الویت‌بندی و ارزیابی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در استان اصفهان

مسیح مرادی‌زاده[۱] و کورش شیرانی[۲*]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۶/۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۲/۴)

چکیده

مدیریت منابع آبی مستلزم ارزیابی دقیق ذخایر آبی و میزان دسترسی به آن در هر منطقه و شناخت فرایندهای محیطی حاکم بر این منابع است. بنابراین هدف اصلی در این مقاله شناسایی زون‌های بالقوه ذخیره آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)، تهیه نقشه پهنه‌بندی و ارزیابی آن است. بر این اساس نقشه‌های موضوعی مانند ژئومورفولوژی، تراکم زهکشی، تراکم خطواره، شیب و کاربری اراضی برای تجزیه و تحلیل FAHP آماده و وزن لایه‌های انتخاب شده با استفاده از روش FAHP محاسبه شد. درنهایت نقشه پهنه‌بندی بالقوه آب‌های زیرزمینی به پنج اولویت ضعیف، متوسط، خوب، بسیار خوب و عالی رده‌بندی شد. از آنجا که تعداد و تراکم چاه‌ها و چشمه‌های موجود در محدوده مورد بررسی بیانگر پتانسیل ذخیره آب زیرزمینی مناطق است، بنابراین از منحنی ویژگی عمل‌گر نسبی یا گیرنده (ROC) با به‌کارگیری نقشه پراکنش نقاط چشمه به‌عنوان پتانسیل بالفعل منابع آب زیرزمینی برای ارزیابی صحت و اعتبارسنجی آن استفاده شد. نتایج نشان داد مساحت الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی به‌ترتیب الویت از اول یا بسیار خوب (۳۷/۷ کیلومترمربع)، دوم یا خوب (۵۵ کیلومترمربع)، سوم یا متوسط (۴۰ کیلومترمربع)، چهارم یا ضعیف (۱۰۷ کیلومترمربع) و الویت پنجم یا بسیار ضعیف (۹۸/۴ کیلومترمربع) به‌عنوان مناطق پیشنهادی مشخص شدند.

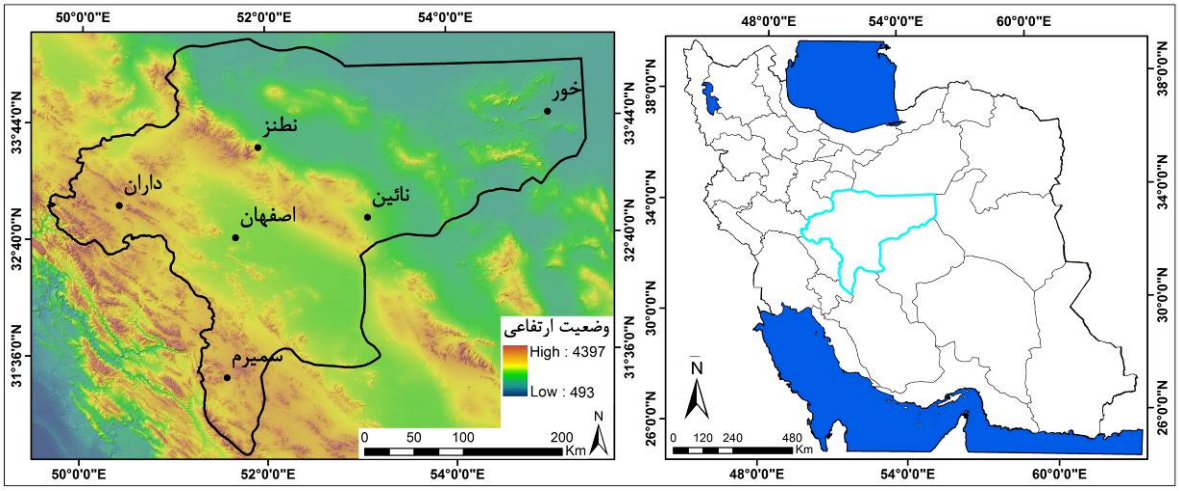
واژه‌های کلیدی: ارزیابی، پهنه‌بندی، آب زیرزمینی، وزن‌دهی، FAHP

۱. گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: K.Shirani@areeo.ac.ir

مقدمه

آب‌های زیرزمینی، منابع تجدیدناپذیر طبیعی زمین هستند که فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و خانگی را حفظ و پشتیبانی می‌کنند و بیشترین درصد آب شیرین جهان قلمداد می‌شوند. این منبع مهم آبی حدود ۳۴ درصد آب سالانه کل جهان را تأمین می‌کند. استفاده از آب‌های زیرزمینی به‌دلیل رشد سریع جمعیت، نرخ بالای شهرنشینی، رشد صنعتی و مصارف کشاورزی در حال افزایش است. این امر منجر به تخلیه سریع آب‌های زیرزمینی و درنهایت منجر به تنش و تخریب این منابع می‌شود (۱۷). چرخه هیدرولوژیکی، آب‌های زیرزمینی در اثر نفوذ آب‌های سطحی (باران) در اعماق زیاد و پر کردن فضاهای بین ذرات خاک یا رسوبات و یا شکستگی‌ها در سنگ به‌وجود می‌آید. آب زیرزمینی با سرعت بسیار آهسته در زیر سطح زمین به سمت نقاط تخلیه، از جمله چاه‌ها، چشمه‌ها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها جریان می‌یابد که بزرگ‌ترین منبع در دسترس آب شیرین در زیر زمین است. این امر نه تنها برای هدف قرار دادن زون‌های بالقوه آب‌های زیرزمینی، بلکه نظارت و حفاظت از این منبع مهم حیاتی شده است. هزینه و نیروی کار متحمل شده در توسعه آب‌های سطحی در مقایسه با آب‌های زیرزمینی خیلی بیشتر است، از این‌رو بیشتر تأکید بر استفاده از آب‌های زیرزمینی است که می‌تواند در یک زمان کوتاه توسعه یابند. حساسیت آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف کشور متفاوت است. در این میان با توجه به جمعیت و موقعیت جغرافیایی استان اصفهان، مسئله آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از چالش‌های پیش روی استان اصفهان محسوب می‌شود. یکی از راهکارهای موجود، ایجاد نقشه‌های الویت‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی است که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آتی مورد توجه قرار گیرد. تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و روش‌های زمین‌آمار، به‌عنوان روشی سودمند برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در جهان شناخته شده است (۷ و ۱۰). روش‌های متعددی در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی استفاده شده است که می‌توان به مدل‌های نسبت فراوانی (Frequency Ratio)، رگرسیون لجستیک (Logistic Regression)، مدل وزن شاهد (Weights-of-Evidence) و آنتروپی شانون (Shannon's Entropy) اشاره کرد (۶، ۸ و ۹). همچنین از تکنیک‌های محاسبات نرم‌افزاری مانند درخت تصمیم (Decision Tree) (۵ و ۱۱)، شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) (۱۸) و منطق فازی (۲۳) برای تهیه نقشه مناطق بالقوه آب زیرزمینی استفاده شده است.

در زمینه شناسایی زون‌های بالقوه آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری AHP یا فازی و وزن‌دهی به عوامل مؤثر و درنهایت تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی نیز پژوهش‌های مختلفی همراه با نتایج مفیدی انجام شده است (۴، ۱۳، ۱۶ و ۱۹) در این پژوهش‌ها عمدتاً از لایه‌های اطلاعاتی یا عوامل مؤثری از قبیل لیتولوژی، ژئومورفولوژی، خاک، شیب، خطواره‌ها، آبراهه‌ها و سایر داده‌های تأثیرگذار در محیط GIS استفاده کرده‌اند. در بیشتر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، جنبه‌های ارزیابی و اعتبارسنجی نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی در نظر گرفته نشده است. همچنین با توجه به ماهیت پیوستگی و تدریجی آب زیرزمینی در آبخوان‌ها، به‌نظر می‌رسد که استفاده تلفیقی مدل‌های مناسب (تلفیق روش تصمیم‌گیری با منطق فازی) در افزایش کارآمدی نقشه پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی نقش مؤثری داشته باشد. موضوعی که در پژوهش‌های گذشته به آن توجه نشده است. بنابراین با توجه به مطالب اشاره شده هدف از انجام پژوهش حاضر، پتانسیل‌یابی و تهیه نقشه پهنه‌بندی مناطق مستعد آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری فازی (FAHP) و ارزیابی و اعتبارسنجی آن با استفاده از نسبت فراوانی یا Frequency Ratio (FR)، شاخص سطح سلول هسته یا Seed Cell Area Index (SCAI) و منحنی ویژگی عملگر گیرنده یا Recievier Operating Charactristic (ROC) است. لازم به‌ذکر است جنبه نوآورانه این پژوهش به‌کارگیری این شاخص‌ها همراه با همدیگر به‌منظور اعتبارسنجی و ارزیابی



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

مدل و تعیین آستانه‌های مناسب برای طبقات نقشه الویت‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی است که در کمتر پژوهش مشابه‌ای در زمینه تهیه نقشه‌های پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی به‌کار گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیای منطقه مورد مطالعه واقع در ۴۹ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۴۵ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۳۴ درجه ۱۰ دقیقه عرض شمالی با مساحت ۱۰۶۸۰۰ کیلومتر مربع است (شکل ۱). با توجه به قرارگیری در مرکز فلات ایران از نظر مورفوتکتونیکی شامل چهار واحد ساختمانی به نام‌های: زاگرس چین‌خورده، زاگرس مرتفع، سنندج- سیرجان و ایران مرکزی است. از جمله گسل‌های اصلی منطقه، می‌توان به گسل درونه، گسل دهشیربافت، گسل زاگرس، گسل پشت بادام، گسل قم- زفره و گسل کاشان اشاره کرد (۱۷). از نظر اقلیمی نیز به‌دلیل واقع شدن در مرکز ایران و در دامنه‌های شرقی سلسله جبال زاگرس موجب شده است تا همانند سایر مناطق مرکزی کشور به‌دلیل تغییرات آب‌وهوایی در این مناطق از بارندگی‌های کم، دما و تبخیر زیاد برخوردار و مقادیر بارندگی آن نیز همواره دچار نوسانات شدید باشد. بر اساس گزارش سازمان هواشناسی استان اصفهان و با توجه به آمار ۴۵ ساله اخیر (۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵)، بیشینه درجه حرارت ۴۰/۶ درجه سانتی‌گراد، کمینه درجه حرارت ۱۰/۶- درجه سانتی‌گراد و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۶/۷درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. طبق همین گزارش، تعداد روزهای یخبندان استان ۷۶ روز و متوسط میزان بارندگی سالانه آن ۱۱۶/۹ میلی‌متر است (سازمان هواشناسی استان اصفهان، ۱۳۹۴). آب‌وهوای استان اصفهان به‌طور کلی معتدل خشک است، اما با توجه به تأثیر بادها و دوری و نزدیکی به منطقه کوهستانی غرب و دشت کویر در شرق و جنوب شرقی، آب‌وهوای آن در سه بخش متمایز، آب‌وهوای بیابانی که شمال شهرستان نائین، حوضه بیابانک و انارک تا شمال اردستان را در بر می‌گیرد. مشخصه ویژه آن تغییر شدید و سریع درجه حرارت، کمی بارش باران و وزش بادهای تند در طول سال است. آب‌وهوای نیمه‌بیابانی که شهرستان اصفهان را در بر می‌گیرد و خشکی هوا و کمی بارندگی از مشخصات این نوع آب و هواست. رودخانه زاینده‌رود به طرز چشم‌گیری روی آب‌وهوای این ناحیه تأثیر مثبت دارد و آن را تعدیل می‌کند و آب‌وهوای نیمه‌مرطوب سرد که قلمرو غرب و جنوب غربی اصفهان را در بر می‌گیرد. به نسبت افزایش ارتفاع، میزان بارندگی افزایش می‌یابد و از درجه گرمای هوا نیز کاسته می‌شود.

شکل ۲. نمودار گردشی روش پژوهش

مواد و روش‌ها

داده‌ها و آماده‌سازی معیارهای تأثیرگذار بر آب زیرزمینی

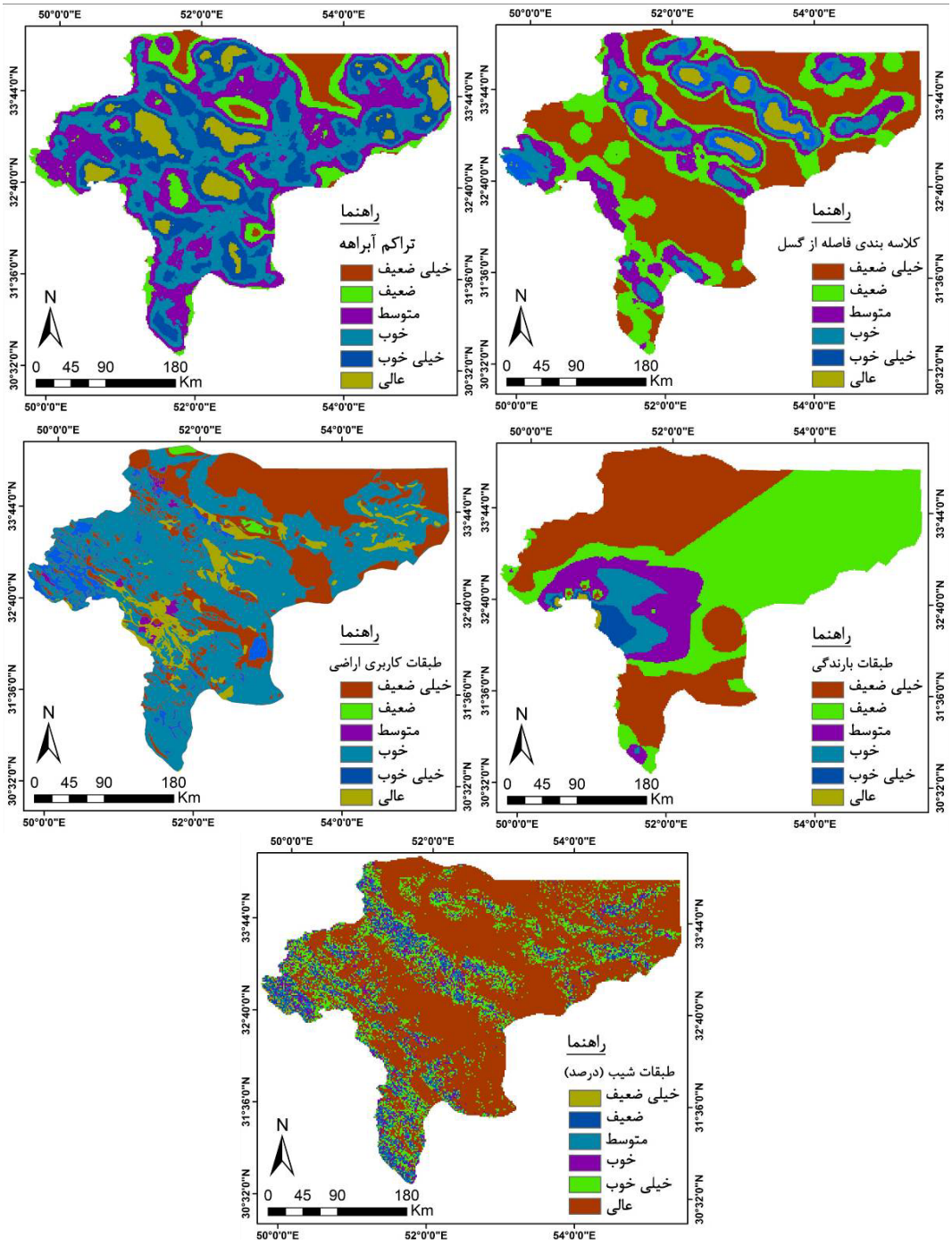
پژوهش حاضر برمبنای مطالعات کتابخانه‌ای و روش‌های توصیفی- تحلیلی صورت گرفته است (شکل ۲). در این پژوهش از داده‌های اطلاعاتی مختلف شامل تصاویر ماهواره‌ای لندست سال ۲۰۱۶ (سنجنده OLI)، نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰، داده‌های سازمان هواشناسی و همچنین DEM ۳۰ متر SRTM استفاده شده است.

همچنین بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته در داخل و خارج از کشور (۲، ۲۶ و ۲۸) و به‌منظور تأمین اهداف مورد نظر، پنج لایه اطلاعاتی شیب، شبکه آبراهه، بارش، خطواره یا گسل و کاربری زمین انتخاب و در محیط GIS آماده شدند (شکل ۲). در ابتدا مدل ارتفاعی رقومی (DEM) مربوط SRTM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شد و لایه‌های تأثیرگذار بر آب زیرزمینی مانند درجه شیب و شبکه آبراهه از مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزارهای ArcGIS 10.3 و SAGA-GIS تهیه شد. عوامل توپوگرافی به‌ویژه شیب، نقش بسیاری 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، این امر باعث نفوذ یا تغذیه بیشتر آب می‌شود، ولی نواحی با شیب بالا دارای مقادیر زیادی رواناب هستند و مقدار نفوذ در آنها کم است (۲۱). در این پژوهش لایه شیب‌های بالای ۱۵ درجه جز کلاس‌بندی قرار نگرفته و به سبب این در شیب‌ها محدودیت اسکان بوده و از نظر منطقی شامل ارزش‌دهی نیست و در نتیجه این محدوده ماسک شده است (۲۱ و ۲۸). آبراهه‌ها نقش انتقال رواناب را داشته و در فواصل نزدیک‌تر به رودخانه، به‌دلیل تغذیه سفره آب زیرزمینی تعداد چشمه‌های بیشتری وجود دارد (۲۱). بارندگی نیز نقش مؤثر و اصلی در تغذیه آبخوان‌ها دارد، به‌طوری که با مهیا بودن حالت ایده‌آل تمامی معیارهای مؤثر، اگر بارندگی اتفاق نیافتد، هیچ‌گونه تغذیه‌ای در سفره‌های زیرزمینی انجام نمی‌شود. بنابراین معیارهای دیگر معمولاً از نظر مکانی در موقعیت آبخوان تأثیرگذار هستند. به‌طور کلی هر کجا میانگین بارندگی

بیشتر باشد، میزان تغذیه آبخوان‌ها نیز بیشتر است. همچنین از آنجایی که حامل رواناب‌ها معمولاً آبراهه‌ها هستند بنابراین تراکم آبراهه‌ها منجر به رواناب بیشتر می‌شود (۱۵). با مهیا بودن شرایط می‌توان گفت هر چه تراکم آبراهه‌ها بیشتر باشد، آبخوان‌های با سطح استاتیک بالا در آن محل محتمل‌تر است. نقشه بارش با استفاده از برازش و درون یابی آمار بارش ایستگاه هواشناسی اداره هواشناسی و همبستگی با نقشه DEM با استفاده نرم افزار ArcGIS10.1 تهیه شد.

نوع سنگ‌شناسی و ویژگی‌های وابسته به آن نظیر بافت و درجه خلوص سنگ نقش مهمی در تخلخل، نفوذپذیری اولیه و تمرکز جریان آب زیرزمینی در داخل سنگ‌ها ایفا می‌کند (۲۱). عوامل ساختمانی و تکتونیکی نظیر درزه‌ها و گسل‌ها به‌عنوان نقاط ضعف واحدهای زمین‌شناسی به‌شمار رفته و راهی برای عبور آسان آب و محلی برای تجمع آب به‌صورت مخازن زیرزمینی هستند. این عامل همچنین به‌طور چشمگیری روی هیدروژئولوژی سنگ‌های کربناته و آهکی تأثیر می‌گذارد (۲۱). تراکم شکستگی معیاری برای خردشدگی سازند است، بدین معنی که تعداد درزه و شکستگی که به‌ازای هر واحد طول در یک منطقه ظاهر می‌شوند، مدنظر است. افزایش تراکم درزه و گسل‌ها به‌طور کلی نقش مؤثری در نفوذ و انتقال‌دهی آب زیرزمینی برای استخراج، حفاظت آب و پراکندگی مواد آلاینده اهمیت دارد ولی در ایجاد پرده ترزیق برای غیر قابل نفوذ کردن یک منطقه به‌ویژه برای احداث سدهای مخزنی نقش منفی دارد (۵، ۱۲ و ۱۵). با توجه به اهمیت جنس زمین‌شناسی محیط آبخوان‌ها، نهشته‌های رسوبی در استان اصفهان در چهار بخش قابل تقسیم است: ۱. مجموعه‌های رسوبی و آذرین دگرگون نشده: شامل پرکامبرین بالایی (زمین‌های غیردگرگونی تشکیل شده از رسوبات ضخیم)، پالئوزوئیک (عمدتاً شامل مارن، شیل‌های قرمز تا بنفش و کوارتزیت)، مزوزوئیک (شامل سازندهای شتری، نای بند، شمشک و ...)، سنوزوئیک (عمدتاً از مواد آتشفشانی تشکیل شده است) و کواترنری (شامل تپه‌های ماسه‌ای بادی، رسوبات آبرفتی و ...) می‌شود. ۲. بخش رسوبی: افیولیت‌های کرتاسه: آگماتیت آذرین، مجموعه شیست‌های گلوکوفانه‌دار، آهک، دایک، ماسه سنگ، کنگلومرا، شیل، گدازه‌های بالشی و آمیزه تکتونیکی افیولیتی. ترسیری: ملانژیا آمیزهای رسوبی. ۳. مجموعه‌های دگرگونی فاز کوهرایی سیمیرین آغازین: این مجموعه‌ها شامل آهک فوزولین‌دار دگرگون شده، سنگ‌های پالئوزوئیک و ... ۴. توده‌های نفوذی: این توده‌ها شامل گابرو، دیوریت، گرانیت و ... می‌شود. از نظر وضعیت پراکنش گسل‌ها نیز، با توجه به موقعیت جغرافیایی استان، دارای شبکه‌ای متراکم است که از جمله گسل‌های اصلی استان اصفهان می‌توان به گسل درونه، گسل دهشیر- بافت، گسل زاگرس، گسل پشت بادام، گسل قم- زفره و گسل کاشان اشاره کرد (۱۷). نقشه زمین‌شناسی در محیط ArcGIS10.1 با استفاده از نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی ایران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ رقومی، تهیه و لایه‌های گسل و سنگ‌شناسی از آن استخراج شد. یکی دیگر از عوامل مؤثر، کاربری اراضی است، نوع کاربری در میزان رواناب و نفوذپذیری آن نقش مستقیمی دارد. همچنین میزان تراکم پوشش گیاهی، نوع کشت در مناطق مختلف و ... تأثیر مستقیمی بر پتانسیل آب‌های زیرزمینی دارد به همین از این فاکتور نیز استفاده شده است. لایه کاربری اراضی با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای OLI مربوط به ماهواره لندست ۸ سال ۲۰۱۶ پردازش‌های مناسب روی باندهای ۲ تا ۷ و باند پان کروماتیک در محیط ENVI5.3 و مقایسه و تدقیق مرزهای آن با استفاده از نقشه کاربری اراضی موجود در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شد. بیشترین کاربری منطقه مورد مطالعه، مرتع و رخنمون‌های سنگی است. معیارهای تأثیرگذار بر آب زیرزمینی در این پژوهش، در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این پژوهش ابتدا تمام لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در فرایند مدل تهیه شده و سپس نقشه‌های مورد نظر استخراج شده است. با توجه به اینکه تمامی این لایه‌ها اثر یکسانی در تمرکز آب‌های زیرزمینی ندارند، بایستی به هر کدام از آنها وزن متناسبی اعمال



شکل ۳. نقشه طبقاتی عوامل مؤثر

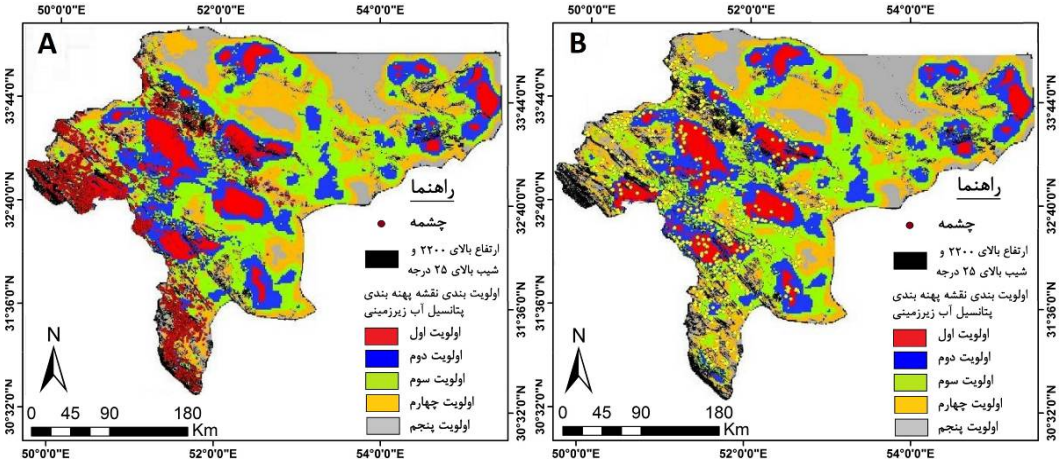
شود. به‌منظور وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی از جامعه آماری ۳۳ نفره از اساتید دانشگاه، مهندسین آب منطقه‌ای و کارشناسان فارغ‌التحصیل رشته آب زیرزمینی با درجات علمی دکترا و کارشناسی ارشد استفاده شده است. بدین‌صورت که پس از امتیازدهی هر لایه توسط کارشناسان امر، امتیازات به‌دست آمده وارد جدول اطلاعاتی لایه‌ها شده است (جدول ۱) و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در مرحله بعد مقادیر وزنی و تناسب زمین برای پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی بر اساس روش FAHP در هر کدام‌یک از لایه‌ها مشخص شد و نقشه‌های آنها با دامنه تناسب عالی تا خیلی کم تهیه شدند (شکل ۴).

جدول ۱. کلاس‌بندی معیارها و وزن‌های تخصیص‌یافته به معیارها و زیرمعیارها

معیار اصلی	وزن معیار اصلی	زیرمعیار	چگالی زیرمعیار	وزن زیرمعیار	وزن کلی
تراکم آبراهه	۰/۴۴۹۰۵	طول آبراهه	۰–۰/۰۴	۰/۰۳۶۱۴	۰/۰۱۹۳۷
			۰/۰۴–۰/۱۳	۰/۰۵۶۱۵	۰/۰۳۱۹۱
			۰/۱۳–۰/۲	۰/۰۹۴۵۲	۰/۰۵۳۷۲
			۰/۲–۰/۲۷	۰/۱۶۱۶۳	۰/۰۹۱۸۶
			۰/۲۷–۰/۳۵	۰/۲۷۲۰۸	۰/۱۵۴۶۳
			۰/۳۵–۰/۵۷	۰/۴۰۸۰۹	۰/۲۱۸۶۸
میزان بارندگی	۰/۲۹۶۲۶	۷۵–۱۵۰ میلی‌متر	۰–۲/۲	۰/۰۳۶۱۴	۰/۰۱۲۷۷
		۱۵۰–۲۵۰ میلی‌متر	۲/۲–۴/۷	۰/۰۵۶۱۵	۰/۰۲۱۰۵
		۲۵۰–۳۵۰ میلی‌متر	۴/۷–۷/۹	۰/۰۹۴۵۲	۰/۰۳۵۴۴
		۳۵۰–۴۵۰ میلی‌متر	۷/۹–۱۲/۱	۰/۱۶۱۶۳	۰/۰۶۰۶۰
		۴۵۰–۵۵۰ میلی‌متر	۷/۹–۱۹/۳	۰/۲۷۲۰۸	۰/۱۰۲۰۱
		۵۵۰–۶۰۰ میلی‌متر	۱۷/۹–۳۳/۳	۰/۴۰۸۰۹	۰/۱۴۴۲۷
شیب (درجه)	۰/۱۵۴۷۳	۰–۱/۵		۰/۴۰۸۰۹	۰/۰۷۵۳۵
		۱/۵–۳		۰/۲۷۲۰۸	۰/۰۵۳۲۸
		۳–۵		۰/۱۶۱۶۳	۰/۰۳۱۶۵
		۵–۸		۰/۰۹۴۵۲	۰/۰۱۸۵۱
		۸–۱۱		۰/۰۵۶۱۵	۰/۰۱۰۹۹
		۱۱–۱۵		۰/۰۳۶۱۴	۰/۰۰۶۶۷
کاربری اراضی	۰/۰۸۱۰۰	جنگل و جنگل‌کاری		۰/۴۰۸۰۹	۰/۰۳۹۴۴
		دریاچه و زمین‌های مرطوب و زراعت آبی		۰/۲۷۲۰۸	۰/۰۲۷۸۹
		مرتع و دیم‌کاری		۰/۱۶۱۶۳	۰/۰۱۶۵۷
		مسکونی		۰/۰۹۴۵۲	۰/۰۰۹۶۹
		دشت		۰/۰۵۶۱۵	۰/۰۰۵۷۵
		بیابان و تل‌ماسه و زمین‌های شور		۰/۰۳۶۱۴	۰/۰۰۳۴۹
تراکم گسل	۰/۰۴۷۳۹	طول گسل	۰–۰/۰۲	۰/۰۳۶۱۴	۰/۰۰۲۰۴
			۰/۰۲–۰/۰۶	۰/۰۵۶۱۵	۰/۰۰۳۳۶
			۰/۰۶–۱	۰/۰۹۴۵۲	۰/۰۰۵۶۶
			۱–۰/۱۶	۰/۱۶۱۶۳	۰/۰۰۹۶۹
			۰/۱۶–۰/۲۲	۰/۲۷۲۰۸	۰/۰۱۶۳۲
			۰/۲۲–۰/۳۷	۰/۴۰۸۰۹	۰/۰۲۳۰۸

نقشه پراکنش چشمه و چاه‌های آب

به‌منظور شناسایی چشمه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، علاوه بر اجرای مطالعات گسترده صحرایی، اطلاعات موقعیت جغرافیایی چشمه‌ها و چاه‌های آب در استان اصفهان از سازمان تحقیقات



شکل ۴. A) نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی با چشمه‌ها و B) نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی با چاه‌ها

منابع آب ایران گرفته شد. در مجموع ۹۰۶۹ چشمه و چاه آب در استان برای ارزیابی و اعتبارسنجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شده در این پژوهش انتخاب و استفاده شد (شکل ۴).

الگوریتم FUZZY-AHP

روش AHP، یک روش آنالیز چندمعیاره مبتنی بر فرایند وزن‌دهی تجمعی است که در آن چندین ویژگی مرتبط بر اساس اهمیت نسبی‌شان نمایش داده می‌شود. در AHP اهمیت چندین ویژگی از فرایند مقایسه زوجی به‌دست می‌آید که در آن ارتباط ویژگی‌ها به‌صورت دو به دو در یک ساختار سلسله مراتبی مقایسه می‌شوند و بر اساس میزان اهمیت وزن می‌گیرد. برای ارزیابی تعداد زیادی از معیارها و حل مسائل چندمتغیره، AHP به‌صورت گسترده به‌کار می‌رود و این مدل به گروه تصمیم‌گیران اجازه می‌دهد عضو هر گروهی که باشند از آزمون‌پذیری این مدل استفاده کنند و مسئله را به کمک آن حل کنند (۲۲). الگوریتم AHP با وجود محبوبیت عام، به‌دلیل ناتوانی در ترکیب ابهام ذاتی و نبود صراحت مربوط به نگاشت ادارک‌های تصمیم‌گیران با اعداد دقیق، مورد نقد است (۲۰). بنابراین به‌دلیل نواقص مدل AHP، یانگ و چن(۳۰) پیشنهاد کردند که روش AHP در کاربردهای تصمیم‌گیری کریسپ (CRISP) استفاده شود. یکی از راه‌هایی که برای غلبه بر کاستی‌های فرایند تحلیل سلسله مراتبی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است به‌کارگیری نظریه مجموعه‌های فازی است که بر پایه استفاده از منطق فازی در فرایند تحلیل سلسله مراتبی است (۴). چندین رویکرد FAHP با اندکی تفاوت وجود دارند که برای کاربرد در مسائل متنوع تصمیم‌گیری ارائه شده‌اند. روش مورد استفاده در این تحقیق، توسط باکلی (۴) ارائه شده است.

در این روش برای مقایسه زوجی گزینه‌ها، از اعداد فازی و برای به‌دست آوردن وزن‌ها و برتری‌ها از روش میانگین هندسی استفاده می‌شود. همچنین مقایسات زوجی المان‌های هر سطح، در قالب اعداد فازی ذوزنقه‌ای بیان شده است. الگوریتم این روش در سه گام اجرا می‌شود. در گام‌های اول و دوم از روش باکلی (۴) و در گام سوم از روش بونیسون (۳) استفاده شده است. درگام اول مطابق رابطه‌های (۱) تا (۳) ماتریس‌های مقایسات زوجی توسط شخص تصمیم گیرنده مشخص شد.

$$\tilde{a}_{ij} = \left(a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}\right) \quad (۱)$$

$$\tilde{a}_{ji} = \left(\frac{۱}{d_{ij}}, \frac{۱}{c_{ij}}, \frac{۱}{b_{ij}}, \frac{۱}{a_{ij}}\right) \quad (۲)$$

$$\begin{bmatrix} (a_{۱۱}, b_{۱۱}, c_{۱۱}, d_{۱۱}) & \cdots & (a_{۱n}, b_{۱n}, c_{۱n}, d_{۱n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{n۱}, b_{n۱}, c_{n۱}, d_{n۱}) & \cdots & (a_{nn}, b_{nn}, c_{nn}, d_{nn}) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

در گام دوم با استفاده از روش میانگین هندسی وزن هر کدام از

ویژگی‌ها (زیرلایه‌ها) به‌صورت جداگانه و همچنین وزن (یا مقدار برتری بین لایه‌ای) هر یک از معیارها (لایه‌ها) مطابق رابطه‌های (۴) و (۵) و فازی سازی مطابق رابطه‌های (۶) و (۷) محاسبه می‌شود.

$$a_i = \left(\prod_{j}^{n} a_{ij} \right)^{1/n} \quad (۴)$$

$$a = \sum_{i=1}^{n} a_i \quad (۵)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_i}{d}, \frac{b_i}{c}, \frac{c_i}{b}, \frac{d_i}{a} \right) \quad (۶)$$

$$\tilde{W}_j = \left(\frac{a_i}{d}, \frac{b_i}{c}, \frac{c_i}{b}, \frac{d_i}{a} \right) \quad (۷)$$

درنهایت در گام سوم با استفاده از روش بونیسون مقادیر مطلوبیت فازی محاسبه و وزن هر لایه در مقادیر فازی اختصاص یافته به‌ویژگی‌های درون لایه‌ای آن مطابق روابط (۸) و (۹) ضرب و به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود (۴).

$$\tilde{u}_j = \sum_{j=1}^{n} \tilde{w}_j \tilde{r} \quad (۸)$$

$$\tilde{w}_j \tilde{r}_{ij} = \begin{pmatrix} a_1 b_2, b_1 b_2, a_1 l_2 + a_2 l_1 \\ -l_1 l_2, b_1 r_2 + b_2 r_1 + r_1 r_2 \end{pmatrix} \quad (۹)$$

$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (۱۰)$$

پس از محاسبه وزن مربوط به هر لایه بر اساس روش FAHP که در حقیقت اهمیت هر لایه را در تشکیل آب زیرزمینی نشان می‌دهد، لایه‌های اطلاعاتی با هم تلفیق و نقشه پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شد. تلفیق نقشه‌های معیار در نرم‌افزار ArcGIS 10.1 انجام شد.

روش‌های مورد استفاده در این تحقیق نیز شامل روش FAHP (برای تهیه نقشه پهنه‌بندی) (۲۹)، روش FR و SCAL و ROC (برای ارزیابی و اعتبارسنجی) است. با توجه به اهداف مورد نظر، پژوهش حاضر در چهار مرحله صورت گرفته است که در ادامه به تشریح مراحل پرداخته شده است: در مرحله اول: بر اساس پیشینه پژوهش اقدام به جمع‌آوری و آماده‌سازی عوامل مؤثر (پنج عامل بارش، کاربری زمین، شبکه آبراهه، شیب و خطواره یا گسل) در قالب لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS، به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی شده است. در مرحله دوم: پس از رده‌بندی، طبقات عوامل یا لایه‌های مؤثر بر اساس روش FAHP وزن‌دار (وزن‌دهی درون لایه‌ای و بین‌لایه‌ای) شده‌اند. در مرحله سوم: لایه‌های مورد نظر در محیط GIS تلفیق و نقشه پهنه‌بندی حاصل شده است. در مرحله آخر: پس از طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی، با استفاده از نقشه یا لایه پراکنش چاه‌ها و چشمه‌ها (واقعیت زمینی) و به‌کارگیری روش ROC اقدام به اعتبارسنجی و ارزیابی نقشه نهایی شده است. در شکل ۲ مراحل انجام کار نشان داده شده است و در ادامه به تشریح روش‌های مورد استفاده پرداخته شده است.

ارزیابی و اعتبارسنجی نقشه الویت‌بندی پتانسیل منابع آب زیرزمینی

ارزیابی یک گام اساسی در توسعه و تعیین کیفیت نقشه الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی است. یکی از روش‌های مناسب برای ارزیابی نتایج حاصل از یک طبقه‌بندی کننده و ارزیابی میزان قابلیت آن در شناسایی طبقه مورد نظر استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی یا گیرنده (ROC) به‌منظور بررسی حساسیت روش است. منحنی ROC از کارآمدترین روش‌ها در ارائه ویژگی تعیینی، شناسایی احتمالی و پیش‌بینی سیستم‌هاست که میزان دقت مدل را به‌صورت کمّی برآورد می‌کند (۲۱، ۲۴ و ۲۵). منظور از حساسیت ارتباط بین میزان سلول‌های درست طبقه‌بندی شده و موارد نادرست است. هر چه میزان انحراف از خط مبنا برای یک طبقه خاص در منحنی ROC بیشتر باشد، کارایی طبقه‌بندی کننده یاد شده در شناسایی آن طبقه بیشتر است. علاوه بر بررسی روند نمودار طبقه مورد نظر، سطح زیر آن نمودار نیز محاسبه می‌شود. این مساحت بیانگر احتمال این است که یک سلول انتخاب شده به‌طور تصادفی، صحیح طبقه‌بندی می‌شود و هر چه بیشتر باشد، قابلیت اطمینان روش یاد شده را نشان می‌دهد (۲۴). در این شاخص ارزیابی

سلول‌هایی که به درستی به طبقه مورد نظر اختصاص یافته‌اند (TP)، سلول‌هایی که به درستی به طبقه مورد نظر اختصاص نیافته‌اند (TN)، سلول‌هایی که به نادرستی به طبقه مورد نظر اختصاص یافته‌اند (FP) و سلول‌هایی که به نادرستی به طبقه مورد نظر اختصاص نیافته‌اند (FN)، استفاده می‌شوند.

اگر خروجی واقعی مثبت و مقدار پیش‌بینی نیز مثبت باشد، این حالت را TP می‌نامیم. اگر خروجی واقعی مثبت باشد و مقدار پیش‌بینی نیز منفی باشد، این حالت را FN می‌نامیم. اگر خروجی واقعی منفی و مقدار پیش‌بینی نیز منفی باشد، این حالت را TN می‌نامیم. اگر خروجی واقعی منفی و مقدار پیش‌بینی نیز مثبت باشد، این حالت را FP می‌نامیم. در ترسیم نمودار ROC حساسیت (Sensitivity) بیانگر مقادیر پیش‌بینی شده درست در مقابل تمام خروجی‌های مثبت است. ویژگی (Specificity) بیانگر مقادیر پیش‌بینی شده منفی درست در مقابل تمام خروجی‌های منفی است. در صورتی که مقدار ویژگی از عدد یک کسر شود مؤید مقادیر پیش‌بینی شده مثبت در مقابل تمام خروجی‌های منفی خواهد بود که معیار بهتری برای ارزیابی و اعتبارسنجی است (۲۴). برای رسم این منحنی، باید محور X که نمایانگر "ویژگی -۱" (رابطه ۱۱) و محور Y که حاوی "حساسیت" (رابطه ۱۲) است به‌ازای هر مقدار از آستانه طبقه مورد نظر محاسبه شود.

$$\text{ویژگی -۱} = \frac{TP}{TN+FP} \quad (11)$$

$$\text{حساسیت} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (12)$$

سطح زیر منحنی ROC که AUC (Area Under Curve) نامیده می‌شود، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخداده (پراکنش نقاط چشمه و چاه) و عدم وقوع رخداد (مناطق الویت خیلی ضعیف و ضعیف پتانسیل منابع آب زیر زمینی) است. مقادیر AUC از ۰/۵-۱ متغیر است. همبستگی کیفی- کمّی سطح زیر منحنی (AUC) و ارزیابی تخمین به‌صورت (۰/۹-۱، عالی؛ ۰/۸-۰/۹، خیلی خوب؛ ۰/۷-۰/۸،خوب؛ ۰/۶-۰/۷، متوسط و ۰/۵-۰/۶، ضعیف) است (۲ و ۲۷). هر چه سطح منحنی به یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر بهترین دقت از نقشه پهنه‌بندی تهیه شده است. سپس با استفاده از منحنی ویژگی عملگر نسبی یا گیرنده (ROC) (۱، ۲۴، و ۲۶) صحت نقشه تهیه شده مورد تأیید قرار گرفت.

بدین‌منظور از پراکنش نقاط چشمه و چاه به‌عنوان واقعیت زمینی برای ارزیابی و دقت طبقه‌بندی نقشه الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی بهره گرفته شد (۲۰ و ۲۱). در این مرحله با تلاقی نقشه پراکنش چشمه‌های منطقه به‌عنوان پتانسیل بالفعل و نقشه الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی حاصل از اجرای مدل در محیط ArcGIS، با بهره‌گیری از منحنی ویژگی عملگر نسبی (ROC) به‌ارزیابی اعتبارسنجی نقشه الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی پرداخته می‌شود.

همچنین برای ارزیابی و مقایسه دقت بین پهنه‌ها یا رده‌های الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی در مدل، از نسبت فراوانی (Frequency Ratio) (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) استفاده شده است. به بیانی دیگر با استفاده از نسبت فراوانی (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) دقت طبقه‌بندی مدل تعیین می‌شود (۲۴، ۲۵ و ۲۶). نسبت فراوانی (FR) از تقسیم تعداد پیکسل یا نقاط چشمه و چاه در هر طبقه نسبت به سطح هر الویت یا پهنه حاصل می‌شود. شاخص سطح سلول هسته (SCAI) تراکم پیکسل یا نقاط چشمه و چاه در هر طبقه است و از تقسیم درصد سطح هر پهنه الویت پتانسیل آب زیرزمینی به درصد سلول هسته حاصل می‌شود.

بحث و نتایج

نتایج وزن‌دهی به عوامل مؤثر براساس الگوریتم FAHP

نتایج حاصله از جدول ۱ و شکل ۴ نشان می‌دهد که بر اساس انتخاب پارامترها، به‌ترتیب تراکم آبراهه، میزان بارندگی، شیب زمین تا ۱۵ درجه، کاربری اراضی و تراکم گسل دارای اهمیت و وزن بیشتری هستند. در تراکم آبراهه زیرمعیاری با چگالی

۰/۰۴-۰ و وزن کلی ۰/۰۱۹۳۷ دارای کمترین و چگالی ۰/۵۶-۰/۳۷ و وزن کلی ۰/۲۱۸۶۸ دارای کمترین و بیشترین بازخورد در این معیار هستند. در معیار بارش، زیرمعیار بارندگی طبقات ۱۵۰-۷۵ و ۶۰۰-۵۵۰ میلی‌متر بارش به‌ترتیب دارای کمترین و بیشترین وزن کلی (۰/۰۱۲۷۷ و ۰/۱۴۴۲۷) هستند. در معیار شیب، زیرمعیار شیب طبقات ۱/۵-۰ و ۱۵-۱۱ دارای بیشترین و کمترین وزن (۰/۰۷۵۳۵ و ۰/۰۰۶۶۷) هستند. این بدین مفهوم است که شیب‌های کمتر اثر بیشتری دارند. در معیار کاربری اراضی جنگل و جنگل‌کاری با وزن ۰/۰۳۹۴۴ و بیابان و تل‌ماسه و زمین‌های شور با وزن ۰/۰۰۳۴۹ به‌ترتیب بیشترین و کمترین وزن را دارا هستند. در معیار گسل، زیرمعیاری با تراکم ۰/۰۲-۰ کمترین وزن (۰/۰۰۲۰۴) و زیرمعیاری با تراکم ۰/۳۷-۰/۲۲ بیشترین وزن (۰/۰۲۳۰۸) را دارند. در تمام زیرمعیارها، تراکم آبراهه با چگالی ۰/۵۷-۰/۳۷ بیشترین وزن (۰/۲۱۸۶۸) و میزان گسل با چگالی ۰/۰۲-۰ کمترین وزن (۰/۰۰۲۰۴) را دارند.

بر اساس شکل ۴ آبراهه در مرکز و غرب و جنوب استان اصفهان بیشترین تراکم را دارد و بارندگی در جنوب غرب بیشترین میزان است و شیب در نواحی غرب، جنوب غرب و مرکز دارای تراکم بیشتری هستند. در نواحی جنوب، غرب، جنوب غربی و مرکز استان کاربری زراعت و جنگل‌کاری است و میزان گسل در شمال غربی، شمال‌شرقی و بخش کوچکی در غرب و جنوب دارای بیشترین تراکم هستند.

منطقه مورد مطالعه

بر اساس پردازش، تلفیق و طبقه‌بندی نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی در محیط GIS مساحت الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی به‌ترتیب الویت از اول یا بسیارخوب (۳۷/۷ کیلومترمربع)، دوم یا خوب (۵۵ کیلو مترمربع)، سوم یا متوسط (۴۰ کیلو مترمربع)، چهارم یا ضعیف (۱۰۷ کیلو مترمربع) و الویت پنجم یا بسیار ضعیف (۹۸/۴ کیلو مترمربع) به‌عنوان مناطق پیشنهادی مشخص شدند (شکل ۴). نقشه‌های نهایی تهیه شده بیانگر مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی هستند و شامل آب مصرفی برای شرب، کشاورزی و بخش صنعت می‌شود و به‌صورت ویژه مربوط به هیچ کدام از آنها نیست. چرا که به‌منظور تعیین آب مناسب برای هر یک از بخش‌ها نیاز به بررسی میزان هوازدگی لایه‌ها، ضریب نفوذ پذیری لایه‌ها و ... است که دسترسی به این اطلاعات مقدور نبوده است. ارزیابی نقشه‌های نهایی بیانگر این است که بالاترین میزان پتانسیل بالقوه مربوط به مناطق غربی و جنوب غربی استان است که بخش عمده‌ای از طبقه اولویت اول و دوم در این قسمت از استان قرار دارد و همچنین پایین‌ترین میزان پتانسیل بالقوه مربوط به مناطق شمال شرق و شرق استان است که عمدتاً به طبقه اولویت آخر اختصاص یافته است. در نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی، سازندهای منطقه بر اساس ویژگی‌های ذاتی (ترکیب لیتولوژیکی وضعیت توپوگرافی) وجود یا نبود عوامل مؤثر در تشکیل آب زیرزمینی در آنها، به پهنه‌های مختلف از لحاظ پتانسیل آب زیرزمینی تقسیم شدند. لازم به ذکر است پهنه‌بندی سازندها به محدوده‌های رده‌بندی شده با ارزش‌های متفاوت، به این معنا نیست که به‌طور قطع در محدوده‌های دارای ارزش‌پتانسیلی بالا هر گونه حفاری چاه توأم با موفقیت خواهد بود و یا در مناطق با ارزش پتانسیلی ضعیف، هیچ چاهی آبدهی خوب نخواهد داشت، بلکه آنچه که تفکیک مناطق با پتانسیل مختلف را باعث می‌شود، فقط درصد احتمال محدوده مورد نظر در استخراج منابع آبی است، برای مشخص کردن مناسب‌ترین مناطق، انجام مطالعات دقیق ژئوفیزیک و حفاری‌های اکتشافی لازم است. یکی از پارامترهای فیزیکی، اختلاف ارتفاع است که نقش مؤثری در میزان بارندگی، تبخیر، دما وضعیت پوشش گیاهی دارد و به نوبه خود از عوامل مؤثر در مقدار نفوذ و رواناب است. وجود چشمه‌ها و چاه‌ها در شیب‌های بالا می‌تواند نشان دهنده تأثیر عوامل زمین‌شناسی محلی باشد. غالباً شیب‌های پایین‌تر مربوط به ارتفاعات دامنه است. درحالی که شیب‌های تند، بیشتر در بخش‌های مرتفع و ستیغ‌ها رخ می‌دهد. از این‌رو، وقوع چشمه‌ها و چاه‌ها در

شیب‌های کمتر، از شانس بالاتری برخوردار خواهد بود. با فرض ارتفاع یکسان، در مناطق کم‌شیب، در مقایسه با مناطق شیب‌دار، سطح تماس زمین با لایه‌ها بیشتر می‌شود. پس از بررسی موقعیت چشمه‌ها و چاه‌های منطقه مورد مطالعه مشخص شد که بیشتر چشمه‌ها و چاه‌ها که در نقاط مرتفع قرار دارند، از آبدهی پایینی برخوردار خواهند بود. زیرا حوضه آبگیر کوچکی دارند که روی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی که پتانسیل کمی دارند، منطبق است. همچنین چشمه‌ها و چاه‌هایی با آبدهی زیاد که در مناطقی با شیب پایین قرار دارند دقیقاً روی مناطقی با پتانسیل آب زیرزمینی بالاتر روی نقشه منطبق است (شکل ۴). البته دلیل دیگر آن وضعیت لیتولوژی محل قرارگیری این چشمه‌ها و چاه‌ها واحدهای ژئومورفولوژی منطقه است که در سلسله مراتبی تحلیلی فازی لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد که اولویت اول پهنه‌بندی متناسب با کاربری‌های جنگلی و زمین‌های آبی و اولویت آخر نیز متناسب با تل‌ماسه‌ها و بیابان‌هاست. همچنین بیشترین تطابق تراکم آبراهه و بارندگی‌ها با اولویت اول متناسب بوده است. همچنین ارتفاعات و شیب‌های بالای ۱۵ درجه متناسب اولویت آخر نقشه پهنه‌بندی قرار گرفته‌اند.

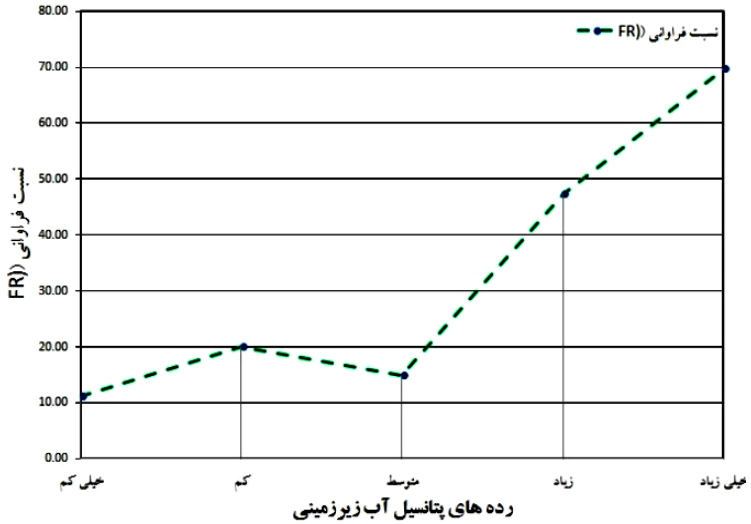
نتایج ارزیابی دقت و اعتبارسنجی نقشه الویت پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان نقشه الویت پتانسیل آب زیرزمینی از شاخص‌های نسبت فراوانی (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) استفاده شد. به‌عبارت دیگر نسبت فراوانی (FR) و شاخص SCAI دو شاخصی هستند که دقت طبقه‌بندی مدل را تعیین می‌کنند (۲۴). در حقیقت نسبت فراوانی (FR) نسبت پراکنش نقاط چشمه در هر طبقه به مساحت سطح آن طبقه و شاخص SCAI نسبت درصد مساحت هر یک از طبقات الویت پتانسیل آب زیرزمینی به درصد پراکنش نقاط چشمه در هر طبقه است (۲۱). نتایج حاصل از مقادیر FR (شکل ۵) و SCAI (شکل ۶) نشان داد که نقشه تولید شده دقیق است زیرا رده‌های الویت بسیار خوب و خوب دارای مقادیر خیلی کم SCAI و مقادیر بالای FR هستند و رده‌های بسیار ضعیف و ضعیف دارای مقادیر بالای SCAI و مقادیر خیلی کم FR هستند. این نتایج با نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین (۲۱، ۲۴ و ۲۵) که بیان داشتند مقادیر SCAI باید از رده بسیار ضعیف تا خیلی‌خوب کاهش یابد و مقادیر FR باید از رده بسیار ضعیف تا بسیار خوب افزایش یابد، همخوانی دارد. بنابراین همبستگی بالای رده‌های طبقات پتانسیل آب زیرزمینی با تراکم نقاط پراکنش چشمه‌ها و چاه‌های موجود و بازدیدهای میدانی منطقه مورد مطالعه تأیید و بنابراین آستانه‌های تفکیک‌پذیری بین طبقات اولویت‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی مناسب ارزیابی شد. نتایج ارزیابی دقت طبقه‌بندی بر مبنای مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) با استفاده از شاخص FR و SCAI در (جدول ۲) و (شکل‌های ۵ و ۶) نشان داده شده است. همچنین در این پژوهش با استفاده از پراکنش نقاط چشمه‌های موجود (۹۰۶۹ چشمه و چاه) اعتبار نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل FAHP توسط منحنی ROC ارزیابی شد. نتایج حاصل از منحنی ROC مربوط به مدل FAHP در شکل ۷ و مساحت زیر منحنی (AUC) به همراه انحراف استاندارد و سطح اطمینان مدل در جدول ۳ ارائه شده است. همان طور که قبلاً اشاره شد رابطه کمّی- کیفی بین سطح زیر منحنی AUC و دقت پیش‌بینی منحنی ROC بین صفر تا ۱ (۱-۰/۹ دقت عالی، ۰/۹-۰/۸ خیلی‌خوب، ۰/۸-۰/۷ خوب، ۰/۷-۰/۶ متوسط و ۰/۶-۰/۵ دقت ضعیف) تعیین می‌شود (۱۳). بر این اساس نتایج نشان داد که دقت پیش‌بینی مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) خیلی‌خوب است. به‌عبارت دیگر بر اساس سطح زیر منحنی (AUC=۸۷۷/۰) نمودار ROC، دقت پیش‌بینی مدل ۸۷/۷ درصد تعیین می‌شود.

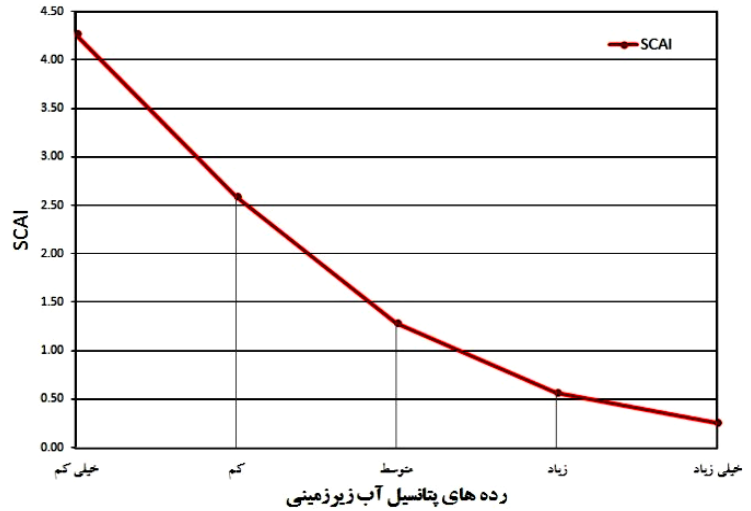
نتایج این پژوهش از نظر به‌کارگیری عوامل مؤثر و مدل تصمیم‌گیری سلسله مراتبی فازی به‌منظور اولویت‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی، تحقیقات ماگیش و همکاران (۱۲)، ماراگسان و همکاران (۱۶)، نقیبی و همکاران (۱۸)، پریجا و همکاران (۱۹)

جدول ۲. نسبت فراوانی (FR) و شاخص SCAI رده‌های پتانسیل آب زیرزمینی به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

الویت	۱	۲	۳	۴	۵
رده‌های پتانسیل آب زیرزمینی	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
تعداد چشمه‌ها و چاه‌های درون اولویت	۲۶۳۰	۲۶۰۱	۵۹۸	۲۱۴۶	۱۰۹۱
درصد چشمه‌ها و چاه‌های درون اولویت	۲۹/۰۱	۲۸/۶۹	۶/۶۰	۲۳/۶۷	۱۲/۰۳
مساحت هر رده پتانسیل (کیلومترمربع)	۳۷/۷	۵۵	۴۰	۱۰۷/۴۶	۹۸/۴
درصد مساحت رده	۱۱/۱۴	۱۶/۲۵	۱۱/۸۱	۳۱/۷۴	۲۹/۰۶
نسبت فراوانی (FR)	۶۹/۷۶	۴۷/۲۹	۱۴/۹۵	۱۹/۹۷	۱۱/۰۹
درصد Seed	۴۲/۷۸	۲۹/۰۰	۹/۱۷	۱۲/۲۵	۶/۸۰
SCAI	۰/۲۶	۰/۵۶	۱/۲۹	۲/۵۹	۴/۲۷



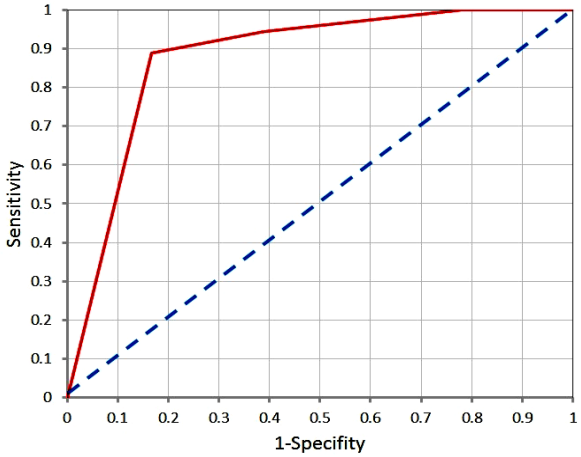
شکل۵. نسبت فراوانی (FR) رده‌های پتانسیل آب زیرزمینی به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)



شکل ۶. شاخص SCAI رده‌های پتانسیل آب زیرزمینی به روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

جدول ۳. مساحت زیر منحنی ROC به‌همراه انحراف استاندارد و سطح اطمینان آن

سطح زیر منحنی ROC	انحراف استاندارد	سطح اطمینان	سطح اطمینان ۹۵ درصد	
			حد بالا	حد پایین
۰/۸۷۷	۰/۰۶۳	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۷۵۳



شکل ۷. منحنی نرخ پیش‌بینی (ROC) روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) برای رده‌های پتانسیل آب زیرزمینی

را تأیید می‌کند. همه افراد مذکور استفاده از مدل پیشنهادی را در شناسایی مناطق مستعد آب زیرزمینی کارآمد می‌دانند. همچنین این پژوهش از نظر کارآمدی به‌کارگیری شاخص‌های FR، SCAI و AUC-ROC در اعتبارسنجی و ارزیابی مدل مورد استفاده، تحقیقات رضوی و همکاران (۲۱)، شیرانی (۲۴)، شیرانی و عرب‌عامری (۲۵)، منصوری و شیرانی (۱۴) و سوزان و دورایان (۲۷) را که در زمینه مدل‌های مبتنی بر داده‌کاوی است، تائید می‌کند.

نتیجه‌گیری

آنچه در زمینه نتایج حاصل از پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی اهمیت دارد، میزان انطباق نتایج با واقعیت‌ها است. از این‌رو، باید حداکثر شواهد ممکن برای ارزیابی نتایج را برای مقایسه با واقعیت‌های موجود و همچنین، هماهنگی با قوانین و شرایط فیزیکی حاکم بر سیستم طبیعی، مورد استفاده قرار داد. در هر پروژه مکان‌یابی آب زیرزمینی، بعد از مدل‌سازی و تهیه نقشه پتانسیل‌سنجی لازم است نتایج حاصل با اطلاعات موجود زمین‌شناسی صحرایی مانند اطلاعات مربوط به چاه‌های بهره‌برداری و اکتشافی، پیزومترها، چشمه‌ها، قنات‌ها (سال آماری ۹۵-۹۴) صحت‌سنجی شود. مساحت الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب الویت از اول یا بسیار خوب (۳۷/۷ کیلو مترمربع)، دوم یا خوب (۵۵ کیلو مترمربع)، سوم یا متوسط (۴۰ کیلو مترمربع)، چهارم یا ضعیف (۱۰۷ کیلو مترمربع) و الویت پنجم یا بسیار ضعیف (۹۸/۴ کیلو مترمربع) به‌عنوان مناطق پیشنهادی مشخص شدند. به‌منظور صحت‌سنجی عمل پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده)، از موقعیت چشمه‌ها و چاه‌های منطقه و میزان آبدهی و ویژگی‌های کمّی آنها استفاده شده است. نقشه الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی با استفاده از پراکنش نقاط چشمه‌های موجود، نسبت فراوانی (FR)، شاخص SCAI و منحنی ROC ارزیابی و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد نسبت فراوانی پیکسل‌ها (FR) و شاخص سطح سلول هسته (SCAI) مبین صحت مناسب طبقه‌بندی در پنج طبقه پتانسیل است. همچنین دقت نمودار

ویژگی عملگر گیرنده (ROC) فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) با سطح زیر منحنی (AUC) ۸۸ درصد، نماینده همبستگی بالا بین نقشه پتانسیل تهیه شده و نقشه پراکنش نقاط چشمه‌های موجود و ارزیابی خوب مدل است. به‌طور کلی پس از اجرای این پژوهش با توجه به هدف تعیین شده، با تعیین نقاط مستعد بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، بررسی نقاط بحرانی به‌منظور پیدا کردن راه حل مناسب و سریع برای رفع مشکل فرونشست دشت‌ها و ایجاد یک بانک اطلاعاتی مدون و منظم در محیط GIS به‌منظور سرعت عمل بخشیدن به پژوهش‌های آتی با بهره‌گیری از مدل FUZZY-AHP در بستر GIS، امکان بررسی‌های دقیق‌تر در مقیاس محلی را فراهم می‌آورد. درنهایت با توجه به‌دقت بالایی که نقشه الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی ایجاد شده از منطقه مطالعاتی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) دارد، این نقشه می‌تواند به‌منظور مدیریت بهینه توسط تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان منابع آب کشور و همچنین اجتناب از مناطق حساس و با پتانسیل بسیار ضعیف استفاده شود، همچنین با توجه به‌دقت بالای تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) در شناسایی مناطق پرپتانسیل منابع آب زیرزمینی پیشنهاد می‌شود در زمینه تهیه نقشه الویت‌های پتانسیل منابع آب زیرزمینی در مناطق دیگر با مقیاس کوچک نیز این روش استفاده شود، البته شکی نیست برای مناطق بزرگ‌مقیاس در نظر گرفتن عوامل هیدرودینامیکی و ویژگی‌های در افزایش دقت نقشه پتانسیل آب زیرزمینی می‌تواند نقش بسزایی داشته باشد. نتایج این پژوهش به‌عنوان اطلاعات پایه‌ای در مقیاس تفصیلی برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی می‌تواند استفاده شود.

سپاسگزاری

داده‌ها و اطلاعات تکمیلی مورد نیاز این پژوهش از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان و اداره آب منطقه‌ای اصفهان تهیه شدند. همچنین طی مراحل بررسی و پذیرش این مقاله، از نظرات و پیشنهادات بسیار ارزنده داوران محترم و ناشناس در ارتقای نتایج دقیق‌تر استفاده شد. از این‌رو نویسندگان مراتب تقدیر و تشکر را نسبت به آن مرکز، اداره و داوران محترمی که زحمت داوری را به‌عهده داشتند، ابراز می‌کنند.

منابع مورد استفاده

1. Asadi, S. S., P. Neela Rani, B.V.T. Vasantha Rao and M.V. Raju. 2012. Estimation of groundwater potential zones using Remote sensing and Gis: A model study. *International Journal of Advanced Science and Technology* (2): 265-276.
2. Basavaraj, D. B., C. G. Hiremath, J. Davithuraj and B. K. Purandara. 2016. Identification of groundwater potential zones using ArcGIS 10.1. *International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science* 2394-2827.
3. Bonissone, P. P. 1982. A Fuzzy Sets Based Linguistic Approach: Theory and Application, PP. 329-339. *In:* Gupta, M. M. and E. Sanchez (Eds.) Approximate Reasoning in Decision Analysis, North-Holland.
4. Buckley J. J. 1985. Fuzzy Hierarchical Analysis. *Fuzzy Sets and Systems* 17: 233- 247.
5. Chenini, I, A. B. Mammou and M. May. 2010. Groundwater recharge zone mapping using GIS-based multi-criteria analysis: a case study in Central Tunisia (Maknassy Basin). *Water Resources Management* 24(5): 921-39.
6. Davoodi Moghaddam, D., M. Rezaei, H. R. Pourghasemi, Z. S. Pourtaghi and B. Pradhan. 2015. Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 8(2): 913–929.
7. Deepesh, M., K. Madan, and C. Bimal. 2011. Assessment of groundwater potential in a semi-arid region of india using remote sensing, GIS and MCDM techniques. *Water Resources Management* (25): 1359-1386.
8. Dixon, B. 2009. A case study using SVM, NN and logistic regression in a GIS to predict wells contaminated with Nitrate-N. *Hydrogeology Journal* 17(6): 1520-1527.
9. Ganapuram, S., G. V. Kumar, I. M. Krishna, E. Kahya and M. C. Demirel. 2009. Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Advances in Engineering Software* 40(7): 506-18.

10. Israil, M., M. Al-hadithi and D. Singhal. 2006. Application of a resistivity survey and geographical information system (GIS) analysis for hydrogeological zoning of a piedmont area: Himalayan foothill region, India. *Hydrogeology Journal* 14: 753-9.
11. Lee, M. J., I. Park and S. Lee. 2015. Forecasting and validation of landslide susceptibility using an integration of frequency ratio and neuro-fuzzy models: a case study of Seorak mountain area in Korea. *Environmental Earth Sciences* 74(1): 413-29.
12. Magesh, N. S., N. Chandrasekar and S. John Prince. 2012. Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, Gis and Mif techniques. *Geo-Science Frontiers* 2: 189-196.
13. Mahmoudi, D., M. Rezaei, M. Dashti Barmaki and K. Rezaei. 2014. Hydrostratigraphy investigation for identifiying of groundwater potential zones using geophysical and sedimentological data (case study: Kordan plain, Karaj), *Journal of Water Resources Development* 2(5): 104-115.
14. Mansouri, M., K. Shirani, A. Ghaziphard and S. N. Emami. 2016. Landslide hazard zonation using Entropy and Weight of Evidence methods (Case study: Dow ab Samsami, Chahar Mahal & Bakhtiyari), *Geosiences* 1(26): 267-280.
15. Mukherjee, P., C. K. Singh and S. Mukherjee. 2011. Delineation of groundwater potential zones in arid region of India, a remote sensing and GIS approach. *Water Resources Management* 26: 2643–2672.
16. Murugesan, B., R. Thirunavukkarasu, V. Senapathi and G. Balasubramanian. 2012. Application of remote sensing and GIS analysis for groundwater potential zone in kodaikanal Taluka, South India. *Journal of Earth Science* 7(1): 65-75.
17. Nabavi, M. H. 1976. Introduction to Iran Geology, Iran Geology Survey, 94p.
18. Naghibi, S. A., H. R. Pourghasemi, Z. S. Pourtaghi and A. Rezaei. 2015. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Journal of Earth Science* 8(1): 171-86.
19. Preeja K. R., J. Sabu, J. Thomas and H. Vijith. 2011. Identification of Groundwater Potential Zones of a Tropical River Basin (Kerala, India) Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 39(1): 83-94.
20. Ramu, H.; B. Mahalingam and M. Vinay. 2014. Identification of ground water potential zones using GIS and Remote Sensing Techniques: A case study of Mysore taluk–Karnataka. *International Journal of Geomatics and Geosciences* (3): 976–4380.
21. Razavi Termeh, S. V., K. Shirani and M. Soltani Rabi. Groundwater potential mapping using integrating weight of evidence and logistic regression models (Case Study: Nahavand), *Journal of Water and Soil Science* (In Press).
22. Saaty, T. L. 1996. Decision Making for Leaders, RWS Publications. Pittsburgh.
23. Shahid, S., S. Nath and J. Roy. 2000. Groundwater potential modelling in a soft rock area using a GIS. *International Journal of Remote Sensing* 21(9): 1919-24.
24. Shirani, K. 2017. Modelling and Assessment of Landslide Susceptibility Zonation Using Shannon's Entropy Index and Bayesian Weight of Evidence (Case Study: Sarkhoon Basin, Karoon), *Journal of Water and Soil Science* 21(1): 51-68.
25. Shirani, K. and A. R. Arabameri. 2015. Landslide hazard zonation using lojestic regression method (case study: Dez e Oulia basin), *Journal of Water and Soil Science* 19(72): 334-321.
26. Shirani, K., A. Shafiey Dastjerdi, and J. Rahnamarad 2017. Integration of Multi-Criteria Decision Matrix and Geographical Information System to Site Selection for an Underground Dam. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* (22.09) :3669-3686.
27. Süzen, M. L. and V. Doyuran. 2004. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology* 45(5):665-679.
28. Thomas, J., S. Joseph, K. P. Thrivikramji and G. Abe. 2011 Morphometric analysis of the drainage system and its hydrological implications in the rain shadow regions, Kerala, India. *Journal of Geographical Sciences* 21(6): 1077–1088.
29. Vahidnia, M. H. A., A. Alesheikh and A. Alimohammadi. 2009. Hospital site selection using fuzzy AHP and derivatives. *Journal of Environmental Management* (90):3048-3056.
30. Yang, C. C. and B. S. Chen. 2004. Key Quality Performance Evaluation Using Fuzzy AHP, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers* 21(6): 543-550.

Journal of Water and Soil Science
Vol. 23, Winter 2020, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Prioritization and Assessment of Groundwater Resources Map in Isfahan Province

M. Moradizadeh[1] and K. Shirani[2*]

(Received: August 27-2018 ; Accepted: April 24-2019)

Abstract

Water resources management depends on the precise assessment of water storage and access in each region, as well as environmental interactions of these resources. The man objective of this study was to delineate the potential zones of groundwater storage using FAHP. Mapping and assessment of it required maps of geomorphology, drainage, density, lineament density, slope and vegetation, which were initially prepared as the input layers in FAHP; the appropriate weights were attributed to them based on FAHP. Potential zones of ground water were classified into five classes of poor, average, good, very good and excellent. The number and density of available wells and springs in the study area dealt with the potential of the region for groundwater storage. So, ROC was used to assess the validation of results, considering spring points as signs of water resources. According to the results, classes of very good, good, average, weak, and very weak were ranked as the first to the last in terms of privilege order with an area of 37.7, 55, 40, 107, and 98.4 square kilometers, respectively.

Keywords: Prioritization, Groundwater, Weighting, AHP

1. Department of Engineering Geology, Tehran University, Tehran, Iran.
2. Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran.
*: Corresponding Author: Email: K.Shirani@areeo.ac.ir