استعدادیابی منابع آب کارستی با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی (مطالعه نمونه‌ای: تاقدیس سفیدکوه، استان لرستان)

سیامک بهاروند[۱*]، حمزه سارویی[۲]، سلمان سوری[۳]

چکیده

کشف منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از راه‌های تامین آب شرب در جهان با توجه به نیاز روز افزون جهانیان به آب، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. این تحقیق با هدف شناسایی منابع آبی جدید در تاقدیس سفیدکوه واقع در غرب شهر خرم‌آباد انجام گرفته است. بدین منظور هفت لایه‌ی اطلاعاتی، سنگ‌شناسی، تراکم شکستگی‌ها، تراکم آبراهه‌ها، شیب، پوشش گیاهی، دما و ارتفاع با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌ی زمین‌شناسی، نقشه‌ی پستی و بلندی و اطلاعات صحرایی، بر اساس روش فازی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شده است. پس از تهیه نقشه عوامل موثر بر استعدادیابی منابع آب کارستی، این نقشه‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، بر اساس میزان اهمیت نسبی آن‌ها، وزن‌دهی شدند. سپس برای تهیه نقشه استعدادیابی منابع آب کارستی، لایه‌های موجود با روش هم‌پوشانی در محیط نرم‌افزار ArcGIS با استفاده از ماژول Raster Calculator با هم تلفیق شدند. بر اساس نتایج به دست آمده به ترتیب ۱۲/۳، ۲۲/۶۲، ۲۷/۷۹، ۲۳/۹۱ و ۱۳/۶۹ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های با استعداد خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد وجود دارد.

واژه های کلیدی: تاقدیس سفیدکوه، استان لرستان، کارست، آب زیرزمینی

مقدمه

با توجه به توزیع نامتعادل زمانی و مکانی منابع آب‌های سطحی و استعداد بالای آلودگی این منابع، امروزه تقاضا برای آب‌های زیرزمینی جهت مصارف شرب،

[۱] استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران
تلفن: ۰۹۱۶۳۶۷۲۲۹۴ Email: sbbaharvand53@gmail.com
[۲] استادیار، گروه زمین‌شناسی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
[۳] کارشناس ارشد، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

کشاورزی و صنعت افزایش یافته است. اما استفاده روزافزون و بی‌رویه از آبخوان‌های آبرفتی و افت سطح آب در این آبخوان‌ها، باعث شده است که جستجو برای یافتن سایر منابع آب زیرزمینی در کارست و سازندهای سخت بیشتر مورد توجه قرار گیرد (یوسفی سنگانی و همکاران، ۱۳۹۱). سازندهای کارستی کربناته ۱۱٪ از سطح زمین را در ایران پوشانده‌اند که این مقدار در زاگرس به ۲۳٪ افزایش می‌یابد (رییسی و کوثر، ۱۹۹۷). منابع آب‌های کارستی ازجمله منابع بسیار با ارزشی هستند که سهم قابل توجهی در تأمین آب مورد نیاز بشر دارا هستند. استفاده از این منابع در حال حاضر از طرف وزارت نیرو صرفاً جهت مصارف آینده آب شهری و صنعتی تعیین گردیده است. این منابع محدود، نیازمند اجرای صحیح طرح‌های آب‌یابی و اکتشافات منابع جدید، بهره برداری بهینه و اعمال مدیریت صحیح درحفظ و نگهداری آنها است.

در دو دهه‌ی اخیر استفاده به روش‌هایی نظیر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور در آب و زمین‌شناسی بسیار توجه شده است که این روش‌ها ارزیابی سریع منابع آب را امکان‌پذیر می‌نمایند (پریجا و همکاران، ۲۰۱۱). سنجش از دور نه تنها دامنه‌ی بزرگ مقیاسی را از مشاهدات گسترده زمانی-مکانی را فراهم می‌کند بلکه باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه می‌شود (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸). سامانه اطلاعات جغرافیایی نیز ابزاری قوی و مفید برای مدیریت داده‌های مکانی و تصمیم‌گیری در چندین مورد از جمله زمین‌شناسی و موضوع‌های محیطی است (صابری و همکاران، ۱۳۹۱).

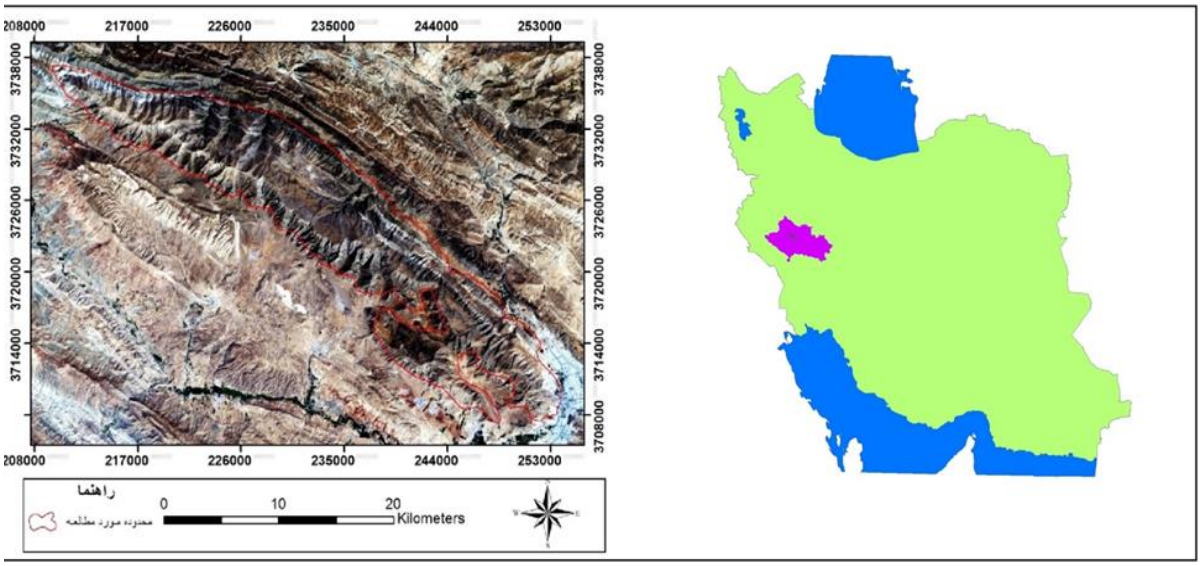
مطالعه‌ی سفره‌های کارستی به دلیل ناهمگنی در خصوصیات آب‌پویایی با روش‌های معمول حفر چاه‌های اکتشافی و مشاهده‌ای دارای هزینه بالایی هستند که برای شناخت نسبی سفره‌های آب این هزینه‌ها به‌ندرت تامین می‌شود (خدایی، ۱۳۷۹). بدین منظور با استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی به جمع‌آوری اطلاعات در محدوده‌ی تاقدیس سفیدکوه پرداخته شده است. در این تحقیق تجزیه و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی انجام گردیده است تا علاوه بر استفاده از نظرهای کارشناسی در روش سلسله مراتبی، با توسعه دادن فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به سمت فضای فازی (استفاده از مفاهیم اساسی نظریه مجموعه‌های فازی و به ویژه اعداد فازی)، عدم در نظر گرفتن بی دقتی و عدم اطمینان ذاتی ادراکات تصمیم گیرندگان و انعکاس نظرات آنها به صورت یک عدد قطعی برطرف گردد. تا کنون در زمینه‌ی استعدادیابی منابع آب زیرزمینی مطالعاتی انجام گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

رحیمی و موسوی (۱۳۹۲) به استعدادیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش AHP و نرم‌افزار GIS در حوضه‌ی آبخیز شاهرود-بسطام پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده پهنه‌ی استعدادی بالا برای استخراج منابع آب زیرزمینی بیشتر بر رسوب‌های درشت دانه‌ی دوران چهارم و مخروطه‌های‌افکنه و پهنه‌ی بدون استعداد بر ارتفاعات و مناطق آهکرسی منطبق بود؛ مفیدی‌فر و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از روش تصمیم‌گیری تحلیل سلسله‌مراتبی، منابع آب زیرزمینی در حوضه‌ی یزد-اردکان را استعدادیابی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان دادند که حدود ۷۰ درصد از مساحت منطقه‌ی مطالعه شده دارای استعداد خوب و خیلی خوب از نظر آب زیرزمینی است؛ فتحی‌زاد و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به استعدادیابی آب‌های زیرزمینی در حوضه‌ی مهدیشهر پرداختند. در این تحقیق که از لایه‌های اطلاعاتی سنگ‌شناسی، خطواره‌ها، شیب، پستی و بلندی، تراکم زهکشی، پوشش گیاهی و خطوط هم‌باران استفاده شده بود نتایج به دست آمده نشان داد که آبرفت‌های دوران چهارم از اهمیت بیشتری در استعدادیابی منابع آب زیرزمینی منطقه برخوردار هستند؛ رضایی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از روش تحلیل شبکه به استعدادیابی منابع آب زیرزمینی در حوضه‌ی آبریز منتهی به دشت تبریز پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش دو عامل زمین‌شناسی و بارش بیشترین نقش را در استعدادیابی منابع آب زیرزمینی منطقه داشته و پهنه‌های با استعداد بالای آب زیرزمینی بر ارتفاعات پایین و رسوباهای دوران چهارم منطبق است؛ هیون جو و همکاران (۲۰۱۱) به استعدادیابی منابع آب زیرزمینی شهر پوهانگ کره با استفاده از سامانه ازاطلاعات جغرافیایی پرداختند، نتایج به دست آمده نشان دادند که دقت نقشه‌ی حاصله بیش از ۷۷ درصد است. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده لایه‌ی خاک بیشترین تاثیر و ارتفاع کمترین اثر بر استعدادیابی منابع آب زیرزمینی محدوده‌ی مطالعه

شده را داشته است؛ نگاراجان و سینگ (۲۰۰۹)، برای استعدادیابی منابع آب زیرزمینی منطقه‌ی تامیل نادو هندوستان از عکس‌های هوایی، نقشه‌های زمین‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی، گروه‌های آب‌شناسی خاک، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و نقشه‌ی شبکه زهکشی استفاده کردند و منطقه را به سه ناحیه‌ی خوب، متوسط و فقیر از نظر استعداد آب زیرزمینی تقسیم کردند؛ ایتیشری و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی با استفاده از تحلیل شبکه‌ای، آب زیرزمینی در منطقه‌ی یونائو هندوستان را استعدادیابی کردند. نتایج این تحقیق نشان دادند که حدود ۱۵ درصد از مساحت منطقه، استعداد خوب و خیلی خوب از نظر آب زیرزمینی دارد؛ دومینگوس و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از سنجش از دور، سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی و تحلیل سلسله مراتبی به استعدادیابی منابع آب زیرزمینی حوضه‌ی کومورو واقع در تیمور شرقی پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده، دشت آبرفتی واقع در شمال غرب منطقه از استعداد بالایی برخوردار بوده است.

محدوده مورد مطالعه

تاقدیس سفیدکوه در استان لرستان و در غرب شهر خرم‌آباد قرار دارد (شکل ۱). متوسط ارتفاع در این تاقدیس ۲۱۲۳ متر است. این تاقدیس بخشی از زاگرس چین‌خورده بوده که تشکیلات آهکی آن دارای سن کرتاسه است



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی تاقدیس سفیدکوه

روش تحقیق

در این مطالعه از روش سلسله مراتبی فازی به عنوان یکی از روش‌های متداول در استعدادیابی منابع آب استفاده شده است. این تحقیق عموماً از روش تحلیلی و با استناد به مطالعات میدانی و کتابخانه‌ای انجام شده است. به‌طور کلی برای انجام این تحقیق مراحل زیر طی شده است:

۱- رقومی کردن نقشه پستی و بلندی منطقه و ساختن نقشه رقومی ارتفاع (Dem) به منظور تهیه لایه‌های اطلاعاتی شیب، طبقات ارتفاعی و شبکه‌ی آبراهه‌ها

۲- تهیه‌ی لایه‌های اطلاعاتی سنگ‌شناسی با استفاده از نقشه‌ی زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای منطقه و بازدیدهای میدانی

۳- استخراج پوشش گیاهی: کسب اطلاعات درباره وضعیت پوشش‌گیاهی از قبیل میزان و پراکنش آنها، با توجه به تأثیری که این عامل در کارستی شدن دارد، از اهمیت زیادی برخوردار است. گردآوری اطلاعات در باره‌ی تغییرات پیوسته پوشش گیاهی با روش‌های معمولی بسیار مشکل و پرهزینه است. در این حالت، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای امکان مطالعه گستره پوشش‌گیاهی را فراهم می سازد. شاخص‌های گیاهی متعددی برای استخراج پوشش گیاهی از داده‌های ماهواره‌ای ارائه شده‌اند. در این مطالعه، از شاخص گیاهی NDVI، به دلیل سادگی و حساسیت نسبتاً زیاد آن به پوشش گیاهی استفاده شده است (فلاح‌پور طزنجی، ۱۳۹۲). با استفاده از شاخص NDVI،

میزان پوشش گیاهی با دامنه اعداد بین ۱+ تا ۱- استخراج گردید که تنها اعداد مثبت نشان دهنده‌ی پوشش گیاهی است.

۴- تهیه لایه شکستگی‌ها: در تحقیق حاضر برای استخراج خطواره‌ها و تهیه نقشه مربوطه، از تصویر ماهواره‌ای لندست ETM^+ (باند ۷) به علت اینکه کمتر تحت تأثیر پراکنش‌های جوی قرار می‌گیرد استفاده شده است. ابتدا فیلتر Sobel در چهار جهت اصلی اعمال و همچنین از فیلتر آشکارساز لبه برای استخراج خطواره‌های منطقه مطالعه شده استفاده گردید، سپس با استفاده ازتصویر ترکیب رنگی کاذب منطقه و تصاویر سه بعدی نرم افزار Google Earth از منطقه مطالعه شده خطواره‌های کاذب و مشکوک منطقه مانند جاده‌ها، آبراهه‌ها و غیره حذف شدند و با استفاده از تابع density در نرم افزار Arc GIS نقشه چگالی خطواره‌های منطقه به‌دست آمده است.

۵- تهیه نقشه‌ی دمای منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای +ETM (باند ۱-۶): از جمله روش‌های متداول تعیین دمای سطح زمین استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی است. حال آنکه این داده‌ها تنها معرف دمای یک نقطه مشخص است و در برخی موارد تعمیم این اطلاعات به مناطق همجوار تخمین درستی از دمای هوا را به دست نمی‌دهد. داده‌های دورسنجی با داشتن قابلیت‌هایی همچون دید وسیع، تکرارپذیری، تنوع داده‌ها و در بر گرفتن تمامی نقاط سطح زمین می‌توانند روشی مناسب جهت بازیابی دمای درخشندگی سطح زمین محسوب گردند. جهت تعیین دما با استفاده از تصاویر سنجش‌ازدور، با تهیه‌ی تصاویر اولیه (سال ۲۰۱۶)، بدلیل شرایط مختلف محیطی لازم است تا تصاویر تهیه شده تصحیح شوند. برای این منظور دو روند اعمال تصحیحات یعنی تصحیحات هندسی و رادیومتریکی بر روی تصاویر انتخاب شده اعمال گردیده است. به منظور آنالیز بهتر و جامع‌تر و جهت رسیدن به نتایج مطلوب‌تر لازم است تا تصحیح اتمسفری نیز اعمال گردد. برای کاهش این اثر رابطه ۱ در نظر گرفته شده است (کول و همکاران، ۲۰۱۰).

$$C_R = \frac{R - L^{\uparrow}}{\varepsilon\tau} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} L^{\downarrow} \qquad (۱)$$

در این رابطه εضریب گسیلمندی، CR رادیانس تصحیح شده، τضریب نفوذ، $L^{\downarrow}$ و $L^{\uparrow}$ به ترتیب رادیانس پائین و بالا رونده است. مقادیر ضریب نفوذ و رادیانس بالا و پائین رونده به صورت محلی از وب سایت NASA که برای تصحیحات اتمسفری در نظر گرفته شده است، تهیه می‌شود. به طور کلی باندهای حرارتی سنجنده‌های ماهواره‌ای، در محدوده‌هایی از طیف الکترومغناطیس تصویربرداری می‌کنند که اصطلاحاً پنجره اتمسفری نامیده می‌شود. بنابراین در سنجنده‌هایی که هدف آنها اندازه-گیری دمای سطح زمین است، از این پنجره‌های اتمسفری استفاده می‌شود. البته اتمسفر همچنان بر دقت اندازه‌گیری دمای سطح زمین اثرگذار است. دو روش کلی برای تصحیح خطای اتمسفر وجود دارد. در روش اول که اصطلاحاً تصحیح مطلق اتمسفر نامیده می‌شود، با در اختیار داشتن اطلاعات پروفیل جوی در زمان تصویر برداری، اثرات آن شبیه‌سازی و تصحیح می‌شود. در روش دوم، تحت عنوان تصحیح نسبی اتمسفر، از تفاوت اثرگذاری اتمسفر در باندهای مختلف حرارتی استفاده می‌شود و یا به کمک عوارضی در تصویر که دمای آنها معلوم است، خطای اتمسفر برطرف می‌شود.

پس از تصحیحات ارائه شده، برای محاسبه دمای روشنایی می‌توان از رابطه‌ی (۲) استفاده کرد، در این رابطه T_R دمای روشنایی بر حسب کلوین و مقادیر K_1 و K_2 برای باند ۱-۶ سنجنده‌ی +ETM به ترتیب ۶۶۶/۰۹ و ۱۲۸۲/۷۱ است.

$$T_R = \frac{K_2}{Log(\frac{K_1\varepsilon}{C_R} + 1)} \qquad (۲)$$

۶- استانداردسازی لایه‌ها با استفاده از منطق فازی: با تعیین مجموعه‌ای از معیارها برای ارزیابی گزینه‌های تصمیم‌گیری، لازم است که هر معیار به صورت یک نقشه در پایگاه داده‌های GIS ذخیره شود. در اندازه‌گیری صفات، دامنه متنوعی از مقیاس‌ها استفاده شده، بر همین اساس لازم است ارزش‌های موجود در لایه‌های مختلف نقشه به واحدهای قابل مقایسه و در تناسب با هم تبدیل شوند. با انجام این کار نقشه‌های معیار و قابل مقایسه خواهیم داشت. یکی از روش‌های معیار سازی، روش فازی است. عملیات فازی‌سازی، ورودی‌ها را گرفته و با استفاده از توابع عضویت مربوطه، یک درجه‌ی مناسب به هر یک نسبت می‌دهد (مهجوری، ۱۳۹۱). تابع عضویت را می‌توان به‌صورت درجه‌ی تعلق عناصر مجموعه مرجع به زیر

مجموعه‌های آن تعریف کرد که به شکل $\mu c(X)$ نمایش داده می‌شود. برای به دست آوردن 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 Linear و Userdefined نقشه‌های هر یک از عوامل مؤثر بر استعدادیابی منابع آب کارستی به نقشه‌های فازی تبدیل شده‌اند.

۷- وزن‌دهی به عوامل موثر در استعدادیابی منابع آب کارستی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی: AHP یک روش نیمه‌کیفی در مطالعه‌ی منابع آب است که شامل یک ماتریس وزن دهی بر مبنای مقایسه‌های زوجی بین عوامل بوده و میزان مشارکت هر یک از عوامل را در استعدادیابی مشخص می‌کند (آیالو و همکاران، ۲۰۰۵). از مزایای روش مزبور این است که اعمال نظر کارشناسی افراد را تا حد زیادی آسان‌تر کرده و احتمال خطا را کاهش می‌دهد. همچنین، در این روش می‌توان تعداد زیادی از عوامل را دخالت داد و با استفاده از نظر کارشناسی وزن هر عامل را به دست آورد.

در تحلیل سلسله مراتبی روش کار بدین صورت است که ابتدا به منظور تعیین ارجحیت عوامل مختلف و تبدیل آنها به مقادیر کمی از قضاوت‌های شفاهی (نظر کارشناسی) بر مبنای مقایسه‌های زوجی استفاده می‌شود، به طوری که تصمیم گیرنده ارجحیت یک عامل را نسبت به علل دیگر به صورت جدول (۱) در نظر گرفته و این قضاوت‌ها را به مقادیر کمی بین ۱ الی ۹ تبدیل می‌کند. سپس نتایج این مقایسات، برای محاسبه شاخص ناسازگاری[۴] به نرم افزار Expert Choice وارد می‌گردد. اگر شاخص ناسازگاری محاسبه شده کمتر از ۰/۱ باشد نتایج قابل قبول بوده و در غیر این صورت باید دوباره در وزن‌دهی تجدید نظر شود.

۸- تهیه نقشه‌ی استعدادیابی منابع آب کارستی با هم‌پوشانی نقشه وزنی هر یک از عوامل

۹- ارزیابی نقشه‌ی استعدادیابی منابع آب کارستی با استفاده از لایه‌ی چشمه‌های اصلی منطقه

نتایج و بحث

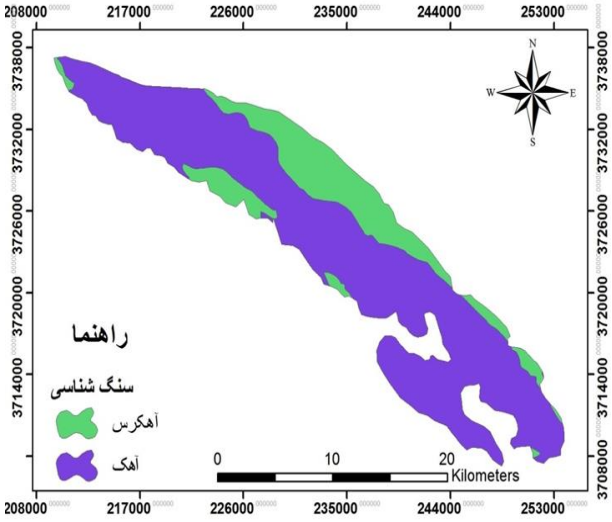
به منظور تهیه نقشه‌ی استعدادیابی منابع آب در محدوده مطالعه شده ابتدا نقشه عوامل مؤثر در استعدادیابی تهیه گردید (اشکال ۲ تا ۸). بررسی نتایج به دست آمده از نقشه‌های هر یک از عوامل به شرح زیر است:

بررسی نقشه سنگ‌شناسی: وجود سازندهای آهکی در این منطقه که دارای توان بالای انحلال است، شرایط را برای ایجاد و توسعه‌ی کارست فراهم می‌کند (شکل ۲). به این ترتیب می‌توان انتظار داشت که تقریباً در تمامی محدوده‌ی تاقدیس مطالعه شده استعداد بالای ذخیره و انتقال آب زیرزمینی وجود داشته باشد.

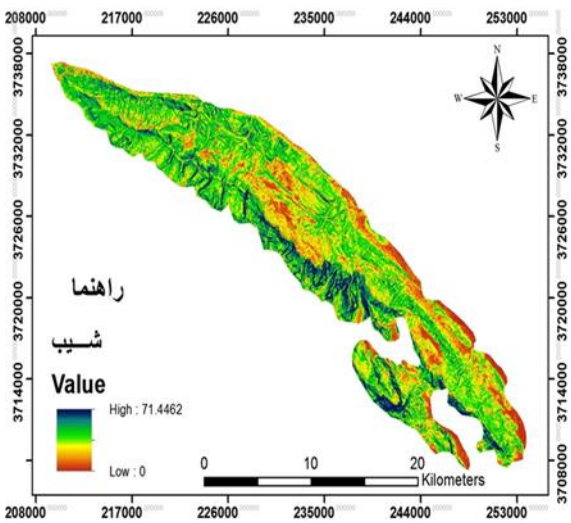
بررسی نقشه‌ی شیب: به‌طور کلی در طبقات مختلف شیب (شکل ۳)، آب زیرزمینی تمایل دارد در مناطقی با کمترین شیب پستی و بلندی و به تبع آن شیب آبی تجمع یابد. به این ترتیب امکان نفوذ آب در مناطقی با شیب کمتر بسیار بیشتر از مناطقی با شیب پستی و بلندی زیاد است که همین عامل باعث توسعه بیشتر کارست در سازندهای آهکی می‌شود. محدوده شیب در منطقه‌ی مورد مطالعه بین ۰ تا ۷۱ درجه است. اختلاف ارتفاع بالا در سطح منطقه (حداقل ارتفاع ۱۱۷۷ متر و حداکثر ارتفاع ۳۰۶۹ متر) باعث شده است تا دامنه‌های زیادی با شیب‌های بالا تشکیل شوند، که این دامنه‌ها حرکت آب را به سوی مناطق با ارتفاع و شیب کمتر هدایت می‌کنند.

بررسی نقشه‌ی تراکم خطواره‌ها: بررسی تراکم خطواره‌های موجود در محدوده مطالعه شده (شکل۴) نشان می‌دهد که بیشترین تراکم در یال جنوبی تاقدیس است که این خود می‌تواند عاملی برای انتقال آب زیرزمینی از نقاط ارتفاعی بالاتر به مناطق پست‌تر باشد. طبق بررسی‌های انجام شده در قسمت‌های با تراکم بالای خطواره، شبکه‌ی آبراهه از تراکم پایین‌تری برخوردار

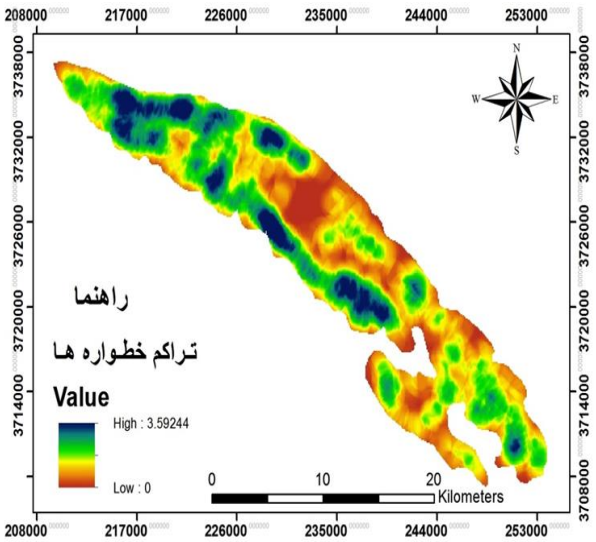
[۱] Inconsistency



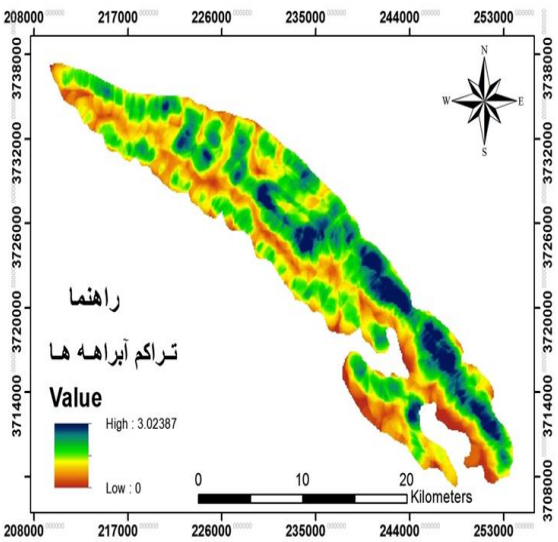
شکل ۲- نقشه‌ی سنگ‌شناسی محدوده‌ی مطالعه شده



شکل ۳- نقشه‌ی درجه‌های شیب محدوده‌ی مطالعه شده



شکل ۴- نقشه‌ی تراکم خطواره‌های محدوده‌ی مطالعه شده (کیلومترمربع)



شکل ۵- نقشه‌ی تراکم آبراهه‌های محدوده مطالعه شده (کیلومترمربع)

است که در این مناطق به دلیل نرخ بالای جریان آب نفوذی به درون زمین، انحلال سنگ‌ها و کارستی شدن از استعداد بالایی برخوردار است.

بررسی نقشه‌ی تراکم آبراهه‌ها: بر خلاف خطواره‌ها بیشترین تراکم شبکه آبراهه در یال شمالی است (شکل ۵) و باید انتظار داشت که وجود شبکه متراکم زهکشی در این مناطق نیز عاملی جهت تغذیه‌ی ساختارهای رسوبی موجود در این مناطق و به دنبال آن بالا بردن ذخیره‌ی آبی آن‌ها شود.

بررسی نقشه‌ی ارتفاع: بررسی نقشه‌ی ارتفاعی محدوده مطالعه شده نشان می‌دهد که کمترین ارتفاع‌ها؛ در یال شرق و شمالی شرق تاقدیس واقع شده است و با توجه به ارتباط بین حرکت آب زیرزمینی از ارتفاعات مجاور به مناطق پست تر و تجمع در این نواحی، انتظار می‌رود که احتمال اکتشاف آب زیرزمینی در این مناطق وجود داشته باشد. همچنین نتایج به دست آمده از ارتباط تراکم خطواره‌ها با نقشه ارتفاع منطقه نشان می‌دهد که مناطق با تراکم بیشتر خطواره در ارتفاعات متوسط قرار دارد که این عامل نیز می‌تواند باعث انتقال آب به مناطق پست‌تر شود (شکل ۶).

بررسی نقشه‌ی دما: بررسی نقشه‌ی دمای تاقدیس سفیدکوه نشان می‌دهد که محدوده‌ی دمایی درخشندگی منطقه بین ۱۷ تا ۶۰ درجه است. با توجه به تأثیر معکوس دما با توسعه‌ی کارست (به‌طوری که افزاش دما

جدول ۱- طبقه‌بندی ارجحیت مقادیر وزن‌ها بر اساس قضاوت کارشناسی (ساعتی و وارگاس، ۲۰۰۱؛ ساعتی، ۱۹۸۰)

توصیف زباني ارجحیت طبقات	مقدار عددي وزن‌ها
كاملاً مهم يا كاملاً مطلوب تر	۹
اهميت خيلي قوي	۷
اهميت يا مطلوبيت قوي	۵
كمي مطلوب تر يا كمي مهم تر	۳
اهميت يا مطلوبيت يكسان	۱
اولويت بين فواصل	۲، ٤، ٦ و ۸

جدول ۲- توابع عضویت استفاده شده در استعدادیابی منابع آب کارستی محدوده تاقدیس سفیدکوه

پارامتر	توضیح	تابع استفاده شده
سنگ‌شناسی	سازندهای آهکی به دلیل قابلیت انحلال، استعداد بالاتری دارند	Userdefined
شیب	با کاهش شیب استعداد منابع آب کارستی بیشتر است	Linear
تراکم گسل	با افزایش تراکم شکستگی‌ها قابلیت نفوذ آب بیشتر است	Linear
تراکم آبراهه	با افزایش تراکم آبراهه‌ها تغذیه ساختارهای رسوبی بیشتر می‌شود	Linear
ارتفاع	با کاهش ارتفاع استعدادیابی منابع آب کارستی بیشتر است	Linear
پوشش گیاهی	با افزایش تراکم پوشش گیاهی قابلیت نفوذ آب بیشتر می‌شود	Userdefined
دما	با کاهش دما تابع عضویت افزایش می‌یابد	Linear

جدول ۳- وزن‌دهی عوامل مؤثر بر استعدادیابی منابع آب کارستی در محدوده‌ی تاقدیس سفیدکوه

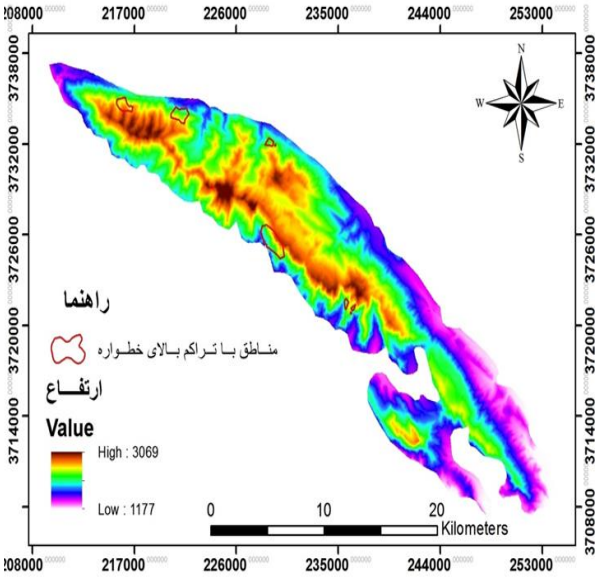
	سنگ‌شناسی	تراکم شکستگی	تراکم آبراهه	دما	شیب	ارتفاع	پوشش گیاهی	وزن	ضریب ناسازگاری
سنگ‌شناسی	۱	۲	۲	۳	۴	۵	۶	۰/۳۱۶	
تراکم شکستگی		۱	۱	۲	۳	۴	۵	۰/۱۹۸	
تراکم آبراهه			۱	۲	۳	۴	۵	۰/۱۹۸	۰/۰۲
دما				۱	۲	۳	۴	۰/۱۲۳	
شیب					۱	۲	۳	۰/۰۷۸	
ارتفاع						۱	۲	۰/۰۵۱	
پوشش گیاهی							۱	۰/۰۳۵	

موجب کاهش انحلال گاز کربنیک درآب باران می‌گردد) به دماهای پایین ارزش بیشتر و به دماهای بالاتر ارزش کمتر داده شده است.

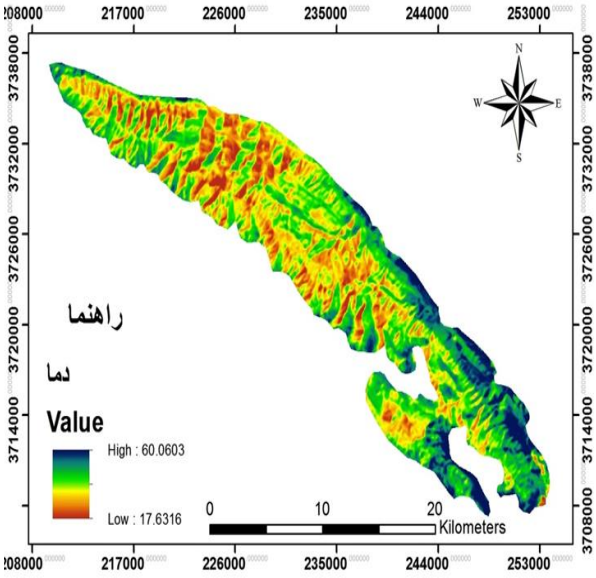
بررسی نقشه‌ی پوشش گیاهی: بررسی نقشه پوشش گیاهی منطقه نشان می‌دهد که قسمتی از یال شمالی تاقدیس به دلیل پوشش گیاهی متراکم‌تر دارای قابلیت بالاتری از لحاظ استعداد منابع آب کارستی است.

در این تحقیق به منظور فازی‌سازی نقشه هر یک از عوامل موثر در استعدادیابی منابع آب کارستی، از توابع عضویت فازی استفاده شده است (جدول ۲). پس از تهیه‌ی نقشه‌ی فازی عوامل، با مقایسه‌ی زوجی (بر اساس جدول ۱) عوامل دو به دو با هم مقایسه و نتایج به دست آمده به منظور محاسبه وزن‌های هر یک از عامل‌های استفاده شده به نرم‌افزار Expert Choice انتقال داده شد. نتایج به دست آمده از محاسبه‌ی ضریب ناسازگاری نشان داد که مقایسه‌ها به درستی انجام شده‌اند (جدول ۳).

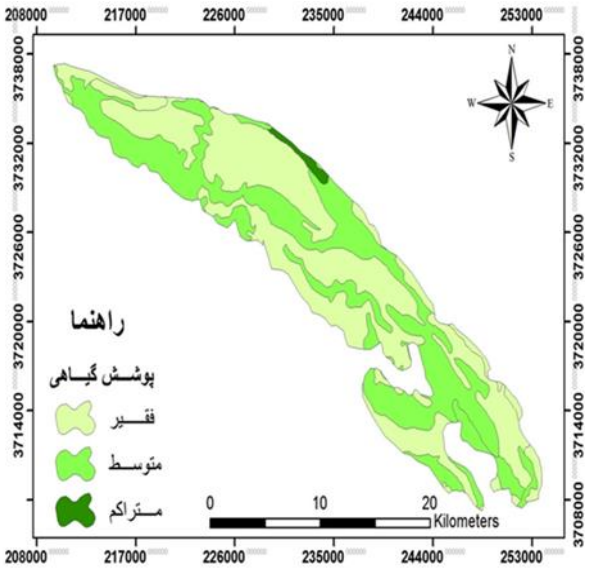
به منظور تهیه نقشه‌ی استعدادیابی منابع آب زیرزمینی با روش تلفیقی سلسله مراتبی و فازی؛



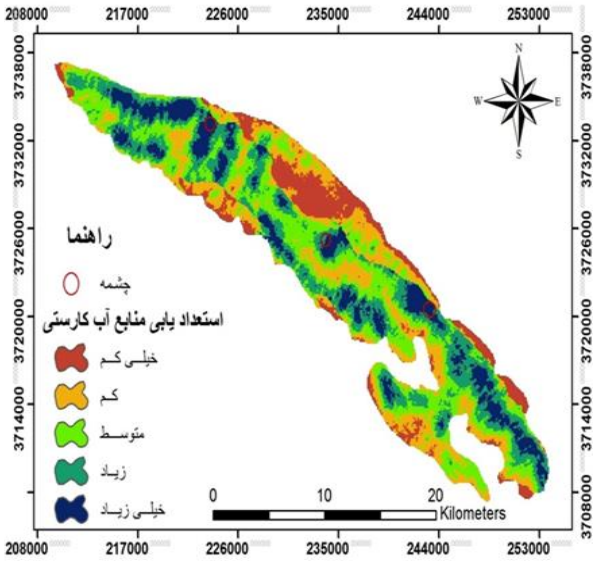
شکل ۶- نقشه‌ی ارتفاع محدوده‌ی مطالعه شده (متر)



شکل ۷- نقشه‌ی دمای محدوده‌ی مطالعه شده (درجه‌ی سانتی‌گراد)



شکل ۸- نقشه‌ی پوشش گیاهی محدوده‌ی مطالعه شده



شکل ۹- نقشه‌ی استعدادیابی منابع آب کارستی محدوده‌ی مطالعه شده

نقشه‌های فازی هر یک از عوامل در وزن‌های به دست آمده برای آنها بر اساس قضاوت کارشناسی ضرب و نقشه تمام عوامل همپوشانی داده شدند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به ترتیب ۱۲/۳، ۲۲/۶۲، ۲۷/۷۹، ۲۳/۹۱ و ۱۳/۶۹ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های با استعداد خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و استعداد خیلی زیاد قرار دارند (شکل ۹).

پس از تهیه هر روش لازم است که نتایج به‌دست آمده با توجه به واقعیات و اطلاعات موجود پیرامون آنها، بررسی گردد. به عبارتی، باید نقشه‌ی استعدادیابی به‌دست آمده، صحت سنجی گردد. در غیر این صورت، اعتماد به نتایج استعدادیابی یا تصمیم‌گیری جهت انجام مراحل بعدی مطالعات، از جمله اکتشافات ژئوفیزیکی و حفاری-های اکتشافی، از احتمال موفقیت کمتری برخوردار گردیده و خطر کردن سرمایه‌گذاری برای انجام مطالعه‌های مذکور بالا خواهد بود. در چنین شرایطی، نتایج استعدادیابی در هاله‌ای از ابهام و عدم اطمینان قرار گرفته و نه تنها کمکی به صرفه‌جویی در وقت و هزینه نخواهد نمود، بلکه ممکن است موجب سردرگمی، طولانی شدن مطالعه‌ها، افزایش هزینه‌ها و از همه بدتر، اخذ نتایج نامطلوب و عدم

بهره‌مندی از منابع آب موجود گردند.

برای صحت سنجی روش ارائه شده برای توسعه‌ی کارست در منطقه مطالعه شده از موقعیت چشمه‌های بزرگ و دائمی در سطح تاقدیس استفاده شد (شکل ۹). از آنجایی که که در مناطق کارستی چشمه‌های بزرگ با آبدهی زیاد معرف مناطق کارستی توسعه یافته هستند، برای صحت‌سنجی روش ارائه شده با توجه به محدودیت اطلاعات، وسعت زیاد و همچنین صعب‌العبور بودن منطقه سه چشمه‌ی بزرگ در سطح تاقدیس سفیدکوه برای این کار انتخاب شدند. با هم‌پوشانی لایه‌ی چشمه‌ها و روش توسعه‌ی کارست منطقه مشاهده شد که تمامی چشمه‌ها در پهنه‌های با استعداد کارست زیاد و خیلی‌زیاد قرار گرفته‌اند و انطباق بسیار خوبی بین روش پیشنهادی و موقعیت چشمه‌های بزرگ منطقه وجود دارد. با توجه به نقشه‌ی زمین‌شناسی، روند عمومی خطواره‌ها و شکستگی‌های بزرگ به نظر می‌رسد ارتباط آب‌شناسی میان حوضه‌ی آبگیر چشمه‌های منطقه مطالعه شده و حوضه‌های مجاور وجود ندارد. لذا پیشنهاد می‌شود جهت اطمینان بیشتر، نتایج این پژوهش را با تحقیقاتی در خصوص هیدروشیمی و هیدروژئوشیمی حوضه‌های آبگیر و منابع آبگیر مجاور مقایسه و با درصد اطمینان بالاتری اظهار نظر انجام گردد.

نتیجه‌گیری

در بررسی و ارزیابی میزان کارایی روش‌های نوین GIS و RS در مدیریت و استخراج لایه‌های اطلاعاتی به هنگام مطالعه منابع آب کارستی در تاقدیس سفیدکوه، که هدف این تحقیق می باشد، عوامل و مولفه‌هایی دخالت دارند که این عوامل به نسبت تاثیر در پی جویی و پتانسیل‌یابی منابع آب دارای اولویت‌های وزنی متفاوتی هستند. در این تحقیق به ترتیب اولویت وزنی هر یک از عوامل در استعدادیابی منابع آب کارستی تاقدس سفیدکوه از عوامل سنگ‌شناسی، تراکم خطواره‌ها، تراکم آبراهه، دما، شیب، ارتفاع و پوشش گیاهی استفاده شده است.

در این تحقیق به منظور استعدادیابی منابع آب کارستی ار روش تلفیقی سلسله مراتبی و فازی استفاده شده است تا علاوه بر استفاده از نظرهای کارشناسی در روش سلسله مراتبی با توسعه دادن فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به سمت فضای فازی (استفاده از مفاهیم اساسی نظریه مجموعه‌های فازی و به ویژه اعداد فازی)، عدم در نظر گرفتن بی دقتی و عدم اطمینان ذاتی ادراکات تصمیم گیرندگان و انعکاس نظرات آنها به صورت یک عدد قطعی برطرف گردد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که به ترتیب ۱۲/۳، ۲۲/۶۲، ۲۷/۷۹، ۲۳/۹۱ و ۱۳/۶۹ درصد از مساحت منطقه در پهنه‌های با استعداد خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و استعداد خیلی زیاد قرار دارد که مناطق با استعداد بالا مناسب ترین مناطق برای بهره‌برداری از منابع آب کارستی هستند.

ارزیابی نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان از دقت بالای نقشه‌ی تهیه شده دارد. بنابر نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان دریافت که روش‌های GIS و RS به خوبی در تولید لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در بخش مطالعات منابع آب قابل استفاده هستند و می‌توان به وسیله آن‌ها لایه‌هایی را تولید نمود که در تجزیه و تحلیل مسائل و مشکلات مدیریت منابع آب کارآمد هستند.

منابع:

۱) خدایی، ک. ۱۳۷۹. نقش نمایانگرهای آب زیرزمینی در شناسایی منابع آب کارستی حوزه نمونه ارومیه با استفاده از GIS. پایان نامه کارشناسی ارشد آب‌شناسی. دانشگاه شهید بهشتی.

۲) رحیمی، د. و موسوی، س.ح. ۱۳۹۲. استعدادیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل AHP و تکنیک GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شاهرود-بسطام). نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی. ۱۷(۴۴): ۱۵۹-۱۳۹.

۳) رضایی‌مقدم، م.ح.، رحیم‌پور، ت. و نخستین‌روحی، م. ۱۳۹۵. استعدادیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز منتهی به دشت تبریز). نشریه اکوهیدرولوژی. ۳(۳): ۳۷۹-۳۸۹.

۴) صابری، ع.، رنگزن، ک.، مهجوری، ر. و کشاورزی، م.ر. ۱۳۹۱. استعداد یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش از دور و GIS به روش تحلیل سلسله مراتبی در تاقدیس کمستان استان خوزستان. مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. ۱(۶): ۱۱- ۲۰.

۵) فتحی‌زاد، ح.، علیپور، ح.، هاشمی‌نسب، ن. و کریمی، حُ. ۱۳۹۵. استعدادیابی آب‌های زیرزمینی از طریق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) با استفاده از سنجش از دور

و سامانه اطلاعات جغرافیایی در حوضه مهدیشهر. نشریه هیدروژئومورفولوژی. ۸: ۱-۲۰.

۶) فلاح‌پور طزنجی، م. ۱۳۹۲. کاربرد سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) در مطالعه منابع آب (مطالعه موردی: دشت بهادران یزد). فصلنامه منابع آب و توسعه. ۱(۳): ۱۳۲-۱۴۲.

۷) مفیدیفر، م.، المدرسی، س.ع.، اصلاح، م. و ملک زاده بافقی، ش. ۱۳۹۳. استعداد یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل تصمیم‌گیری تحلیل سلسه مراتبی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه دشت یزد اردکان). همایش ملی کاربرد مدل های پیشرفته تحلیل فضایی (سنجش از دور و GIS) در آمایش سرزمین. دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد. ص ۱-۱۰.

۸) موسوی، س.ف.، چیت‌سازان، م.، میرزایی، ی.، شبان، م. و محمدی، ح.ر. ۱۳۸۸. تلفیق سنجش از دور و GIS به منظور استعدادیابی مناطق مناسب جهت تغذیه آب زیرزمینی. همایش ژئوماتیک. سازمان نقشه برداری. تهران. ص ۶۳-۶۹.

۹) مهجوری، ر. ۱۳۹۱. سنجش توزیع مکانی سوانح آتش‌سوزی، تعیین بهترین محل ایستگاه‌های آتش‌نشانی و مسیر بهینه با استفاده از سامانه اطلاعات مکانی و منطق فازی در شهر اهواز. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده علوم دانشگاه شهید چمران اهواز.

۱۰) یوسفی سنگانی، ک.، محمدزاده، ح. و اکبری م. ۱۳۹۱. استعدادیابی آب زیرزمینی کوه‌های هزار مسجد با استفاده از مدل تلفیقی فازی و AHP (مطالعه موردی: شمال شرقی کوه‌های هزار مسجد در خراسان رضوی). اولین همایش ملی بحران آب و پیامدهای ناشی از آن. دانشگاه آزاد اسلامی. واحد فردوس. ص ۱۲۲-۱۲۹.

11) Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H. and Kanno, T. 2005. Landslide in Sado Island of Japan part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from to methods and verifications. Engineeing Geology. 81: 432-445.

12) Domingos, P., Sangam, S., Mukand, S. and Sarawut, N. 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, 7(1): 503-519.

13) Etishree, A., Rajat, A., Garg, R.D. and Garg, P.K. 2013. Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. Journal of Earth System Science. 122(3): 887-898.

14) Hyun-Joo, O., Yong-Sung, K., Jong-Kuk, C., Eungyu, P. and Saro, L. 2011. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. Journal of Hydrology. 399 (3-4), 158-172.

15) Nagarajan, M. and Singh, S. 2009. Assessment of Groundwater Potential Zones using GIS Technique. J. Indian Soc. Remote Sens. 37: 69–77.

16) Preeja, K.R., Sabu, J., Jobin, T. and Vijith, H. 2011. Integration of a tropical river basin (Kerala, India) using Remote Sensing and GIS techniques. J. Indian Society of Remote Sensing. 39(1): 83-94.

17) Raeisi, E. and Kowsar, N. 1997. Development of shahpour Cave, Southern Iran Cave and Karst Science Bridgewater. 24(1):27-34.

18) Saaty, T.L. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill, New York. 287p.

19) Saaty, T.L. Vargas LG. 2001. models, methods, concepts, and applications of the Analytica Hierarchy process. 1st ed. Kluwer Academic, Boston, 333p.