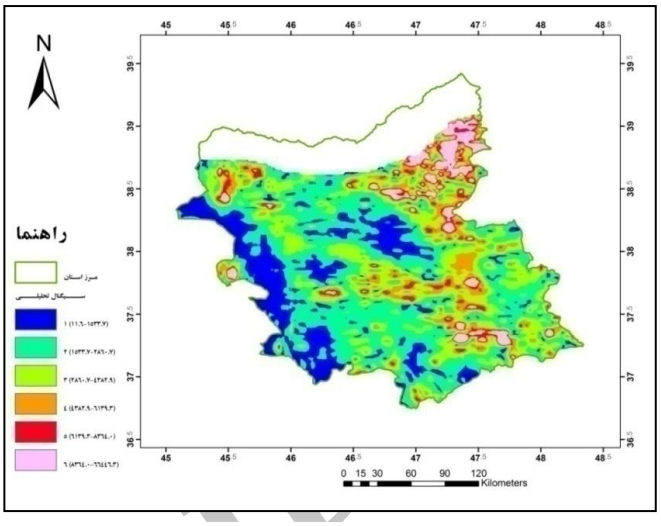
دمای سطحی

تخمین دمای سطح زمین از باند حرارتی، بر اساس تئوری جسم سیاه بنا نهاده شده است که در آن طبق قانون پلانک، دمای سطح زمین با استفاده از بازتابش امواج الکترومغناطیس از زمین قابل محاسبه خواهد بود (Qin et al., 2011). با استفاده از باند حرارتی سنجنده‌ی ETM^{+}، دمای سطح زمین به دست آمده و تصویر نهایی به فرم رستر تبدیل و پس از کلاسه بندی شدن آماده‌ی تلفیق گشت (اشکال ۱۱ و ۱۲). با توجه به زمان ثبت تصاویر ماهواره‌ای پنج منظر (۲۰۰۱/۶/۱۵، ۲۰۰۰/۸/۳۲، ۲۰۰۰/۶/۶، ۲۰۰۰/۶/۵، ۲۰۰۰/۶/۳) که همگی در روز برداشت شده اند، وجود تفاوت دمایی ناشی از تغییر فصل در داده‌ها وجود نخواهد داشت.

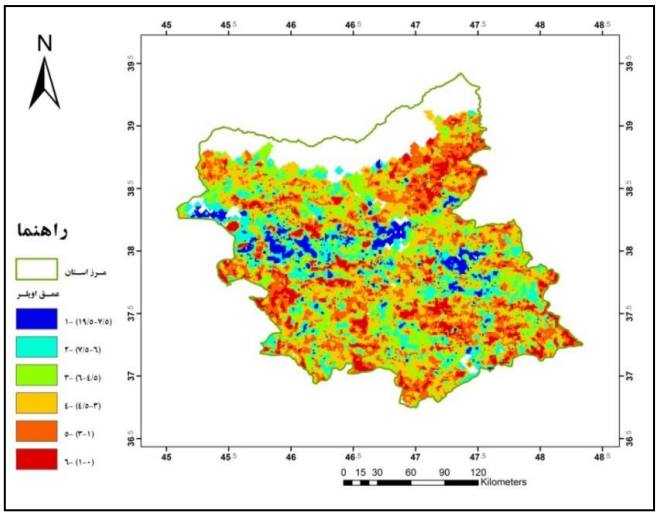
تلفیق لایه‌های شاهد

مطالعه و بررسی نتایج هریک از روش‌های اکتشافی به تنهایی، قادر به روشن نمودن بخشی از ویژگی‌های هدف اکتشافی خواهد بود و چنانچه این مطالعات با نگاهی جامع به تمامی نتایج حاصله انجام گیرد، تفاسیر و برآوردها با دقت و صحت بیشتری همراه خواهند بود. با این حال بهترین روش برای حذف خطاهای انسانی در برآورد تخمین‌های حاصل از روش‌های اکتشافی مختلف، تلفیق نتایج حاصل از پردازش این روش‌ها در قالب یک سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌باشد. روش‌های تلفیق در دو دسته‌ی کلی دانش محور و داده محور قابل دسته بندی می‌باشند. در مدل‌های داده محور، ارتباط مکانی بین داده‌های ورودی (نقشه شواهد) و موقعیت مکانی نهشته‌های شناخته شده، اهمیت هر لایه اطلاعاتی را مشخص می‌کند. در مراحل اولیه‌ی اکتشاف، روش‌های دانش محور از کارایی بیشتری برخوردار می‌باشد. در مراحل نهایی که تکنیک‌های اکتشافی و نتیجتاً نتایج حاصله دقت بالاتری دارند و بررسی‌ها در مقیاس وسیع‌تری انجام می‌پذیرند، استفاده از روش‌های داده‌محور مانند شبکه‌های عصبی از توجیه منطقی بیشتری برخوردار می‌باشد (Bonham-Carter, 1994). در این پژوهش از دو روش تلفیق مدل بولین و هم‌پوشانی وزن‌دار بعنوان روش‌های دانش محور استفاده شده است که در ادامه به توضیح هر روش و سپس نتایج به دست آمده از هر یک خواهیم پرداخت.

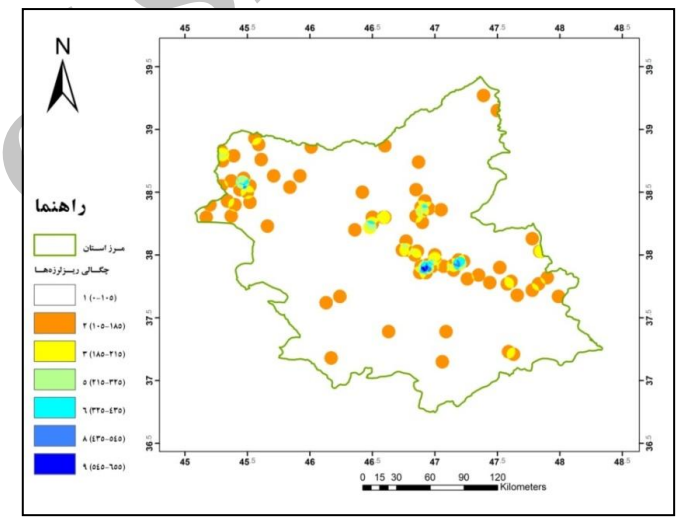
Archive of SID
www.SID.ir



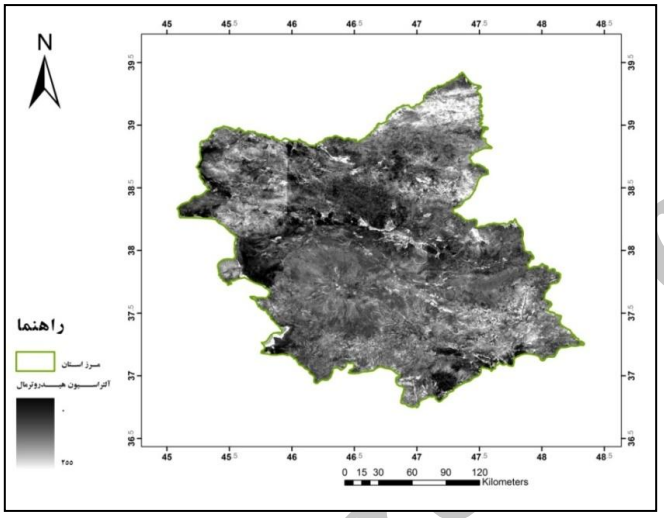
شکل ۴. تصویر رستر نهایی حاصل از پردازش سیگنال تحلیلی



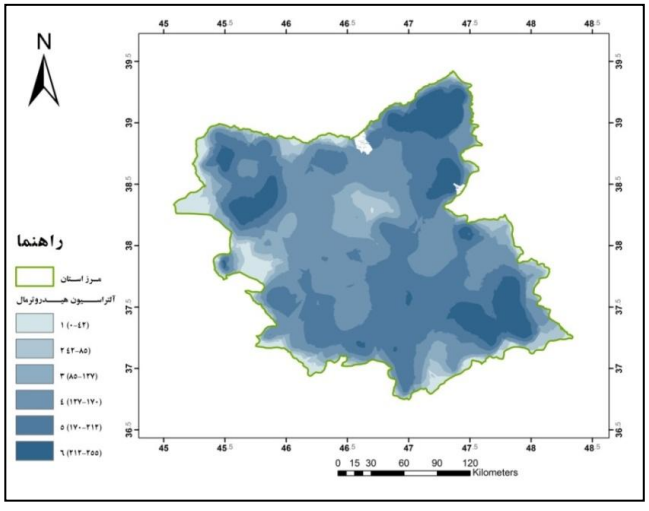
شکل ۵. تصویر رستر نهایی حاصل از دکانولوشن اویلر



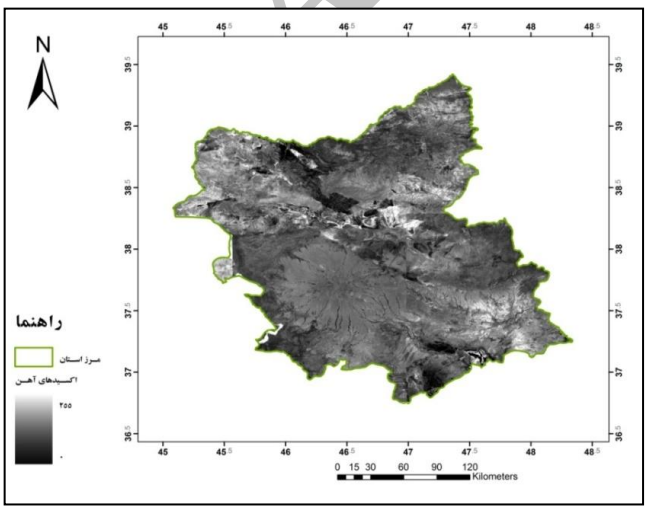
شکل ۶. تصویر رستر نهایی چگالی ریزلرزه‌ها



شکل ۷. دگرسانی گرمابی، تصویر ماهواره‌ای پس از پردازش



شکل ۸. دگرسانی گرمابی، تصویر رستر نهایی پس از کلاسه‌بندی



شکل ۹. اکسیدهای آهن، تصویر ماهواره‌ای پس از پردازش

www.SID.ir

مدل منطق بولین

در این مدل وزن‌دهی به واحدها در هر لایه اطلاعاتی بر اساس منطق صفر و یک است. یعنی در نقشه‌های پایه هر واحد از نظر مطلوبیت یا امتیاز صفر می‌گیرد و یا امتیاز یک و حد واسطی از لحاظ مطلوبیت وجود ندارد و در نقشه‌های نهایی و تلفیق‌یافته هر پیکسل یا مناسب و یا نامناسب تشخیص داده می‌شود. این مدل دارای دو عملگر AND و OR است. بر اساس نظریه مجموعه‌ها عملگر AND اشتراک و عملگر OR اجتماع مجموعه‌ها را استخراج می‌کند. عملگر OR به پیکسل‌هایی که فقط در یکی از نقشه‌های پایه مناسب بوده و ارزش یک داشته باشد، در نقشه خروجی و تلفیق‌یافته ارزش یک می‌دهد. در عملگر AND فقط پیکسل‌هایی که در همه نقشه‌های پایه ارزش یک داشته باشند، در نقشه نهایی ارزش یک خواهند داشت و جزء مناطق مناسب قرار می‌گیرند (Bonham-Carter, 1994). برای تعیین مناطق مساعد زمین شناسی در استان آذربایجان شرقی، شواهد آلتراسیون (آلتراسیون هیدروترمال و اکسید آهن) با استفاده از عملگر OR با یکدیگر ترکیب گشته و سپس از طریق عملگر AND با لایه‌ی اطلاعات لیتولوژی تلفیق گشتند. لایه‌ی به دست آمده در این مرحله با استفاده از عملگر OR، با لایه‌ی مغناطیسی حاصل از تلفیق نقشه‌های شاهد عمق و پراکندگی جانبی توده‌های نفوذی به وسیله‌ی عملگر AND ترکیب گشته و مناطقی با احتمال وجود اتاقک‌های ماگمایی فعال را مشخص نمودند. اضافه نمودن لایه‌ی آنومالی دمای سطحی از طریق عملگر OR در این مرحله، گستردگی موتورهای حرارتی زیر سطحی را مشخص می‌نماید. اجتماع لایه‌های چگالی گسل‌ها و چگالی ریز لرزه‌ها به وسیله‌ی عملگرOR، معیاری از مناطق مساعد ساختاری منطقه می‌باشد که در نهایت پس از تلفیق از طریق عملگر AND با لایه‌ی موتورهای حرارتی زیر سطحی، مناطق دارای پتانسیل زمین‌گرمایی را مشخص می‌نماید (شکل ۱۳). نتیجه‌ی حاصل از این تلفیق در شکل (۱۴) به نمایش گذاشته شده است. ۹۳٪ مراکز آتشفشانی ثبت شده در منطقه به عنوان نقاط موجود جهت صحت سنجی روش دارای همپوشانی با نتیجه‌ی به دست آمده از این روش می‌باشند. علاوه بر این، مدل بولین مورد محدوده‌ی مورد مطالعه را به ۲۵/۷٪ مساحت کل استان تقلیل داده است.

مدل هم پوشانی وزن‌دار

در این مدل علاوه بر وزن‌دهی به هر واحد در لایه‌های اطلاعاتی، به هر لایه اطلاعاتی نیز بر اساس اهمیت خود وزن خاصی داده می‌شود. محدوده وزن‌دهی به واحدها و لایه‌ها بستگی به نظر محقق دارد، نتیجه‌ی نهایی این مدل که از ابزارهای نیرومند در محیط GIS می‌باشد، ارزش هر پیکسل در نقطه خروجی مجموع ارزش پیکسل‌های لایه‌های ورودی در همان نقطه است که به نسبت ضریب اهمیت آن لایه افزایش یافته‌اند. این روش از حساسیت بیشتری نسبت به مدل بولین برخوردار است و بدلیل وزن‌دهی به هر لایه اطلاعاتی و هر واحد در هر نقشه، انعطاف‌پذیری و حساسیت بیشتری در مکان‌یابی نسبت به مدل قبلی دارد (Bonham-Carter, 1994).در این تحقیق کلاس‌های لایه‌ی سنگی، بر اساس کاهش اهمیت از تراورتن و اسیدی به حد واسط و بازیک به (تفکیک جنس)، باکلاس‌های همین لایه، بر اساس کاهش اهمیت از کواترنری به پیش از کواترنری (به تفکیک سن) وزن دهی شده و با استفاده از مدل تلفیقی هم‌پوشانی وزن‌دار، لایه‌ی واحدی را تشکیل دادند. توده‌های نفوذی کم عمق نیز از طریق اشتراک گیری از نتایج حاصل از پردازش داده‌های مغناطیسی به صورت لایه‌ی مغناطیسی تبدیل گشتند. پس از آن لایه‌های اطلاعاتی از پیش تعیین شده، بر اساس میزان اهمیت در اکتشاف منابع زمین‌گرمایی، به صورت جدول (۱) امتیازدهی گشتند. در هر نقشه نیز کلاس‌های مختلف بر اساس درجه‌ی اهمیت خود وزن دهی گشتند. بدین ترتیب توده‌های نفوذی با عمق کمتر و شدت مغناطیدگی بیشتر (بر اساس ارزش عددی سیگنال تحلیلی به عنوان معیاری از شدت) بیشترین وزن را گرفته و وزن کلاس‌های بعدی به صورت نزولی محاسبه گشت. لایه‌ی لیتولوژی نیز چنان‌که گفته شد، پیش‌تر بر اساس اهمیت جنس و سن ترکیب گشته و در این مرحله بر اساس ارزش کلاس‌های جدید وزن‌دهی گشتند. شدت آلتراسیون‌ها و دمای سطحی و نیز میزان چگالی ریزلرزه‌ها و گسل‌ها نیز معیار سایر لایه‌ها برای تخصیص وزن محسوب گردیده است. نتایج حاصل از این تلفیق، شامل مناطق الویت بندی شده در شکل (۱۵) نمایش داده شده است. ۹۰٪ مراکز آتشفشانی در منطقه به عنوان نقاط موجود جهت صحت سنجی روش دارای همپوشانی با مناطق دارای اولویت اول می‌باشند. از طرفی دیگر، مناطق دارای بالاترین اولویت اکتشافی تنها ۲۵/۵٪ کل مساحت استان را پوشش می‌دهد.

بررسی و صحت سنجی نتایج

نتایج حاصل از دو روش به کار رفته، مناطقی را با روند و پراکندگی مشابه به نمایش گذاشته‌اند. با این حال برای انجام مقایسه‌ی دقیق‌تر ، مساحت نواحی مشترک بین نتایج بولین و مناطق دارای اولویت اول هم‌پوشانی وزن‌دار محاسبه شد که نشان دهنده‌ی وجود ۵۸٪ سطح تحت پوشش مشترک توسط دو روش می‌باشد. روش‌های مختلفی را می توان جهت بررسی صحت نتایج حاصل از پتانسیل یابی به کار گرفت. به دلیل ماهیت اکتشافی و اهداف مطالعات پتانسیل یابی منابع زمین‌گرمایی از یک‌سو و عدم وجود داده های کافی از واقعیت‌های زمینی (وجود منابع ناشناخته زمین‌گرمایی و عدم اطلاع از مناطق کم پتانسیل در محدوده مورد مطالعه در این مرحله از عملیات اکتشافی) از سوی دیگر، در این تحقیق تنها از روش تطابق آماری نتایج مدل پیش بینی با واقعیت‌های زمینی برای کنترل و صحت سنجی نتایج استفاده شده است.

بررسی موقعیت چشمه‌های آب گرم

همانطور که اشاره شد تراوایی وتخلخل ناچیز سنگ مخزن زمین‌گرمایی، مستلزم وجود شکستگی‌هایی در سنگ مخزن می‌باشد بطوریکه راهیابی سیالات هیدروترمال به سطح زمین را امکانپذیر نماید. به همین دلیل، چشمه‌های آب گرم، به طور معمول با فاصله از سنگ‌های آذرین و در سنگ‌های رسوبی، آبرفت‌ها و سنگ‌های آذرآواری و در فواصل دور از کنتاکت‌های آذرین شکل می‌گیرند (Huenges, 2009). در این تحقیق از تعداد ۱۰ چشمه‌ی آب گرم در جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی، جهت مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از

Archive of SID
www.SID.ir

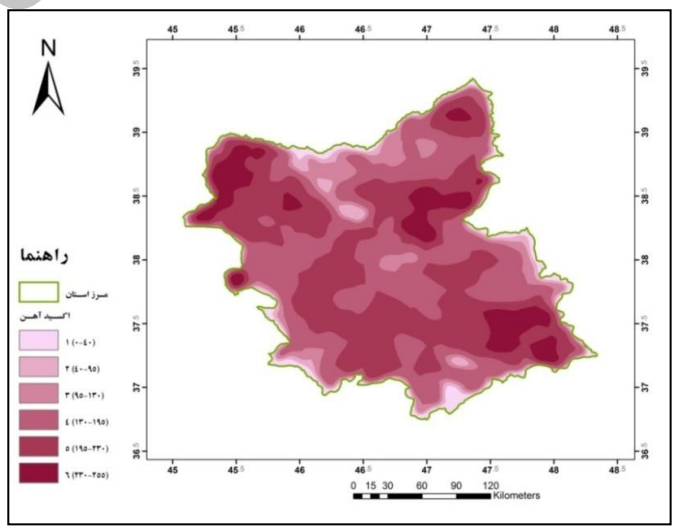
مدلهای تلفیق استفاده شد که نتایج حاصله، در اشکال (۱۶ و ۱۷) آورده شده‌اند.

روش آماری کنترل صحت نتایج

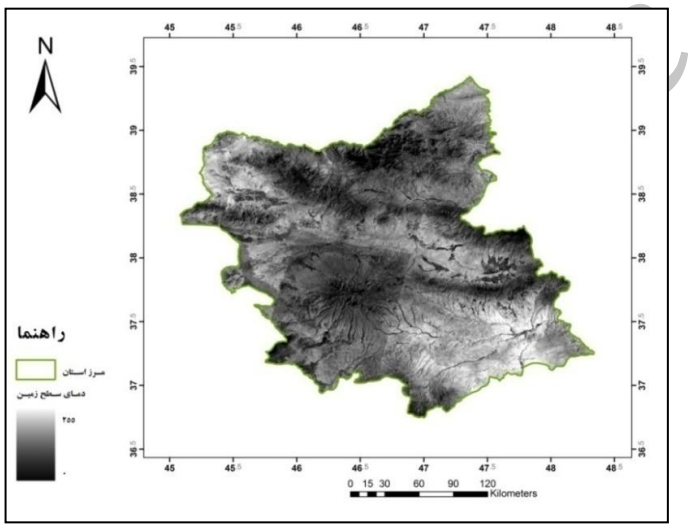
در این تحقیق محدوده مراکز آتشفشان‌های موجود در ناحیه مورد مطالعه به همراه زون تأثیر آنها به میزان ۲۰۰۰ متر، به عنوان لایه واقعیت زمینی (Ground Truth Layer) با اولویت ۱ درنظر گرفته شده است که سطحی معادل ۴۲۵/۶۳ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. همچنین کل سطح دارای پتانسیل نیز که از مدل بولین استخراج شده است معادل ۱۱۶۵۷/۱ کیلومتر مربع را تحت پوشش قرار می‌دهد. با توجه به تعریف فوق از لایه واقعیت زمینی، نتایج حاصل از مدل تلفیق بولین دربرگیرنده تمامی واقعیت‌های زمینی می‌گردد که حاکی از ۱۰۰ درصد همپوشانی این روش در محدودسازی زون‌های مستعد حاوی منابع احتمالی زمین‌گرمایی می‌باشد. همان‌طور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از همپوشانی وزن‌دار ۸۱/۳ درصد از زون با حداکثر مطلوبیت (واقعیت زمینی اولویت ۱ شامل زون‌های شناخته شده و تحقق یافته زمین‌گرمایی در دسترس) را در بر می‌گیرد.

جمع بندی نتایج

مطالعات دورسنجی با استفاده از داده‌های ماهواره لندست از کارایی بالایی در اکتشاف ناحیه‌ای منابع زمین‌گرمایی برخوردار است، به طوری که روند مناطق دارای دمای سطحی بالا، با سایر شواهد از جمله وجود گدازه و سنگ‌های آتشفشانی در لایه‌ی لیتولوژی و نیز با شواهد سطحی موجود کاملاً همبسته می‌باشد. مقایسه‌ی روند ساختارهای تکتونیکی با توده‌های نفوذی حاصل از برداشت مغناطیسی، مؤید تأثیر فعالیت حرارتی توده‌های نفوذی کم عمق در ایجاد ریزلرزه‌ها می‌باشد. از مهم‌ترین اهداف اکتشافی در مراحل اولیه، کاهش وسعت محدوده‌ی مورد مطالعه می‌باشد که در این پژوهش، با استفاده از دو روش تلفیقی بولین و هم‌پوشانی وزن‌دار وسعت محدوده‌ی مورد مطالعه به ترتیب به ۲۵/۷٪ و ۲۵/۵٪ کاهش یافته است. بر اساس مطالعات آماری انجام گرفته بر نتایج حاصل از دو روش تلفیق به کار گرفته شده و لایه واقعیت زمینی، روش بولین ۱۰۰ سطح این لایه را در پوشش می‌دهد، این سطح پوشش در مورد روش هم‌پوشانی وزن‌دار به ۸۱/۳٪ می‌رسد که این کاهش ناشی از انعطاف پذیری بالاتر این روش نسبت به مدل بولین و کارآیی بیشتر آن در شرایط کمبود داده و وجود عدم قطعیت در داده ها می‌باشد.



شکل ۱۰. اکسیدهای آهن، تصویر رستر نهایی پس از کلاسه‌بندی



شکل ۱۱. دمای سطحی زمین، تصویر ماهواره‌ای پس از پردازش

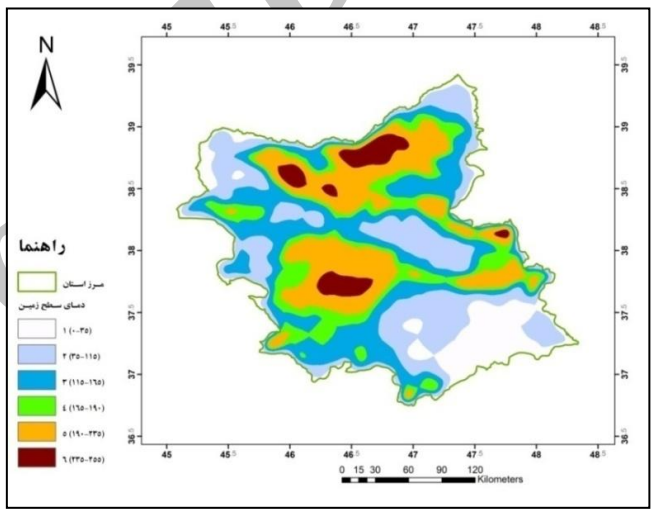
جدول ۱. وزن دهی به لایه‌ها در روش هم‌پوشانی وزن دار

لایه اطلاعاتی	آلتراسیون OH	اکسیدهای آهن	واحدهای سنگی	مغناطیس	دمای سطحی	ریزلرزه‌ها	گسل
وزن	۱۵	۶	۲۰	۱۵	۲۰	۹	۱۵

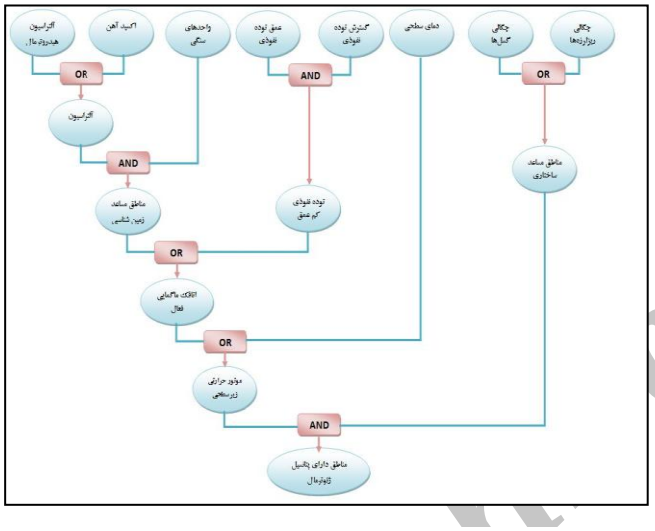
www.SID.ir

جدول ۲. نتایج کنترل آماری صحت نتایج تلفیق داده ها به روش‌های مختلف

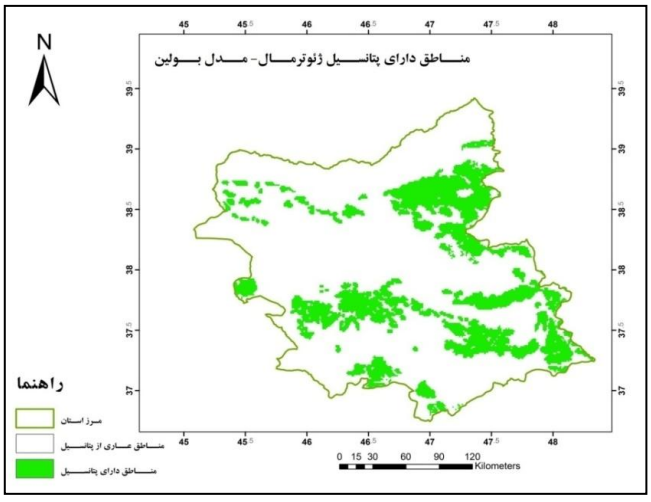
	روش تلفیق	
	روش همپوشانی وزن‌دار	روش بولین
سطح منطبق بر اولویت۱ (km^2)	۱۰۵۰۹/۱	۱۱۶۵۷/۱
سطح منطبق بر واقعیت زمینی(km^2)	۳۴۹/۱۲	۴۲۵/۶۳
درصد انطباق با واقعیت زمینی	۸۱/۳	۱۰۰/۰



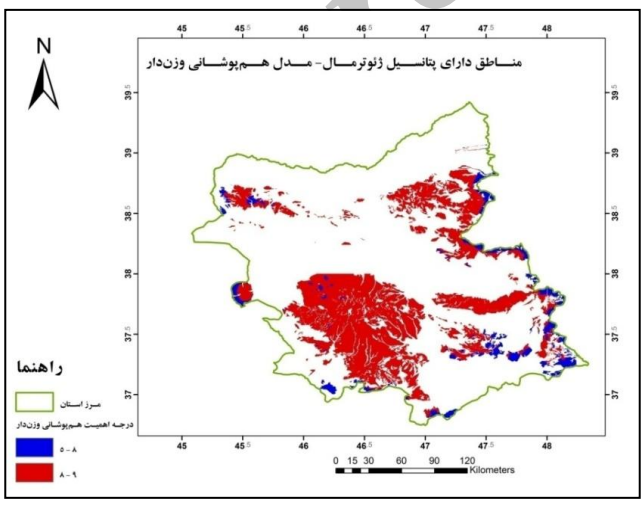
شکل ۱۲. دمای سطح زمین، تصویر رستر نهایی پس از کلاسه‌بندی



شکل ۱۳. نمودار تلفیق لایه‌ها با استفاده از مدل بولین

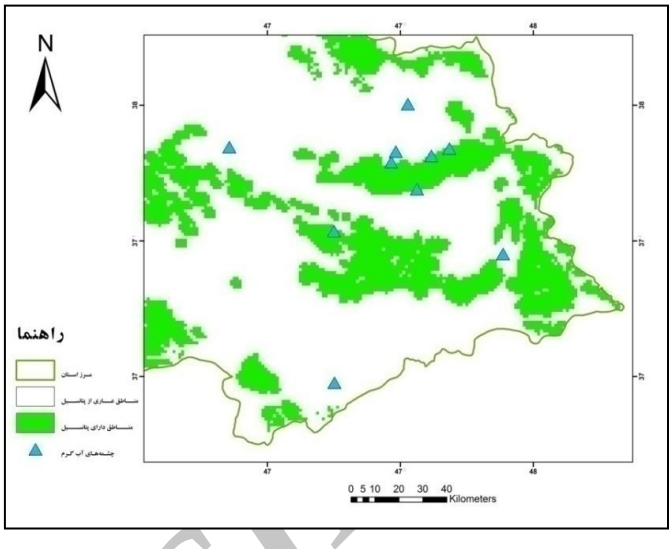


شکل ۱۴. نتیجه‌ی حاصل از تلفیق با استفاده از مدل بولین

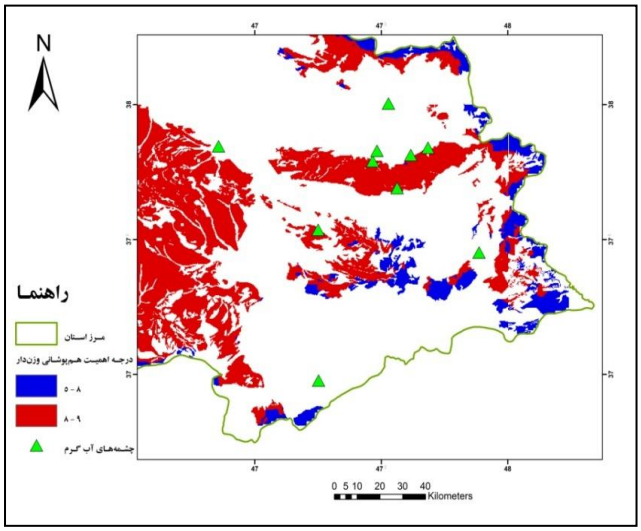


شکل ۱۵. نتیجه‌ی حاصل از تلفیق با استفاده از مدل هم‌پوشانی وزن‌دار

www.SID.ir



شکل ۱۶. مقایسه نتیجه تلفیق با استفاده از مدل بولین با پراکندگی



شکل ۱۷. مقایسه نتیجه تلفیق با استفاده از مدل هم‌پوشانی وزن‌دار با پراکندگی

منابع

آقانباتی، س، ع، ۱۳۸۳، زمین شناسی ایران، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

درویش‌زاده، ع، ۱۳۷۰، زمین شناسی ایران، نشر دانش امروز (وابسته به مؤسسه انتشارات امیرکبیر)، تهران.

علیزاده ربیعی، ح، ۱۳۸۰، سنجش از دور(اصول و کاربرد)،تهران سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها.

نوراللهی، ی، جمال‌الدینی، م، غضبان، ف، ۱۳۷۷، پروژه پتانسیل سنجی انرژی زمین‌گرمایی ایران، بررسی روش‌های پتانسیل‌سنجی انرژی زمین‌گرمایی در جهان، سازمان انرژی‌های نو ایران، گروه زمین‌گرمایی، تهران.

Agterberg, F.P., 1989, "Computer programs for mineral exploration", Science 245, pp. 76–81.

Bonham-Carter, G.F., 1994, Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS, Pergamon, Ontario.

Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1988, "Integration of geological data sets for gold exploration in Nova Scotia", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54, pp. 1585–1592.

Cataldi, R., 2009, Review of historiographic aspects of geothermal energy in the Mediterranean and Mesoamerican areas prior to the modern age, Geo-Heat Centre Quarterly Bulletin, Oregon Institute of Technology.

Chung, C.F., Jeoerson, C.W. and Singer, D.A., 1992, "A quantitative link among mineral deposit modeling, geoscience mapping, and exploration-resource assessment", Economic Geology 87, pp. 194–197.

Coolbaugh, M., Lechler, P., Sladek, C. and Kratt, C., 2009, "Carbonate Tufa Columns as Exploration Guides for Geothermal Systems in the Great Basin", GRC Transactions, Vol. 33.

Dewangan, P., Ramprasad, T., Ramana, M.V., Desa, M., and Shailaja, B., 2007, "Automatic interpretation of magnetic data using Euler Deconvolution with nonlinear background", Pure appl. geophys., 164, pp. 2359–2372.

El Dawi, M., G., Tianyou, L., Hui, S., and Dapeng. L., 2004, "Depth estimation of 2-D magnetic anomalous sources by using Euler Deconvolution method", American Journal of Applied Sciences 1 (3), pp. 209-214.

Huenges, E. (Ed), 2009, Geothermal energy systems, Exploration, development and utilization, WILEY-VCH, Germany.

Katz, S.S., 1991, "Emulating the prospector expert system with a raster GIS", Computers and Geosciences 17, pp. 1033–1050.

Archive of SID
www.SID.ir

Macleod, I.N., Jones, K., and Dai, T.F., 1994, 3-D Analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. Exploration Geophysics, 24, 679-688.

Qin, Q., Zhang, N., Nan, P. and Chai, L., 2011, "Geothermal area detection using Landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis—A case study in Tengchong, China", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13, pp. 552–559.

Raines, G.L., and Bonham-Carter, G.F., 2006, Exploratory Spatial Modelling Demonstration for Carlin- type deposits, Central Nevada, USA, using Arc-SDM *in* Harris, J.R. (editor), GIS applications in earth sciences: Special Publication, Geological Association of Canada, Special Publication 45, p. 23-52.

Sundhoro, H., Sulaeman, B. and Iim, D., 2010, "Travertine Deposits Indicated of a Medium Enthalpy for a Geothermal Reservoir, Beneath Dolok Marawa Area, Simalungun, North Sumatera Province – Indonesia", Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.

Yousefi, H., Ehara and S., Noorollahi, Y., 2007, "Geothermal potential site selection using GIS in Iran", Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.

Yousefi, H., Noorollahi, Y., Ehara, S., Itoi, R., Yousefi, A., Fujimitsu, Y., Nishijima, J. and Sasaki, K., 2010, Developing the geothermal resources map of Iran, Geothermics 39.

Archive of SID

www.SID.ir