

پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز زنجانرود با استفاده از تحلیل های مکانی و پی جویی های ژئوالکتریک

مرضیه شعبانی^۱، ابوالفضل رضائی^{۲*} و زهره معصومی^۲

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران

^۲ استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹

چکیده

حوضه آبریز زنجانرود در سال های اخیر متحمل افت شدید تراز آب زیرزمینی شده است، بنابراین آگاهی از پراکندگی سفره های آب زیرزمینی منطقه ضروری است. به منظور پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی از هفت زیرمعیار شیب، لیتولوژی، بارندگی، تراکم آبراهه، تراکم خطواری و کاربری اراضی استفاده شد. برای وزن دهی به معیارها از مدل تحلیل سلسله مراتبی و برای تلفیق لایه ها در سیستم اطلاعات مکانی از مدل تاپسیس بهره گرفته شد. در نهایت، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در چهار رده اهمیت (غنی، مناسب، ضعیف و بسیار ضعیف) به دست آمد. نتایج حاصل از مدل، با استفاده از موقعیت چاه های بهره برداری منطقه و روش های ژئوالکتریک صحت سنجی شدند. محل چاه های با دبی بالاتر بیشتر درون پهنه اولویت اول (پتانسیل غنی) و برخی نیز درون پهنه اولویت دوم (پتانسیل مناسب) قرار دارند که این می تواند تأیید بر صحت مدل باشد. همچنین مدل دو بعدی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی تطابق قابل قبولی با مدل حاصل از روش تاپسیس دارد. پهنه های با پتانسیل ضعیف، مناسب، بسیار ضعیف و غنی به ترتیب ۳۵، ۳۲، ۲۹ و ۴ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده اند. پهنه های غنی و مناسب اکثراً در دشت گسترش دارند و سفره مناسب و وسیع در ارتفاعات زنجانرود وجود ندارد.

کلیدواژه ها: زنجانرود، پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی، تحلیل سلسله مراتبی، تاپسیس، ژئوالکتریک.

* نویسنده مسئول: ابوالفضل رضائی

E-mail: arezaei@iasbs.ac.ir

۱- پیش نوشتار

در مناطق خشک مانند اکثر نقاط ایران، از یک سو خشک شدن رودخانه ها و کاهش منابع آب سطحی و از سوی دیگر افزایش جمعیت، میل به مصرف گرایی و افزایش سطح زیر کشت زمین های آبی سبب برداشت بی رویه از منابع آب های زیرزمینی و کاهش شدید حجم ذخیره آبخوان ها شده است (Madani, 2014). در حوضه آبریز زنجانرود نیز از سال ۱۳۶۰ (۱۸۴ میلیون متر مکعب در سال) تا سال ۱۳۸۷ (۹۳۷ میلیون متر مکعب در سال) برداشت آب های زیرزمینی ۵ برابر افزایش یافته است که سبب افت شدید تراز آب زیرزمینی شده است. در صورت ادامه این روند، در آینده نزدیک ممکن است تأمین آب شرب کافی برای شهر زنجان با مشکل مواجه شود (عبیدی نژاد، ۱۳۹۰). برای استفاده مناسب و مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی، پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی منطقه می تواند مثر و ثمر واقع شود. مهم ترین معیارها برای پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی دارای بعد مکانی هستند. یکی از مهم ترین ابزارهای در دسترس به منظور تهیه این نوع داده های مکانی داده های سنجش از دور (RS; Remote sensing) است. به منظور پردازش این نوع داده ها از سیستم اطلاعات مکانی (GIS; Geospatial Information System) استفاده می شود که بهره گیری از این روش ها موجب صرفه جویی در زمان و هزینه می شود.

کارهای متنوعی در ارتباط با پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از داده های RS و پردازش های GIS انجام شده است. لایه های اطلاعاتی به کار رفته در اکثر تحقیقات پیشین شامل لیتولوژی، شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، تراکم خطواری، تراکم آبراهه و بارندگی است (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸؛ یوسفی سنگانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ رحمتی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Sener et al., 2018؛ Arulbalaji et al., 2019). از مرسوم ترین روش ها برای وزن دهی به لایه های اطلاعاتی روش های تحلیل سلسله مراتبی و فاکتور چند تأثیر (MIF; Multi Influencing factor) است (بهاروند و همکاران، ۱۳۹۷؛ Magesh et al., 2012؛ Mahmoud and Alazba, 2016, Aggarwal et al., 2019). معمولاً برای تلفیق لایه ها از روش های تاپسیس و همپوشانی وزن دار بهره گرفته می شود تا در نهایت نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی یک منطقه به دست آید (Afshar et al., 2011؛ Magesh et al., 2012; Ameri et al., 2018).

تحقیق حاضر سعی در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز زنجانرود

با استفاده از داده های زمین شناسی، هیدروژئولوژیکی و سنجش از دور دارد. در این تحقیق هفت زیرمعیار مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی شامل شیب، لیتولوژی، مقدار بارندگی، تراکم آبراهه، تراکم چشمه، تراکم خطواری و کاربری اراضی مد نظر قرار گرفته است. در این تحقیق از مدل تحلیل سلسله مراتبی برای وزن دهی به معیارها استفاده شده است. به علاوه، از مدل تاپسیس در سیستم اطلاعات مکانی برای تلفیق لایه ها بهره گرفته شده است. در این تحقیق برای اطمینان از نتایج به دست آمده، نتایج حاصل از مدل تاپسیس با استفاده از موقعیت چاه های با دبی بالا و پی جویی های ژئوالکتریک شامل مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی صحت سنجی شد.

۲- روش تحقیق

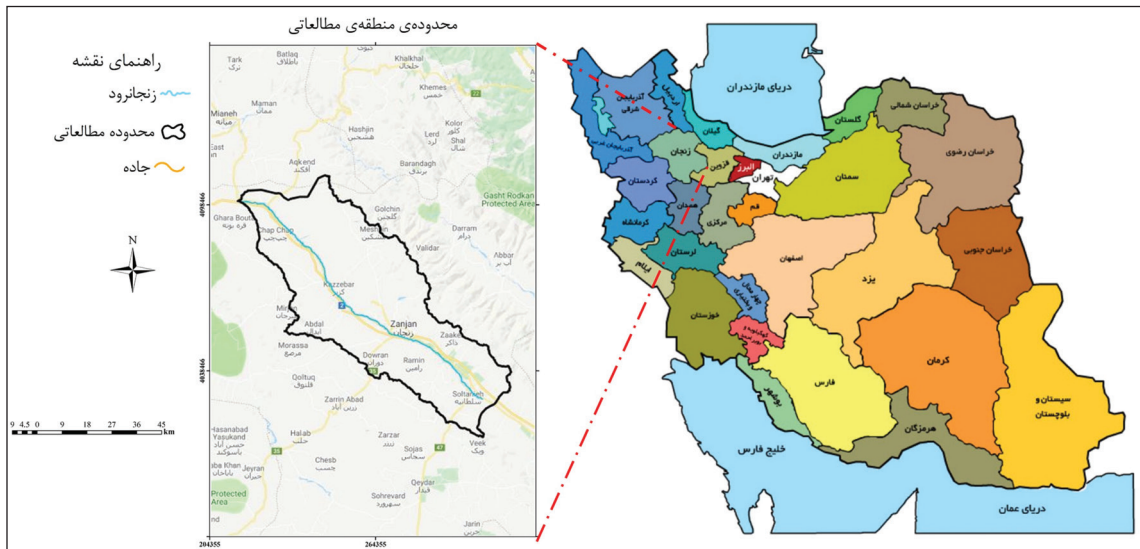
در این قسمت به معرفی منطقه مطالعاتی، معیارهای مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی، وزن دهی معیارها و تلفیق لایه ها پرداخته خواهد شد.

۲-۱. منطقه مطالعاتی

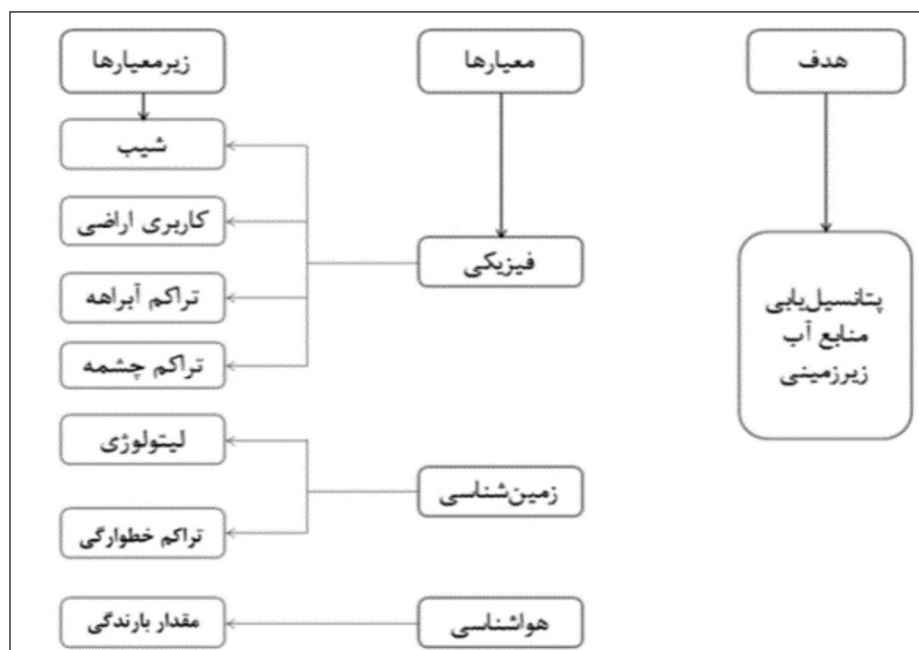
حوضه آبریز زنجانرود با مساحت ۴۸۵۷ کیلومتر مربع، در شمال غرب ایران واقع شده است (شکل ۱). زنجانرود با طول ۱۲۰ کیلومتر از رودخانه های دائمی به شمار می رود که آب این حوضه را زهکش می کند. حوضه آبریز زنجانرود به صورت یک حوضه فرورفته بین کوهستان های طارم و سلطانیه قرار گرفته است که در آن نهشته های آواری-کربناته الیگومیوسن و نهشته های آواری پلیو-پلئستوسن و آبرفت های کوآترن بر جای نهاده شده اند. ارتفاعات حوضه بیشتر شامل رخنمون هایی از نهشته های آتشفشانی و آتشفشانی-آواری همراه با توده های نفوذی گرانیتی و گرانودیوریتی است.

۲-۲. معیارهای مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی

پتانسیل یابی از طریق بررسی و تلفیق معیارهایی که در تغذیه آب به زیر زمین، ذخیره آن و ایجاد سفره های آب زیرزمینی مؤثر هستند، امکان پذیر است (Mahmoud and Alazba, 2016). بنابراین با توجه به هدف تحقیق و با استفاده از منابع موجود، ابتدا معیارهای مؤثر بر پتانسیل منابع آب زیرزمینی مشخص شده و داده های مکانی و توصیفی مربوط به آنها از منابع مختلف جمع آوری شدند. معیارها و زیرمعیارهای مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز زنجانرود.



شکل ۲- معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی.

آبخوان غنی کمتر است زیرا آب باران زودتر در یکی از مسیل های آبراهه قرار گرفته و از منطقه خارج می شود. برای تهیه این لایه از شبکه آبراهه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شده است.

قاعدتا هرچه بارندگی بیشتر باشد، احتمال تشکیل آبخوان بیشتر است. در این مطالعه، به منظور تهیه نقشه پراکندگی بارندگی منطقه، مقادیر بارندگی بلند مدت (۱۳ ساله) اندازه گیری شده در ۱۷ ایستگاه باران سنجی منطقه به روش کریجینگ درون یابی شد.

لیتولوژی رخنمون های سنگی نقش مهمی بر نفوذ آب به داخل زمین دارد و در کنترل تغذیه آب زیرزمینی بسیار مهم است (Mukherjee et al., 2012). مهم ترین سازندهای سخت رخنمون یافته در ارتفاعات حوضه آبریز زنجانرود شامل کهر (شیل و ماسه سنگ اسلیتی)، بایندور (ماسه سنگ)، سلطانیه (دولومیت)، باروت (دولومیت

در این تحقیق هفت زیرمعیار مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی شامل شیب، لیتولوژی، مقدار بارندگی، تراکم آبراهه، تراکم چشمه، تراکم خطواری و کاربری اراضی مد نظر قرار گرفته است. در ادامه دلایل اهمیت این معیارها و منابع تهیه داده های مربوطه ارائه خواهد شد.

تغییرات شیب بر میزان نفوذ آب باران به داخل زمین تأثیر گذار است به گونه ای که با افزایش شیب نرخ نفوذ کاهش می یابد (Ganapuram et al., 2009). لایه شیب، با تهیه نقشه DEM حاصل از منحنی های میزان ۲۵ متری مستخرج از نقشه های ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه برداری کشور ترسیم شده است.

تراکم آبراهه، می تواند به گونه ای بیانگر مقدار نفوذ پذیری حوضه باشد و به آب و هوا، لیتولوژی، پستی و بلندی، ظرفیت نفوذ، پوشش گیاهی و شدت رواناب بستگی دارد (Bali et al., 2012). به طور کلی در مناطق با تراکم آبراهه بالا، احتمال تشکیل

رودخانه زنجانرود نقش مهمی در تشکیل آبخوان در منطقه دارند. با در نظر گرفتن جنس و استفاده از جدول استاندارد مقادیر نفوذپذیری (Freeze and Cherry, 1979)، به آبرفت‌های دانه درشت و آهک‌های انحلالی دارای درزه و شکاف بیشترین و به شیل و مارن کمترین ضریب ضریب نفوذ اختصاص داده شد. رتبه‌های داده شده به جنس‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

چرت‌دار، زاگون (شیل)، لالون (ماسه‌سنگ)، میلا (سنگ آهک مارنی)، درود (کوارتزیت شیل)، روته (سنگ آهک)، شمشک (شیل)، لار (سنگ آهک)، تیزکوه (سنگ آهک)، فجن (کنگلومر)، زیارت (سنگ آهک)، کرج (توف و ماسه‌سنگ) و قم (سنگ آهک) است. رسوبات و آبرفت‌های عهد حاضر بیشتر گستره دشت زنجان را تشکیل داده است که به خاطر شیب کم و ضخامت نسبتاً زیاد، به ویژه در اطراف

جدول ۱- دسته‌بندی لیتولوژی و رتبه‌های اختصاص داده شده به هر دسته.

دسته	آبرفت‌های مسیر رودخانه	سنگ آهک	رسوبات آواری عهد حاضر	دولومیت	سنگ آهک مارنی	رسوبات همراه با زپس	ماسه‌سنگ، کنگلومرا	سنگ‌های آتشفشانی و آذرین	سنگ‌های دگرگونی، شیل، مارن و رس
رتبه	۱	۲	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۵	۶	۷
سازند	Qal	روته، لار، تیزکوه، زیارت، و قم	Qf و Qt	سلطانیه، باروت	میلا	Ng3 و Ng2	بایندور، لالون، و فجن	کرج	کهر، زاگون، درود، و شمشک

تشکیل دهد، بنابراین در نزدیک‌ترین دره‌ها و مسیل‌ها به صورت چشمه ریز ظاهر می‌شود. از آنجا که در منطقه مورد مطالعه غیر از یک چشمه با دبی حدود ۱۵ لیتر بر ثانیه بقیه چشمه‌ها همگی ریز بوده با دبی کمتر از ۶ لیتر بر ثانیه، بنابراین از تراکم چشمه‌های ریز نیز به عنوان یک لایه تأثیرگذار استفاده شده است، به گونه‌ای که در مکان‌های با تراکم چشمه‌های ریز بیشتر، پتانسیل تشکیل آبخوان غنی کمتر است. برعکس شرایط حاکم بر منطقه مورد مطالعه، در مناطق کارستی که نفوذ به آبخوان از طریق مجاری کارستی زیاد است، وجود چشمه‌های بزرگ، می‌تواند بیانگر وجود آبخوان مناسب باشد.

۲-۳. وزن‌دهی معیارها

در این تحقیق، از فرایند تحلیل سلسله مراتبی به منظور وزن‌دهی لایه‌های اطلاعاتی استفاده شده است. فرایند تحلیل سلسله مراتبی از جامع‌ترین سامانه‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است (قدسی‌پور، ۱۳۸۱). اولین گام در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی از موضوع مورد بررسی است که در آن اهداف، معیارها، زیرمعیارها و ارتباط بین آنها نشان داده می‌شود (صادق‌پور و رئیسی، ۱۳۸۳). پس از آن، ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شده که کارشناسان از قضاوت‌های شفاهی برای مقایسه عناصر ماتریس استفاده می‌کنند که این قضاوت‌ها به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تقسیم بندی شده‌اند (Saaty, 1980). در این تحقیق، پرسشنامه‌های مربوط به مقایسه زوجی زیرمعیارها توسط کارشناسان آب منطقه‌ای زنجان و اساتید دانشگاه (آب‌شناس، زمین‌شناس و متخصص GIS) تکمیل شده است. سپس با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی وزن نسبی عناصر به دست آمده است. در پایان وزن نهایی هر زیرمعیار در فرایند تحلیل سلسله مراتبی از مجموع حاصل ضرب اهمیت معیارها در وزن نسبی زیرمعیارها به دست آمده است.

۲-۴. تلفیق لایه‌ها

در این تحقیق به منظور تلفیق لایه‌های اطلاعاتی وزن‌دهی شده، از مدل تاپسیس استفاده شده است. مدل تاپسیس یکی از پرکاربردترین مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، برای تلفیق لایه‌های اطلاعاتی وزن‌دهی شده است (Shih et al., 2007). در این روش تحلیل چند معیاره گسسته m زیرمعیار به وسیله n معیار مورد ارزیابی قرار گرفته و زیرمعیارها بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل رتبه‌بندی می‌شوند. اساس این تکنیک بر این مفهوم استوار است که گزینه انتخابی باید کمترین فاصله را با

خطوارگی‌ها عوارض خطی شامل گسل‌ها، درزه و شکاف‌ها و یا مرز بین سازندها روی سطح زمین هستند. در این تحقیق داده‌های مربوط به خطوارگی از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شوند. خطوارگی‌ها از نظر هیدروژئولوژی بسیار مهم هستند زیرا به عنوان مسیل‌های نفوذ و حرکت آب زیرزمینی، به ویژه در سازندهای سخت به شمار می‌روند. تراکم خطوارگی در یک منطقه، می‌تواند به طور غیرمستقیم پتانسیل منابع آب زیرزمینی را آشکار کند زیرا وجود خطوارگی‌ها دلالت بر منطقه نفوذپذیر دارد (Magesh et al., 2012). بنابراین در مناطق با تراکم خطوارگی بالا میزان نفوذ آب به داخل زمین بیشتر است. برای استخراج خطوارگی‌های منطقه مطالعاتی، از باند هشت تصاویر ماهواره‌ای Landsat8، به عنوان یک باند پنکروماتیک، با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر استفاده شده است. به منظور استخراج خطوارگی، از فیلترهای جهتی برای بارزسازی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. در فیلترهای جهتی با توجه به وزن المان‌ها، مقادیر پیکسل‌ها در تصاویر به نحوی تغییر پیدا می‌کنند که عوارضی که در جهت‌های فیلتر شده قرار می‌گیرند، بارزتر می‌شوند (حمزه و شفیع بافتی، ۱۳۹۲). بنابراین در ابتدا تصویر در زوایای ۰، ۴۵، ۹۰ و ۳۱۵ درجه فیلتر شد. سپس با روش استخراج اتوماتیک، خطوارگی‌ها استخراج شدند. پس از استخراج اتوماتیک خطوارگی‌ها، نتایج به صورت بصری تصحیح شده و با مشخصات منطقه تطبیق داده شد و در نهایت تراکم خطوارگی‌ها به دست آمد.

نوع استفاده از زمین، در میزان نفوذ آب به داخل زمین مؤثر است. به طور مثال در زمین‌های کشاورزی به خاطر عملیات شخم، میزان نفوذ آب بیشتر است اما در مناطق مسکونی با پوشش آسفالت نفوذ آب خیلی کمتر است. در این تحقیق، منطقه مطالعاتی به ۸ دسته کاربری تقسیم شده است. کاربری‌ها به ترتیب میزان نفوذ شامل زراعت آبی بدون محدودیت، اراضی زراعی آبی مخلوط زراعت و باغ، اراضی زراعی دیم، مخلوط کاربری مرتع و دیم، مراتع ضعیف، مراتع متوسط، تاکستان‌ها، مجتمع‌های درختی و اراضی شهری هستند (بخشی تیرگانی و همکاران، ۱۳۹۰؛ Pingping et al., 2013).

در برخی مواقع مانند شرایطی که چشمه‌های ریز (دبی کمتر از ۶ لیتر بر ثانیه) به صورت گسترده در نقاط مختلف یک حوضه رخنمون دارند، می‌توان به این نتیجه رسید که پتانسیل نفوذ به آب زیرزمینی کم است. در واقع به خاطر پتانسیل نفوذ کم، آب باران نفوذی نمی‌تواند به اعماق زیاد نفوذ کرده و یک سفره غنی و یکپارچه

گزینه‌ی ایده آل مثبت، d_i^+ فاصله از ایده آل مثبت و d_i^- فاصله از ایده آل منفی هستند. برای هر زیرمعیار ایده آل مثبت بهترین مکان و ایده آل منفی بدترین مکان، از نظر آن زیرمعیار می‌باشد؛

۶) تعیین فاصله نسبی با رابطه (۴). در این رابطه، C مقدار نزدیکی پیکسل i ام به جواب ایده آل را نشان می‌دهد. مقدار C بین صفر و یک در نوسان است. در نهایت اولویت بندی زیرمعیارها بر اساس میزان C انجام می‌شود. $C=1$ نشان دهنده بالاترین رتبه و $C=0$ نشان دهنده کمترین رتبه است. در این رابطه d_i^+ فاصله از ایده آل مثبت، d_i^- فاصله از ایده آل منفی و C میزان نزدیکی نسبی است.

$$C = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad \text{رابطه (۴)}$$

۳- بحث

با انجام فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، وزن‌های به دست آمده به ترتیب شامل تراکم چشمه (۰/۴۲۱)، لیتولوژی (۰/۲۴۷)، شیب (۰/۱۱۲)، تراکم آبراهه (۰/۰۷۰)، مقدار بارندگی (۰/۰۵۶)، کاربری اراضی (۰/۰۴۹) و تراکم خطاگرگی (۰/۰۴۴) است. مجموع اوزان زیرمعیارها برابر با یک و ضریب ناسازگاری آنها ۰/۰۹ است. وزن‌های به دست آمده از روش AHP در لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر یک از زیرمعیارها تأثیر داده شده است. در مرحله بعد، با استفاده از روش تاپسیس، لایه‌ها پس از ضرب وزن‌های مربوطه با هم تلفیق شده و نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی منطقه به دست آمد. شکل ۳ نقشه لایه‌های مختلف پس از ضرب وزن هر لایه را نشان می‌دهد. شکل ۴ نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی حاصل از تاپسیس را نشان می‌دهد.

راه حل ایده آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و بیشترین فاصله را با راه حل ایده آل منفی (بدترین حالت ممکن) داشته باشد (Lin, 2010). برای اجرای این مدل و روی هم گذاری لایه‌های اطلاعاتی در ابتدا لازم است تمام لایه‌ها به فرمت raster تبدیل شوند و محدوده مورد مطالعه به مدل معرفی شد و ۶ مرحله زیر به ترتیب انجام می‌شود:

(۱) تشکیل ماتریس تصمیم شامل m زیرمعیار و n معیار مسئله؛

(۲) نرمال سازی و بی مقیاس سازی ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه (۱)

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad i=1,2,\dots,n \quad j=1,2,\dots,m \quad \text{رابطه (۱)}$$

که r_{ij} مقدار بدون مقیاس ارزش پیکسل‌ها برای هر معیار و x_{ij} مقدار عددی به دست آمده از پیکسل i ام بر اساس معیار j ام است؛

(۳) وزن دهی به ماتریس نرمال شده با استفاده از وزن‌های به دست آمده از طریق محاسبات AHP؛

(۴) تعیین راه حل ایده آل مثبت و راه حل ایده آل منفی با استفاده از رابطه (۲)

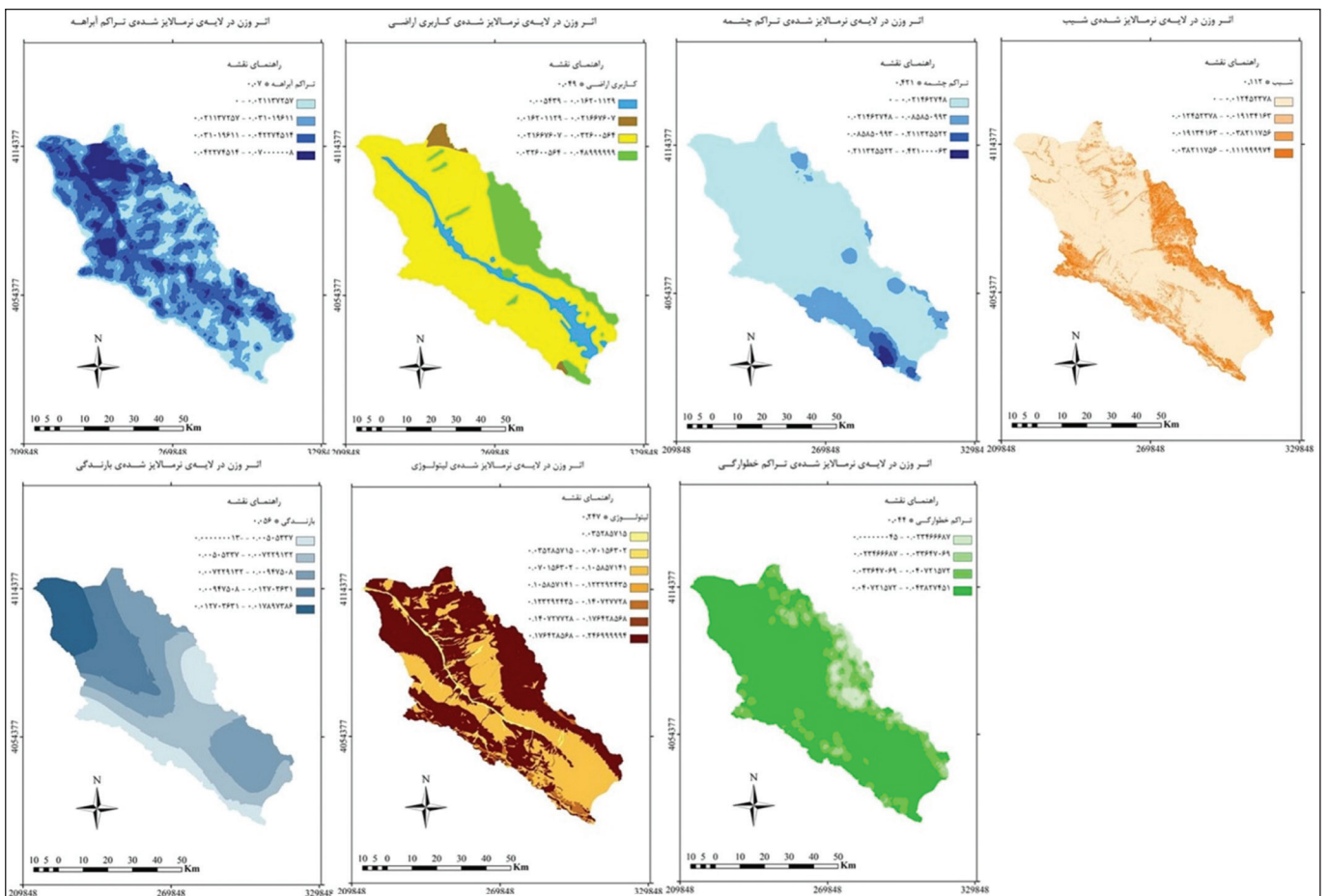
$$A^+ = \{(\max_j v_{ij}, \min_j v_{ij}) \mid i=1,2,\dots,m\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$A^- = \{(\min_j v_{ij}, \max_j v_{ij}) \mid i=1,2,\dots,m\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

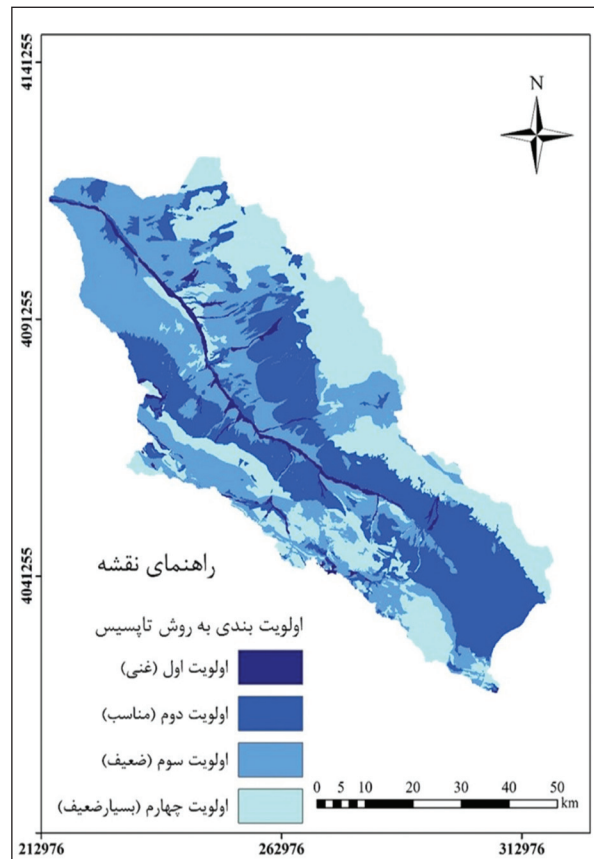
(۵) تعیین فاصله هر پیکسل از ایده آل مثبت و منفی با استفاده از رابطه (۳)

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad i=1,2,\dots,m \quad d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad i=1,2,\dots,m \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این رابطه v_{ij} درایه‌های ماتریس موزون، v_j^+ گزینه‌ی ایده آل مثبت و v_j^-



شکل ۳- اثر وزن در لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هفت زیرمعیار مؤثر.



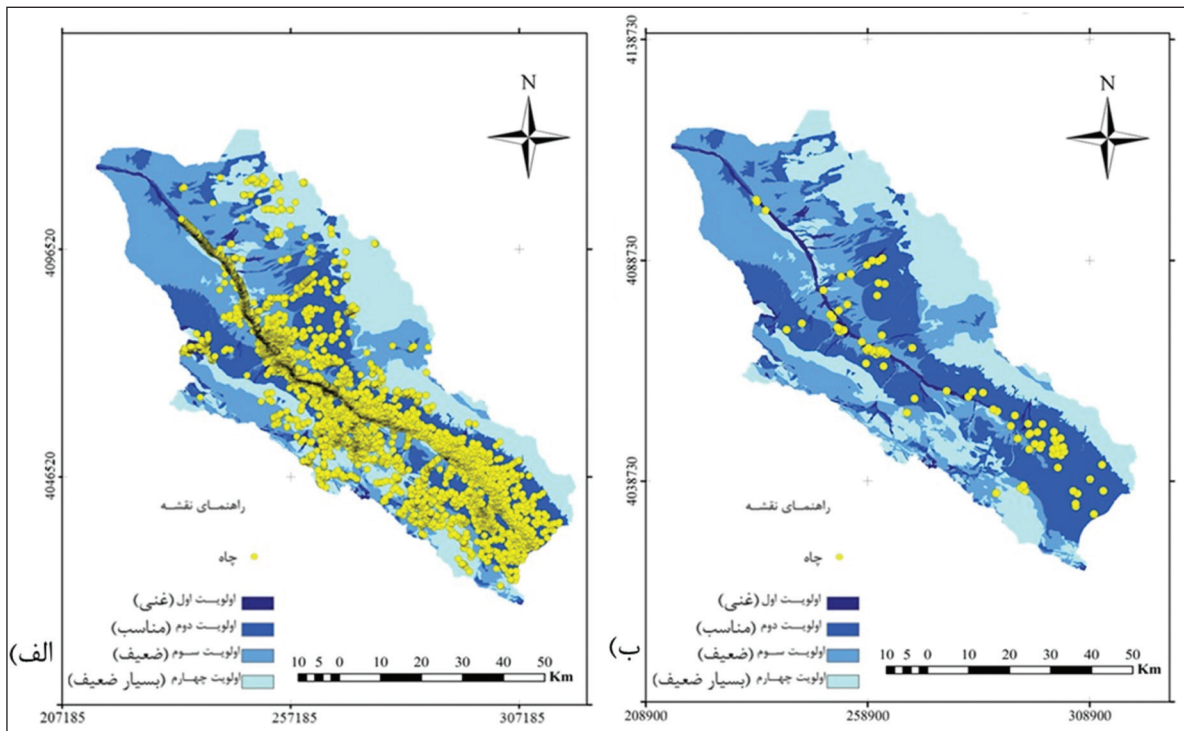
شکل ۴- اولویت بندی منطقه مطالعاتی از نظر پتانسیل منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش تاپسیس.

پی جویی های ژئوالکتریکی (مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی) استفاده شده است. از آنجا که وجود چاه های بهره برداری بیشتر و با دبی بالاتر نمایانگر وجود آبخوان مناسب است، بنابراین در این تحقیق سعی شده است که در محدوده دشت زنجان از پراکندگی کل چاه ها و حتی چاه های پر آب (دبی بالاتر از ۴۰ لیتر بر ثانیه) برای صحت سنجی مدل استفاده شود. در حوضه آبریز زنجان رود حدود ۶۰۲۸ چاه با عمق حداکثر ۱۸۰ متر وجود دارد. با توجه به شکل ۵- الف، تعداد چاه های واقع در محل اولویت های اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب برابر با ۳۲۶۰، ۱۸۷۴، ۵۳۱ و ۳۶۳ حلقه است. ۵۴/۰۸٪ از این چاه ها در پهنه اولویت اول (نزدیکی رودخانه) و ۳۱/۰۹٪ در پهنه اولویت دوم (مناطق دشتی با رسوبات آبرفتی) قرار دارد. همچنین، با توجه به شکل ۵- ب همگی چاه های با دبی بالاتر از ۴۰ لیتر بر ثانیه که نشان از وجود آبخوان مناسب تر دارند، در این دو پهنه پتانسیل غنی و مناسب، حفر شده اند. قابل توجه این است که در دشت زنجان و در محدوده اولویت های سوم و چهارم که نشان از عدم وجود آبخوان مناسب دارد، هیچ چاهی با دبی بالاتر از ۴۰ لیتر بر ثانیه وجود ندارد.

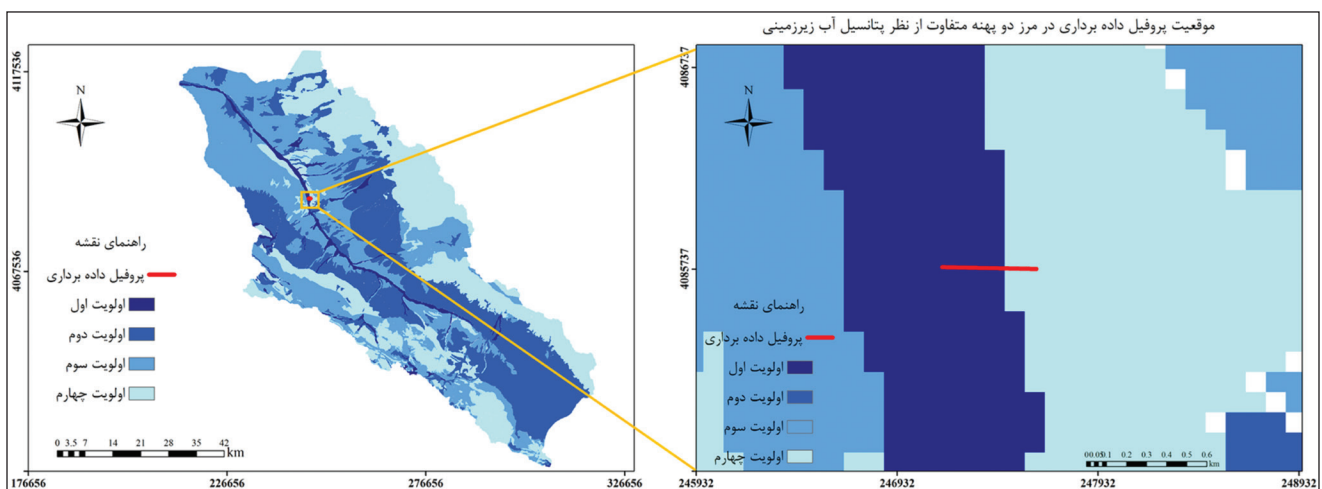
علاوه بر پراکندگی چاه های بهره برداری، در این تحقیق سعی شد از روش های ژئوالکتریکی که در آن با انتقال میدان های الکتریکی، با چشمه مصنوعی به درون زمین و اندازه گیری اختلاف پتانسیل، به بررسی وضعیت آب های زیرزمینی، اکتشاف مواد معدنی و غیره در عمق کم می پردازند، نیز به منظور صحت سنجی نتایج حاصل از تاپسیس استفاده شود (وزارت صنعت، معدن و تجارت، ۱۳۹۳). بنابراین، یک پروفیل ژئوالکتریکی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در منطقه عمود بر محل مرز پهنه های اولویت اول (پتانسیل غنی آبخوان) و اولویت چهارم (پتانسیل بسیارضعیف آبخوان) حاصل از مدل تاپسیس اجرا شد (شکل ۶). داده برداری های مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی با آرایه های ژئوالکتریکی دایبل - دایبل و پل - دایبل با پروفیلی به طول ۴۶۰ متر و با فاصله الکترودی ۱۰ متری انجام شد.

طبق این نقشه، منطقه مطالعاتی از نظر پتانسیل منابع آب زیرزمینی در چهار رده ی اهمیت، شامل اولویت اول (پتانسیل غنی آبخوان)، اولویت دوم (پتانسیل مناسب آبخوان)، اولویت سوم (پتانسیل ضعیف آبخوان) و اولویت چهارم (پتانسیل بسیار ضعیف آبخوان) اولویت بندی شده است. مساحت اولویت های اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۲۱۵ کیلومتر مربع (۴/۴۳٪)، ۱۵۴۹ کیلومتر مربع (۳۱/۹۱٪)، ۱۶۷۸ کیلومتر مربع (۳۴/۵۷٪) و ۱۴۱۲ کیلومتر مربع (۲۹/۰۹٪) است. اولویت اول با کمترین مساحت، بیشتر در اطراف رودخانه زنجان رود قرار دارد که این به خاطر تغذیه همیشگی رودخانه به آب زیرزمینی و وجود بافت مناسب خاک (دانه درشت) در اطراف رودخانه است. اولویت دوم، به دلیل قرارگیری در مسیر تغذیه آب زیرزمینی ارتفاعات با دشت، دارای گستره زیادی به ویژه در بالادست حوضه و در آبرفت های دامنه ای نزدیک به محل تلاقی ارتفاعات با دشت است. از آنجا که محدوده گستره اولویت دوم از یک سو در حاشیه ارتفاعات قرار دارد و از سوی دیگر دارای جنس نفوذپذیر (رسوبات آواری عهد حاضر) و عمق آب زیرزمینی بیشتر از سایر نواحی است، بنابراین این گستره، به ویژه در حاشیه ارتفاعات، می تواند برای تغذیه مصنوعی مناسب باشد. شایان ذکر است که آب جویبارهای سرچشمه گرفته از ارتفاعات اطراف با کیفیت بالا نیز می تواند به عنوان منبع آب برای تغذیه به کار رود. گسترش زیاد اولویت سوم در بخش خروجی حوضه، بیشتر به خاطر وجود لایه های زمین شناسی دانه ریز (مارن و سیلت) در منطقه است. براساس مشاهدات و اطلاعات موجود، ارتفاعات حوضه آبریز زنجان رود به دلایلی از قبیل (۱) مسدود شدن درزه و شکاف ها در اثر وجود پوشش خاک نسبتاً ضخیم، (۲) شیب زیاد در ارتفاعات، (۳) عدم وجود سازندهای کارستی با گسترش قابل توجه، (۴) عدم گسترش عمقی زیاد رسوبات درزه در ارتفاعات، برای تشکیل آبخوان مناسب نیست.

به منظور صحت سنجی مدل حاصل از تاپسیس، از چاه های بهره برداری و



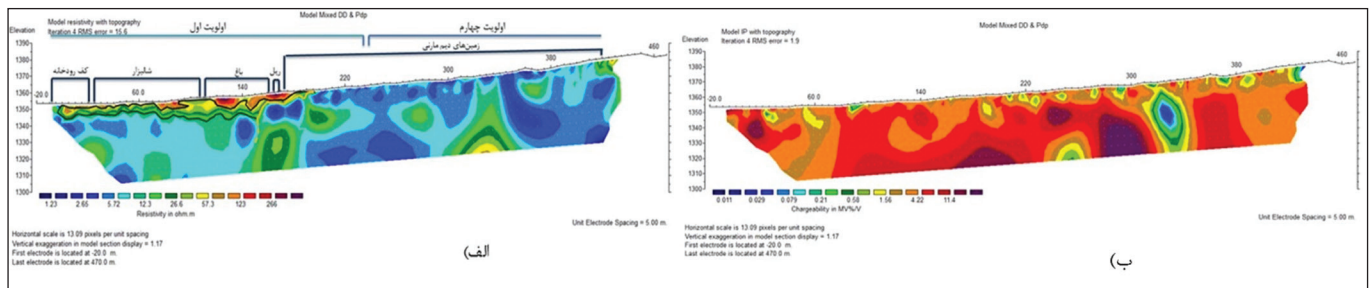
شکل ۵- الف) موقعیت چاه‌ها در حوضه آبریز زجانرود بر روی نقشه پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی حاصل از مدل تاپسیس، ب) موقعیت چاه‌های با دبی بالاتر از ۴۰ لیتر بر ثانیه.



شکل ۶- محل قرارگیری پروفیل در مرز دو اولویت اول و چهارم در نقشه پتانسیل آب زیرزمینی که به روش تاپسیس به دست آمده است.

است که در پهنه اولویت چهارم، مقادیر مقاومت ویژه بسیار کم (حدود ۱/۵ تا ۶ اهم‌متر) دیده می‌شود که به احتمال زیاد به دلیل وجود رس یا مارن است. زیرا، ۱) هیچ چاه آبی در پهنه اولویت چهارم در منطقه حفر نشده است، ۲) در بازدید میدانی مشخص شد که خاک‌های سطحی اطراف بسیار دانه‌ریز از جنس خاک رس و مارن هستند که به احتمال زیاد همین لایه‌ها در اعماق، زیر آبرفت‌های رودخانه‌ای حاصل از رودخانه زجانرود در منطقه گسترش دارند و سبب ایجاد مقاومت ویژه کم شده‌اند و ۳) مدل‌های دوبردی پلاریزاسیون القایی نشان می‌دهند که این مناطق با مقاومت ویژه بسیار پایین، دارای شارژپذیری بالا (در حد رس) هستند. با توجه به مطالب بالا می‌توان گفت که مدل حاصل از تاپسیس برای پتانسیل یابی منطقه درست جواب داده است.

مدل‌سازی معکوس دوبردی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در نرم‌افزار RES2DINV انجام شده است. برای داشتن قدرت تفکیک جانبی و عمقی مناسب از ترکیب دو آرایه‌ی داپیل- داپیل و پل- داپیل استفاده شده است. مدل دو بعدی ترکیبی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در شکل ۷ نشان داده شده است. مدل دو بعدی مقاومت ویژه منطقه آبخوان (۱۰ تا ۳۰ اهم‌متر) را با خط سیاه نشان می‌دهد که درون پهنه اولویت اول قرار دارد و این می‌تواند نشان از صحت مدل پتانسیل یابی باشد. در زیر آبخوان، مقاومت ویژه بسیار پایینی دیده می‌شود که این به احتمال زیاد به خاطر وجود رس است. در واقع، آبخوان در این لایه گسترش نیافته است زیرا، در مدل IP با افزایش عمق، مقدار شارژپذیری افزایش یافته است و مقادیر زیاد شارژپذیری مربوط به رس است. شایان ذکر



شکل ۷- مدل‌های دوبعدی با استفاده از ترکیب آرایه‌های داپیل - داپیل - پل - داپیل (الف) مدل مقاومت ویژه و (ب) مدل پلاریزاسیون القایی.

۴- نتیجه گیری

استفاده از آرایه‌های دوقطبی - دوقطبی و قطبی - دوقطبی، مدل‌سازی معکوس دوبعدی مقاومت ویژه و پلاریزاسیون القایی در محل پروفیل عمود بر مرز اولویت اول و چهارم، نشان می‌دهد که آبخوان مناسب با محل اولویت اول تطابق دارد در حالی که در محل اولویت چهارم بیشتر لایه‌های رسی گسترده شده و آبخوانی وجود ندارد. به طور کلی، نتایج حاصل حاکی از این است که سفره‌های مناسب درون دشت قرار دارد و در ارتفاعات اطراف سفره غنی گسترده وجود ندارد. سفره آبرفتی کنونی واقع در دشت زنجان و اطراف زنجانرود، که در حال حاضر با افت شدید تراز آب روبرو است، مهم‌ترین سفره حوضه آبریز زنجانرود به شمار می‌رود. بنابراین برای اینکه بتوان از رخداد بحران شدید آب در آینده در منطقه جلوگیری کرد، برنامه‌ریزی جهت مدیریت بهینه مصرف آب زیرزمینی در حوضه ضروری است.

این تحقیق، سعی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز زنجانرود با استفاده از داده‌های RS و تحلیل‌های مکانی در GIS دارد که در آن با استفاده از هفت زیرمعیار مؤثر در تشکیل آبخوان شامل شیب، لیتولوژی، مقدار بارندگی، تراکم آبراهه، تراکم چشمه، تراکم خطوارگی و کاربری اراضی و با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله مراتبی و مدل تاپسیس، مکان‌های احتمالی وجود آبخوان بررسی شده است. پس از مدل‌سازی، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در چهار رده اهمیت شامل اولویت اول (پتانسیل غنی)، اولویت دوم (پتانسیل مناسب)، اولویت سوم (پتانسیل ضعیف) و اولویت چهارم (پتانسیل بسیار ضعیف) برای منطقه به دست آمد. نتایج حاصل از صحت‌سنجی با محل‌های بهره‌برداری نشان می‌دهند که محل‌های با دبی بالا مطابق با اولویت اول (پتانسیل غنی) یا دوم (پتانسیل مناسب) در منطقه است. همچنین نتایج حاصل از پی‌جویی‌های ژئوالکتریکی با

کتابنگاری

- بخشی تیرگانی، م. مرادی، ح. و صادقی، ح.، ۱۳۹۰- مقایسه تولید رواناب و رسوب در دو کاربری مرتع و دیم. فصلنامه علمی- پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران. جلد ۱۸، شماره ۲، صص ۲۷۹ تا ۲۶۹.
- بهاروند، س.، سارویی، ح. و سوری، س.، ۱۳۹۷- استعدادیابی منابع آب کارستی با استفاده از روش سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: تاق‌دیس سفیدکوه، استان لرستان). فصلنامه علمی- پژوهشی مهندسی منابع آب، ۱۱(۳۹)، صص. ۳۵ تا ۴۴.
- حمزه، ف. و شفیعی بافتی، ش.، ۱۳۹۲- آنالیز خطوارگی در رخنمون‌های آهکی و اهمیت آن در بهینه‌سازی استخراج (مورد مطالعه: معادن سنگ ساختمانی کرمان). زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست. بهار ۹۴، سال بیست و چهارم، شماره ۹۵، صص. ۱۸۵ تا ۱۹۶.
- رحمتی، ا.، نظری سامانی، ع. و مهدوی، م.، ۱۳۹۶- ارزیابی کارایی روش تحلیل سلسله مراتبی در پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قروه- دهگلان). مرتع و آبخیزداری، ۷۰(۴)، صص. ۸۶۹ تا ۸۷۹.
- صادقپور، ا. و رئیسی، ا.، ۱۳۸۳- استفاده از روش ارزیابی چند معیاره (AHP) در انتخاب ساختگاه بهینه سد مطالعه موردی امکان‌سنجی تعیین ساختگاه سد قره چای، اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت پروژه.
- عبدی‌نژاد، پ.، ۱۳۹۰- بررسی وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی دشت‌های مهم استان زنجان (جهت مدیریت مناسب منابع آب زیرزمینی در آنها). دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، زنجان، شرکت آب منطقه‌ای زنجان.
- قدسی‌پور، ح.، ۱۳۸۱- مباحثی در تصمیم‌گیری چند معیاره، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران.
- موسوی، ف.، چیت‌سازان، م. و میرزایی، ی. و شبان، م.، ۱۳۸۸- تلفیق سنجش از دور و GIS به منظور پتانسیل‌یابی مناطق مناسب جهت تغذیه آب زیرزمینی، مورد مطالعه: محدوده تاق‌دیس کمستان، همایش ژئوماتیک ۸۸، تهران، سازمان نقشه برداری کشور.
- یوسفی سنگانی، ک.، محمدزاده، ح. و اکبری، م.، ۱۳۹۳- ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با روش تلفیق فازی و مدل تحلیل سلسله مراتبی، مطالعه موردی: شمال خاوری رشته‌کوه‌های هزار مسجد، استان خراسان رضوی، فصلنامه بین‌المللی پژوهشی تحلیلی منابع آب و توسعه، شال دوم، شماره ۴، پای ۷.

References

- Afshar, A., Mariño, M. A., Saadatpour, M. and Afshar, A., 2011- Fuzzy TOPSIS multi-criteria decision analysis applied to Karun reservoirs system. *Water resources management*, 25(2), 545-563.
- Aggarwal, M., Saravanan, S., Jennifer, J. J. and Abijith, D., 2019- Delineation of Groundwater Potential Zones for Hard Rock Region in Karnataka Using AHP and GIS. In *Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications* (pp. 315-317). Springer, Cham.
- Ameri, A. A., Pourghasemi, H. R. and Cerda, A., 2018- Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. *Science of The Total Environment*, 613, 1385-1400.
- Arulbalaji, P., Padmalal, D. and Sreelash, K., 2019- GIs and AHp techniques Based Delineation of Groundwater potential Zones: a case study from southern Western Ghats, India. *Scientific reports*, 9(1), 2082.
- Bali, R., Agarwal, K. K., Ali, S. N., Rastogi, S. K. and Krishna, K., 2012- Drainage morphometry of Himalayan Glacio-fluvial basin, India: hydrologic and neotectonic implications. *Environmental Earth Sciences*, 66(4), 1163-1174.
- Freeze, A. R. and Cherry, J. A., 1979- *Groundwater*, GB1003.2.F73 551.4*98 78-25796 ISBN 0-13-365312-9.
- Ganapuram, S., Kumar, G. V., Krishna, I. M., Kahya, E. and Demirel, M. C., 2009- Mapping of groundwater potential zones in the Musi basin using remote sensing data and GIS. *Advances in Engineering Software*, 40(7), 506-518.
- Lin, H. T., 2010- Fuzzy application in service quality analysis: An empirical study, expert systems with applications, 37(1): 517-526
- Madani, K., 2014- Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of environmental studies and sciences*, 4(4), 315-328.
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N. and Soundranayagam, J. P., 2012- Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 189-196.
- Mahmoud, S. H. and Alazba, A. A., 2016- Integrated remote sensing and GIS-based approach for deciphering groundwater potential zones in the central region of Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), 344.
- Mukherjee, P., Singh, C. K. and Mukherjee, S., 2012- Delineation of groundwater potential zones in arid region of India—a remote sensing and GIS approach. *Water resources management*, 26(9), 2643-2672.
- Pingping, H., Xue, S., Li, P. and Zhanbin, L., 2013- Effect of Vegetation Cover Types on Soil Infiltration Under Simulating Rainfall. *Nature Environment and Pollution Technology*, 12(2), 193.
- Saaty, T. L., 1980- *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation*. New York: McGraw, 281.
- Şener, E., Şener, Ş. and Davraz, A., 2018- Groundwater potential mapping by combining fuzzy-analytic hierarchy process and GIS in Beyşehir Lake Basin, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-21.
- Shih, H. S., Shyur, H. J. and Lee, E. S., 2007- An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7-8), 801-813.

Assessment of groundwater potential in Zanjanrood catchment area using spatial analysis and geoelectrical investigations

M. Shabani¹, A. Rezaei^{2*} and Z. Masoumi²

¹M.S.c., Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

²Assistant Professor, Department of Earth Sciences, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

Received: 2018 June 17

Accepted: 2019 April 29

Abstract

The water table in the Zanjanrood catchment has severely declined recently. Therefore, determination of the groundwater potential zoning map is of great importance for optimal management of water resources. Here, we used seven effective criteria including lithology, slope, drainage, lineament, rainfall, spring density and landuse to assess groundwater potential. The analytical hierarchical analysis process was used for weighting the criteria. Overlay analysis was implemented using TOPSIS model to prepare the groundwater potential map in four categories of priority including very-good, good, low and poor. In general, the very-good category corresponds with the first priority while the lowest potential of groundwater match with the fourth priority. The high-discharged production wells and the geoelectrical investigations (resistivity and induced polarization) were applied to verify the model. The spatial distribution of the high-discharge production wells has completely coincided with both the very-good and good priorities in the area. The results of resistivity and IP models also are in good agreement with those from the TOPSIS model. Overall, the results suggest there is no rich aquifer in mountains of the Zanjanrood catchment. Furthermore, the most important aquifer in the Zanjanrood catchment is located around the Zanjanrood River where a severe water table decline has occurred.

Keywords: Zanjanrood catchment, Assessment of groundwater potential, Analytical hierarchical analysis process, TOPSIS, Geoelectric

For Persian Version see pages 287 to 294

*Corresponding author: A. Rezaei; E-mail: arezaei@iasbs.ac.ir