

مکان‌یابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی تجدید شونده حوضه آبریز دریاچه ارومیه با تحلیل AHP و تکنیک فازی فضایی (مطالعه موردی: دشت ارومیه)

سعید مقدم^۱، حجت احمدی^{۲*}، کامران زینال‌زاده^۳، بهزاد حصاری^۴

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران.

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران.

* نویسنده مسئول: h.ahmadi@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۳۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۰۶

چکیده

منابع آب زیرزمینی به دلیل ضریب اطمینان بالاتر و نوسانات کمتر به عنوان یک گزینه‌های مطمئن از دیرباز مورد استفاده انسان بوده و در طی دهه‌های اخیر در اثر برداشت بیش از تغذیه، با کاهش کمی و کیفی روبرو شده است. در این تحقیق پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و مدل ترکیبی منطق فازی-تحلیل سلسله مراتبی انجام شد. ضروری است که با مدیریت برداشت از آب‌های زیرزمینی و شناسایی مناطق حساس آبخوان‌های این حوضه و شناسایی مناطق قابل برداشت اثر متقابل منفی میان دریاچه و منابع آب‌های زیرزمینی اطراف آن را تا حد امکان کاهش داد. ابتدا لایه‌های مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی (لایه مدل رقومی ارتفاعی، شیب، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، زمین‌شناسی، بارش، تبخیر و سطح آب زیرزمینی) در محیط ArcGIS10.2 تهیه گردید. نتایج مطالعه نشان داد که در مدل تحلیل سلسله مراتبی و مدل ترکیبی منطق فازی به ترتیب حدود ۱۸/۹ درصد و ۲۵/۳۳ درصد از سطح منطقه دارای پتانسیل بالایی بوده و مناسب حفر چاه می‌باشند. در نهایت برای تعیین صحت نقشه‌های نهایی از منحنی ROC استفاده گردید که میزان دقت نقشه‌های نهایی تهیه شده با روش تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی-تحلیل سلسله مراتبی به ترتیب ۰/۷۷۵ و ۰/۸۱۲ بوده و روش منطق فازی-تحلیل سلسله مراتبی نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی دارای عملکرد بهتری در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی بود.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، پتانسیل آب زیرزمینی، تحلیل سلسله مراتبی، دریاچه ارومیه، منحنی ROC.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی نیز شود و بالعکس برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی نیز با تأثیر متقابل بر دریاچه کاهش تراز آب آن را تشدید خواهد کرد. از این رو می‌بایست با مدیریت برداشت از آب‌های زیرزمینی و شناسایی مناطق حساس آبخوان‌های این حوضه و شناسایی مناطق قابل برداشت اثر متقابل منفی میان دریاچه و منابع آب‌های زیرزمینی اطراف آن را تا حد امکان کاهش داد. برای توسعه مناسب و مدیریت آب‌های زیرزمینی لازم است تا مکان‌هایی که در آنها این منابع در حال تجدید می‌باشند

دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران، بزرگ‌ترین دریاچه‌های شور جهان و بزرگ‌ترین دریاچه در خاورمیانه می‌باشد که دارای گونه‌های جانوری و محیط‌زیست منحصربه‌فردی است. در بیست سال گذشته تراز سطح آب این دریاچه به شدت افت کرده است. از آنجایی که دریاچه ارومیه نقش تغذیه‌کننده و تغذیه شونده از منابع آب‌های زیرزمینی اطراف آن را ایفا می‌کند. کاهش تراز آب در آن می‌تواند باعث افت منابع

محققان مختلف برای کاربردهای متفاوتی از جمله ترسیم نقشه تغذیه به آب‌های زیرزمینی یا پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (آنتوناکس و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات مختلفی در زمینه پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی انجام شده است. طهماسبی پور و همکاران (۲۰۱۷) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت‌های دهلران و موسیان آبدانان استان ایلام انجام دادند. آن‌ها فاکتورهای شامل سطح آب زیرزمینی، سنگ‌شناسی، ژئومورفولوژی، شیب، جهت شیب، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، طبقات ارتفاعی، شاخص رطوبت توپوگرافی، انحنا سطح و بافت خاک در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی مؤثر دانستند. حیدری آقاگل و همکاران (۲۰۱۷) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی را در استان خراسان جنوبی با روش منطق فازی انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که حدود ۱۷٪ از مساحت استان دارای کلاس پتانسیل آبی بالا و بسیار بالایی بوده که منطبق بر رسوبات دوران چهارم و مناطق دارای تراکم شکستگی بالا است، پهنه پتانسیل خیلی کم نیز منطبق بر ارتفاعات، لیتولوژی متراکم و مناطق بیابانی بودند. یوسفی سنگانی و همکاران (۲۰۱۵) پتانسیل آب زیرزمینی را با استفاده از روش تلفیق فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی ارزیابی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که روش تلفیقی فازی گاما نسبت به سایر روش‌ها برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه مناسب‌تر است. ساویتا و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی را در هند با استفاده از تکنیک سنجش از دور و GIS بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان داد که تعیین مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی برای شناسایی مناطق مناسب استخراج آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر آن مفید می‌باشد. با توجه به نقش بسزای آب‌های سطحی در تغذیه و حفظ دریاچه ارومیه، به نظر می‌رسد که عمده جریان‌های سطحی باید به سمت دریاچه معطوف می‌گردد. این مساله باعث هدایت بیشتر مصرف‌کنندگان در حوضه خصوصاً بخش کشاورزی به سمت آب‌های زیرزمینی خواهد شد. با این ترتیب هدف این تحقیق پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی آبخوان‌های غرب دریاچه ارومیه

شناسایی شوند (اواگ لوپولوس، ۲۰۰۵). در سال‌های اخیر با پیشرفت علوم فضایی این امکان فراهم شده است تا بتوان تکنولوژی سنجش از دور را برای تخمین آب‌های سطحی و زیرسطحی در منطقه‌ای وسیع مورد استفاده قرار داد. این روش‌ها برای تهیه نقشه آب‌های زیرزمینی در مناطق وسیع و غیرقابل‌دسترس بسیار مفید می‌باشند. استفاده از تکنیک‌های سنتی از قبیل روش‌های ژئوفیزیکی، آماری و زمین‌آماری برای مدیریت آب‌های زیرزمینی معمولاً به دلیل کمبود اطلاعات مناسب به‌شدت دارای محدودیت می‌باشد (توید و همکاران، ۲۰۰۷). پایش مداوم و طولانی‌مدت سیستم آب‌های زیرزمینی توسط روش‌های سنتی گران، دارای هزینه‌های گزاف آزمایشگاهی و زمان‌بر می‌باشد. تکنولوژی‌های جدید مانند سنجش از دور و GIS می‌توانند به‌عنوان ابزاری مناسب برای کاوش در آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند (لبلنس و همکاران، ۲۰۰۷). سنجش از دور از طریق ترسیم خطوط و شکاف‌های موجود در زمین و تعیین مکان‌هایی که تغذیه به آب‌های زیرزمینی وجود دارد، اهمیتی فراوان در هیدروژئولوژی ایفا می‌کند (داس، ۱۹۹۰). این ساختارها از تصاویر ماهواره‌ای مناسب استخراج شده و با دیگر نقشه‌های موجود ترکیب می‌شوند. تکنیک سنجش از دور ابزاری مناسب برای مناطقی می‌باشد که اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی و همچنین اندازه‌گیری‌های زمینی بسیار محدود می‌باشد (هافمن و ساندز، ۲۰۰۷). ترکیب اطلاعات سنجش از دور با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) امکان پردازش اطلاعات مکانی از منابع مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد. استفاده از GIS برای تهیه نقشه مکان‌های مناسب استخراج آب‌های زیرزمینی امکان ذخیره و آنالیز اطلاعات مختلف را فراهم می‌کند (بالاچاندار و اتان، ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر الگوریتم‌های مختلفی برای ترکیب نقشه‌های متفاوت در محیط GIS توسعه یافته‌اند که الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی^{۶۱} AHP یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه تهیه نقشه‌های پتانسیل‌یابی از طریق وزندهی و ترکیب نقشه‌های مختلف با یکدیگر در محیط GIS می‌باشد و توسط

⁶¹ Analytical Hierarchy Process

با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و مدل ترکیبی منطق فازی- تحلیل سلسله مراتبی و ارزیابی عملکرد این دو مدل در برنامه ریزی برای مدیریت آب های زیرزمینی می باشد. یافته های این تحقیق می تواند در مدیریت مناسب منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار بگیرد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

دشت مورد مطالعه در شمال غربی ایران از طول جغرافیایی $47^{\circ} 44'$ تا $45^{\circ} 18'$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 7'$ تا $38^{\circ} 7'$ قرار داشته و دارای اقلیم سرد و خشک می باشد. این دشت با مساحت $138732/5$ هکتار در اراضی ساحلی و کم شیب ضلع غربی دریاچه ارومیه واقع شده است. با توجه به آمار سال ۱۳۹۵-۱۳۹۴، تعداد چاه های موجود در دشت ارومیه ۱۸۶۶۹ حلقه می باشد که تعداد ۱۱۰۴ حلقه چاه عمیق و تعداد ۱۷۵۶۵ حلقه چاه نیمه عمیق مورد بهره برداری قرار می گیرند. در مجموع ۱۸۶۶۹ حلقه چاه عمیق و نیمه عمیق و ۱۳۵ دهنه چشمه و ۶۹ رشته قنات منابع آب زیرزمینی را تخلیه می نمایند و چشمه های این منطقه در دره های مناطق کوهستانی ظاهر گردیده اند که مالکیت بعضی از آنها در کنار روستاها با افراد بوده و جهت مصارف کشاورزی و شرب مورد استفاده قرار می گیرند. بعلاوه چشمه سارهای کوچک و بزرگ از دامنه های کوه های مرزی ایران و ترکیه و دره ها سرچشمه گرفته و این چشمه سارها با تعداد فراوان خود رودخانه های این منطقه را تشکیل می دهند. جهت جریان آب در این دشت از غرب به شرق می باشد. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و قرارگیری آن در کنار دریاچه ارومیه، به اهمیت تحقیق و ارزیابی کمی و کیفی آب های زیرزمینی غرب دریاچه ارومیه می افزاید. پایین آمدن سطح آب دریاچه تأثیر بسیاری در حرکت آب های زیرزمینی داشته و باعث تغییرات فراوان در کمیت و کیفیت آب های زیرزمینی مناطق مختلف غرب دریاچه ارومیه شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. این سفره از طریق نفوذ مستقیم از ریزش های جوی، نفوذ از جریان های سطحی، آب برگشتی از مصارف کشاورزی، شرب و صنعت و

همچنین ورودی های زیرزمینی تغذیه و از طریق برداشت از آب زیرزمینی برای مصارف مختلف و همچنین خروجی زیرزمینی تخلیه می گردد. دشت ارومیه در سال های اخیر به علت برداشت زیاد از آب های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی با مشکل افت شدید سطح آب زیرزمینی مواجه شده است. به طوری که توسط وزارت نیرو این دشت به عنوان دشت ممنوعه اعلام شده است. با توجه به اینکه بخشی از آب مورد نیاز این منطقه از آب های زیرزمینی دشت ارومیه تأمین می شود، بنابراین مدیریت و ارزیابی آب زیرزمینی برای مصارف مختلف در این دشت از اهمیت بالایی برخوردار است.

شناسایی و تهیه عوامل مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی عوامل متعددی نظیر زمین شناسی، پستی و بلندی، شیب زمین، پوشش اراضی، بارش و .. در شکل گیری و حرکت آب های زیرزمینی مؤثر هستند. لذا انتخاب پارامترها عمدتاً با هدف مطالعه و همچنین به موجود بودن داده ها بستگی دارد. بنابراین شاخص ها در مطالعه های مشابه، متفاوت هستند. شایان ذکر است که انتخاب مناسب شاخص ها به منظور پتانسیل یابی دقیق آب های زیرزمینی نقش مهم و تعیین کننده دارد (احمد و همکاران، ۲۰۱۴). بر این اساس، پس از مطالعه تحقیقات انجام شده داخلی و خارجی در خصوص عوامل مؤثر در پتانسیل منابع آب زیرزمینی، ۹ پارامتر ارتفاع، شیب زمین، بارش، تراکم رودخانه، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، زمین شناسی، تبخیر و سطح آب زیرزمینی به عنوان متغیرهای ورودی برای پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی آبخوان های غرب دریاچه ارومیه استفاده شدند. عوامل مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی را می توان با توجه به مقادیرشان، به دو گروه طیفی و گسسته تقسیم بندی کرد. پارامترهای طیفی، دارای داده های پیوسته و طیفی هستند و مقادیر آنها را می توان به گروه های متنوعی تقسیم بندی کرد ولی در مقابل، پارامترهای گسسته دارای مقادیری گسسته ای هستند که مقادیر آنها به گروه های مشخصی تقسیم بندی می شوند (صادق فام و همکاران، ۲۰۱۶). از بین پارامترهای مورد استفاده در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی، پارامترهای ارتفاع، شیب زمین، بارش، فاصله از

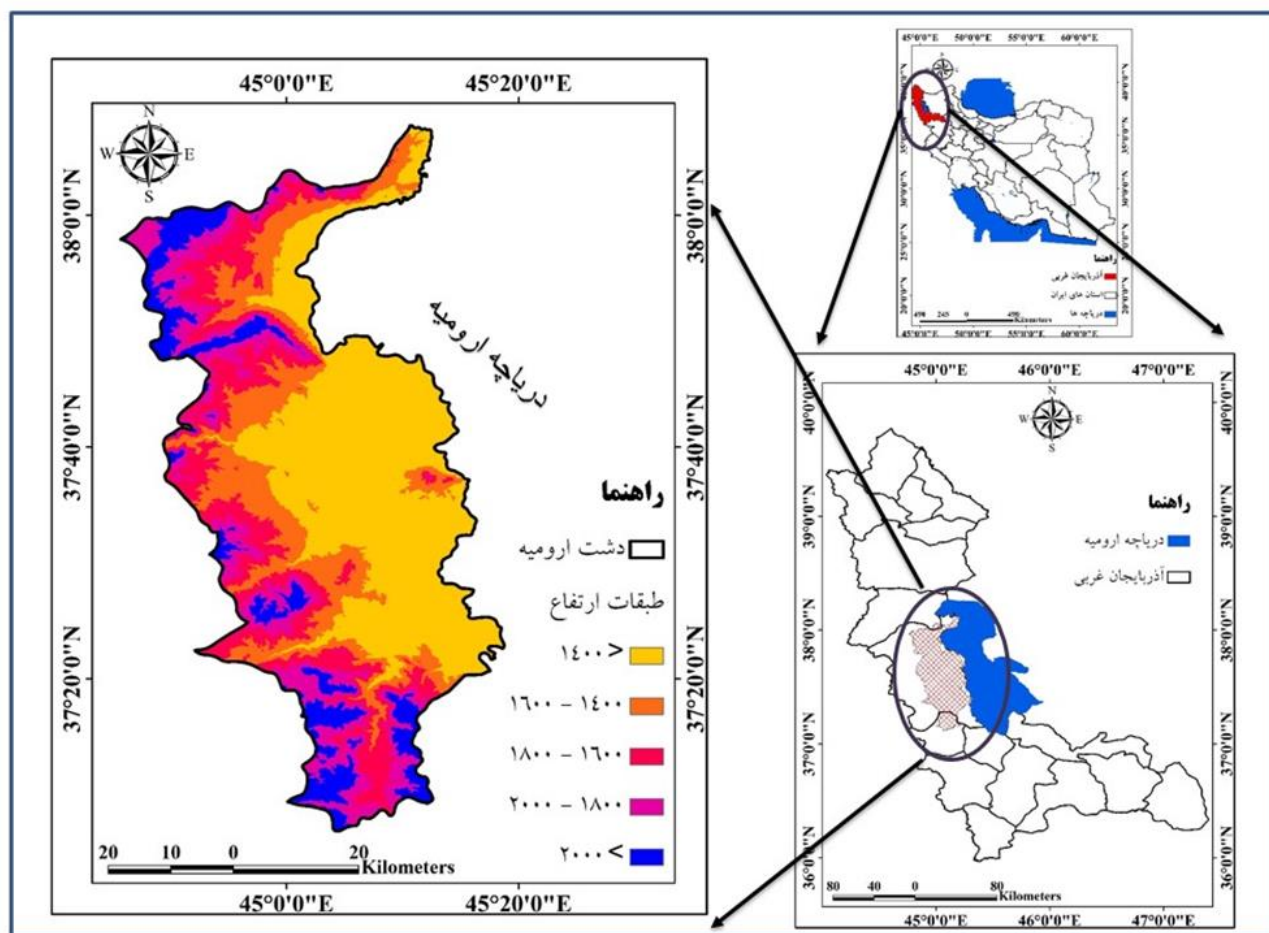
بارش و تبخیر

برای به دست آوردن نقشه بارش و تبخیر منطقه مورد مطالعه، از داده‌های آماری ۱۵ ساله (از سال آبی ۸۱-۱۳۸۰ تا سال آبی ۹۵-۱۳۹۴) مربوط به ۱۰ ایستگاه باران‌سنجی سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی استفاده شد. نقشه رستری بارش و تبخیر با واحد میلی‌متر از درون‌یابی میانگین پانزده ساله داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی مذکور به روش کریجینگ معمولی حاصل شده است.

رودخانه، سطح آب زیرزمینی، تراکم رودخانه و میزان تبخیر پارامترهای طیفی هستند. در مقابل، کاربری اراضی و زمین‌شناسی جزء پارامترهای گسسته می‌باشند.

ارتفاع و شیب زمین

برای به دست آوردن نقشه ارتفاع و شیب زمین از تصویر $GDEM-ASTER^{62}$ با سلول‌های ۳۰ متری برای محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. نقشه رستری حاصل در شکل ۲، ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا را با واحد متر و شیب منطقه برحسب واحد درصد در محیط نرم‌افزار ArcGIS نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه مدل رقومی ارتفاع دشت ارومیه در استان آذربایجان غربی و ایران.

نقشه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان آذربایجان غربی تهیه شد که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سال ۲۰۱۷ تهیه شده بود.

نقشه کاربری اراضی

⁶² Global Digital Elevation Model-Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer

زمین‌شناسی

انجام می‌شود و با صرف زمان اندک، می‌توان پایگاه داده‌های موجود را توسعه داد (قدرتی، ۲۰۱۱).

روش تجزیه و تحلیل

روش تحلیل سلسله مراتبی

در این روش ابتدا ماتریس مقایسه‌ای تشکیل شده و مشخصه‌ها به صورت زوجی مقایسه و وزن (ارزش) نسبی آنها به طور نظری تعیین می‌شود. نسبت‌های یاد شده با مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ بیان می‌شود (جدول ۳-۱).

در این روش به منظور اجتناب از خطاهای شخصی، یا سلیقه‌ای در تصمیم‌گیری می‌توان از آرای گروهی متخصصان استفاده کرد؛ بنابراین در این تحقیق پس از تعیین مشخصه‌های تأثیرگذار در فرسایش خندقی به منظور تعیین وزن نسبی آنها و به منظور بالا بردن صحت، پرسشنامه‌ای برای استفاده از آرای متخصصان مرتبط با موضوع طراحی خواهد شد، نتایج ابتدا وارد ماتریس اولیه و سپس ماتریس نرمال خواهد شد.

برای محاسبه وزن نسبی لایه‌ها از روش تقریبی و جمع ستونی استفاده خواهد شد. سپس اطلاعات فضایی (داده‌های نقشه‌ای) با قالب برداری (وکتوری) محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار ArcGIS منتقل شده و روابط توپولوژیک برای هر لایه نقشه‌ای ساخته شده و پایگاه داده مناسب در محیط GIS تهیه خواهد شد. پس از تعیین وزن نسبی معیارها، وزن‌های نسبی به دست آمده به نقشه‌های مربوط نسبت داده خواهد شد، سپس برای تحلیل فضایی و ارزیابی چند معیاری و تهیه نقشه نهایی طبقه توان منطقه قالب رستری استفاده خواهد شد.

بدین منظور تمامی لایه‌های وزن‌دهی شده در این نرم‌افزار و در قالب رستری رویهم‌گذاری خواهند شد. انجام تحلیل سلسله مراتبی به منظور تعیین وزن عوامل، با استفاده از نرم‌افزار *EXPERT CHOICE 11* انجام گرفت. پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی، این لایه به ۴ طبقه پتانسیل بالا، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم‌بندی شد. میزان قابل قبول ارجحیت‌های داده شده بر اساس نرخ ناسازگاری، کمتر از ۰/۱ می‌باشد. که در پژوهش حاضر نرخ تمام ناسازگاری‌ها کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد.

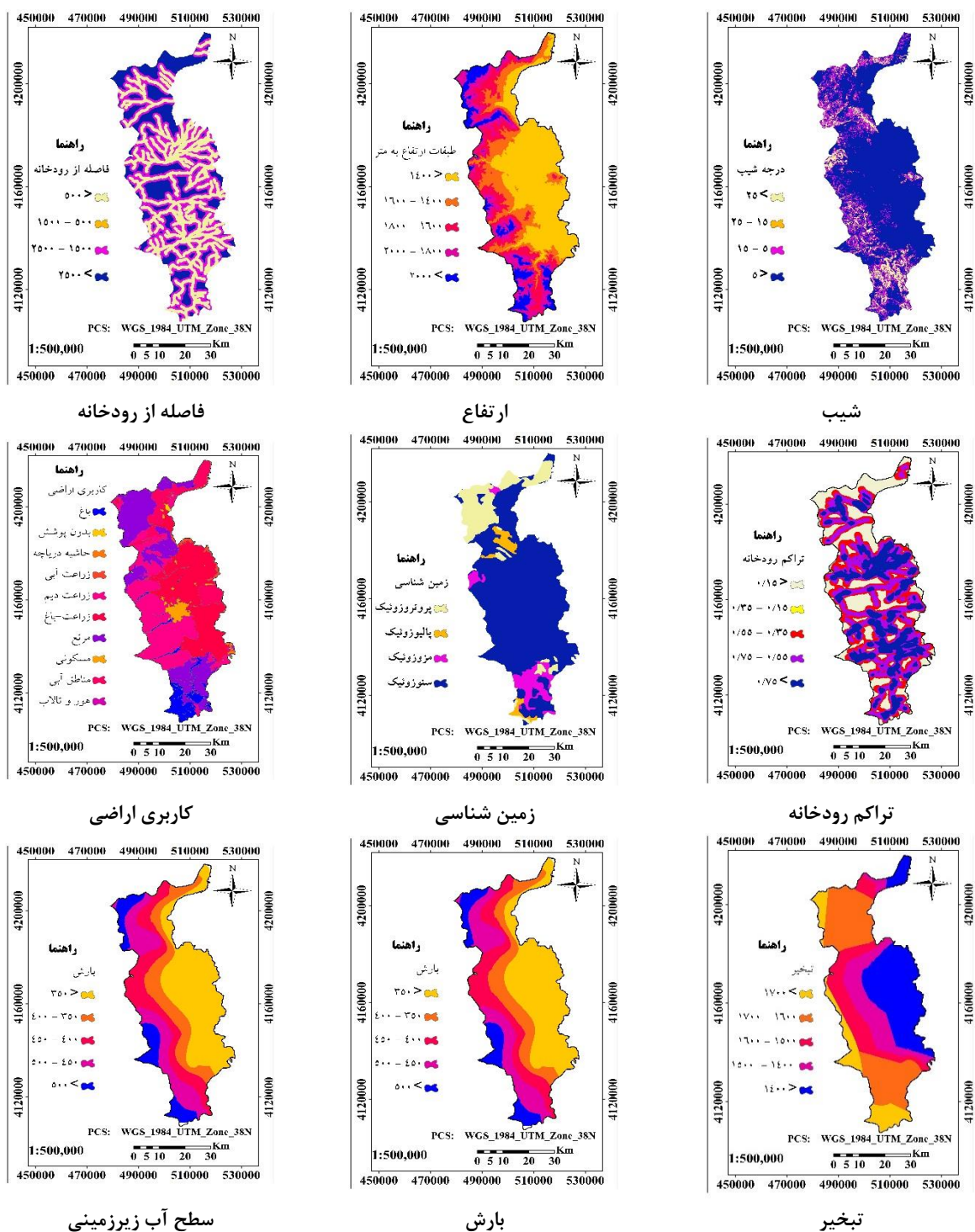
این فاکتور بر اساس وضعیت لایه‌های زمین‌شناسی منطقه برای نفوذ و نگهداری آب‌های زیرزمینی وزندهی می‌شود. شکستگی‌ها، شکاف‌ها و تخلخل، ظرفیت و ذخیره مخصوص لایه‌های زمین‌شناسی جهت ذخیره آب‌های زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای تأثیر دادن فاکتور سنگ‌شناسی در پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه تهیه و لایه‌های زمین‌شناسی از روی آن رقومی سازی می‌شوند. در نهایت بر اساس خاصیت نفوذپذیری و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی لایه‌های مختلف نقشه سنگ‌شناسی منطقه تهیه و به هر کدام ارزشی متناسب با میزان نفوذپذیری آن داده می‌شود (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۲).

عمق آب زیرزمینی

برای به دست آوردن نقشه عمق آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، از داده‌های آمار ۱۵ ساله (از سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ تا سال آبی ۹۶-۱۳۹۵) مربوط به ۸۳ چاه مشاهده‌ای سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی استفاده شده است. نقشه رستری عمق آب زیرزمینی با واحد متر از درون‌یابی میانگین ۱۵ ساله داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای مذکور به روش کرچینگ معمولی حاصل شده است. نقشه فاکتورهای موثر در پتانسیل‌یابی آبخوان غرب دریاچه ارومیه در شکل (۲) ارائه شده است.

سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

تاریخچه GIS به زمان‌های خیلی قبل بر نمی‌گردد. اصطلاح سامانه اطلاعات جغرافیایی در اواسط سال ۱۹۶۰ میلادی پا به عرصه وجود نهاد. این سامانه مجموعه‌ای سازمان یافته از سخت‌افزار، نرم‌افزارهای کامپیوتری، داده‌های مکان مرجع شامل داده‌های توصیفی و مکانی، افراد متخصص و الگوریتم هاست که به منظور گردآوری، ذخیره‌سازی، بهنگام سازی، پردازش، بازیافت، تجزیه و تحلیل و ارائه شکل‌های مختلف اطلاعات مکان مرجع، طراحی و ایجاد شده و به بیان مشخصات و ویژگی‌های جغرافیایی داده‌ها می‌پردازد. به طور کلی، تجزیه و تحلیل داده‌ها و مدیریت آنها به کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی به سهولت



شکل ۲- نقشه فاکتورهای مؤثر در پتانسیل یابی آبخوان غرب دریاچه ارومیه.

برای محاسبه وزن نسبی لایه‌ها از روش تقریبی و جمع ستونی استفاده خواهد شد. سپس اطلاعات فضایی (داده‌های نقشه‌ای) با قالب برداری (وکتوری) محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و نرم‌افزار ArcGIS منتقل شده و روابط توپولوژیک برای هر لایه نقشه‌ای ساخته شده و پایگاه داده مناسب در محیط GIS تهیه خواهد شد. پس از تعیین وزن نسبی معیارها، وزن‌های

مناسب‌ترین سطح آن برای پهنه‌بندی فرسایش آب‌کندی معرفی شده است (متولی و اسمیلی، ۲۰۱۳ و شاسفر، ۲۰۱۴). در روش ترکیبی منطق فازی-تحلیل سلسله مراتبی، با استفاده از روش فرایند سلسله مراتبی (AHP) و با توجه به اهمیت هر پارامتر در پتانسیل منابع آب، وزن آنها محاسبه گردید و با اعمال تابع عضویت فازی خطی به حالت فازی تبدیل و با در نظر گرفتن وزن‌های محاسبه شده از روش AHP تمامی لایه‌ها با عملگر جمع فازی با یکدیگر ترکیب و نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی آبخوان‌های غرب دریاچه ارومیه حاصل گردید.

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

عملکرد مدل‌ها با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد. عملکرد مدل‌های پتانسیل‌یابی را می‌توان با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم یا منحنی عملیاتی دریافت‌کننده (ROC) و معیارهای مساحت زیر منحنی (AUC) مورد ارزیابی قرار داد (فائوکات، ۲۰۶۶).

منحنی مشخصه عملکرد سیستم با نام منحنی تشخیص عملکرد نسبی نیز شناخته شده است. این منحنی که نخستین بار در جنگ جهانی دوم برای تحلیل سیگنال‌های راداری استفاده شد، یک نمودار توصیفی است که در آن، مقادیر نرخ مثبت واقعی در مقابل مقادیر نرخ مثبت کاذب ترسیم می‌شوند. معیار مساحت زیر منحنی، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده (چاه پر آب) و عدم وقوع رخداد (نبود چاه پر آب) است. مقادیر AUC از صفر تا یک متغیر است. هر چه این معیار به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر دقیق بودن و برتری مدل پتانسیل‌یابی می‌باشد (پورقاسمی و همکاران، ۲۰۱۳). در این مطالعه برای محاسبه معیار AUC برای مدل پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی از ابزار ROC نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

انتخاب عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی

۹ لایه مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در این تحقیق عبارتند از: لایه ارتفاع، شیب، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه، زمین‌شناسی، بارش، تبخیر و سطح آب زیرزمینی. که این لایه‌ها پس از آماده‌سازی در سیستم اطلاعات

نسبی به‌دست آمده به نقشه‌های مربوط نسبت داده خواهد شد، سپس برای تحلیل فضایی و ارزیابی چند معیاری و تهیه نقشه نهایی طبقه توان منطقه قالب رستری استفاده خواهد شد. بدین‌منظور تمامی لایه‌های وزن‌دهی شده در این نرم‌افزار و در قالب رستری رویهم‌گذاری خواهند شد. انجام تحلیل سلسله مراتبی به‌منظور تعیین وزن عوامل، با استفاده از نرم‌افزار *EXPERT CHOICE 11* انجام گرفت. پس از تهیه نقشه پهنه‌بندی، این لایه به ۴ طبقه پتانسیل بالا، متوسط، کم و خیلی کم تقسیم‌بندی شد. میزان قابل قبول ارجحیت‌های داده شده بر اساس نرخ ناسازگاری، کمتر از ۰/۱ می‌باشد. که در پژوهش حاضر نرخ تمام ناسازگاری‌ها کمتر از ۰/۰۵ به دست آمد.

منطق فازی

در تئوری کلاسیک مجموعه‌ها، یک عنصر یا عضو مجموعه است یا نیست (صفر و یک). تئوری مجموعه‌های فازی این مفهوم را گسترش داده و عضویت درجه‌بندی شده را مطرح می‌کند. به این ترتیب که یک عنصر می‌تواند تا درجاتی و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. به بیان دیگر یک مجموعه فازی، مجموعه‌ای از المان‌ها با ویژگی‌های مشابه است که در آن، مجموعه درجه‌ای مشخص از صفر تا یک را دارد. صفر به معنی عدم عضویت و یک به معنی عضویت کامل است (دومان و همکاران، ۲۰۰۶). بنابراین، قبل از اجرای مدل فازی نیاز است که برای هر یک از لایه‌های اشاره شده در فوق توابع عضویت تعیین گردد و ارزش لایه‌ها در بازه‌ای بین (صفر و یک) قرار گیرد و سپس لایه‌ها وارد مدل فازی گردند. برای اجرای تکنیک فازی نیاز به عملگر گاما می‌باشد، مقدار گامای تعدیل‌کننده بین صفر و یک است، گامای صفر معادل ضرب فازی و گامای یک معادل جمع فازی می‌باشد. بر همین اساس وزندهی به هر یک از این پارامترها بر اساس تأثیر نسبی که در پهنه‌بندی دارند با استفاده از منطق فازی انجام می‌گیرد و در هر نقشه فاکتور فازی، ارزش هر یک از کلاس‌ها و واحدهای موجود با درجات عضویت فازی حد واسط بین صفر تا یک مشخص می‌گردد.

در نهایت لایه‌های فازی شده با استفاده از عملگر فازی گامای ۰/۸ با هم ترکیب می‌شوند. با توجه به منابع موجود، گامای ۰/۸

جغرافیایی (GIS)، به تعداد طبقات مشخصی، بر اساس منابع موجود و شرایط منطقه طبقه‌بندی شدند.

نتایج و بحث

تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی

در این مطالعه به منظور پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمین در منطقه مورد مطالعه، گروه نمایه‌ها، نمایه‌ها معیارهای مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی شناسایی و پس از جمع‌آوری و وزندهی اطلاعات، اقدام به تهیه لایه‌ها گردید. با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی، معیارهای مورد بررسی به‌صورت زوجی

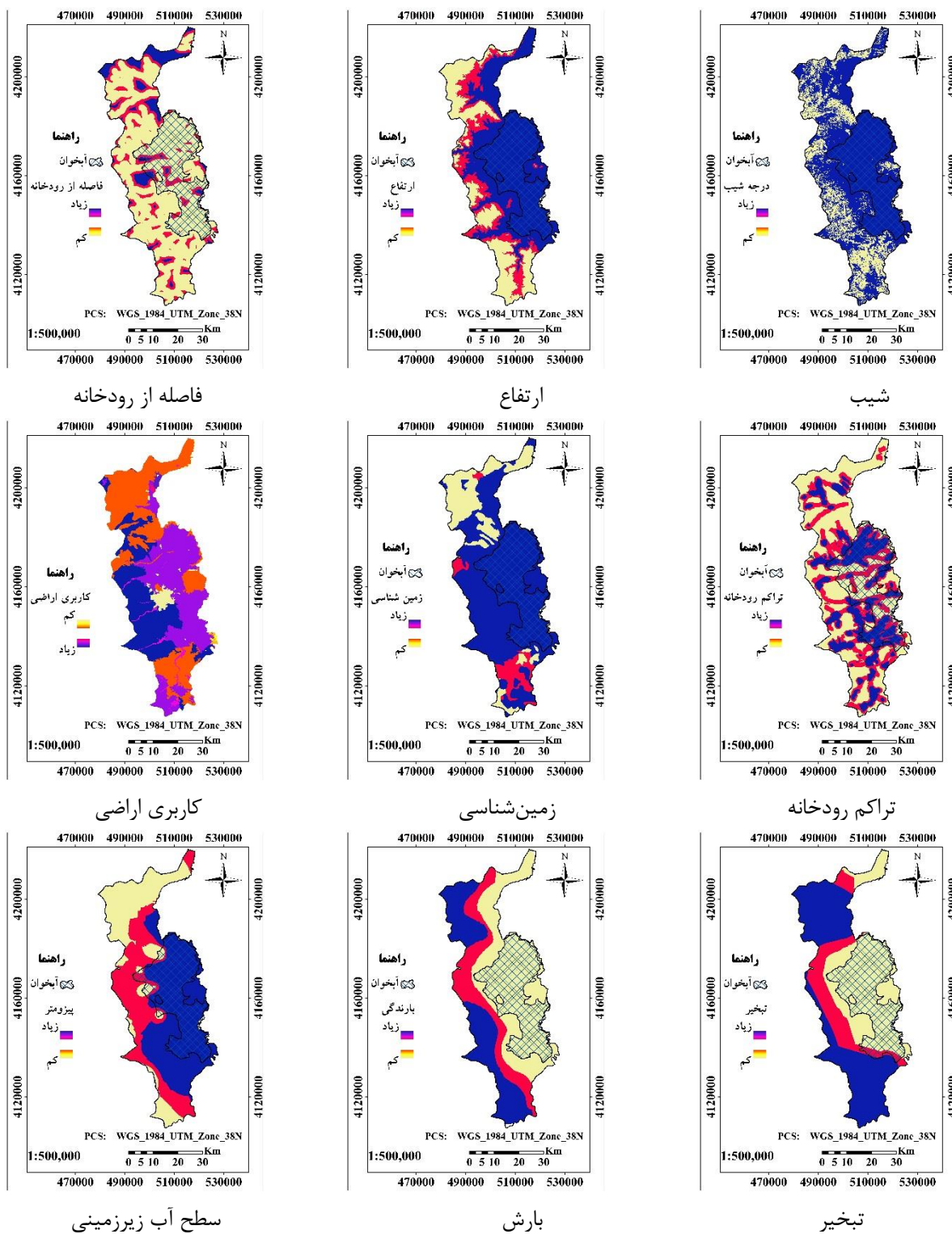
مقایسه شدند. نتایج وزندهی و اولویت‌بندی معیارها نشان داد که نمایه پی‌زومتری با امتیاز ۰/۲۸۸ دارای بیشترین اهمیت و نمایه تبخیر و تعرق با امتیاز ۰/۰۲۴ دارای کمترین اهمیت می‌باشد، همچنین نرخ سازگاری ۰/۰۶ است (جدول ۱). نتایج وزندهی و ارزیابی طبقات مختلف هر یک از نمایه نیز در جدول (۲) نشان داده شده است، و بر اساس وزن هر یک از طبقات به منظور اجرای مدل فازی اولویت‌بندی شدند. همچنین شکل (۳) نتایج حاصل از فازی سازی نقشه‌های معیار با استفاده از توابع فازی مختلف را نشان می‌دهد که ارزش‌های آنها از صفر (کم) تا یک (زیاد) تبدیل شده است.

جدول ۱- اولویت و وزن معیارها حاصل از مقایسات زوجی.

پارامتر	وزن AHP	پارامتر	وزن AHP	پارامتر	وزن AHP
شیب (درجه)	۰/۱۲۶	ارتفاع	۰/۰۳۳	تبخیر	۰/۰۲۴
تراکم رودخانه	۰/۱۹۴	بارش	۰/۰۸۴	فاصله از رودخانه	۰/۱۴۱
زمین شناسی	۰/۰۶۳	کاربری اراضی	۰/۰۴۶	سطح آب زیرزمینی	۰/۲۸۸

پارامتر	کلاس	وزن AHP	پارامتر	کلاس	وزن AHP
شیب (درجه)	۵ >	۰/۵	فاصله از رودخانه	۵۰ >	۰/۴۷۱
	۵-۱۵	۰/۳۰۴		۱۵۰-۵۰۰	۰/۲۶۸
	۱۵-۲۵	۰/۱۴۲		۲۵۰-۱۵۰۰	۰/۱۴۳
	۲۵ <	۰/۰۵۴		۳۵۰۰-۲۵۰۰	۰/۰۷۵
ارتفاع	۱۴۰۰ >	۰/۴۲	زمین شناسی	۲۵۰۰ <	۰/۰۴۴
	۱۴۰۰-۱۶۰۰	۰/۲۷		سنوزونیک	۰/۵۸۲
	۱۶۰۰-۱۸۰۰	۰/۱۶		مزوزونیک	۰/۲۳۱
	۱۸۰۰-۲۰۰۰	۰/۰۹		پالیوزونیک	۰/۱۲
تراکم رودخانه	۲۰۰۰ <	۰/۰۵	کاربری اراضی	پروترزونیک	۰/۰۶
	۰/۱۵ >	۰/۰۴		زراعت آبی	۰/۲۸
	۰/۱۵-۰/۳۵	۰/۰۷		زراعت دیم	۰/۱۹
	۰/۳۵-۰/۵۵	۰/۱۴		زراعت-باغی	۰/۱۴
تبخیر	۰/۷۵ >	۰/۴۷	سطح آب زیرزمینی	باغ	۰/۱
	۱۴۰۰ >	۰/۴۶		فاقد پوشش	۰/۰۹
	۱۴۰۰-۱۵۰۰	۰/۲۷		مرتفع	۰/۰۷
	۱۵۰۰-۱۶۰۰	۰/۱۴		حاشیه دریاچه	۰/۰۵
بارش	۱۶۰۰-۱۷۰۰	۰/۰۸	سطح آب زیرزمینی	هور و تالاب	۰/۰۳
	۱۷۰۰ <	۰/۰۵		مناطق آبی	۰/۰۲۸
	۳۵۰ >	۰/۰۴		مناطق مسکونی	۰/۰۱۷
	۳۵۰-۴۰۰	۰/۰۷		۹ >	۰/۴۷
	۴۰۰-۴۵۰	۰/۱۴		۹-۱۸	۰/۲۷
	۴۵۰-۵۰۰	۰/۲۷		۱۸-۲۶	۰/۱۴۳
	۵۰۰ <	۰/۴۷		۲۶-۳۳	۰/۰۷۵
				۳۳ <	۰/۰۴۴

جدول ۲- نتایج وزندهی و ارزیابی طبقات مختلف هر یک از لایه‌های مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی



شکل ۳- نقشه فازی معیارهای مؤثر در پتانسیل یابی آبخوان دشت ارومیه دریاچه ارومیه.

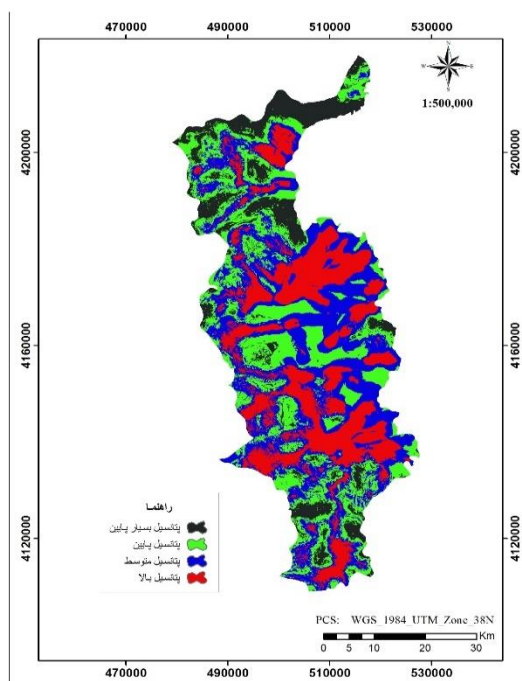
نقشه پتانسیل آب زیرزمینی حوضه دشت ارومیه

پتانسیل بسیار پایین (۲۱/۸ درصد) و پتانسیل بالا (۱۸/۹ درصد) اختصاص دارد. همچنین نتایج روش فازی-AHP نشان داد که بصورت کلی حدود ۶۰ درصد از حوزه ارومیه دارای پتانسیل متوسط به بالاست که از این مقدار ۲۵/۳۳ درصد از سطح منطقه دارای پتانسیل بالای آب زیرزمینی است و تنها ۱۳/۶۱ درصد از سطح کل منطقه دارای پتانسیل بسیار پایینی است.

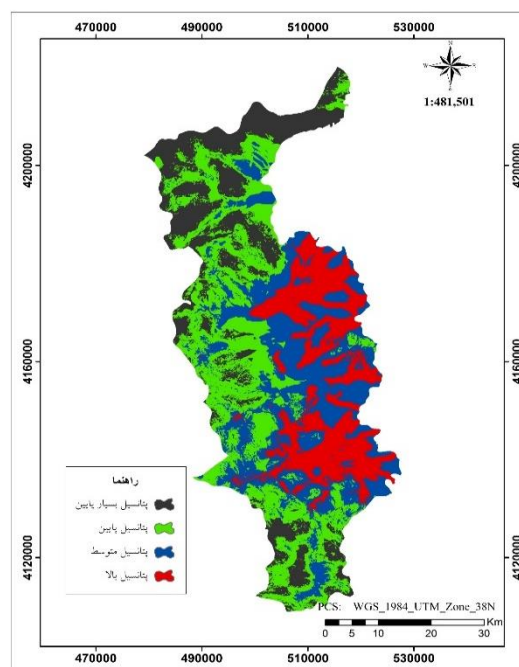
نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش AHP و فازی-AHP در شکل (۴) ارائه شده است. همچنین مساحت و درصد مساحت طبقات نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق با جدول (۳) و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی، بیشترین مساحت به ترتیب به طبقات با پتانسیل پایین (۳۱/۶ درصد)، پتانسیل متوسط (۲۷/۶ درصد)،

جدول ۳- وضعیت طبقات پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه محاسبه شده با روش AHP و فازی-AHP

اولویت	پتانسیل	روش AHP		فازی-AHP	
		مساحت (ha)	مساحت (%)	مساحت (ha)	مساحت (%)
۱	زیاد	۴۹۴۶۷/۱	۱۸/۹	۶۶۵۶۳/۵۳	۲۵/۳۳
۲	متوسط	۷۳۳۹۵/۲	۲۷/۶	۹۰۸۴۱/۲۴	۳۴/۵۸
۳	کم	۸۲۸۵۰/۵	۳۱/۶	۶۹۵۷۴/۳۵	۲۶/۴۸
۴	خیلی کم	۵۷۳۵۷/۶	۲۱/۸	۳۵۳۳۹/۲۵	۱۳/۶۱
	جمع کل	۲۶۲۷۱۸/۳۷	۱۰۰	۲۶۲۷۱۸/۳۷	



مدل ترکیبی فازی-تحلیل سلسله مراتبی



روش تحلیل سلسله مراتبی

شکل ۴- نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مطالعه با استفاده از روش AHP و فازی-AHP.

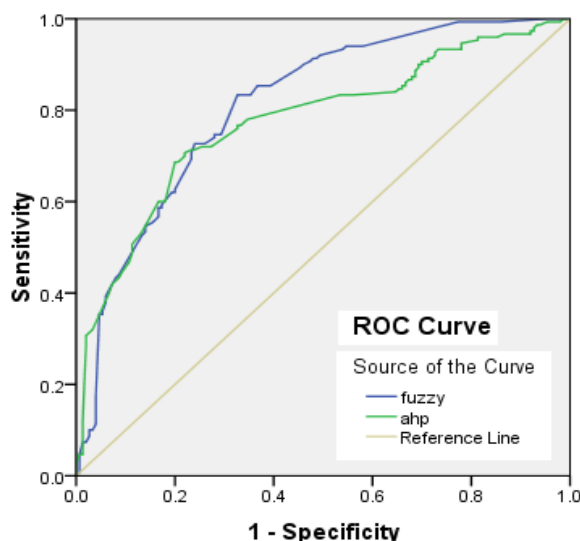
پیش‌بینی است. مقدار AUC برای مدل‌های مورد ارزیابی در جدول (۴) ارائه شده است. همچنین منحنی ROC مدل‌های مورد ارزیابی در شکل (۵) ارائه شده است. مدل فازی-تحلیل سلسله مراتبی نسبت به مدل تحلیل سلسله مراتبی در زمینه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دارای عملکرد بهتری بود.

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

به منظور اعتبارسنجی نقشه‌های پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی، از منحنی ROC استفاده شد. مساحت زیر منحنی ROC که AUC نام دارد، در صورتی که کمتر از ۰/۵ باشد نشان‌دهنده عدم صحت مدل است و از ۰/۵ تا ۱ نشان‌دهنده صحت مدل، جهت

جدول ۴ - مقدار AUC مدل‌های پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی.

ردیف	مدل پیش‌بینی	مقدار AUC
۱	تحلیل سلسله‌مراتبی	۰/۷۷۵
۳	تحلیل سلسله‌مراتبی-فازی	۰/۸۱۲



شکل ۵- منحنی ROC مدل‌های استفاده شده برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی

نتیجه‌گیری

تبدیل ارزش‌های نقشه‌های معیار به طیف پیوسته‌ای بین ۰ تا ۱ سبب می‌شود که مرز بین کلاس‌ها به صورت تدریجی تعیین گردد. همچنین نقش هر معیار نه به صورت قطعی بلکه به صورت احتمالی تعیین می‌شود و در نتیجه مطابقت بیشتری با سازوکار عوامل طبیعی در پتانسیل‌یابی دارد. با توجه به اینکه در این مطالعه از دو مدل مختلف برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی دشت ارومیه استفاده شده است، لذا مناطقی که از لحاظ پتانسیل منابع آب زیرزمینی بر اساس دو مدل، دارای کلاس پتانسیلی یکسان هستند، با اطمینان و اعتماد بیشتری می‌توان به کلاس پتانسیلی این نواحی اتکا کرد. به عنوان مثال کلاس پتانسیلی با پتانسیل خیلی کم و کم در این دو مدل، در دامنه نسبتاً یکسانی قرار دارند. مقدار AUC در این مطالعه با نتایج مطالعات پورقاسمی و همکاران (۲۰۱۶) با دقت ۸۰٪ مطابقت دارد. فلاح و همکاران (۲۰۱۷) جهت اعتبارسنجی نقشه پتانسیل آبهای زیرزمینی در

در تحقیق حاضر، پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی با استفاده از دو مدل تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و Fuzzy-AHP مورد بررسی قرار گرفت. جهت پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در یک منطقه مشخص، تعداد عوامل دخیل بیش از مواردی است که در این پژوهش استفاده گردیده است که عدم وجود داده‌های مورد نیاز، یکی از دلایل می‌باشد. پارامترهای مورد استفاده در این پژوهش شامل تبخیر و تعرق، بارش، ارتفاع، کاربری اراضی، دوره زمین‌شناسی، شیب، فاصله از رودخانه، تراکم رودخانه و پیرومتر بود. با توجه به معیار ارزیابی مورد استفاده در این مطالعه (ROC) مدل فازی-تحلیل سلسله‌مراتبی نسبت به مدل تحلیل سلسله‌مراتبی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر دارای عملکرد بهتری بود. در روش ترکیبی منطق فازی-تحلیل سلسله‌مراتبی، روش منطق فازی به علت فراهم آوردن امکان

- Evangelopoulos, A., 2005. Management of groundwater potential areas of jurisdiction of local organizations, Larisa Prefecture (Exploitation status of aquifers – Sustainability of T.O.E.V), Larisa, May (in Greek).
- Falah, F., Daneshfar, M & Ghorbaninejad, S. 2017. Application of the statistical index model in groundwater potential mapping in the Khorramabad plain. *Journal of Water and Sustainable Development*. 4(1), 89-98.
- Fawcett, T. 2006. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*. 27(8), 861-874.
- Ghodrati M. 2011. *ArcGIS Application Training in Water Engineering (Hydrology and Hydrogeology)*. First Edition. Publishers of Simae Danesh.
- Heydari Aghagholi M., Ghoam E. and Rostami Barani H. R. 2017. Finding Potential Groundwater Resources Using Fuzzy Logic (Case Study: South Khorasan province). *Iranian Water Resources Research*. 13(1), 211-215.
- Hoffmann, J., Sander, P., 2007. Remote sensing and GIS in hydrogeology. *Journal of Hydrogeology*, 15, 1-3.
- Leblanc, M., Favreau, G., Tweed, S., Leduc, C., Razack, M., Mofor, L., 2007. Remote sensing for groundwater modelling in large semiarid areas: Lake Chad Basin, Africa. *Journal of Hydrogeology*, 15, 97-100.
- Lee, S., Hyun, Y. and Lee, M.J., 2019. Groundwater Potential Mapping Using Data Mining Models of Big Data Analysis in Goyang-si, South Korea. *Sustainability*, 11(6), p.1678.
- Motevalli S. and Esmaili R. 2013. Landslide Hazard Zoning using Gamma Fuzzy Operator (A Case Study: Taleghen Watershed). 8, 1-20.
- Pourghasemi, H.R., Jirandeh, A.G., Pradhan, B., Xu, C., Gokceoglu, C. 2013. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. *J Earth Science*. 2: 349-369.
- Pourghasemi, H. R., Moradi, H. R., & Aghda, S. F. 2013. Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural hazards*, 69(1), 749-779.
- Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., 2012. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63(2), 965-996.
- Sadeghfam, S., Hassanzadeh, Y., Nadiri, A.A., Khatibi, R. 2016. Mapping groundwater potential field using catastrophic fuzzy membership function and jensks optimization method: a case study of Maragheh-Bonab plain, Iran. *Environmental Earth Science*. 75, 545-555.
- Savita, R.S., Mittal, H.K., Satishkumar, U., Singh, P.K., Yadav, K.K., Jain, H.K., Mathur, S.M. and Davande, S., 2018. Delineation of Groundwater Potential Zones using Remote Sensing and GIS Techniques in Kankanala Reservoir Subwatershed, Karnataka, India. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 7(1), 273-288.
- Shasfar S. 2014. Application of fuzzy logic in the study of gully erosion using GIS (Case study: Turod Basin). *Geographic Information Research. Journal - Research Geographical Information*. 23(92), 36-42.
- Tahmasebipour N., Arshia A. and Mirzapour H. 2017. Groundwater Potential Mapping Using Frequency Ratio and Statistical Index Models at Dehloran and Mosian-Abdanan Plains, Iran. *Extension and Development of Watershed Management*. 5(18), 33-44.
- Tweed, S.O., Leblanc, M., Webb, J.A., Lubczynski, M.W., 2007. Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, SE Australia. *Journal of Hydrogeology*, 15, 75-96.
- دشت خرم‌آباد از منحنی ROC استفاده کردند که نتیجه ۸۲ درصدی این منحنی حاکی از دقت بالای این روش در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی خرم‌آباد بود. در تحقیق Lee و همکاران ROC برای مدل‌های برای مدل‌های FR و BCT در کره جنوبی، ۶۸/۳٪ و ۶۹/۴٪ به دست آمد که کمتر از مقادیر یافت شده در این تحقیق بوده است (لی و همکاران، ۲۰۱۹). بر اساس مساحت اختصاص یافته به کلاس‌های پتانسیلی مختلف مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه، مدل Fuzzy-AHP با اختصاص کمترین مساحت به کلاس پتانسیلی خیلی کم و کم و بیشترین مساحت به کلاس پتانسیلی متوسط و زیاد، خوشبینانه‌ترین مدل می‌باشد. نتایج پیش‌بینی نشان داد که فاکتورهای درصد شیب، جهت شیب، ارتفاع، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی و فاصله از اراضی کشاورزی در تعیین پتانسیل آتش‌سوزی مؤثر بوده، و به‌کارگیری آن‌ها در مدل‌های احتمالاتی ارزیابی پتانسیل آتش‌سوزی مفید می‌باشد. مناطقی که با استفاده از روش AHP و Fuzzy-AHP برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی پهنه‌بندی شدند به چهار طبقه پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط و پتانسیل بالا تقسیم‌بندی شد که از این میان فقط مناطق با پتانسیل بالا مدنظر می‌باشد. مساحت مناطق با پتانسیل بالا در روش AHP و Fuzzy-AHP به ترتیب ۱۸/۹ درصد و ۲۵/۳۳ درصد سطح منطقه مورد مطالعه را شامل شده که مساحت مناطق با پتانسیل بالا در روش AHP بیشتر از روش Fuzzy-AHP می‌باشد.

منابع

- Ahmad, K, Shahid, s., Bin Harun, S., Ismail, T., Nawaz, N., Shamsudin, S. 2014. Assessment of groundwater potential zones in an arid region based on catastrophic theory. *Earth Science Information*. 8, 539-549.
- Antonakos, A., Voudouris, K., Lambrakis, N., 2014. Site selection for drinking-water pumping boreholes using a fuzzy spatial decision support system in the Korinthia prefecture, SE Greece. *Hydrogeol. J*. 22, 1763-1776.
- Balachandar, S., Eaton, J.K., 2010. Turbulent dispersed multiphase flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42, 111-133.
- Das, D., 1990. Satellite remote sensing in subsurface water targeting. In: *Proceeding ACSM-ASPRS Annual Convention*, pp. 99-103.
- Duman, T.Y., Can, T., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A. and Sonmez, H. 2006. Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey. *Environmental Geology*, 51, 241-256.

Yousefi Sangani K., Mohammadzadeh H. and Akbari M. 2015. An Evaluation of Groundwater Potential Zones Using Combined Fuzzy-AHP Method and GIS/RS Technologies: A Case Study of NE Hezarmasjed Mountain, Khorasan Razavi Province. International Bulletin of Water Resources & Development. 4(7), 127-141.