



## استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت سیلاخور)

محمد سعیدی<sup>۱</sup>، مهدی کماسی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران.  
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت‌الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران.  
\* نویسنده مسئول: [komasi@abru.ac.ir](mailto:komasi@abru.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸

### چکیده

بسیاری از منابع آب زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه از نظر کیفی افت محسوس پیدا کرده و علاوه بر مشکلات کمی دچار مشکلات کیفی نیز شده است. از این رو، پتانسیل‌یابی و اکتشاف منابع آب زیرزمینی به پیشرفتی در زمینه تحقیقات هیدروژئولوژی تبدیل شده است. در این پژوهش، با هدف تحلیل و ارزیابی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در دشت سیلاخور و توسعه روشی اصلاح شده، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، استفاده شده است. یازده لایه‌ی موضوعی شامل لایه‌های لیتولوژی، بارش، پوشش گیاهی، تراکم و فاصله از گسل، ارتفاع، شیب، دما، کاربری اراضی، تراکم و فاصله از آبراهه براساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های آماری تهیه و به هر کدام از لایه‌ها و طبقات آن لایه، وزنی براساس فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی اختصاص داده شد. نقشه‌ی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در پنج طبقه شامل پتانسیل بالا، خوب، متوسط، کم و ضعیف پهنه‌بندی گردید. بر این اساس، ۵۶٪ مساحت دشت دارای پتانسیل بالا تا متوسط است که بیشتر در مرکز و جنوب غربی دشت قرار گرفته و منطبق بر آبرفت‌های کواترنری و سازندهای سخت کربناته می‌باشد. اعتبار سنجی توسط تعداد، موقعیت و میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری موجود در منطقه انجام و مشخص شد که ۸۹٪ از چاه‌های بهره‌برداری در مناطقی با پتانسیل آب زیرزمینی متوسط تا بالا قرار گرفته‌اند. از این رو، استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، روشی مؤثر و قابل اعتماد برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی است که می‌تواند برای توسعه و مدیریت منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شود.

**واژه‌های کلیدی:** آب زیرزمینی، پتانسیل‌یابی، دشت سیلاخور، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی.

### مقدمه

آب زیرزمینی یک منبع مهم و محدود از آب‌های شیرین است. با این وجود، رشد جمعیت، گسترش کشاورزی و توسعه اقتصادی، نیاز به منابع آبی را افزایش داده است. در مناطق خشک و نیمه خشک به ویژه ایران، این نیاز با استفاده از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. آب‌های زیرزمینی در حال حاضر بیش از ۷۰٪ از کل مصرف آب ایران را تشکیل می‌دهد (غلامی و همکاران، ۲۰۱۵). در سالیان اخیر استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی باعث ایجاد مشکلات زیادی از جمله کاهش تراز پیزومتری، افت کیفیت و آلودگی آب‌های زیرزمینی و باعث بروز تنش آب شده است (Souissi et al., 2018). بنابراین لازم است

مراتبی نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی دارای عملکرد بهتری در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی است. Sener et al., (2018) در پژوهش خود با استفاده از شاخص پتانسیل آب زیرزمینی به مطالعه و نقشه‌برداری مناطق مستعد از آب‌های زیرزمینی در حوضه دریاچه بیشه‌پیر ترکیه پرداخته‌اند. این شاخص پس از وزن‌دهی لایه‌ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی به دست می‌آید. (Chaudhry et al., 2019) در پژوهشی یک روش استاندارد برای تعیین مناطق دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی با استفاده از یک از تلفیق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی در منطقه‌ای در پنجاب هند، ارائه دادند. در روش آن‌ها برای به دست آوردن نتایج دقیق از اعداد فازی به جای مقادیر وزن استفاده شد. هدف از این مطالعه، تعیین مناطق دارای پتانسیل آب‌های زیرزمینی در دشت سیلاخور با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره فازی است. در این پژوهش، یازده پارامتر شامل لیتولوژی، تراکم و فاصله از گسل، پوشش گیاهی، تراکم و فاصله از آبراهه، کاربری زمین، شیب، ارتفاع، دما و بارش مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده پرسشنامه مقایسات زوجی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، وزن لایه‌های موضوعی و کلاسه‌های هر لایه تهیه و به هر کدام از آن‌ها اختصاص داده شد. در نهایت، با استفاده از شاخص پتانسیل آب زیرزمینی  $GWPI^1$  که یک روش ترکیب خطی وزن‌دار است، نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی ایجاد می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

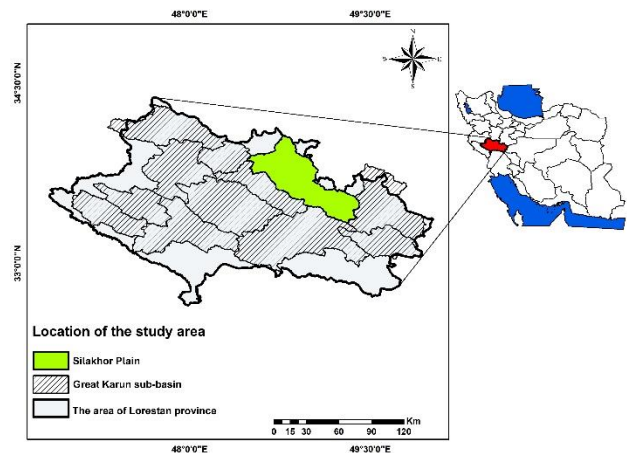
محدوده مورد مطالعه مشتمل بر حوضه دشت سیلاخور که در بخشی از شهرستان‌های دورود و بروجرد، که واقع در شمال شرق استان لرستان می‌باشد که بین طول‌های ۴۸ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۴ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۳ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). این محدوده که جزء حوضه آبریز رودخانه دز از زیرحوضه‌های

که یک طرح مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی تدوین شود تا بتوان از این منابع حیاتی به درستی استفاده شود (Prasad et al., 2007). در این شرایط، نقشه‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی موجود و پیش‌بینی سناریوهای آینده استفاده از این منابع مهم است. پتانسیل آب‌های زیرزمینی را دقیقاً می‌توان با استفاده از تلفیق روش‌های هیدروژئولوژیکی و ژئوفیزیکی و بررسی گمانه‌ها شناسایی کرد. با این حال، این روش‌ها زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند (Mandal et al., 2016). پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی بیشتر مبتنی بر سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی و تلفیق آن با استفاده از تکنیک‌های مختلف انجام می‌شود. به عنوان نمونه: رحیمی و سلیمانی (۱۳۹۵) در پژوهشی، نواحی دارای پتانسیل منابع آب زیرزمینی در دشت دهگلان را با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای و همپوشانی لایه‌های موضوعی مختلف تهیه و نشان دادند که روش آن‌ها، روشی مؤثر و قابل اعتماد برای توصیف مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در هر منطقه است و راه را برای اکتشاف پایدار آب‌های زیرزمینی هموار می‌کند. جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی، با هدف ارزیابی وضعیت منابع آب موجود در دشت اردبیل از لحاظ وضعیت منابع اعم از سطحی و زیرسطحی براساس چهار معیار طبیعی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و انسانی با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی مطالعاتی را انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که مدل نسبت فراوانی کارایی بهتری نسبت به مدل شاخص آماری در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دارد. رزندی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعاتی، از الگوریتم حداکثر آنتروپی برای پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی در دشت همدان بهار استفاده نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ۲۷/۲ درصد سطح دشت دارای پتانسیل آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین مدل ارائه شده دارای دقت ۰/۸۳ در شناسایی پتانسیل آب زیرزمینی دارد. مقدم و همکاران (۱۳۹۹) به منظور پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در آبخوان‌های محدوده غرب دریاچه ارومیه از روش تحلیل سلسله مراتبی و مدل ترکیبی منطق فازی-تحلیل سلسله مراتبی استفاده کردند. نتایج آنان نشان داد که روش منطق فازی-تحلیل سلسله

<sup>1</sup> Ground Water Potential Index

آب به درون زمین کمتر و سرعت حرکت رواناب بیشتر است (حقی زاده و میرزاپور، ۱۳۹۵). لایه تراکم و فاصله از آبراهه: آبراهه‌ها نقش مهمی در توزیع رواناب‌ها و دارای رابطه‌ی معکوس با نفوذپذیری سفره‌های آب‌های زیرزمینی دارند. به عبارت دیگر، هرچه نفوذپذیری سنگ کمتر باشد، نفوذ باران کمتر و رواناب سطحی بیشتری می‌شود (Jha et al., 2010). از این رو، فواصل نزدیک و افزایش تراکم آبراهه‌ها موجب کاهش پتانسیل آب زیرزمینی می‌شود. لایه تراکم و فاصله از گسل: درزها و گسل‌ها به طور کلی نقش مؤثری در نفوذ و انتقال‌دهی آب زیرزمینی دارند و موجب افزایش تخلخل ثانویه و نفوذپذیری می‌شوند. این عوامل از نظر هیدروژئولوژیکی بسیار مهم هستند، زیرا مسیرهای لازم برای حرکت آب‌های زیرزمینی را فراهم می‌کنند (Magesh., 2012). مناطق با تراکم بالا از گسل و نزدیک به این شکستگی‌ها، مناطقی مساعد برای پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی هستند. لایه بارش: بارندگی یکی از مهمترین جنبه‌های مطالعات آب‌های زیرزمینی است و منبع اصلی تغذیه آب‌های زیرزمینی به شمار می‌آید. آب موجود نقشی تعیین‌کننده برای نفوذ به سیستم آب‌های زیرزمینی دارد (Agarwal et al., 2013). بنابراین، بارش بیشتر در هر منطقه، امکان نفوذ و تغذیه منابع آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. لایه بارش از میانگین بارش ۲۰ ساله از ۱۰ ایستگاه هیدرومتری موجود در محدود دشت به روش IDW<sup>۳</sup> تهیه شد. میانگین بارش سالانه در دشت سیلاخور بین ۳۳۸ تا ۶۰۴ میلی‌متر می‌باشد. لایه دما: دمای سطحی به عنوان یکی از ورودی‌های چرخه آب و تعیین‌کننده اقلیم یک منطقه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اثر مستقیم تغییرات دما، افزایش و یا کاهش میزان تبخیر و تعرق و در نتیجه تغییر در میزان رطوبت در دسترس گیاهان می‌باشد (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین هر چه دما بیشتر باشد میزان تبخیر بیشتر بوده و بنابراین میزان نفوذپذیری خاک کمتر می‌شود. لایه لیتولوژی: با توجه به تفاوت مشهود سازندهای سخت در محدوده مورد مطالعه و تأثیر آن‌ها در منابع آب‌های زیرزمینی، کلیه سازندهای برحسب اهمیت و نقش آن‌ها در نفوذپذیری و

کارون بزرگ می‌باشد که دارای وسعتی حدود ۲۵۴۶ کیلومترمربع است. مساحت دشت این محدوده ۸۱۹ کیلومترمربع و ارتفاعات مجاور این دشت ۱۷۲۷ کیلومترمربع است. کمترین ارتفاع محدوده ۱۴۲۵ متر، مربوط به بخش‌های خروجی حوضه و بیشترین ارتفاع محدوده‌ی ۴۰۷۱ متر از سطح دریا، مربوط به جنوب شرقی محدوده می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.  
Figure 1- Geographical location of the study area.

### عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی

یازده لایه‌ی مؤثر در پتانسیل‌یابی از جمله، لایه‌های ارتفاع، شیب، تراکم و فاصله از آبراهه براساس پردازش تصاویر ماهواره ASTER<sup>۲</sup> ایجاد شده و لایه‌های پوشش گیاهی و دما نیز از پردازش تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 تهیه شده است. همچنین سایر لایه‌ها از داده‌های آماری و نقشه‌های موجود از سازمان‌های آب منطقه‌ای استان لرستان و اداره زمین‌شناسی استان لرستان تهیه و در محیط Arc GIS 10.5 پردازش شده است. این عوامل جریان، بارش و ذخیره آب در منطقه را کنترل می‌کنند و از این رو بر پتانسیل آب‌های زیرزمینی منطقه نیز تأثیر می‌گذارند. تمام لایه‌ها در ۵ طبقه تقسیم‌بندی شده است (شکل ۲).

لایه ارتفاع و شیب: ارتفاع و شیب، می‌تواند شاخص سرعت نفوذ آب باشد. به عبارت دیگر، در مناطق پست و کم ارتفاع، سرعت حرکت رواناب کم است که میزان نفوذ آب به درون زمین را افزایش می‌دهد. در ارتفاعات بالا و نواحی دارای شیب زیاد، نفوذ

<sup>3</sup> Inverse Distance Weighting

<sup>2</sup> Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

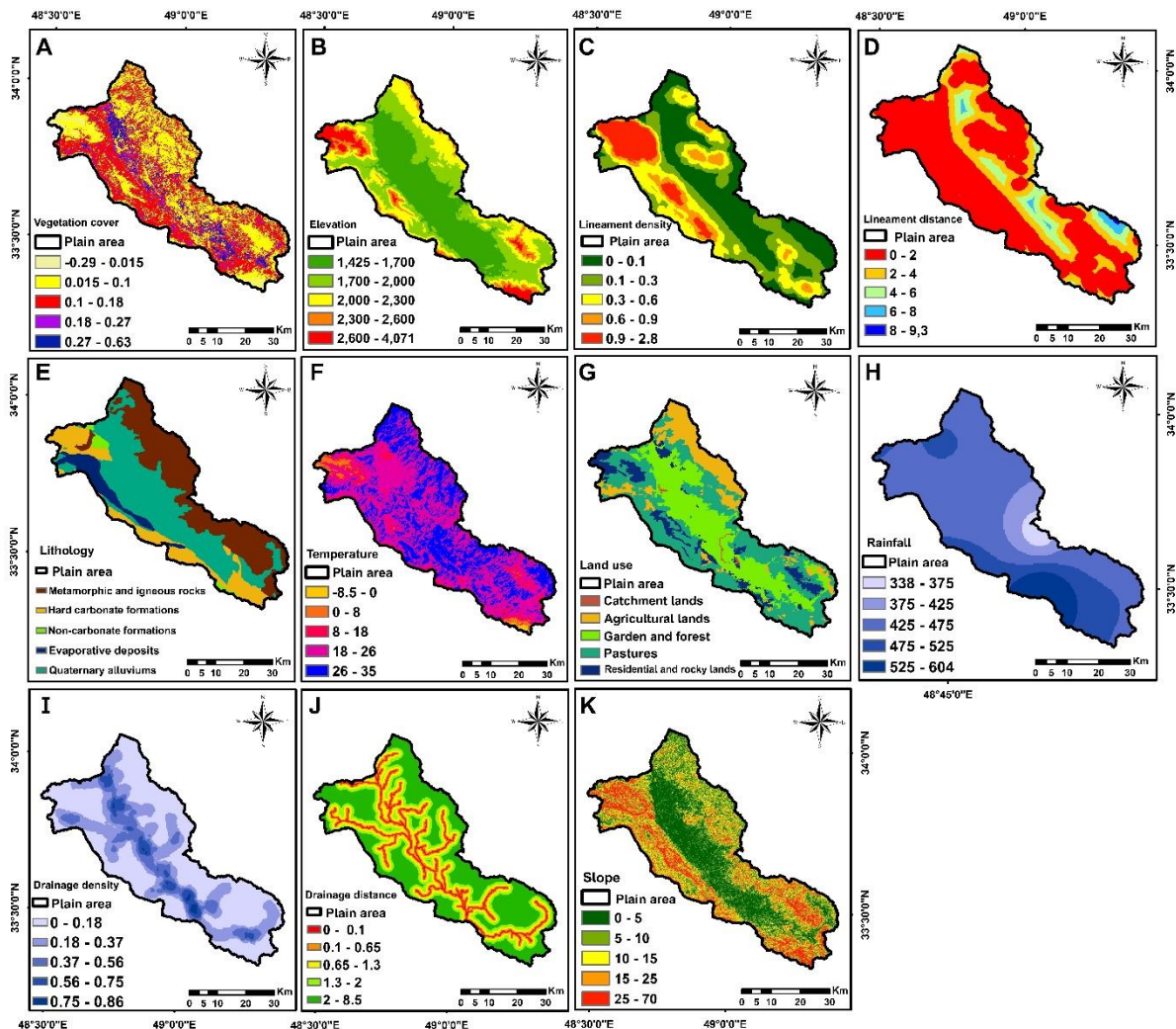
مناطق مکان‌های مستعد از آب‌های زیرزمینی هستند در حالی که مناطقی اراضی مسکونی و صخره‌ای، با توجه به تراکم شکستگی‌ها و نیز سنگ‌شناسی آن‌ها، میزان نفوذ به داخل زمین از کم تا غیر قابل نفوذ متغیر است و دارای پتانسیل آب زیرزمینی ضعیفی هستند.

### مفهوم منطق فازی

بسیاری از عناصر زمین دارای خاصیت عدم قطعیت هستند. عدم قطعیت ذاتی در فرآیندهای تصمیم‌گیری وجود دارد که شامل عدم قطعیت در داده‌ها و ساختار می‌شود. منطق فازی توسط زاده (۱۹۶۵)، برای توصیف عدم قطعیت و ابهام در داده‌ها و روابط عملکردی معرفی شد. مجموعه‌های فازی به ویژه هنگامی که داده‌های کافی برای مشخص کردن عدم اطمینان با استفاده از اقدامات آماری استاندارد (به عنوان مثال، میانگین، انحراف معیار و...) وجود ندارد، بسیار مفید هستند. در نظریه مجموعه‌های کلاسیک، عضویت یک مجموعه درست یا نادرست، ۱ یا ۰ تعریف شده است. با این وجود عضویت در یک مجموعه فازی در مقیاس پیوسته از ۱ (عضویت کامل) تا ۰ (عدم عضویت کامل) بیان می‌شود و مقادیر بین ۰ و ۱ نیز تا حدی به مجموعه تعلق دارد (Keshavarzi et al., 2010).

انحلال‌پذیری در ۵ طبقه تقسیم‌بندی شدند که عبارتند از: آبرفت‌های کواترنری: با توجه به اهمیت واحدهای رسوبی کواترنری از منظر شرایط مناسب نفوذپذیری و تشکیل منابع آب، کلیه واحدهای رسوبی کواترنری، شامل آبرفت‌ها، نهشته‌های پادگانه و مخروط افکنه‌های جوان و قدیم، در یک واحد، تحت عنوان آبرفت‌های کواترنری جمع‌شد. سازندهای سخت کربناته: نظر به اهمیت سنگ‌های آهکی از دیدگاه تشکیل منابع آب و ویژگی انحلال‌پذیری آن‌ها، از منظر امکان ایجاد پدیده کارست‌شدگی، کلیه واحدهای سنگ‌شناسی آهکی، تحت نام سنگ‌های کربناته، در نظر گرفته می‌شود. سازندهای غیرکربناته: سایر سنگ‌های رسوبی از جمله سنگ‌های سیلیسی، تخریبی که دارای نفوذپذیری متوسط بوده را شامل می‌شود. تشکیل آبخوان در سازندهای سخت غیرکربناته عموماً از طریق نفوذ آب از درز و شکاف‌های موجود در سنگ‌های پدید می‌آید. سنگ‌های آذرین و دگرگونی: آبخوان‌های زیرزمینی می‌توانند در انواع مختلف سنگ‌ها آذرین و دگرگونی تشکیل شوند، ولی چون در سنگ‌های آذرین و دگرگونی، فضای خالی بین ذرات آن‌ها وجود ندارد، تشکیل لایه‌های آبدار منحصر به مناطقی است که سنگ‌ها دچار هوازدگی شده‌اند یا در نتیجه حرکات زمین در آن محل‌ها، شکستگی و شکاف به وجود می‌آید (حسامی، ۱۳۸۰). رسوبات تبخیری: این رسوبات عموماً نقش منفی در منابع آب ایفا می‌کنند و دارای نفوذپذیری بسیار کمی هستند. این رسوبات شامل کانی‌هایی اعم از مارنی و گچی می‌باشد. لایه پوشش گیاهی: این لایه براساس شاخص NDVI<sup>۴</sup> محاسبه می‌شود. این شاخص از نسبت باندی بین باندهای مادون قرمز و قرمز محاسبه می‌گردد. مناطق با پوشش گیاهی متراکم دارای نفوذپذیری زیادی هستند، بنابراین در کاهش رواناب مؤثراند و بیشتر آب‌ها به داخل زمین نفوذ خواهد کرد. اراضی فاقد پوشش گیاهی موجب افزایش رواناب و کاهش نفوذپذیری می‌شوند (Shaban et al., 2006). لایه کاربری اراضی: نقشه کاربری اراضی نشان می‌دهد که اراضی آبیگر و نواحی دارای پوشش گیاهی از جمله باغ‌ها، اراضی کشاورزی و

<sup>4</sup> Normalized Difference Vegetation Index



شکل ۲- لایه‌های مؤثر در پتانسیل یابی، (A) پوشش گیاهی، (B) ارتفاع، (C) تراکم گسل، (D) فاصله از گسل، (E) لیتولوژی، (F) دما، (G) کاربری اراضی، (H) بارش، (I) تراکم آبراهه، (J) فاصله از آبراهه و (K) شیب.

Figure 2- Effective layers in detection potential, A) Vegetation cover, B) Elevation, C) Lineament density, D) Lineament distance, E) Lithology, F) Land surface temperature, G) Land use, H) Rainfall, I) Drainage density, J) Drainage distance, K) Slope.

### فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

در تصمیم‌گیری تقریباً واضح (غیر فازی) استفاده می‌شود. ۲- این روش با مقیاس بسیار نامتوازن در ایجاد قضاوت سروکار دارد. ۳- عدم قطعیت موجود در قضاوت یک شخص را در نظر نمی‌گیرد. ۴- قضاوت‌های ذهنی، انتخاب و اولویت تصمیم‌گیرندگان تأثیر زیادی در نتایج فرآیند تحلیل سلسله مراتبی دارد. ۵- رتبه‌بندی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی کاملاً نادرست است (Cheng et al., 1999). بنابراین ممکن است کارشناسان قضاوت‌های متوسط را به جای قضاوت‌های خاص ترجیح دهند. تئوری مجموعه فازی باعث می‌شود فرآیند مقایسه، انعطاف پذیرتر و قادر به توضیح ترجیحات برای متخصصان باشد (Can Kutlu et al., 2012).

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP یک روش قدرتمند برای حل مشکلات تصمیم‌گیری پیچیده است که از مقایسه زوجی و جبر ماتریسی برای وزن‌دهی به معیارها استفاده می‌کند. با استفاده از وزن‌های بدست آمده و معیارهای ارزیابی، تصمیمات اتخاذ می‌گردد (Kahraman et al., 2004). با این حال، در سیستم‌های پیچیده، تصمیم‌گیری و قضاوت انسان‌ها با الگوهای زبانی، مبهم نشان داده می‌شود و به صورت کمی قابل نمایش نیست. علاوه بر این، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی دارای کاستی‌هایی است که می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد: ۱- عمدتاً

اعداد مثلثی را می‌توان به صورت  $\tilde{A}=(L,M,U)$  نمایش داد و روابط بین دو عدد فازی مثلثی  $\tilde{A}_1=(L_1,M_1,U_1)$  و  $\tilde{A}_2=(L_2,M_2,U_2)$  به صورت زیر است:

خواص جمع

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 \oplus \tilde{A}_2 &= (L_1, M_1, U_1) \\ \oplus (L_2, M_2, U_2) &= (L_1+L_2, M_1+M_2, U_1+U_2) \end{aligned} \quad (2)$$

خواص ضرب

$$\begin{aligned} \tilde{A}_1 \otimes \tilde{A}_2 &= (L_1, M_1, U_1) \otimes (L_2, M_2, U_2) \\ &= (L_1 \times L_2, M_1 \times M_2, U_1 \times U_2) \end{aligned} \quad (3)$$

خواص معکوس پذیری

$$\tilde{A}_i^{-1} = (L_i, M_i, U_i)^{-1} = \left( \frac{1}{L_i}, \frac{1}{M_i}, \frac{1}{U_i} \right) \text{ for } L_i, M_i, U_i > 0 \quad (4)$$

متغیرهای زبانی ارزش‌هایی را تعریف می‌کنند که در مجموعه اصطلاحات آن تعریف شده است. استفاده از متغیرهای زبانی باعث ایجاد سهولت در مقایسات و تصمیم‌گیری می‌شود. در جدول ۱، هر تابع عضویت (مقیاس عدد فازی و زبانی) با سه پارامتر از اعداد فازی مثلثی، مطابق با تعریف (Mon 1994) بیان می‌شود:

جدول ۱- مقیاس ارزیابی فازی برای وزن‌ها.

Table 1- Fuzzy evaluation scale for weights.

Fuzzy number	Linguistic scale	Fuzzy triangular numbers
$\tilde{1}$	Equally important	(1, 1, 3)
$\tilde{3}$	Little important	(1, 3, 5)
$\tilde{5}$	Important	(3, 5, 7)
$\tilde{7}$	Much important	(5, 7, 9)
$\tilde{9}$	Absolutely important	(7, 9, 9)

روش تعیین وزن معیارها، براساس روش Buckley (1985) را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد: مرحله (۱) تشکیل ماتریس مقایسات زوجی را در بین همه معیارها متناسب با ساختار سلسله مراتبی که با استفاده از اعداد فازی مثلثی ایجاد می‌شود.

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & 1 & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \frac{1}{\tilde{a}_{12}} & 1 & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\tilde{a}_{1n}} & \frac{1}{\tilde{a}_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

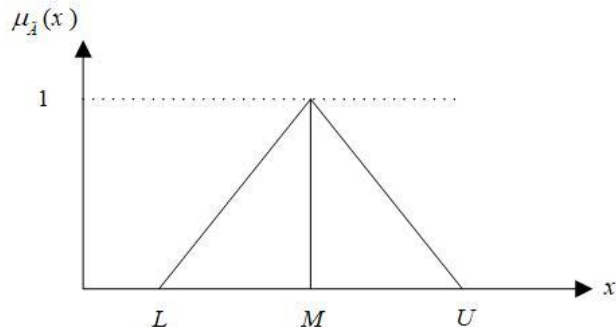
که در آن:

روش‌های مختلف فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی توسط نویسندگان مختلف ارائه شده است از جمله روش باکلی (۱۹۸۵)، آنالیز توسعه چانگ (۱۹۹۶) و... این روش‌ها با استفاده از مفاهیم تئوری مجموعه فازی و تحلیل ساختار سلسله مراتبی، از یک روش سیستماتیک برای اولویت‌بندی معیارها و گزینه‌ها استفاده می‌کنند. در این پژوهش از روش باکلی<sup>۵</sup> (۱۹۸۵)، به دلیل سادگی و سهولت در کاربرد آن در مسائل فازی استفاده شده، این روش از میانگین هندسی برای به‌دست آوردن وزن‌های فازی استفاده می‌کند (Kaya and Kahraman, 2011). باکلی در روش خود از الگوریتم تکاملی برای محاسبه وزن با اعداد فازی دوزنقه‌ای استفاده کرد. با این حال، به منظور ساده کردن روند تحلیل سلسله مراتبی فازی از دیدگاه علمی و کاربردی از اعداد فازی مثلثی استفاده می‌گردد. اعداد فازی یک زیر مجموعه فازی از اعداد واقعی هستند که بیانگر بسط ایده‌آل از فاصله اطمینان است. طبق تعریف، یک عدد فازی مثلثی باید دارای ویژگی‌های اساسی زیر باشد.

یک مجموعه فازی A در R می‌تواند اعداد فازی مثلثی باشد اگر عضویت تابع  $\mu_{\tilde{A}}(x): R \rightarrow [0, 1]$  برابر خواهد بود با:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-L}{M-L} & L \leq x \leq M \\ \frac{U-x}{U-M} & M \leq x \leq U \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

جایی که L و U به ترتیب برای مرزهای پایین و بالایی و M نشان‌دهنده مقدار معین برای عدد فازی A می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳- تابع عضویت دهی برای اعداد فازی مثلثی.

Figure 3- Membership function for triangular fuzzy numbers.

<sup>5</sup> Buckley

### تعیین مناطق پتانسیل آب زیرزمینی

شاخص پتانسیل آب زیرزمینی GWPI یک مقدار بدون بعد است که به پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در یک منطقه کمک می‌کند. شاخص پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش ترکیب خطی وزن‌دار به شرح زیر است (رحمتی، ۲۰۱۴):

$$GWPI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w_i \times x_{ij}) \quad (11)$$

که در آن،  $w_i$  وزن نرمال شده لایه‌های موضوعی  $i$  است و  $x_{ij}$  وزن زیرلایه هر یک از لایه‌های موضوعی  $j$  می‌باشد.  $m$  تعداد کل لایه‌های موضوعی است و  $n$  تعداد کل طبقات در یک لایه موضوعی است.

### بحث و نتایج

#### تهیه نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی

ابتدا نظرات ۴۳ نفر از کارشناسان، متخصصان و مشاوران فعال در زمینه‌ی زمین‌شناسی و مدیریت منابع آب درخواست شد که قضاوت خود را در مورد میزان اهمیت هر یک از معیارها، در قالب پرسشنامه بیان کنند. پس از جمع‌آوری نتایج، با استفاده از میانگین هندسی این نظرات با هم ادغام شدند و ماتریس مقایسات زوجی معیارها ایجاد شد. سپس وزن لایه‌ها و طبقات هر لایه را با روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی تعیین شد. مطابق جدول ۲، وزن لایه‌ها و طبقات هر لایه با استفاده از رابطه باکلی محاسبه می‌شود و به صورت وزن مثلثی فازی در می‌آید. سپس با استفاده از رابطه ۹، به صورت وزن‌های غیرفازی تبدیل و پس از آن، وزن‌ها نرمال‌سازی می‌شود.

$$\tilde{a}_{ij} = \begin{cases} \tilde{1}, \tilde{3}, \tilde{5}, \tilde{7}, \tilde{9}, \tilde{1}^{-1}, \tilde{3}^{-1}, \tilde{5}^{-1}, \tilde{7}^{-1}, \tilde{9}^{-1} & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases} \quad (6)$$

مرحله ۲) استفاده از روش میانگین هندسی برای تعریف میانگین هندسی فازی و وزن فازی هر معیار به شرح زیر است:

$$\bar{r}_i = (\tilde{a}_{i1} \otimes \tilde{a}_{i2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in})^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

$$\tilde{w}_i = \bar{r}_i \otimes (\bar{r}_1 \oplus \bar{r}_2 \oplus \dots \oplus \bar{r}_n)^{-1} \quad (8)$$

که  $\tilde{a}_{in}$  مقادیر فازی مقایسه معیار  $i$  با معیار  $n$  است، بنابراین  $\bar{r}_i$  میانگین هندسی مقادیر مقایسات فازی معیار  $i$  با هر معیار است.  $\tilde{w}_i$  وزن فازی معیار  $i$  ام است، که می‌تواند توسط اعداد فازی مثلثی به صورت  $\tilde{w}_i = (Lw_i, Mw_i, Uw_i)$  نشان داده شود. به طوری که  $Lw_i$ ،  $Mw_i$  و  $Uw_i$  به ترتیب وزن فازی برای مقادیر پایین، میانی و بالای معیار  $i$  می‌باشد.

مرحله ۳) رتبه‌بندی اعداد فازی که در نتیجه هم‌گذاری تصمیمات فازی، توسط هر گزینه تشکیل می‌شود و یک عدد فازی است. بنابراین، لازم است که یک روش رتبه‌بندی غیرفازی برای اعداد فازی برای مقایسه هر گزینه استفاده شود. به عبارت دیگر، استفاده از یک روش فازی‌زدایی برای تعیین بهترین عملکرد غیرفازی BNP<sup>۶</sup> است. استفاده از روش مرکز سطح COA<sup>۷</sup> برای پیدا کردن BNP یک روش ساده و کاربردی است و نیازی به تقدم هیچ ارزیابی نیست (Hsieh, 2004). مقدار BNP را در اعداد فازی  $\tilde{R}_i$  را می‌توان از رابطه ۹ بدست آورد.

$$BNP_i = \frac{[UR_i - LR_i] + [MR_i - LR_i]}{3} + LR_i \quad \forall i \quad (9)$$

مرحله ۴. نرمال‌سازی وزن‌های غیرفازی حاصل از تعیین بهترین عملکرد غیرفازی از رابطه ۱۰ بدست می‌آید.

$$w_i = \frac{w_i'}{\sum w_i'} \quad (10)$$

جدول ۲- ضرایب ماتریس‌های ارزیابی و بردار وزنی معیارها.

Table 2- Fuzzy evaluation scale for weights.

Criteria	Sub-criteria	Layer	Triangular fuzzy weight	BNP	Normal weight
Lithology	Quaternary alluviums	1	(0.088, 0.227, 0.557)	0.291	0.221
	Hard carbonate formations	2	(0.252, 0.524, 1.001)	0.592	0.496
	Non-carbonate formations	3	(0.113, 0.254, 0.568)	0.312	0.261
	Metamorphic and igneous rocks	4	(0.036, 0.071, 0.172)	0.093	0.078
	Evaporative deposits	5	(0.020, 0.035, 0.077)	0.044	0.037

<sup>7</sup> Center Of Area

<sup>6</sup> Best Nonfuzzy Performance

			(0.075, 0.199, 0.478)	0.251	0.191
Rainfall (mm)	525 - 604	1	(0.234, 0.480, 0.934)	0.549	0.465
	475 - 525	2	(0.141, 0.295, 0.601)	0.345	0.292
	425 - 475	3	(0.060, 0.126, 0.295)	0.160	0.136
	375 - 425	4	(0.031, 0.063, 0.147)	0.080	0.068
	338 - 375	5	(0.020, 0.036, 0.082)	0.046	0.039
Vegetation cover			(0.057, 0.148, 0.383)	0.196	0.149
	0.27 - 0.62	1	(0.190, 0.445, 1.000)	0.545	0.431
	0.18 - 0.27	2	(0.116, 0.287, 0.663)	0.355	0.281
	0.10 - 0.18	3	(0.059, 0.145, 0.391)	0.198	0.157
	0.015 - 0.10	4	(0.036, 0.081, 0.210)	0.109	0.087
	-0.29 - 0.015	5	(0.021, 0.042, 0.103)	0.055	0.044
Lineament density (Km/Km <sup>2</sup> )			(0.047, 0.124, 0.317)	0.162	0.123
	0.9 - 2.8	1	(0.248, 0.519, 0.994)	0.587	0.493
	0.6 - 0.9	2	(0.121, 0.258, 0.574)	0.318	0.267
	0.3 - 0.6	3	(0.057, 0.124, 0.288)	0.156	0.131
	0.1 - 0.3	4	(0.032, 0.063, 0.154)	0.083	0.070
	0.0 - 0.1	5	(0.020, 0.036, 0.081)	0.046	0.039
Slope (°)			(0.030, 0.073, 0.203)	0.102	0.078
	0 - 5	1	(0.216, 0.466, 0.954)	0.545	0.451
	5 - 10	2	(0.133, 0.297, 0.641)	0.357	0.295
	10 - 15	3	(0.061, 0.135, 0.330)	0.175	0.145
	15 - 25	4	(0.032, 0.064, 0.160)	0.086	0.071
	25 - 70	5	(0.020, 0.037, 0.082)	0.046	0.038
Drainage density (Km/Km <sup>2</sup> )			(0.023, 0.059, 0.164)	0.082	0.062
	0.0 - 0.18	1	(0.223, 0.496, 1.005)	0.574	0.471
	0.18 - 0.37	2	(0.118, 0.267, 0.622)	0.336	0.275
	0.37 - 0.56	3	(0.057, 0.128, 0.312)	0.166	0.136
	0.56 - 0.75	4	(0.034, 0.071, 0.178)	0.094	0.077
	0.75 - 0.86	5	(0.021, 0.039, 0.089)	0.050	0.041
Lineament distance (Km)			(0.023, 0.055, 0.152)	0.077	0.058
	0 - 2	1	(0.208, 0.470, 0.986)	0.555	0.451
	2 - 4	2	(0.123, 0.286, 0.654)	0.354	0.288
	4 - 6	3	(0.059, 0.136, 0.347)	0.181	0.147
	6 - 8	4	(0.035, 0.069, 0.179)	0.094	0.077
	8 - 9.3	5	(0.020, 0.038, 0.083)	0.047	0.038
Elevation (m)			(0.020, 0.053, 0.141)	0.071	0.054
	1425 - 1700	1	(0.238, 0.498, 0.967)	0.568	0.478
	1700 - 2000	2	(0.130, 0.277, 0.598)	0.335	0.282
	2000 - 2300	3	(0.060, 0.130, 0.299)	0.163	0.137
	2300 - 2600	4	(0.031, 0.058, 0.141)	0.077	0.065
	2600 - 4071	5	(0.020, 0.037, 0.080)	0.046	0.039
Drainage distance (Km)			(0.011, 0.026, 0.067)	0.035	0.026
	2 - 8.5	1	(0.205, 0.473, 0.990)	0.556	0.449
	1.3 - 2	2	(0.117, 0.276, 0.658)	0.350	0.283
	0.65 - 1.3	3	(0.064, 0.148, 0.370)	0.194	0.157
	0.1 - 0.65	4	(0.033, 0.066, 0.174)	0.091	0.073
	0.0 - 0.1	5	(0.020, 0.038, 0.083)	0.047	0.038
Temperature (°C)			(0.010, 0.024, 0.064)	0.033	0.025
	8 - 18	1	(0.239, 0.492, 0.956)	0.563	0.473
	0 - 8	2	(0.132, 0.284, 0.596)	0.337	0.284
	18 - 26	3	(0.057, 0.126, 0.299)	0.161	0.135
	-8.5 - 0	4	(0.032, 0.062, 0.152)	0.082	0.069
	26 - 35	5	(0.020, 0.036, 0.081)	0.046	0.039
Land use			(0.007, 0.013, 0.032)	0.017	0.013
	Catchment lands	1	(0.242, 0.509, 1.004)	0.585	0.488
	Garden and forest	2	(0.103, 0.225, 0.510)	0.279	0.233
	Agricultural lands	3	(0.061, 0.134, 0.313)	0.169	0.141
	Pastures	4	(0.044, 0.096, 0.218)	0.119	0.100
	Residential and rocky lands	5	(0.020, 0.037, 0.078)	0.045	0.038



و گسل‌ها قرار دارد ولی دما تأثیری محدودی بر نواحی مستعد از آب‌های زیرزمینی در دشت دارند.

### اعتبارسنجی نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب‌های زیرزمینی

صحت‌سنجی یکی از مهم‌ترین معیارهای تحقیق علمی است. از آنجایی که چاه‌ها بزرگترین منبع برداشت آب در دشت سیلاخور می‌باشند، موقعیت آن‌ها نشان‌دهنده پتانسیل آب زیرزمینی در محدوده حوضه آبریز دشت سیلاخور است.

بنابراین جهت صحت‌سنجی از موقعیت ۱۲۰۶ چاه بهره‌برداری موجود در منطقه و درون‌یابی میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری برای میزان دقت مدل ارائه شده، مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی در پتانسیل‌یابی با موقعیت چاه‌ها همخوانی خوبی دارد، به طوری که ۸۹٪ از چاه‌های بهره‌برداری در مناطقی با پتانسیل آب زیرزمینی متوسط به بالا قرار گرفته‌اند (جدول ۳).

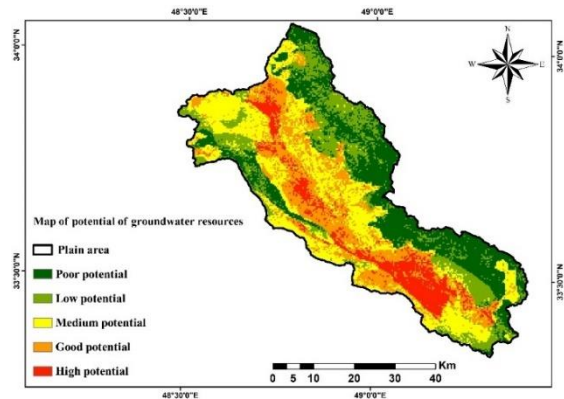
جدول ۳- مساحت پهنه‌بندی و وضعیت مکانی چاه‌های بهره‌برداری.

Zoning of potential	Area (Km <sup>2</sup> )	Area (%)	Number of exploitation wells	Exploitation wells (%)
Poor	631.74	25.29	66	5.5
Low	451.90	18.09	67	5.6
Medium	653.07	26.15	433	35.9
Good	519.66	20.81	427	35.4
High	241.35	9.66	213	17.7

مطابق شکل ۵، میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری ۳/۵ تا ۷۱/۲ مترمکعب بر ساعت می‌باشد که بیشترین برداشت در نواحی غربی و جنوب غربی دشت قرار دارد. همچنین با توجه به نقشه پتانسیل‌یابی، بیشترین برداشت از نواحی دارای پتانسیل بالا تا متوسط صورت می‌گیرد.

بیشترین وزن مربوط به لایه لیتولوژی با وزن ۰/۲۲۱، لایه بارش با وزن ۰/۱۹۱، پوشش گیاهی با وزن ۰/۱۴۹ و تراکم گسل با وزن ۰/۱۲۳ است. سایر پارامترها و لایه‌ها با وزن‌های کمتر، اهمیت و تأثیرگذاری کمتری را نشان می‌دهند. نقشه‌ی پتانسیل منابع آب زیرزمینی براساس رابطه‌ی ۱۱ بدست می‌آید. این رابطه، با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی به تلفیق روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌پردازد. این روش یکپارچه کمک می‌کند تا از طریق آن، با ادغام لایه‌ها و عوامل تأثیرگذار، نواحی مستعد از منابع آب زیرزمینی شناسایی گردد. بازه نقشه‌ی پتانسیل‌یابی در محدوده ۰/۰۹۸ تا ۰/۴۲ قرار دارد،

که در ۵ طبقه شامل: پتانسیل بالا، خوب، متوسط، کم و ضعیف تقسیم‌بندی می‌شود. مناطق با پتانسیل بالا تا متوسط بیشتر در نواحی مرکزی دشت و جنوب غربی دشت قرار گرفته است و نقاط با پتانسیل کم و ضعیف بیشتر در نواحی اطراف و شرق دشت قرار گرفته است (شکل ۴). مقایسه نتایج این نقشه با لایه‌های موضوعی نشان می‌دهد که مناطق دارای پتانسیل در نواحی آبرفت کواترنری، سازندهای سخت کربناته و مناطق با شیب و ارتفاع کم دارای بیشترین انطباق است. این لایه‌ها نیز در نتایج پژوهش‌ها Şener et al., (2018) و Chaudhry et al., (2019) بیشترین تأثیرگذاری را در تعیین مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی نشان دادند.



شکل ۴- نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی.

**Figure 4- Map of potential of groundwater resources.**

همچنین نقشه پتانسیل‌یابی دارای تطبیق‌پذیری خوبی نسبت به مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم، درختزار و جنگل دارد. نتایج این نقشه نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی در فاصله کم نسبت به آبراهه‌ها و گسل‌ها و در تراکم بالای آبراهه‌ها

پتانسیل‌یابی با محل استقرار چاه‌ها از مطابقت خوبی برخوردار است. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری فازی در مطالعات و مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی می‌تواند نتایجی سریع، دقیق و مقرون به صرفه را ارائه دهد. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود از سایر مدل‌های دیگر از جمله مدل نسبت فراوانی و مدل تابع شواهد قطعی و غیره، برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی استفاده و با مدل کنونی مقایسه شود. با توجه به بالا بودن عوامل مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی و تعداد لایه‌های اطلاعاتی بالا، پیشنهاد می‌شود به سبب افزایش دقت تا حد امکان، تمام عوامل در مدل‌سازی در پتانسیل‌یابی وارد شود. روش نشان داده شده در این مطالعه را می‌توان به راحتی در سایر مناطق استفاده نمود.

### منابع

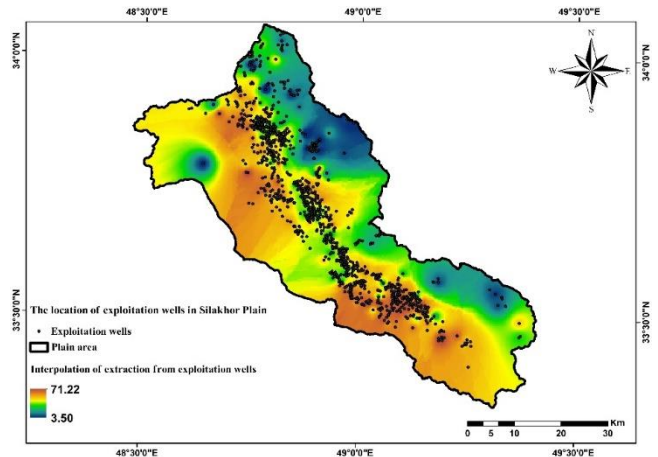
ابراهیمی، ح.، گندمکار، الف.، المدرسی، ع. و رامشت، م. ح.، ۱۳۹۵. برآورد دمای سطح زمین و تأثیر پوشش گیاهی بر دمای سطح با استفاده از تصاویر مودیس (مطالعه موردی: حوزه توپسرکان). جغرافیا (برنامه ریزی منطقه‌ای)، (۶): ۲۳-۳۲.

جعفرزاده، ج.، رستم زاده، ه.، نیک جو، م. ر. و اسدی، الف.، ۱۳۹۶. ارزیابی پتانسیل منابع آب دشت اردبیل با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی (FANP) در محیط GIS. جغرافیا و برنامه ریزی، ۲۱(۶۱): ۱۴۵-۱۶۴.

حسامی، م. ر.، ۱۳۸۰. بررسی هیدروژئوشیمیایی و هیدروژئولوژیکی منابع آبی موجود در سازندهای سخت آذرین و دگرگونی در منطقه کوه سفید بوانات. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی-آبشناسی (هیدروژئولوژی)، دانشگاه شیراز. ۳۰۱ص.

حق‌زاده، ع.، میرزاپور، ح.، ۱۳۹۵. ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره. مجله هیدروژئولوژی، ۱(۲): ۸۳-۹۸.

رحیمی، م.، سلیمانی، ک.، ۱۳۹۵. ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره. علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران، ۱۰(۳۵): ۲۷-۳۸.



شکل ۵- نقشه موقعیت و میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی دشت.  
Figure 5- Map of the location and amount of withdrawal from the groundwater resources of the plain.

### نتیجه‌گیری

ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی به یک موضوع مهم در سراسر جهان تبدیل شده است. دولت‌ها و سازمان‌های تحقیقاتی روش‌های مختلفی را برای ارزیابی و پیش‌بینی توزیع آب‌های زیرزمینی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب آزمایش کرده‌اند. این پژوهش با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی، مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی در شناسایی و پیش‌بینی مکان‌های احتمالی و مستعد برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی در دشت سیلاخور، مورد بررسی قرار گرفته است. شاخص پتانسیل آب زیرزمینی GWPI در بازه ۰/۰۹۸ تا ۰/۴۲ قرار دارد و به ۵ منطقه با پتانسیل بالا، خوب، متوسط، کم و ضعیف طبقه‌بندی شده است. نتایج نشان داد که ۹/۶۶ درصد (۲۴۱/۳۵ کیلومترمربع) از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل آب زیرزمینی بالا، پتانسیل خوب با ۲۰/۸۱ درصد (۵۱۹/۶۶ کیلومترمربع) و پتانسیل متوسط نیز دارای ۲۶/۱۵ درصد (۶۵۳/۰۷ کیلومترمربع) می‌باشد، در حالی که مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی کم مساحتی برابر با ۱۸/۰۹ درصد (۴۵۱/۹۰ کیلومترمربع) و مناطق دارای پتانسیل ضعیف نیز مساحت ۲۵/۲۹ درصد (۶۳۱/۷۴ کیلومترمربع) را نشان می‌دهند. از این رو، بیشتر مناطق یعنی ۵۶/۶۱ درصد (۱۴۱۴/۰۷ کیلومترمربع) دارای پتانسیل عالی برای آب‌های زیرزمینی قرار گرفته‌اند. همچنین، اعتبارسنجی توسط تعداد چاه‌های بهره‌برداری موجود و میزان برداشت از آن‌ها در دشت انجام شد که نشان داد، عملکرد نقشه‌ی

system and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeology Journal*, 18(7): 1713-1728.

Kahraman, C., Cebeci, U., Ruan, D., 2004. Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, 87(2): 171-184.

Kaya, T., Kahraman, C., 2011. An integrated fuzzy AHP-ELECTRE methodology for environmental impact assessment. *Expert Systems with Applications*, 38(7): 8553-8562.

Keshavarzi, A., Sarmadian, F., Heidari, A., Omid, M., 2010. Land Suitability Evaluation Using Fuzzy Continuous Classification (A Case Study: Ziara Region). *Modern Applied Science*, 4(7): 72-81.

Magesh, N.S., Chandrasekar, N., 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.

Mandal, U., Sahoo, S., Munusamy, S.B., Dhar, A., Panda, S.N., Kar, A., Mishra, P.K., 2016. Delineation of Groundwater Potential Zones of Coastal Groundwater Basin Using Multi-Criteria Decision-Making Technique. *Water Resources Management*, 30(12): 4293-4310.

Mon, D.L., Cheng, C.H., Lin, J.C., 1994. Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight. *Fuzzy Sets and Systems*, 62(2): 127-134.

Prasad, R.K., Mondal, N.C., Banerjee, P., Nandakumar, M.V., Singh, V.S., 2007. Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS. *Environmental Geology*, 55(3): 467-475.

Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H.R., Zeinivand, H., 2014. Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9): 7059-7071.

رزندی، ی، فرخ زاده، ب، یوسف زاده چوبک، م. و تیموریان، ت، ۱۳۹۶. پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت همدان- بهار). مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۲۹): ۱۱۰-۱۲۳.

مقدم، س، احمدی، ح، زینال زاده، ک. و حصاری، ب، ۱۳۹۹. مکانیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی تجدیدشونده آبخوان‌های غرب دریاچه ارومیه با تحلیل AHP و تکنیک فازی فضایی. هیدروژئولوژی، ۵(۲): ۱۴۲-۱۵۳.

Agarwal, E., Agarwal, R., Garg, R.D., Garg, P.K., 2013. Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach. *Journal of Earth System Science*, 122(3): 887-898.

Buckley, J.J., 1985. Ranking alternatives using fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, 15(1): 21-31.

Can Kutlu, A., Ekmekçioğlu, M., 2012. A Fuzzy Hybrid Approach for Fuzzy Process FMEA: An Application to a Spindle Manufacturing Process. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 5(4): 611-626.

Chaudhry, A.K., Kumar, K., Alam, M.A., 2019. Mapping of groundwater potential zones using the fuzzy analytic hierarchy process and geospatial technique. *Geocarto International*, 1-22.

Cheng, C.H., Yang, K.L., Hwang, C.L., 1999. Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight. *European Journal of Operational Research*, 116(2): 423-435.

Gholami, V., Chau, K.W., Fadaee, F., Torkaman, J., Ghaffari, A., 2015. Modeling of groundwater level fluctuations using dendrochronology in alluvial aquifers. *Journal of Hydrology*, 529: 1060-1069.

Hsieh, T.Y., Lu, S.T., Tzeng, G.H., 2004. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders' selection in public office buildings. *International Journal of Project Management*, 22(7): 573-584.

Jha, M.K., Chowdary, V.M., Chowdhury, A., 2010. Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information

Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8): 187–208.

Shaban, A., Khawlie, M., Abdallah, C., 2006. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14(4): 433-443.

Souissi, D., Msaddek, M.H., Zouhri, L., Chenini, I., El May, M., Dlala, M., 2018. Mapping groundwater recharge potential zones in arid region using GIS and Landsat approaches, southeast Tunisia. *Hydrological Sciences Journal*, 63(2): 251-268.

Şener, E., Şener, Ş., Davraz, A., 2018. Groundwater potential mapping by combining fuzzy-analytic hierarchy process and GIS in Beyşehir Lake Basin,