پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سلسله‌مراتبی فازی
مطالعهٔ موردی: حوزهٔ آبریز خرم‌آباد

دکتر سیامک بهاروند[1]*، دکتر وهاب امیری امرایی[2]، سلمان سوری[3]

جغرافیا و توسعه، شمارهٔ ۶۰، پاییز ۱۳۹۹
تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۳۰
تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۰۱
صفحات: ۲۰۰-۱۸۱

واژه‌های کلیدی:
سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات‌جغرافیایی، سلسله‌مراتبی فازی،آب زیرزمینی، خرم‌آباد.

چکیده

با توجه به مقدار اندک منابع آب سطحی در بسیاری از مناطق ایران، آب‌های زیرزمینی مناسب‌ترین و تنها منبع درجهت تأمین آب موردنیاز این مناطق محسوب می‌شود. امروزه استفاده از سنجش‌ازدور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تبدیل به یکی از ابزارهای قدرتمند و مقرون‌به‌صرفه درجهت شناسایی و اکتشاف منابع آب زیرزمینی قابل‌دسترس شده‌است. این تحقیق با هدف مشخص‌کردن مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی در سازندهای سخت حوزهٔ آبریز خرم‌آباد با استفاده از سنجش ازدور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، نرم‌افزار Expert Choice و روش سلسله‌مراتبی فازی، انجام شده است.بدین‌منظور باتوجه به‌اطلاعات تصاویر ماهواره‌ای +ETM، بازدید میدانی و داده‌های زمین‌شناسی مانند هیدرولوژی، ساختار زمین و توپوگرافی، نقشه‌هایی مانند لیتولوژی، طبقات ارتفاعی، شیب، تراکم آبراهه، تراکم گسل، پوشش گیاهی و بارندگی تهیه و وزن‌دهی شدند. با اعمال وزن محاسبه‌شدهٔ هر معیار و با استفاده از همپوشانی به روش سلسله‌مراتبی فازی، نقشهٔ نهایی پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که به‌ترتیب، ۴/۵ و ۹/۴ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های فاقد پتانسیل و پتانسیل بالا قرار دارند. بیشترین پتانسیل تشکیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای آهکی و کنگلومراهای کواترنری واقع شده‌است.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌دلیل شیرین‌بودن، ترکیبات ثابت شیمیایی و ضریب آلودگی کمتر، یکی از مهم‌ترین منابع آب شرب و کشاورزی به حساب می‌آیند. این منابع بعد از یخچال‌ها و پهنه‌های یخی، بزرگ‌ترین ذخیرهٔ آب شیرین به حساب آمده *(صداقت، ۱۳۸۵: ۷)* و ۴ درصد از مجموعه آب‌هایی را که فعالانه در سیکل هیدرولوژی دخالت دارند، شامل می‌شوند *(علیزاده، ۱۳۸۹: ۲۴؛ رحیمی، ۱۳۹۰: ۱۲۷)*.

کشور ایران سرزمینی است خشک و نیمه‌خشک با نزولات جوّی بسیار اندک، به‌طوری‌که میانگین بارش سالیانه آن کمتر از یک‌سوم متوسط بارندگی سالیانه جهان است. این گسترهٔ بزرگ جغرافیایی با مشخصات هیدرولوژیکی خاص نظیر حجم نزولات جوّی ۴۱۳ میلیارد مترمکعب، تبخیر و تعرق ۲۹۶ میلیارد مترمکعب، حجم آب قابل‌دسترس ۱۱۷ میلیارد مترمکعب، سرانهٔ آب تجدیدشونده ۱۹۰۰ مترمکعب (در حالی که متوسط آب تجدیدشوندهٔ جهانی ۷۶۰۰

۱- استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران (نویسنده مسئول) s.baharvand@khoiau.ac.ir
۲- استادیار، پردیس علوم پایه، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران v.amiri@yazd.ac.ir
۳- کارشناس ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران s.soori@khoiau.ac.ir

مترمکعب است) و مصرف ۳/۴ میلیارد مترمکعب که حدود ۶۵ درصد آن از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود، با شرایطی سخت در زمینهٔ تأمین آب روبه‌رو است *(سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۳)*.

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت در سال‌های اخیر، کمبود آب و مشکلات ناشی از آن نظیر تأثیر منفی بر توسعهٔ اقتصادی، اجتماعی، تأمین غذا و حفظ محیط زیست باید از هم‌اکنون به مطالعه و پی‌جویی منابع جدید و مطمئن آب پرداخت. بررسی تراز آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۴ تاکنون نشان می‌دهد که اُفت متوسط سالیانهٔ درازمدت سطح آب زیرزمینی در دشت خرم‌آباد ۰/۳۲ متر است و با ادامهٔ روند موجود، آبخوان خرم‌آباد توان تأمین نیاز مصارف مختلف را در سال‌های نه‌چندان دور نخواهد داشت؛ بنابراین، علاوه‌بر مواردی همچون مدیریت بهینهٔ مصرف در بخش‌های مختلف، تأمین آب از منابعی همچون منابع کارستی و درز و شکاف‌دار منطقه می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای قابل‌تأمل مورد توجه سیاستگذارن، دستگاه‌های اجرایی و به تعبیری، تمامی ذی‌مدخلان قرار گیرد؛ ازاین‌رو در این مطالعه سعی شده‌است پتانسیل سازندهای سخت از دیدگاه توان ذخیره‌سازی و انتقال آب و به‌طورکلی، تأمین آب سالم مورد بررسی قرار گیرد. در این راه علاوه‌بر مطالعات میدانی و مطالعهٔ گزارش‌های موجود، از برخی ابزارهای کاربردی همچون سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش سلسله‌مراتبی فازی بهره گرفته شده‌است.

پژوهشگران متعددی نشان دادند که تلفیق لایه‌های اطلاعاتی به‌دست‌آمده از سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای اکتشاف، توسعه و مدیریت منابع آب‌زیرزمینی مفید است *(Gintamo,2015:85-120)*. سنجش‌ازدور یکی از منابع اصلی جمع‌آوری اطلاعات در مورد عوارض سطحی مربوط به آب‌های زیرزمینی مانند سنگ‌شناسی، عوارض ساختاری (گسل‌ها و شکستگی‌ها) کاربری اراضی و ژئومورفولوژی است. این قبیل اطلاعات می‌تواند به‌سادگی به‌عنوان ورودی محیط Arc GIS برای یکپارچه‌سازی با دیگر انواع داده‌ها و آنالیز آن‌ها استفاده شوند *(صابری و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۱)*.

در سال‌های اخیر در زمینهٔ پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی مطالعاتی چند در ایران و سایر نقاط جهان صورت گرفته‌است که ازجملهٔ آن‌ها می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد:

آبشیرینی و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از روش همپوشانی شاخص وزنی در محیط نرم‌افزار ArcGIS به پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در محدودهٔ تاقدیس پابده پرداختند. در این تحقیق که از عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی، نظیر نوع سازندهای زمین‌شناسی، وضعیت زهکشی، میزان شکستگی‌ها، ارتفاع و شیب منطقه استفاده شده‌بود، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که روش مذکور از دقت بالایی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی برخوردار است؛ سیف و کارگر (۱۳۹۰) به پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضهٔ آبریز سیرجان با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان داد که پهنهٔ پتانسیلی بالا برای استخراج منابع آب زیرزمینی بیشتر بر رسوبات درشت‌دانه کواترنری و مخروطه‌افکنه‌ها منطبق است؛ رحیمی و موسوی (۱۳۹۲) به پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل AHP و تکنیک GIS در حوضهٔ آبخیز شاهرود-بسطام پرداختند. براساس نتایج به‌دست‌آمده پهنهٔ پتانسیلی بالا برای استخراج منابع آب زیرزمینی بیشتر بر رسوبات درشت‌دانهٔ کواترنری و مخروطه‌افکنه‌های هولوسن و پهنه بدون پتانسیل بر ارتفاعات و مناطق رسی مارنی منطبق بود؛ مفیدی‌فر و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از روش تصمیم‌گیری تحلیل سلسله‌مراتبی منابع آب زیرزمینی در حوضهٔ یزد-اردکان را پتانسیل‌یابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها

نشـان داد، حـدود ۷۰ درصـد از مسـاحت منطقـهٔ مطالعه‌شده دارای پتانسیل خوب و خیلی‌خـوب ازنظـر آب زیرزمینی است؛ رضایی‌مقـدم و همکـاران (۱۳۹۵) با استفاده از روش تحلیل شبکه به پتانسیل‌یابی منـابع آب زیرزمینی در حوضهٔ آبریز منتهی بـه دشـت تبریـز پرداختند. براساس نتایج به‌دست‌آمده از این پـژوهش، دو عامل زمین‌شناسـی و بـارش بیشـترین نقـش را در پتانسـیل‌یـابی منـابع آب زیرزمینـی منطقـه داشـته و پهنه‌های با پتانسیل بالای آب زیرزمینی بـر ارتفاعـات پایین و رسوبات کواترنری منطبق است؛ واعظی‌هیـر و همکـاران (۱۳۹۷) نشـان دادنـد کـه اسـتفاده از سلسله‌مراتبی فازی در محیط نرم‌افـزار ArcGIS روش قابل‌اعتمـاد در پتانسـیل‌یـابی منـابع آب‌زیرزمینـی در واحـدهای کارسـتی و سـازندهای سـخت‌کـوه مـورو- صوفیان است؛ زنگنه‌تبار و قدیمی (۱۳۹۸) با اسـتفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی به بررسـی پتانسـیل‌یـابی منـابع آب کارسـتی در محـدودهٔ پـرآو- بیسـتون پرداختند. براسـاس نتـایج بـه‌دسـت‌آمـده آهـک‌هـای توده‌ای از بیشترین پتانسـیل بـرای تـأمین منـابع آب زیرزمینی برخوردار بودند؛ اوه[1] و همکاران (۲۰۱۱) بـه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی شهر پوهانگ کره بـا اسـتفاده از سیسـتم اطلاعـات جغرافیـایی پرداختنـد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، دقت نقشهٔ به‌دسـت‌آمـده بـیش از ۷۷ درصـد اسـت. همچنـین براسـاس نتـایج به‌دسـت‌آمـده، لایـهٔ خـاک بیشـترین تـأثیر و ارتفـاع کمترین اثر را بر پتانسـیل‌یـابی منـابع آب زیرزمینـی محدودهٔ مورد مطالعه داشته‌است؛ آگروال[2] و همکـاران (۲۰۱۳) در تحقیقـی بـا اسـتفاده از فراینـد تحلیـل شبکه‌ای، آب‌های زیرزمینی در منطقـهٔ اونـائو[3] کشـور هندوستان را پتانسیل‌یابی کردند. نتـایج ایـن تحقیـق نشان داد، حدود ۱۵ درصد از مسـاحت منطقـه دارای پتانسیل خوب و خیلی‌خوب ازنظر آب زیرزمینی است؛ دومینگـوس[4] و همکـاران (۲۰۱۷) بـا اسـتفاده از سـنجش‌ازدور، سـامانهٔ اطلاعـات جغرافیـایی و فراینـد تحلیـل سلسـله‌مراتبـی بـه پتانسـیل‌یـابی منـابع آب زیرزمینـی حوضـهٔ کومـورو[5] واقـع در تیمـور شـرقی پرداختند. براساس نتایج به‌دست‌آمـده دشـت آبرفتـی واقع در شمال‌غرب منطقه از پتانسیل بالایی برخـوردار بوده‌است.

داس[6] (۲۰۱۷)، انـدوالم[7] و همکـاران (۲۰۱۹) و داس و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از سـنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به‌ترتیب به پتانسـیل‌یـابی منابع آب زیرزمینـی در غـرب بنگـال، حـوزهٔ تاناگونـا اتیـوپی و منطقـهٔ دنگـی نیجریـه پرداختنـد. نتـایج به‌دست‌آمده از اعتبارسنجی روش استفاده‌شـده نشـان داد که سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیـایی از دقـت بـالایی در پتانسـیل‌یـابی منـابع آب زیرزمینـی برخوردارند.

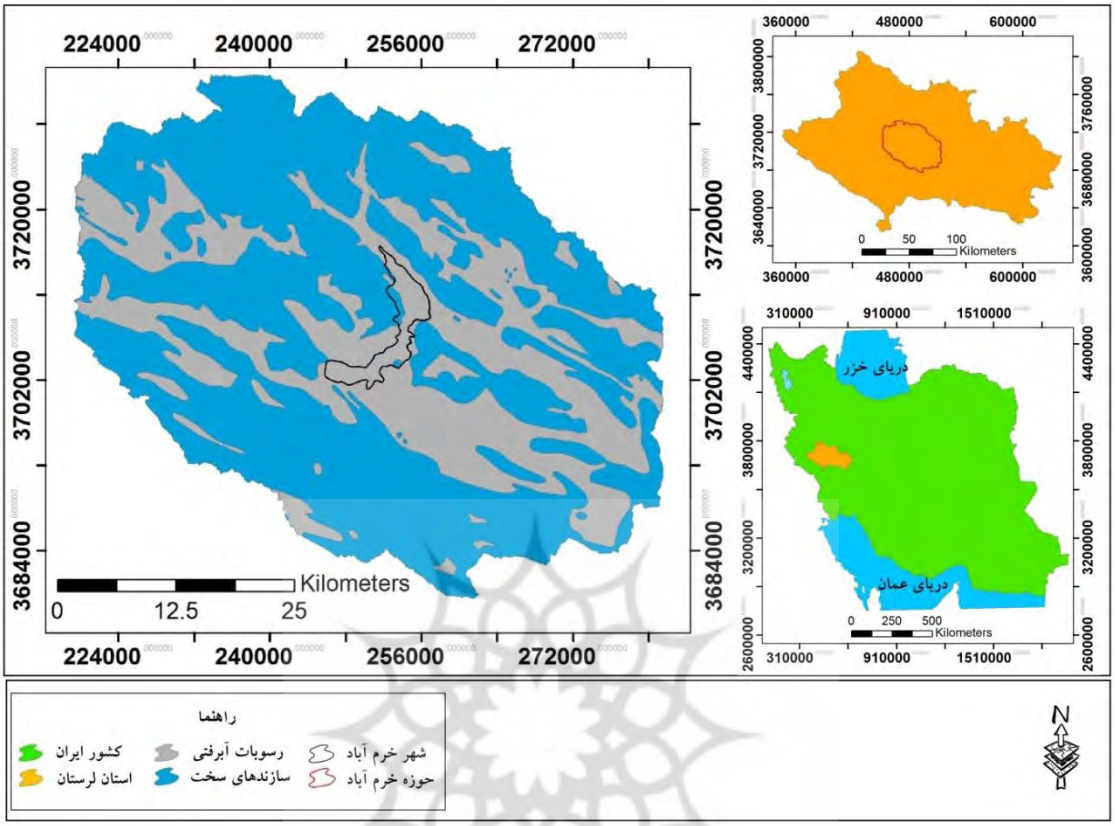
مواد و روش‌ها

مشخصات عمومی منطقه

محدودهٔ مطالعاتی خـرم‌آبـاد بـا وسـعت ۲۳۴۸۶۸ هکتار در غرب کشور ایران قرار دارد. ۱۵۸۰۰۸ هکتـار از وسعت این حوزه را سازندهای سخت و ماباقی آن را رسوبات آبرفتی تشکیل می‌دهد که شهر خرم‌آبـاد نیـز بر روی این رسوبات واقع شده‌است (شکل ۱).

منطقهٔ مورد مطالعه در پهنهٔ چـین‌خـورده- رانـده زاگرس و در بخش مرکزی استان لرستان جای گرفتـه اسـت. ایـن منـطقه نیـز در تبعیـت از رونـد عمـومی سلسله‌جبال زاگرس، از یکسری گسل‌ها، تـاقدیس‌ها و ناودیس‌های کم و بـیش مـوازی تشـکیل شـده‌اسـت. رونـد غالب گسل‌ها و چین خوردگی‌ها در این منطقـه شمال بـاختر- جنوب خاور است که بـه‌طـور عمـده از گسل‌های معکوس تشکیل شده‌اند.

1-Oh
2-Agarwal
3-Unnao
4-Domingos
5-Comoro watershed
6-Das
7-Andualem



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوزهٔ خرم‌آباد

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

بررسی اطلاعات آماری دشت خرم‌آباد در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶ (برگرفته از برنامهٔ عملیاتی ارائه‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان در قالب طرح احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی کشور) نشان می‌دهد که آبخوان خرم‌آباد با وسعت ۱۰۴/۷۴ کیلومترمربع درحال حاضر تأمین‌کنندهٔ منابع آب در محدودهٔ مورد مطالعه است. با توجه به تعداد چاه‌های مجاز و غیرمجاز و همچنین سطح زیرکشت در محدودهٔ آبخوان خرم‌آباد (جداول ۱، ۲ و ۳)، تراز آب زیرزمینی طی سال‌های اخیر و در درازمدت با اُفت شدیدی مواجه بوده‌است (شکل ۲). بررسی تراز آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۴ تاکنون نشان می‌دهد که اُفت متوسط سالیانهٔ درازمدت سطح آب‌زیرزمینی در دشت خرم‌آباد ۰/۳۲ متر و اُفت تجمعی سطح آب زیرزمینی نیز ۷/۰۴ متر بوده‌است؛ ازاین‌رو با توجه به اُفت شدید تراز آب زیرزمینی و نیاز آبی برای تأمین آب شُرب و کشاورزی در محدودهٔ مورد مطالعه، جستجوی منابع احتمالی تأمین آب از ضروریات ادامهٔ حیات در دشت خرم‌آباد است.

جدول ۱ : وضعیت چاه‌های مجاز در محدودهٔ دشت خرم‌آباد تا پایان سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶

نوع مصرف	تعداد	آبدهی متوسط (L/S)	تخلیه (MCM)	حجم اضافه برداشت (MCM)
کشاورزی	۶۰۰	۱۳	۶۴,۸	۱۰/۳۵
شرب	۹۷	۱۳/۰۶	۱۸/۸	-
صنعت و خدمات	۳۶۹	۵/۷	۱۵/۸	-
مجموع	۱۰۴۳	-	۹۹/۵	۱۰/۳۵

مأخذ: برگرفته از اطلاعات آماری دشت خرم‌آباد، ارائه‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای لرستان، ۱۳۹۸

جدول ۲ : وضعیت چاه‌های غیرمجاز در محدودهٔ دشت خرم‌آباد تا پایان سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶

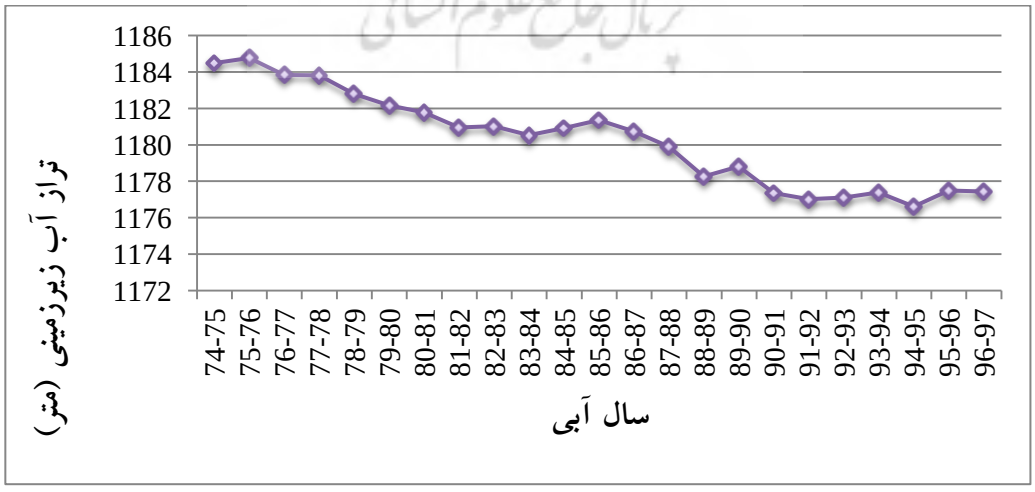
تاریخ حفر	کشاورزی				
	تعداد	تخلیه (MCM)	سطح زیر کشت (hec)		متوسط آبدهی (L/S)
			زراعی	باغی	
قبل از ۱۳۸۵	۹	۰/۴۷۵	۵۳	۶	۵/۲
۱۳۸۵-۱۳۷۹	۷۸	۱/۱۴	۲۰۲	۲۳	۲/۳
مجموع	۸۷	۱/۶۱۵	۲۵۵	۲۹	-

مأخذ: برگرفته از اطلاعات آماری دشت خرم‌آباد، ارائه‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای لرستان، ۱۳۹۸

جدول ۳ : ترکیب کشت، نیاز آبی کشت‌ها و نحوهٔ آبیاری در دشت خرم‌آباد تا پایان سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۶

نوع کشت	گندم	جو	ذرت	سایرکشت‌های زراعی	باغ	جمع کل	اراضی دارای آبیاری تحت فشار
سطح زیرکشت (hec)	۳۸۳۰	۷۰۸	۱۴۸۵	۲۷۱۲	۹۷۰	۹۷۰۵	۶۵۵۷
حجم آب موردنیاز (mcm)	۳۳	۶	۱۳	۲۳	۰/۱۲	۷۵/۱۵	۵۱/۸۲

مأخذ: برگرفته از اطلاعات آماری دشت خرم‌آباد، ارائه‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای لرستان، ۱۳۹۸



شکل ۲: آبنمود معرف دشت خرم‌آباد

مأخذ: برگرفته از اطلاعات آماری دشت خرم‌آباد، ارائه‌شده توسط شرکت آب منطقه‌ای لرستان، ۱۳۹۸

روش تحقیق

لایه‌های اطلاعاتی استفاده شده

در این پژوهش به‌منظور پی‌جویی مناطق آبی با پتانسیل‌های مختلف در محدودهٔ حوزهٔ آبریز خرم‌آباد از معیارهای زمین‌شناسی (لیتولوژی و تراکم گسل)، ژئومورفولوژی (طبقات ارتفاعی و شیب)، عوامل زیست‌محیطی (پوشش گیاهی)، اقلیمی (بارش) و هیدرولوژیکی (تراکم شبکهٔ زهکشی) استفاده شده‌است.

لیتولوژی: نوع سنگ و خصوصیات وابسته‌به آن نظیر بافت و درجه خلوص سنگ‌ها نقش مهمی در تخلخل، نفوذپذیری اولیه و تمرکز جریان آب زیرزمینی در داخل سنگ‌ها ایفا می‌کند *(Baharvand et al., 2016: 121)*. در این تحقیق نقشهٔ لیتولوژی منطقه با رقومی‌کردن نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خرم‌آباد *(تهیه‌شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور)* و استفاده از ترکیب باندی ۵۳۱ تصاویر سنجنده +ETM و مطالعات میدانی به‌منظور بررسی صحت‌سنجی مرز لایه‌ها تهیه‌شده‌است.

گسل‌ها: گسل‌ها به‌دلیل ایجاد فضاهایی در سازندها و واحدهای زمین‌شناسی درجهت عبور آب و حرکت به‌سمت نقاط پایین‌تر در درون زمین، نقاط ضعف درنظر گرفته‌می‌شوند. در این تحقیق به‌منظور تهیهٔ لایهٔ گسل‌های منطقه از نقشهٔ زمین‌شناسی منطقه، عکس‌های هوایی و اعمال فیلتر جهت‌دار بر باند ۷ سنجنده +ETM استفاده‌شده‌است.

شیب: شیب نقش بسیار مهمی در کنترل عواملی مانند سیل‌خیزی، نفوذپذیری، تشکیل خاک داشته و در تعیین پتانسیل آب‌های زیرزمینی دارای اهمیت بالایی است. مناطقی که دارای شیب پایینی هستند، آب را برای مدت طولانی حفظ می‌کنند که این امر باعث نفوذ و تغذیهٔ بیشتر آب می‌شود *(Rahman, 2008: 40)*. به‌منظور تهیه نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی که از خطوط تراز نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ خرم‌آباد (تهیه‌شده توسط سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح) در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد، استفاده شده‌است.

آبراهه: مشخصات هیدرولوژیکی و ژئوهیدرولوژی هر آبخوان یکی از گویاترین بخش‌ها در اکتشافات و پتانسیل‌یابی منابع آب است *(رحیمی و سلیمانی، ۱۳۹۵: ۳۰)*. در سطح محدودهٔ مورد مطالعه، صرف‌نظر از ریزش‌های جوّی، آبراهه‌ها مهم‌ترین منبع تغذیه‌کنندهٔ آب زیرزمینی هستند. به‌منظور تهیه نقشه تراکم آبراهه، شبکهٔ آبراهه‌ها از روی نقشهٔ توپوگرافی مشخص و در محیط نرم‌افزار ArcGIS رقومی شد.

ارتفاع: ارتفاع یکی از فاکتورهای توپوگرافی است که نقش مهمی در میزان رواناب و میزان نفوذپذیری آب در لایه‌های زمین دارد. نقشه طبقات ارتفاعی خود از کلاس‌بندی نقشهٔ DEM منطقه تهیه شده‌است.

بارندگی: بارندگی، منبع اولیه تأمین‌کنندهٔ آب زیرزمینی در هر منطقه است. ارتباط بارندگی با ایجاد آب زیرزمینی به‌وسیلهٔ فاکتورهایی مانند توپوگرافی، پوشش گیاهی و لیتولوژی کنترل می‌شود، این فاکتورها بر مقدار آبی که به درون زمین نفوذ می‌کند، مؤثر هستند *(زروش و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۴۹)*. به‌منظور تهیه نقشه هم‌باران منطقه از آمار بارندگی سالانهٔ ایستگاه خرم‌آباد و ایستگاه‌های مجاور استفاده شده و با ایجاد رابطهٔ همبستگی بین میزان بارندگی و ارتفاع، نقشه همباران منطقه تهیه شده‌است.

پوشش گیاهی: پوشش گیاهی مهم‌ترین ویژگی فیزیوگرافی است که تأثیر بر نفوذ، فرسایش، تبخیر و تعرق می‌گذارد. با توجه به اینکه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌خصوص در فصل خشک، آب سطحی بسیار محدود است؛ بنابراین وجود پوشش گیاهی نمایانگر خوبی از آب زیرزمینی کم‌عمق است *(یوسفی‌سنگانی و همکاران، ۱۳۹۱: ۴)*. در محدودهٔ مورد مطالعه، نقشهٔ پوشش گیاهی از تفسیر شاخص NDVI استخراج شده‌است.

روش پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که علی‌رغم سادگی و کارایی بالا به‌دلیل عدم‌درنظرگرفتن بی‌دقتی و عدم‌اطمینان ذاتی ادراکات تصمیم‌گیرندگان و انعکاس نظرات آن‌ها به‌صورت یک عدد قطعی، اغلب مورد انتقاد قرار گرفته است *(Baharvand & soori, 2016: 32)*؛ به‌همین‌دلیل در این تحقیق سعی شده‌است تا با استفاده از مفاهیم اساسی نظریه مجموعه‌های فازی و به‌ویژه اعداد فازی، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به فضای فازی توسعه داده‌شود. به‌طورکلی، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت خرم‌آباد با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی شامل مراحل زیر است:

۱- ساختن پایگاه داده‌های فضایی و به بیانی ورود و سازماندهی داده‌های فضایی مربوط به لایه‌های مختلف مورد استفاده برای پتانسیل‌یابی و ساماندهی آنها در قالب مدل‌های رستری و برداری.

۲- مرحلهٔ پردازش داده‌ها که شامل طبقه‌بندی داده‌ها و استخراج نقشه‌های مشتق‌شده از لایه‌های مختلف است.

۳- تعیین درجه عضویت فازی براساس توابع عضویت و تهیه نقشه فازی هر یک از عوامل: تئوری فازی شامل تمام تئوری‌هایی است که از مفاهیم اساسی مجموعه‌های فازی یا توابع عضویت استفاده می‌کند. یکی از اساسی‌ترین مباحث در تئوری فازی بحث تابع عضویت و چگونگی تعریف آن است که مشخص‌کنندهٔ اعضاء یک مجموعه است *(تاناکا، ۱۳۸۸: ۱۶)*. اساس اختلاف روش‌های فازی با روش‌های دیگر، در تعریف تابع عضویت است. در تعریف تابع عضویت می‌توان گفت که درجه تعلق عناصر مجموعه مرجع به زیرمجموعه‌های آن است و به‌صورت $\mu c(X)$ نمایش داده‌می‌شود. برای به‌دست‌آوردن تابع عضویت هیچ الگوریتم مشخصی وجود ندارد؛ بلکه تجربه، نوآوری و حتی اعمال نظر شخصی در شکل‌گیری و تعریف تابع عضویت می‌تواند مؤثر باشد. در این تحقیق با استفاده از توابع عضویت خطی larg و small نقشه‌های هر یک از عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در محدودهٔ اطراف شهر خرم‌آباد به نقشه‌های فازی تبدیل شده‌اند.

۴- اولویت‌بندی عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی و تعیین وزن آن‌ها: در این پژوهش از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی[1] (AHP) که یکی از مدل‌های چندمعیارهٔ تصمیم‌گیری است، برای اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده شده‌است. AHP یک روش نیمه‌کیفی است که شامل یک ماتریس وزن‌دهی بر مبنای مقایسات زوجی بین عوامل بوده و میزان مشارکت هر یک از عوامل را در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی مشخص می‌کند. از مزایای این روش آن است که با استفاده از تجربه و دانش کارشناسان متخصص در زمینهٔ کاربرد موردنظر و با درنظرگرفتن خصوصیات محدودهٔ مطالعاتی، فاکتورهای مناسب تعیین و وزن‌دهی می‌شوند *(سوری و همکاران، ۱۳۹۲: ۱۰۶)*.

در تحلیل سلسله‌مراتبی روش کار بدین صورت است که ابتدا به‌منظور تعیین ارجحیت عوامل مختلف و تبدیل آن‌ها به مقادیر کمّی از قضاوت‌های شفاهی (نظر کارشناسی) بر مبنای مقایسات زوجی استفاده می‌شود؛ به‌طوری‌که تصمیم‌گیرنده ارجحیت یک عامل را نسبت‌به علل دیگر به‌صورت جدول (۴) درنظر گرفته و این قضاوت‌ها را به مقادیر کمّی بین ۱ تا ۹ تبدیل می‌کند. سپس نتایج این مقایسات، برای محاسبهٔ شاخص ناسازگاری[1] به نرم‌افزار Expert Choice وارد می‌شود. اگر شاخص محاسبه‌شده کمتر از ۰/۱ باشد، نتایج قابل‌قبول بوده و در غیر این صورت باید دوباره در وزن‌دهی تجدیدنظر شود.

1-Analytical Hierarchy Process

جدول ۴ : طبقه‌بندی ارجحیت مقادیر وزن‌ها براساس قضاوت کارشناسی

توصیف زبانی ارجحیت طبقات	مقدار عددی وزن‌ها
کاملاً مهم یا کاملاً مطلوب‌تر	۹
اهمیت خیلی‌قوی	۷
اهمیت یا مطلوبیت قوی	۵
کمی مطلوب‌تر یا کمی مهم‌تر	۳
اهمیت یا مطلوبیت یکسان	۱
اولویت بین فواصل	۲، ۴، ۶ و ۸

مأخذ: Saaty, 1990: 15

۵- تهیه نقشه‌های سلسله‌مراتبی فازی هر یک از عوامل و همپوشانی نقشه‌ها براساس عملگر گامای فازی: اپراتورهای مدل منطق فازی مشتمل‌بر عملگرهای اجتماع فازی، اشتراک فازی، ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و عملگر گاما فازی هستند که در این تحقیق از عملگر گامای فازی به‌منظور هم‌پوشانی داده‌ها استفاده شده‌است. عملگر گاما فازی برحسب حاصل ضرب جبر فازی و حاصل جمع جبری فازی به‌صورت رابطهٔ (۱) تعریف می‌شود.

رابطهٔ (۱)

$$\mu_{\tilde{A}i,comp}(x) = (\prod_{i=1}^{n} \mu_i(x)z)^{(1-\gamma)}(1 - \prod_{i=1}^{n}(1-\mu_i(x))^{\gamma}, x \in X, 0 \le \gamma \le 1$$

که در آن y پارامتر انتخاب شده در محدودهٔ (۰ و ۱) است *(تاناکا، ۱۳۸۸: ۳۳)*. وقتی y برابر ۱ باشد، ترکیب همان جمع جبری فازی خواهدبود و وقتی y=0 باشد، ترکیب اصلی برابر با حاصل ضرب جبری فازی است. انتخاب صحیح و آگاهانهٔ y بین صفر و یک مقادیری را در خروجی به‌وجود می‌آورد که نشان‌دهندهٔ سازگاری قابل‌انعطاف میان گرایشات کاهشی و افزایشی دو عملگر جمع و ضرب فازی هستند. عملگر گاما نسبت‌به سایر عملگرهای فازی کاربرد بیشتری دارد و زمانی استفاده می‌شود که اثر برخی شواهد کاهشی و اثر برخی افزایشی باشد؛ به‌همین‌دلیل در این مطالعه از عملگر گاما به‌منظور پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در محدودهٔ مورد مطالعه استفاده شده‌است.

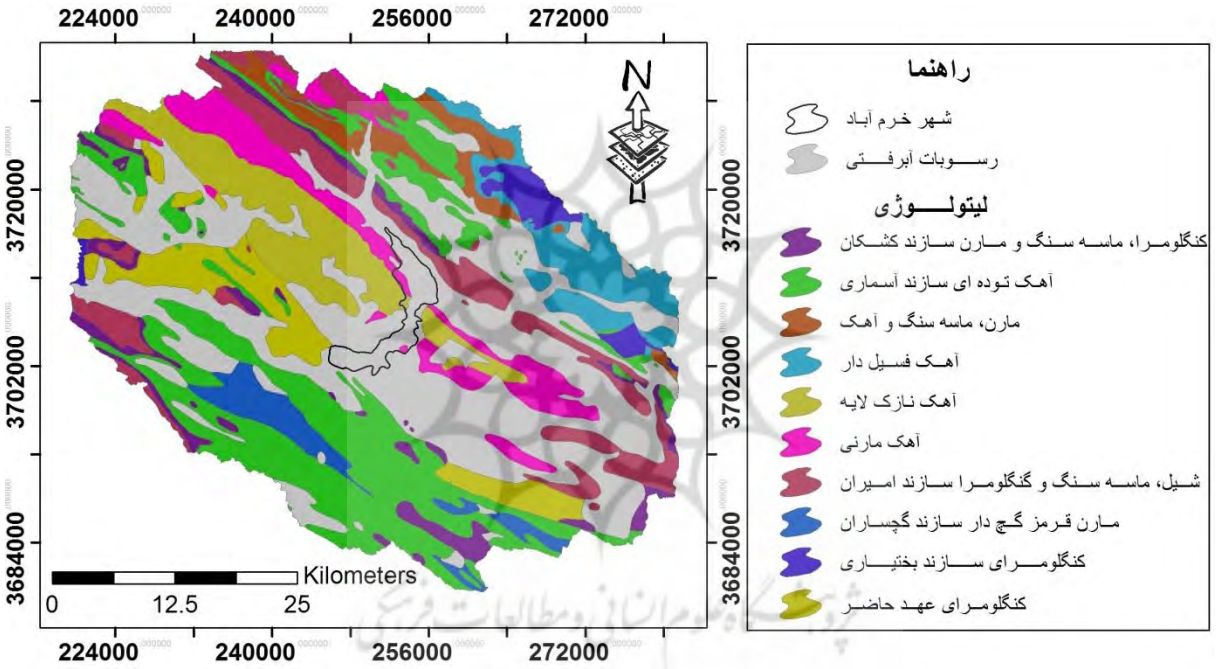
نتایج و بحث

به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب در محدودهٔ مورد مطالعه، ابتدا نقشه عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی تهیه و کلاس‌بندی شد (اشکال ۳ تا ۹). بررسی نتایج به‌دست‌آمده از نقشه‌ها و کلاس‌های آن‌ها به شرح زیر است:

پراکندگی تشکیلات زمین‌شناسی در محدودهٔ مورد مطالعه (شکل ۳) نشان می‌دهد که وجود برخی از سازندهای آهکی ازجمله آهک‌های توده‌ای سازند آسماری و آهک‌های فسیل‌دار دوران مزوزوییک در این منطقه که دارای توان بالای انحلال است، شرایط را برای ایجاد و توسعهٔ کارست فراهم می‌کند. به این ترتیب می‌توان انتظار داشت که تقریباً در مناطق جنوبی و شمال‌شرق محدودهٔ پتانسیل بالای ذخیره و انتقال آب زیرزمینی وجود داشته‌باشد. در همین

1-Analytical Hierarchy Process

زمینه نیز لازم‌به‌ذکر است که سازندهای رسوبی سخت کم‌ضخامت با اندازهٔ ذرات ریز و تراکم بالا عمدتاً توان هیدرولیکی پایینی داشته و از این منظر می‌توان محدوده‌های متشکل‌از سازندهای مارنی و شیلی را در ردهٔ مناطقی با کمترین توان تأمین آب زیرزمینی محسوب کرد. همچنین سازند گچساران با لیتولوژی مارن گچ‌دار در بخش‌هایی از جنوب‌شرق منطقه واقع شده‌است. علی‌رغم پتانسیل گاهاً قابل‌توجه تشکیل فضاهای ثانویه (عمدتاً انحلالی) در این لیتولوژی و فراهم‌آمدن شرایط لازم درجهت ذخیره‌سازی و انتقال آب، نرخ بالای انحلال و نقش تخریبی این سازندها در کاهش کیفیت منابع آبی به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده درجهت برنامه‌ریزی اکتشاف و بهره‌برداری شناخته‌می‌شود.

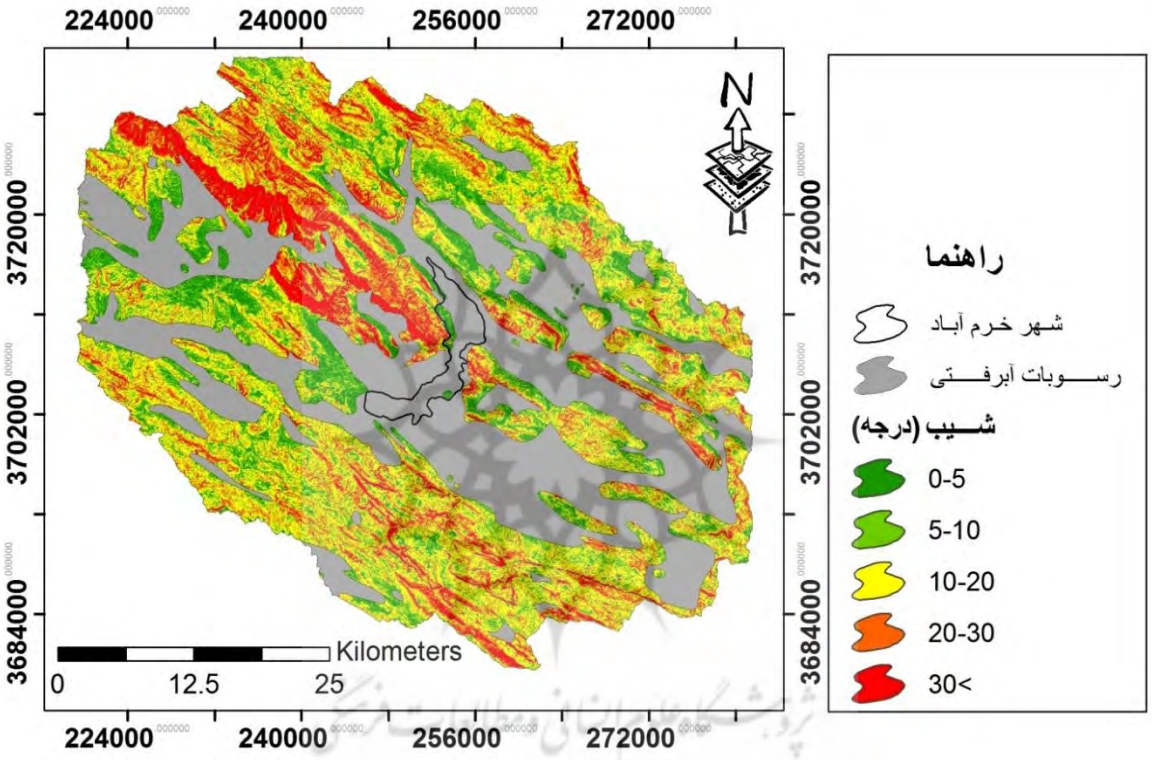


شکل ۳: نقشه لیتولوژی حوزهٔ خرم‌آباد (برگرفته از نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خرم‌آباد)

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

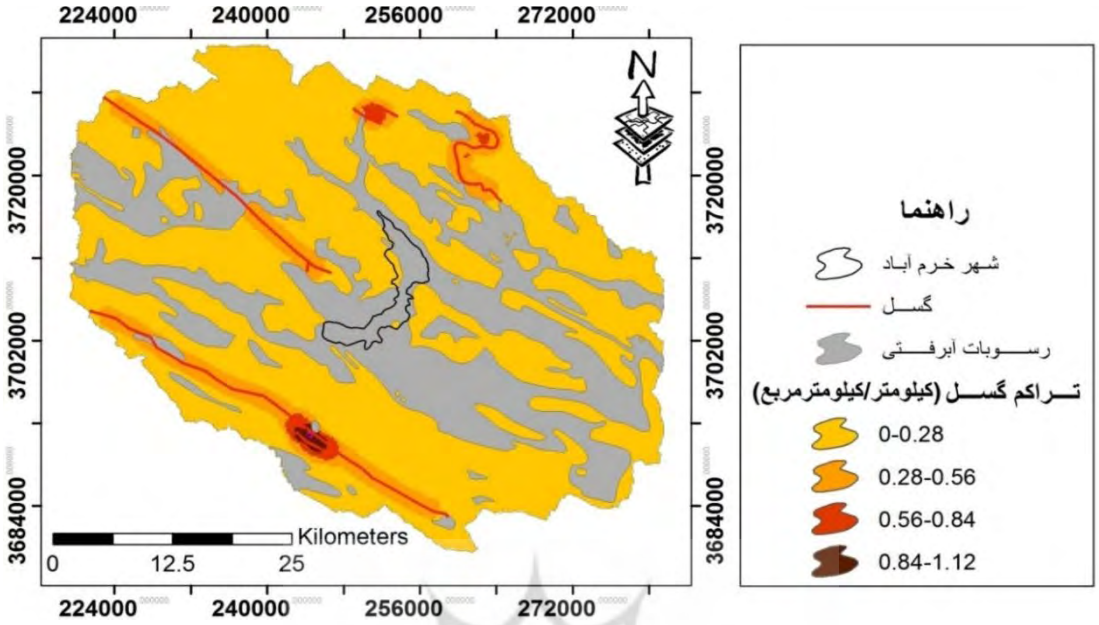
پس از طبقه‌بندی نقشه شیب توپوگرافی در بازه‌های ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰ و بیشتر از ۳۰ درجه، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در طبقات مختلف شیب (شکل ۴) آب زیرزمینی تمایل دارد در مناطقی با کمترین شیب توپوگرافی و به‌تبع آن شیب هیدرولیکی تجمع یابد. به این ترتیب امکان اکتشاف آب در مناطقی با شیب کمتر، بسیار بیشتر از مناطقی با شیب توپوگرافی زیاد است. البته باید خاطرنشان کرد، در بسیاری از مناطق با شیب تند نیز امکان ایجاد مجاری کارستی و گسلی و فراهم‌آمدن شرایطی برای عبور سریع آب زیرزمینی نیز وجود دارد. در این‌گونه موارد، سطح کارستی‌شدن (Karstification level) می‌تواند در نقاطی با شیب توپوگرافی کم متوقف شده و موجب آغاز ذخیره‌شدن آب (به شرط وجود فضای متخلخل یا کارستی کافی) شود. با این تفاسیر، مناطق مستعد اکتشاف آب می‌توانند دارای شیب ۰-۵ درجه باشد که عمدتاً در بخش‌هایی از مرکز، شمال‌شرق و غرب حوزه واقع شده‌اند.

بررسی تراکم گسل‌های موجود در محدودهٔ مورد مطالعه (شکل ۵) نشان از سه منطقه با بیشترین تراکم است که این خود می‌تواند عاملی برای انتقال آب زیرزمینی از نقاط ارتفاعی بالاتر به مناطق پست‌تر باشد. البته باید توجه داشت که این محدوده به‌دلیل قرارگیری در زون زاگرس چین‌خرده به‌صورت بالقوه می‌تواند دارای سیستم گسلی پیشرفته‌تری باشد که این امر مستلزم انجام مطالعهٔ بسیار دقیق‌تری با تأکید بر شناسایی درز و شکاف‌ها و گسله‌های موجود در منطقه است.



شکل ۴: نقشهٔ شیب سازندهای سخت حوزهٔ خرم‌آباد

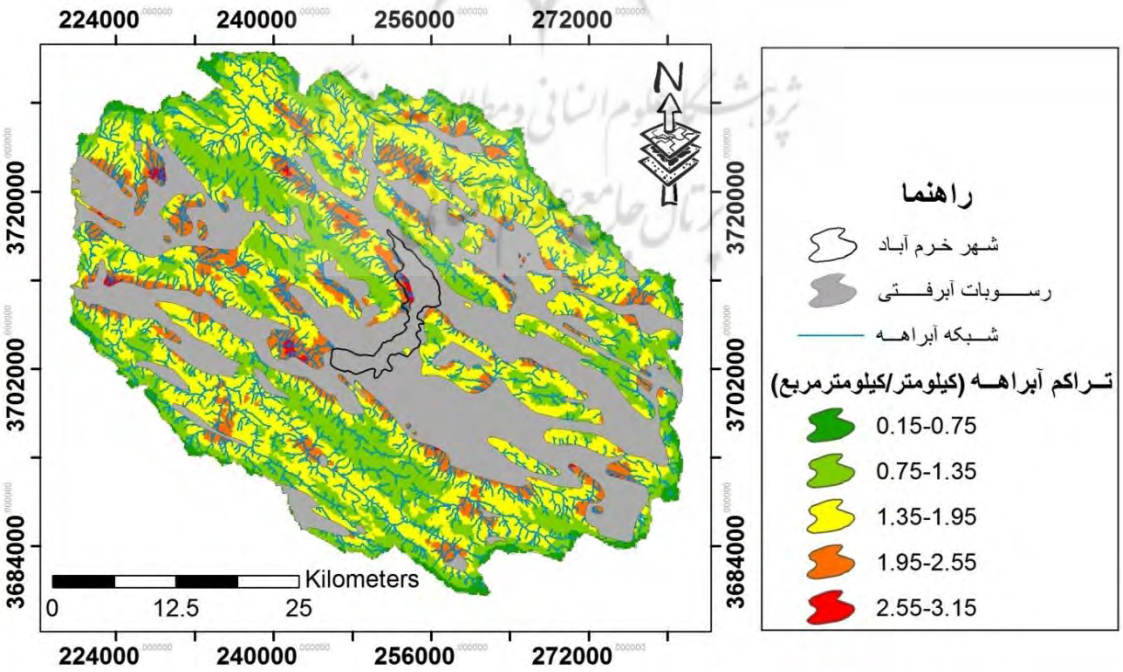
مأخذ: برگرفته از نقشهٔ توپوگرافی ۵۰۰۰۰:۱ خرم‌آباد



شکل ۵: نقشهٔ تراکم گسل‌های سازندهای سخت حوزهٔ خرم‌آباد

مأخذ: برگرفته از نقشهٔ زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ خرم‌آباد

شکل (۶) به‌وضوح نشان می‌دهد که تمامی جریانات سطحی (شبکهٔ آبراهه) موجود در این محدوده به بخش‌های مرکزی و شمال‌غربی منتهی می‌شود؛ به‌همین‌دلیل، باید انتظار داشت که وجود شبکهٔ متراکم زهکشی در این مناطق نیز عاملی درجهت تغذیهٔ ساختارهای رسوبی موجود در این مناطق و به‌دنبال آن بالابردن ذخیرهٔ آبی آن‌ها شود.



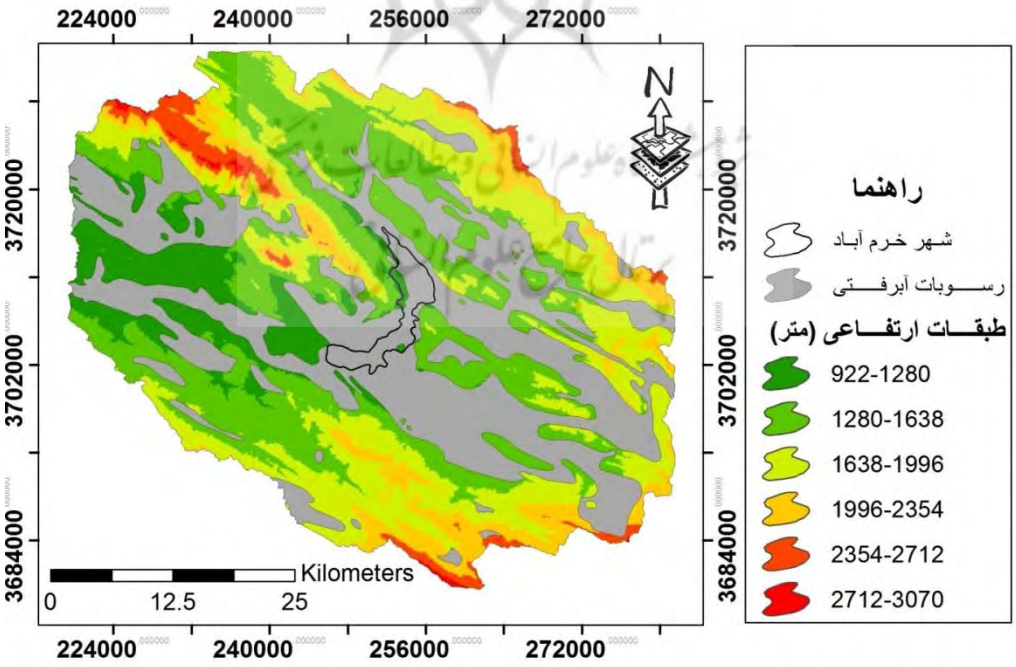
شکل ۶: نقشهٔ تراکم شبکهٔ آبراههٔ سازندهای سخت حوزهٔ خرم‌آباد

مأخذ: برگرفته از نقشهٔ توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ خرم‌آباد

بررسی نقشهٔ ارتفاعی محدودهٔ مورد مطالعه (شکل ۷) نشان می‌دهد که کمترین ارتفاعات در نوار مرکزی (دشت‌های آبرفتی) واقع شده‌است و با توجه به ارتباط بین حرکت آب زیرزمینی از ارتفاعات مجاور به مناطق پست‌تر و تجمع در این نواحی، انتظار می‌رود بیشترین احتمال اکتشاف آب زیرزمینی در این مناطق وجود داشته‌باشد. البته در این زمینه باید سایر عوامل تأثیرگذار را که پیش از این به آن‌ها پرداخته شد نیز مدنظر قرار داد.

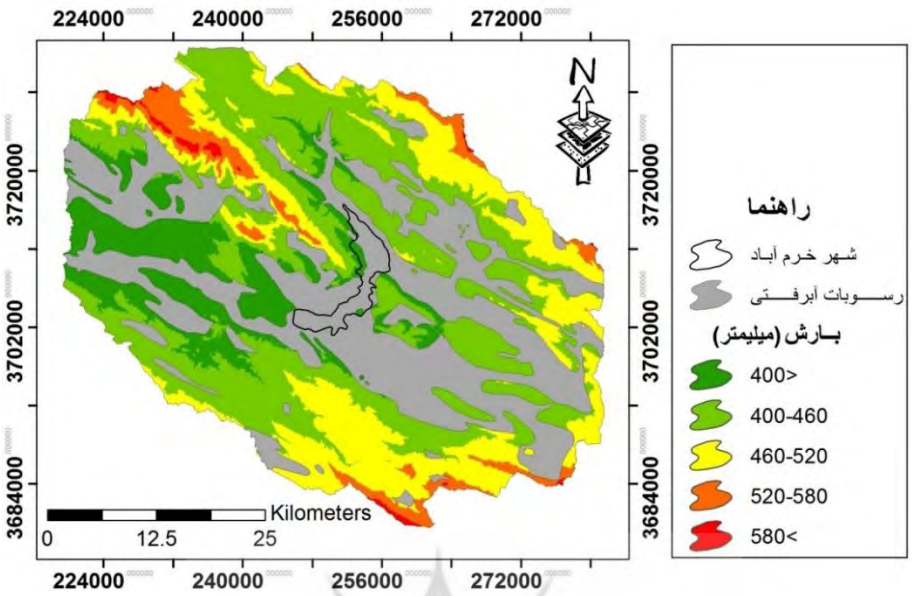
بررسی نقشهٔ طبقات بارندگی در شکل (۸) نشان می‌دهد که اصولاً بارندگی در ارتفاعات بالاتر (در این محدوده، مناطق شمال‌غرب، شمال‌شرق و جنوبی) بیشتر است. در بررسی این نقشه در راستای هدف مطالعه باید از سایر اطلاعات موجود نیز بهره‌گرفت. ارتباط بارندگی با ایجاد آب زیرزمینی بیشتر براساس عواملی مانند پوشش گیاهی و لیتولوژی کنترل می‌شود؛ این بدان معناست که عوامل ذکرشده دارای نقش کنترل‌کننده‌ای در مقدار آب نفوذی به لایه‌های زیرین زمین دارند. با توجه به اینکه در محدودهٔ مورد مطالعه بارندگی‌ها قابل‌ملاحظه عمدتاً در مناطقی با لیتولوژی آهکی و پوشش گیاهی (جنگلی) مناسب رخ می‌دهند؛ ازاین‌رو می‌توان انتظار داشت که مجموع این عوامل منجر به ذخیره‌سازی آب در سازندهای آهکی درز و شکافدار و انحلالی منطقه و همچنین ایجاد فرصت نفوذ و نشت بیشتر نزولات جوّی ازطریق کاهش سرعت ناشی از وجود پوشش گیاهی شود.

بررسی نقشهٔ پوشش گیاهی حوزهٔ خرم‌آباد نشان می‌دهد که قسمت‌هایی از شمال‌غرب و جنوب‌شرق منطقه از پتانسیل بیشتری برخوردار است (شکل ۹). با مشاهدهٔ پدیده‌های سطحی ازجمله پوشش گیاهی زمین، می‌توان به شرایط زیرسطحی وجود آب در لایه‌های زیرین پی برد.



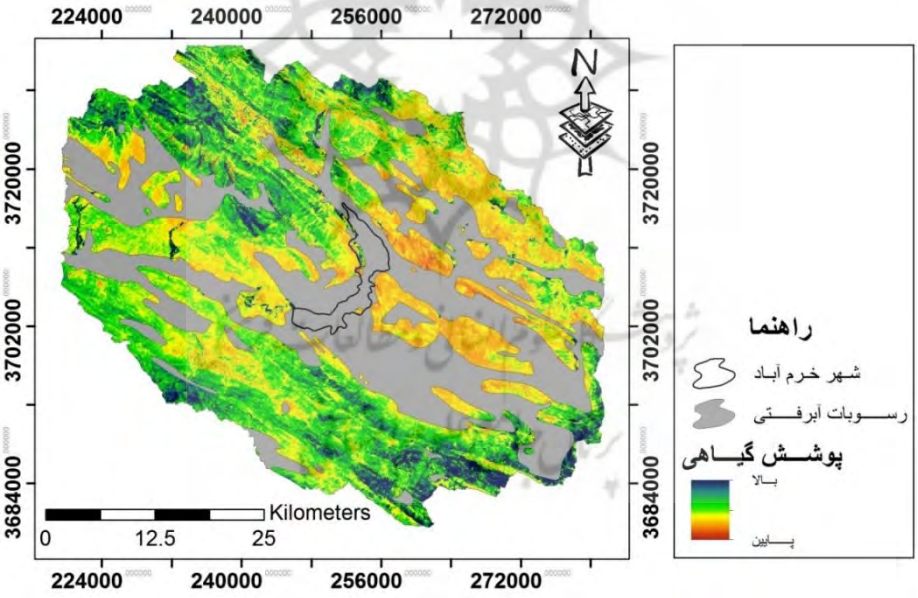
شکل ۷ : نقشهٔ طبقات ارتفاعی سازندهای سخت حوزهٔ خرم‌آباد

مأخذ: برگرفته از نقشهٔ توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ خرم‌آباد



شکل ۸: نقشهٔ طبقات بارندگی سازندهای سخت حوزهٔ خرم‌آباد

مأخذ: برگرفته از آمار بارندگی محدودهٔ مطالعه‌شده



شکل ۹: نقشهٔ پوشش گیاهی سازندهای سخت حوزهٔ خرم‌آباد

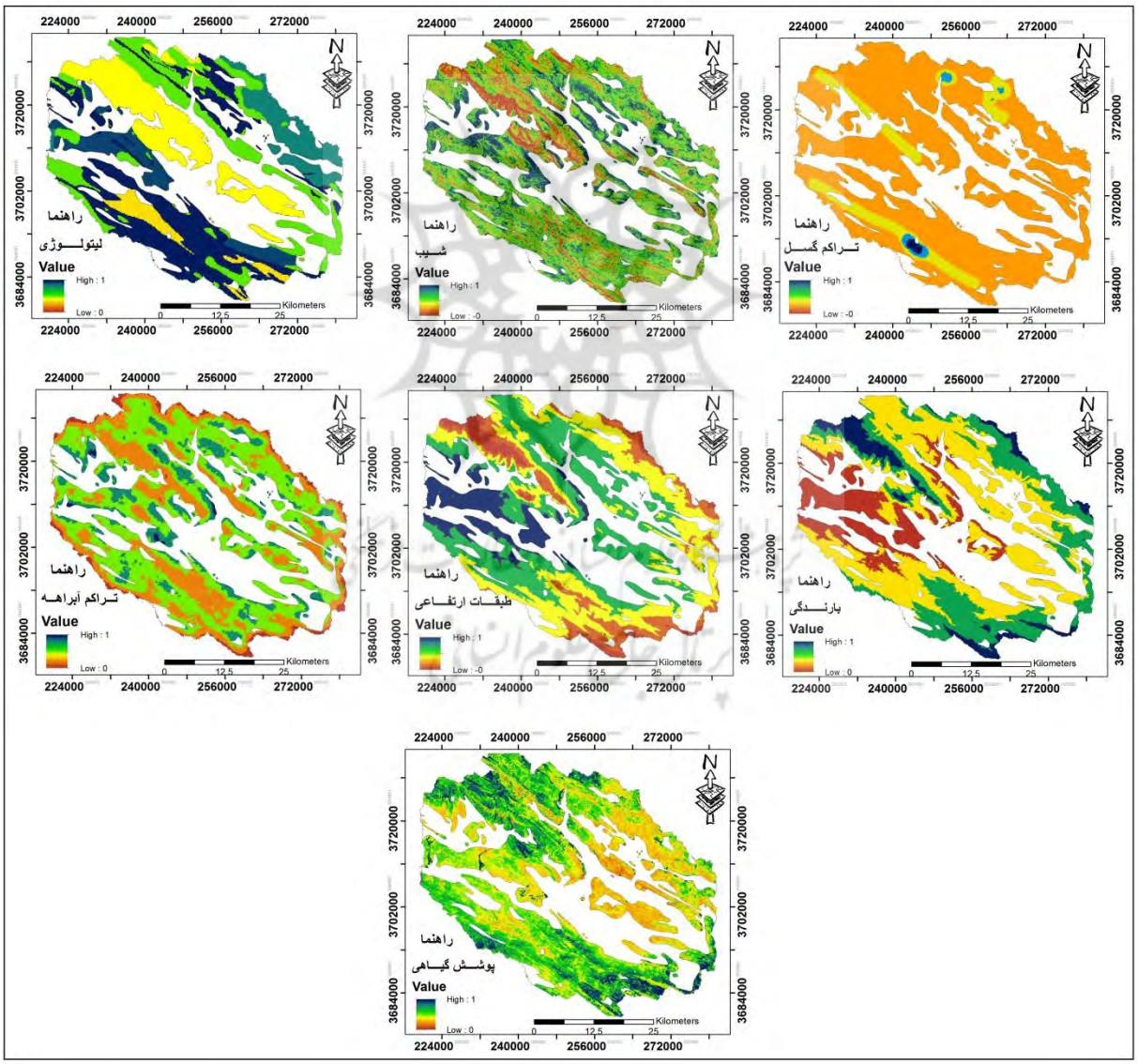
مأخذ: برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای ETM+

در مطالعهٔ انجام‌شده پس از تفسیر نقشه‌های عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، نوع تابع عضویت برای هر یک از لایه‌های لیتولوژی، شیب، تراکم گسل، تراکم آبراهه، ارتفاع، بارندگی و پوشش گیاهی براساس افزایشی و کاهشی‌بودن امتیاز آن‌ها انتخاب و نقشهٔ فازی آن‌ها تهیه شد (جدول ۵) (شکل ۱۰). سپس براساس قضاوت کارشناسی هر یک از عوامل وزن‌دهی شدند که نتایج به‌دست‌آمده از محاسبهٔ ضریب ناسازگاری با مقدار عددی ۰/۰۳ نشان داد که مقایسات به‌درستی انجام‌شده‌است (شکل ۱۱).

جدول ۵: توابع عضویت استفاده‌شده در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوزهٔ خرم‌آباد

پارامتر	بیشترین درجه عضویت	کمترین درجه عضویت	تابع استفاده‌شده
لیتولوژی	آهک توده‌ای	مارن قرمز گچ‌دار	large
شیب	۰-۵	بیشتر از ۳۰ درجه	small
تراکم گسل	۰/۸۴-۱/۱۲	۰-۰/۲۸	large
تراکم آبراهه	۲/۵۵-۳/۱۵	۰/۱۵-۰/۷۵	large
ارتفاع	کمتر از ۱۲۸۰ متر	بیشتر از ۲۷۱۲ متر	small
بارندگی	بیشتر از ۵۸۰ میلی‌متر	کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر	large
پوشش گیاهی	پوشش زیاد	پوشش کم	large

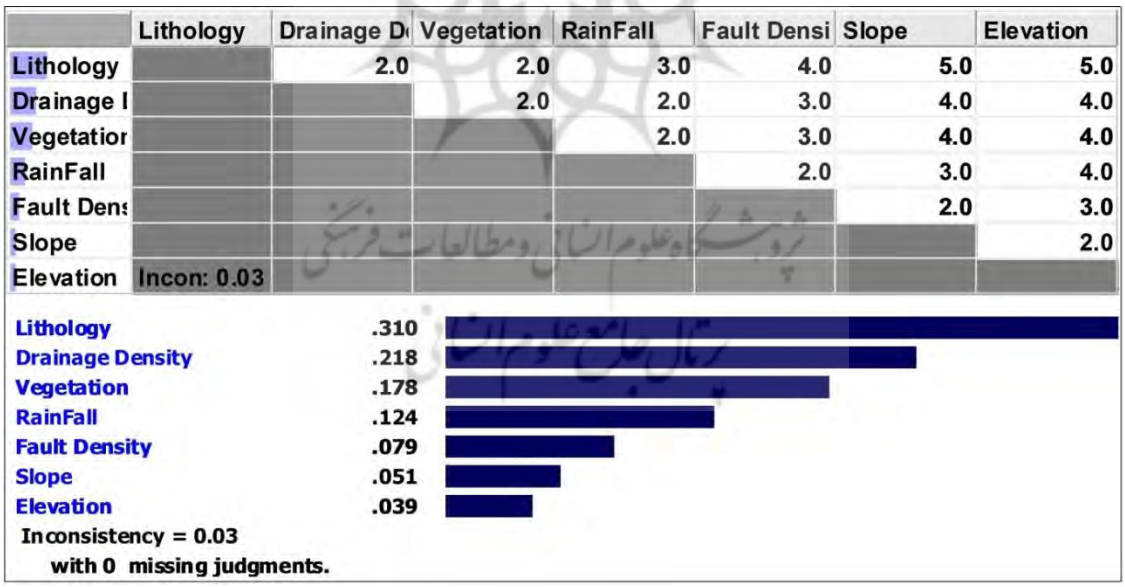
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۱۰: نقشهٔ فازی عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوزهٔ خرم‌آباد

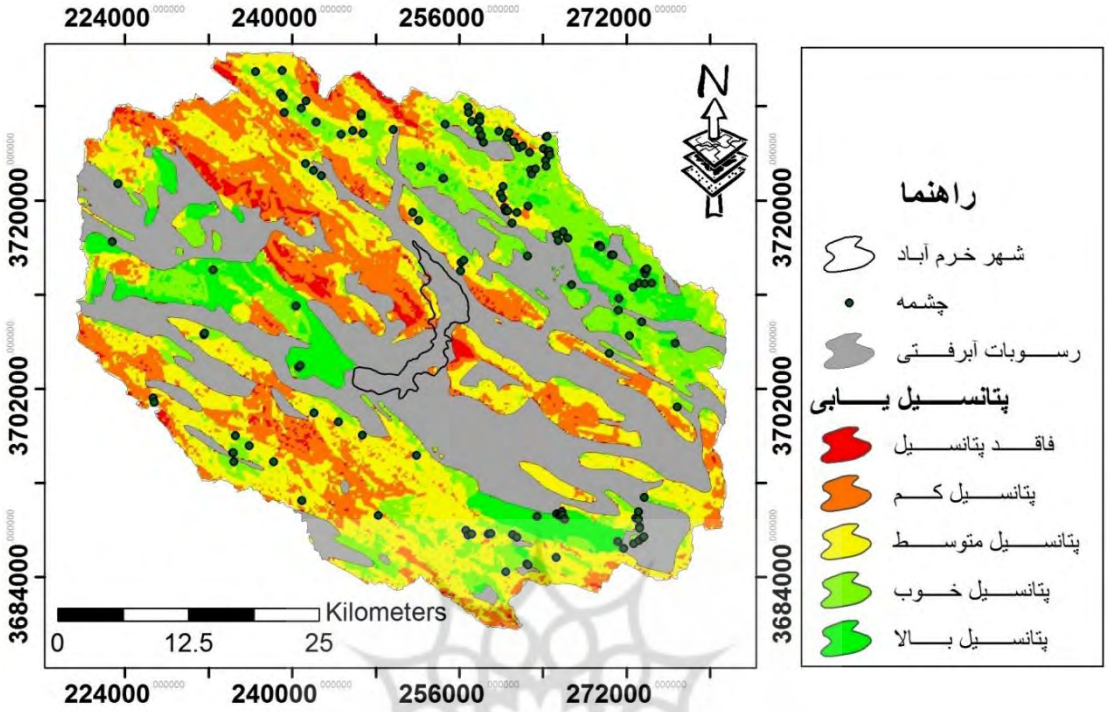
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

به‌منظور تهیه نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به روش تلفیقی سلسله‌مراتبی و فازی، ابتدا نقشه‌های فازی هر یک از عوامل در اوزان به‌دست‌آمده برای آن‌ها براساس قضاوت کارشناسی ضرب شده‌است؛ سپس نقشهٔ تمام عوامل با استفاده از عملگر گامای فازی همپوشانی داده‌شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که به‌ترتیب ۴/۵، ۲۴/۵، ۳۸/۲، ۲۳/۴ و ۹/۴ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های پتانسیلی، فاقد پتانسیل، کم، متوسط، خوب و پتانسیل بالا قرار دارد (شکل ۱۲). به‌منظور صحت‌سنجی روش استفاده‌شده از تلفیق نقشهٔ پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی و لایهٔ اطلاعاتی چشمه‌های موجود در سازندهای منطقه استفاده شده‌است. همان‌طوری‌که نشان داده شده‌است، چشمه‌ها به‌عنوان مناطق برونزد آب به‌صورت طبیعی، می‌توانند بیانگر میزان و حجم آب موجود در سازندهای سخت (با توجه به دبی و تداوم جریانی در ایام سال) باشند؛ بنابراین، بررسی موقعیت چشمه‌ها در هر منطقه می‌تواند وضعیت منابع آبی موجود در سازندهای سخت منطقه را تا حد قابل‌قبولی ارائه دهد؛ به‌همین‌منظور، در این مطالعه سعی شده‌است از این اصل کلی به‌عنوان ابزاری درجهت صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده استفاده شود. همان‌طوری‌که در شکل ۱۲ نمایش داده‌شده‌است، تمامی چشمه‌های موجود در این محدوده، در مناطق دارای پتانسیل بالا، خوب و متوسط قرار گرفته‌اند؛ به‌همین‌دلیل، به‌نظر می‌رسد نتیجهٔ این مطالعه با توجه به اطلاعات استفاده‌شده دارای صحت بالایی بوده و می‌تواند در ارزیابی‌های بعدی مورد استناد قرار گیرد.



شکل ۱۱: وزن‌دهی عوامل مؤثر بر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوزهٔ خرم‌آباد

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸



شکل ۱۲: نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوزهٔ خرم‌آباد

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۸

نتیجه

در مکان‌یابی محل‌های مناسب درجهت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی که هدف این تحقیق است، عوامل و پارامترهایی دخالت دارند که این پارامترها به‌نسبت تأثیر در شناسایی و پتانسیل‌یابی منابع آب دارای اولویت‌های وزنی متفاوتی هستند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، به‌ترتیب اولویت وزنی چهار عوامل لیتولوژی، تراکم آبراهه، پوشش گیاهی و بارندگی از بیشترین وزن در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی سازندهای سخت حوزهٔ خرم‌آباد برخوردار هستند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که به‌ترتیب ۴/۵، ۲۴/۵، ۳۸/۲، ۲۳/۴ و ۹/۴ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های پتانسیلی؛ فاقد پتانسیل، کم، متوسط، خوب و پتانسیل بالا قرار دارد که مناطق با پتانسیل بالا مناسب‌ترین مناطق برای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی هستند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل تشکیل منابع آب زیرزمینی در در آهک‌های فسیل‌دار مزوزوییک در شمال‌شرق، آهک توده‌ای آسماری در شمال حوزه و کنگلومراهای کواترنری واقع شده‌است.

همچنین نتایج حاصل از تلفیق نقشهٔ چشمه‌های منطقه و نقشهٔ پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سلسله‌مراتبی فازی از دقت بالایی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت برخوردار هستند.

منابع

- آبشیرینی، احسان؛ کاظم رنگزن؛ سعدی خورشیدی (۱۳۸۷). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش همپوشانی شاخص وزنی در محیط GIS (مطالعهٔ موردی: در محدودهٔ تاقدیس پابده)، همایش ژئوماتیک ۸۷. تهران. سازمان نقشه‌برداری کشور. صفحات ۱۱-۱.
https://www.tpbin.com/article/38707

- تاناکا، کازوئو (۱۳۸۸). مقدمه‌ای بر منطق فازی برای کاربردهای عملی آن (چاپ چهارم)، ترجمه وحیدیان کامیاد، علی، طارقیان، حامدرضا، مشهد. انتشارات دانشگاه فردوسی. صفحه ۲۱۴.
https://www.gisoom.com/book/1995663

- رحیمی، داریوش (۱۳۹۰). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی (مطالعهٔ موردی: دشت شهرکرد)، مجلهٔ جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. دورهٔ ۴۴. شمارهٔ ۴. صفحات ۱۴۲-۱۲۷.
https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=155822

- رحیمی، داریوش، موسوی، سیدحجت (۱۳۹۲). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل AHP و تکنیک GIS (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبخیز شاهرود-بسطام)، نشریهٔ جغرافیا و برنامه‌ریزی، دورهٔ ۱۷، شمارهٔ ۴۴، صفحات ۱۵۹-۱۳۹.
https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_21.html

- رحیمی، محمد؛ کریم سلیمانی (۱۳۹۵). ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان بر پایهٔ سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره، نشریهٔ علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. دورهٔ ۱۰. شمارهٔ ۳۵. صفحات ۳۸-۲۷.
http://jwmsei.ir/browse.php?a_code=A-10-411-1&sid=1&slc_lang=fa

- رضایی‌مقدم، محمدحسین؛ توحید رحیم‌پور؛ مهسا نخستین‌روحی (۱۳۹۵). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای در محیط سیستم اطلاعات‌جغرافیایی (مطالعهٔ موردی: حوضه‌های آبریز منتهی‌به دشت تبریز)، نشریهٔ اکوهیدرولوژی. دورهٔ ۳. شمارهٔ ۳. صفحات ۳۸۹-۳۷۹.
https://ije.ut.ac.ir/article_60026.html

- زروش، ناهید؛ عبدالرضا واعظی؛ حاجی کریمی (۱۳۹۳). ارزیابی پتانسیل توسعهٔ کارست در تاقدیس کبیرکوه استان ایلام با استفاده از تلفیق فازی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و سنجش‌ازدور و GIS، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی. دورهٔ ۳. شمارهٔ ۳. صفحات ۱۵۷-۱۴۴.
http://ensani.ir/fa/article/346462

- زنگنه‌تبار، ساسان؛ مهرنوش قدیمی (۱۳۹۸). بررسی پتانسیل منابع آب کارست پرآو- بیستون به‌عنوان منابع تأمین آب پایدار اکوسیستم‌های زاگرس، نشریهٔ اکوهیدرولوژی. دورهٔ ۶. شمارهٔ ۱. صفحات ۱۲۳-۱۱۱.

- صابری، عظیم؛ کاظم رنگزن؛ رضا مهجوری؛ محمدرضا کشاورزی (۱۳۹۱). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش ازدور و GIS به روش تحلیل سلسله مراتبی در تاقدیس کمستان استان خوزستان، مجلهٔ زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. دورهٔ ۱. شمارهٔ ۶. صفحات ۲۰- ۱۱.
https://www.sid.ir/Fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=238512

- صداقت، محمود (۱۳۸۵). زمین و منابع آب (آب‌های زیرزمینی)، چاپ پنجم. تهران. انتشارات دانشگاه پیام نور. صفحه ۳۷۶.
https://www.gisoom.com/book/1473875

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور (۱۳۸۳). گزارش وضعیت منابع آب کشور، انتشارات سازمان.

- سوری، سلمان؛ سیامک بهاروند؛ رضا احمدیان‌مقدم؛ مریم دهبان (۱۳۹۲). پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ کسمت)، فصلنامهٔ زمین‌شناسی کاربردی. دورهٔ ۹. شمارهٔ ۲. صفحات ۱۱۰-۱۰۱.

- سیف، عبداله؛ ابوذر کارگر (۱۳۹۰). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و سیستم جغرافیایی، مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز سیرجان، فصلنامهٔ جغرافیای طبیعی. دورهٔ ۴. شمارهٔ ۱۲. صفحات ۹۰-۷۵.
http://ensani.ir/fa/article/261704

- علیزاده، امین (۱۳۸۹). اصول هیدرولوژی کاربردی (چاپ سی‌ویکم)، مشهد: انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، صفحه ۹۴۲.
https://www.gisoom.com/book/11153333

- مفیدی‌فر، مهدی؛ سیدعلی المدرسی؛ مهدی اصلاح؛ شاهرخ ملک‌زاده بافقی (۱۳۹۳). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری تحلیل سلسله‌مراتبی در محیط GIS (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ دشت یزد اردکان)، همایش ملی کاربرد مدل‌های پیشرفتهٔ تحلیل فضایی (سنجش‌ازدور و GIS) در آمایش سرزمین. دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد. صفحات ۲۰-۱۱.
http://gis93.iauyazd.ac.ir/editor_file/93018.pdf

- واعظی‌هیر، عبدالرضا؛ مرتضی وفادار؛ واحده آقایی (۱۳۹۷). پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی موجود در واحدهای کارستی و سازندهای سخت‌کوه مورو-صوفیان با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیارهٔ SWA، AHP و F-AHP، نشریهٔ فضای جغرافیایی. دورهٔ ۱۸. شمارهٔ ۶۴. صفحات ۲۳۴-۲۱۵.
http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-1846-fa.pdf

- یوسفی‌سنگانی، کیوان؛ حسین محمدزاده؛ مرتضی اکبری (۱۳۹۱). پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی کوه‌های هزار مسجد با استفاده از مدل تلفیقی فازی و AHP (مطالعهٔ موردی: شمال‌شرقی کوه‌های هزارمسجد در استان خراسان رضوی)، اولین همایش ملی بحران آب و پیامدهای ناشی از آن. دانشگاه آزاد اسلامی واحد فردوس. صفحات ۷-۱.
https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1045010.html

- Andualem, Tesfa Gebrie & Demeke, Girum Getachew (2019). Groundwater potential assessment using GIS and remote sensing: A case study of Guna tana landscape, upper blue Nile Basin, Ethiopia, Journal of Hydrology: Regional Studies, DOI:10.1016/j.ejrh.2019.100610.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581818302428

- Baharvand, Siamak & Soori, Salman (2016). Landslide Hazard Zonation Using AHP Model (A case study: Ayvashan dam watershed, Lorestan). Journal of Geotechnical Geology, Volume 12, Issue 1, PP.29-37
http://geotech.iauzah.ac.ir/article_675151.html

- Baharvand, Siamak, Rahnamarad, Jafar & Soori, Salman (2016). Delineation of groundwater recharge potential zones using weighted linear combination method (case study: Kuhdasht plain, Iran). Journal of Geotechnical Geology, Volume 12, Issue 2, PP.119-125.
file:///C:/Documents%20and%20Settings/Kh.Mir%20Teymuri/My%20Documents/Downloads/1007420160202.pdf

- Das, Biswajity., Pal, Subodh Chandra, Malik, Sadhan & Chakrabortty, Rabin (2019). Modeling groundwater potential zones of Puruliya district, West Bengal, India using remote sensing and GIS techniques, Geology, Ecology, & Landscapes. 3(3): 223-237, DOI:10.1080/24749508.2018.1555740
https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/24749508.2018.1555740

- Gintamo, Tesfaye Tessema (2015). Ground Water Potential Evaluation Based on Integrated GIS and Remote Sensing Techniques, in Bilate River Catchment: South Rift Valley of Ethiopia. ASRJETS, Volume 10, Issue 1, pp 85-120. https://www.researchgate.net/publication/313063956_Ground_Water_Potential_Evaluation_Based_on_Integrated_GIS_and_Remote_Sensing_Techniques_in_Bilate_River_Catchment_South_Rift_Valley_of_Ethiopia

- Oh, Hyun-Joo, Kim, Yong-Sung, Choi, Jong-Kuk, Park, Eungyu & Lee, Saro (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. Journal of Hydrology, Volume 399, Issue3-4, PP.158-172.

- Rahman, Atiqur (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. Applied Geography, Volume 28, PP.32–53. http://users.clas.ufl.edu/jmjaeger/6932_GIS/EX10/DRASTIC_GIS.pdf

- Saaty, Thomas L (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, Volume 48, Issue 1, PP.9-26. https://econpapers.repec.org/article/eeeejores/v_3a48_3ay_3a1990_3ai_3a1_3ap_3a9-26.htm

- Das, Sujit (2017). Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain in Gangajalghati block, Bankura district, India using remote sensing and GIS techniques. Model. Earth Syst. Environ. DOI 10.1007/s40808-017-0396-7. https://www.researchgate.net/publication/320933540_Delineation_of_groundwater_potential_zone_in_hard_rock_terrain_in_Gangajalghati_block_Bankura_district_India_using_remote_sensing_and_GIS_techniques

- Domingos, Pinto,Sangam, Shrestha,Mukand, Babel & Sarawut, Ninsawat (2017). Delineation of groundwater potential zones in the Comoro watershed, Timor Leste using GIS, remote sensing and analytic hierarchy process (AHP) technique, Applied Water Science, https://www.researchgate.net/publication/273506823_Delineation_of_groundwater_potential_zones_in_the_Comoro_watershed_Timor_Leste_using_GIS_remote_sensing_and_analytic_hierarchy_process_AHP_technique

- Agarwal, Etishree, Agarwal, Rajat, Garg RD & Garg PK (2013). Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. Journal of Earth System Science, Volume 122, Issue 3, pp 887-898. https://link.springer.com/article/10.1007/s12040-013-0309-8

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی