



شرکت مدیریت منابع آب ایران

شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان

عنوان:

پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از تجزیه و تحلیل شاخص همپوشانی وزنی (مطالعه
موردی: دشت گوهرکوه، استان سیستان و بلوچستان)

کارفرما:

شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان

مشاور:

دانشگاه سیستان و بلوچستان

مجری:

دکتر حمید نظری پور

چکیده

سفره‌های آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب برای ساکنان مناطق خشک از جمله دشت گوهرکوه واقع در خشک‌ترین حوضه آبریز ایران است. بارش سالانه اندک با تغییرپذیری بالا و نرخ تبخیر بالا در این منطقه تجربه می‌شود. دارایی‌های آب زیرزمینی این منطقه در نتیجه نیاز روبه رشد به دلیل توسعه کشاورزی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این مطالعه بر شناسایی پارامترهای مؤثر مهم در مناطق پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره و ابزارهای تحلیل فضایی متمرکز است. برای دستیابی به این هدف، نه معیار تأثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی شامل لیتولوژی، زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، گرادیان شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی، تراکم خطواره، کاربری زمین و بارش بر اساس مرور ادبیات موضوع، انتخاب گردیده‌اند. اختصاص وزن به لایه‌های موضوعی از طریق تحلیل فرایند سلسله مراتبی انجام گرفته است. نتایج فرایند تحلیل سلسله مراتبی بیانگر نقش بازر لیتولوژی (۲۹٪)، زمین‌شناسی (۲۵٪) و تراکم زهکشی (۱۵٪) در پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بوده است. کمترین تأثیرگذاری مربوط به بارش (۱٪) بوده است. پس از تعیین رتبه کلاس‌های هر یک از لایه‌های موضوعی، از تحلیل همپوشانی وزنی برای تلفیق لایه‌ها استفاده شده است. خروجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی به پنج دسته تقسیم که از پتانسیل بسیارخوب تا بسیار ضعیف متغیر بوده است. نتایج نشان داد که ۶۰ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل متوسط تا خیلی خوب است که با نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر، تراکم زهکشی، شیب و توپوگرافی پایین نسبت داده می‌شود. تمرکز فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با تراکم چاه‌های بهره‌برداری گویای این واقعیت است. در مقابل، ۴۰ درصد باقیمانده، پهنه‌های با پتانسیل ضعیف آبخوان را نشان دادند که در شرق، مرکز و کرانه‌های غربی حوضه منطقه مورد مطالعه با رخنمون‌های سنگی نفوذناپذیر، شیب زیاد، ارتفاع و تراکم زهکشی بالا و فقر پوشش گیاهی مرتبط است. اعتبارسنجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های موقعیت و عملکرد چاه‌های حفرشده، از طریق منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) تعیین گردید. ناحیه زیر منحنی (AUC)، ۰/۸۱۵ را نشان داد. نتایج امیدوارانه بود و می‌تواند برای مدیریت آب‌های زیرزمینی و اکتشاف منابع آب زیرزمینی اعمال شود.

واژه‌های کلیدی: پتانسیل آب زیرزمینی، تحلیل همپوشانی وزنی، تحلیل فرایند سلسله مراتبی، منحنی مشخصه عملکرد سیستم، آبخوان گوهرکوه.

آب به عنوان یک منبع طبیعی اساسی، در حفظ حیات انسان، پیش برد توسعه اجتماعی- اقتصادی، و حفظ سیستم های اکولوژیکی نقش اساسی دارد (Makonyo and Msabi ۲۰۲۱). در حال حاضر، منابع آب در سرتاسر جهان استرس قابل توجهی را تجربه می کنند که ناشی از اثرات ترکیبی تنوع آب و هوایی و فعالیت های انسانی است. عواملی مانند رشد روزافزون جمعیت، شهرنشینی شتابان، گسترش صنعتی و تشدید شیوه های کشاورزی به طور قابل توجهی تقاضا برای آب را افزایش داده است (Ghosh *et al.* ۲۰۲۲). این امر باعث شده است که حدود ۵۷ درصد از آب مورد نیاز برای مصارف خانگی، کشاورزی و صنعتی در مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران از ذخایر آب زیرزمینی تامین شود. در مناطق خاصی، وابستگی به آب های زیرزمینی برای آب آشامیدنی تا ۶۵٪ افزایش می یابد، که چالش های قابل توجهی را در استفاده پایدار از آن ایجاد می کند. به طور همزمان، وضعیت جهانی منابع آب زیرزمینی، هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی، در درجه اول به دلیل برداشت بی رویه، شاهد کاهش است. این استخراج بیش از حد منجر به پایین آمدن سطح سطح ایستابی آب می شود و ناکافی بودن آب های سطحی در این مناطق مسائل کمبود آب را بیشتر تشدید می کند (Arulbalaji *et al.* ۲۰۱۹). افزایش بهره برداری از آب های زیرزمینی در مناطق خشک پیش بینی می شود که منجر به استفاده از ذخایر آب فسیلی در آینده شود، عملی که ذاتاً ناپایدار است (Scanlon *et al.* ۲۰۰۶).

با توجه به کمبود منابع آب سطحی در بسیاری از مناطق ایران، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، آب های زیرزمینی به عنوان مناسب ترین منبع برای برآوردن نیازهای آبی ظاهر می شوند (مدنی ۱۳۹۳؛ حاجی محمدی و همکاران ۲۰۲۴). آب های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک نه تنها به دلیل طراوت نسبی و ترکیب شیمیایی پایدارتر، بلکه به دلیل حساسیت کمتر به آلودگی و قابلیت اطمینان بالاتر به عنوان منبع آب بسیار ارزشمند است. به طور همزمان، تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت اکولوژیکی زمین دارد و نقش مهمی در توسعه اقتصادی، تنوع اکولوژیکی و سلامت جوامع ایفا می کند (ایزدی و همکاران ۲۰۱۲). کمبود و کاهش آشکار آب های زیرزمینی در دشت های ایران به یک بحران بحرانی و حاد تبدیل شده است (باقری و حسینی ۱۳۹۰). سفره های زیرزمینی با چالش های بزرگی در حوزه توسعه پایدار مواجه هستند که در درجه اول به دلیل کاهش سطح آب، بدتر شدن کیفیت آب، افزایش آسیب پذیری در برابر تغییرات آب و هوایی در نتیجه گرم شدن کره زمین، تغییر در الگوهای بارش و وقوع مکرر خشکسالی است (فولتز ۲۰۰۲). حاجی محمدی و همکاران ۲۰۲۴).

دشت گوهرکوه در جنوب شرقی ایران، نمایانگر منطقه ای با پتانسیل های قابل توجه توسعه کشاورزی و گردشگری در یک چشم انداز خشک است. در اینجا، آب زیرزمینی به عنوان تنها منبع برای نیازهای خانگی، کشاورزی و صنعتی عمل می کند. این منطقه در حال حاضر با یک بحران شدید آب دست و پنجه نرم می کند که ناشی از افزایش مداوم جمعیت و گسترش کشاورزی است که

تقاضای آب را به شدت افزایش داده است (رضایی و سرگزی ۲۰۱۰). پرداختن به این بحران مستلزم تلاش متمرکز برای مدیریت موثر مصرف آب، با تمرکز ویژه بر شناسایی و مدیریت پتانسیل آب سفره است.

یکی از جنبه‌های مهم این تلاش شامل انتخاب لایه‌های موضوعی است، فرآیندی اساسی برای تعیین منابع آب زیرزمینی و در عین حال مملو از چالش‌ها، به ویژه از نظر کمیت و نوع. مناسب بودن این لایه‌ها عمیقاً تحت تأثیر شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه است که نیاز به یک رویکرد ظریف دارد. به گونه‌ای که لایه‌های موضوعی موثر در ترسیم منابع آب زیرزمینی در یک محیط خشک با بارندگی اندک و پوشش گیاهی کم (Mumtaz et al. ۲۰۱۹; Mallick et al. ۲۰۱۹; Elewa and Qaddah ۲۰۱۱) کاملاً با لایه‌های معتدل متفاوت است. محیط کوهستانی با بارش برف فراوان و پوشش جنگلی انبوه (Sapkota et al. ۲۰۲۱). در نتیجه، قابلیت اطمینان تحقیقات پتانسیل آب زیرزمینی به انتخاب دقیق و هوشمندانه عوامل موثر بر منابع آب زیرزمینی هر منطقه بستگی دارد. از سوی دیگر، دخالت لایه‌های موضوعی متعدد (Ozdemir ۲۰۱۱) در مقابل لایه‌های موثر (Khan et al. ۲۰۲۲) می‌تواند فرآیند تحلیل و تفسیر نتایج را پیچیده کند. در زمینه وابستگی دشت گوهرکوه به آب‌های زیرزمینی، بررسی عوامل موثر بر در دسترس بودن و پویایی آن ضروری است. پتانسیل آب زیرزمینی توسط عوامل مختلفی از جمله فیزیوگرافی، زمین شناسی، هیدرولوژی، کاربری زمین، پوشش زمین و عناصر آب و هوایی مانند بارش، دما و تبخیر شکل می‌گیرد (Asgher et al. ۲۰۲۲). پیچیدگی و تنوع این عوامل می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در پتانسیل آب‌های زیرزمینی در فواصل کوتاه شود (Thapa et al. ۲۰۱۷; Dar et al. ۲۰۱۰). علیرغم منابع غنی آب زیرزمینی منطقه، فقدان مطالعات جامع در مورد پهنه‌های بالقوه آن و عوامل موثر بر آن وجود دارد. این شکاف در دانش منجر به بهره‌برداری بی‌ساختار و بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی شده و اثرات نامطلوبی مانند فرونشست زمین، تغییر کاربری زمین و محدودیت‌های مصرف آب را به دنبال دارد. هدف تحقیق ما رفع این شکاف با به کارگیری رویکردی دقیق برای انتخاب لایه‌های موضوعی است و در نتیجه قابلیت اطمینان ارزیابی‌های پتانسیل آب زیرزمینی در محیط‌های خشک مانند دشت گوهرکوه را افزایش می‌دهد.

ادغام سیستماتیک داده‌ها در تحقیقات هیدروژئولوژیکی شناسایی سریع و مقرون به صرفه مناطق بالقوه آب زیرزمینی را تسهیل می‌کند و پیشرفت قابل توجهی را نسبت به روش‌های سنتی، زمان برتر و گران قیمت مانند بررسی‌های ژئوفیزیکی و هیدروژئولوژیکی، نقشه برداری رخنمون و حفاری چاه ارائه می‌کند (Jha et al. ۲۰۱۰). با تکیه بر این پیشرفت، فناوری‌های سنجش از دور (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان ابزار قدرتمندی برای ارزیابی منابع طبیعی ظاهر می‌شوند. آنها کارایی بالا، هزینه کم و قابلیت تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی و مکانی-زمانی پیچیده را در مناطق وسیع در یک بازه زمانی نسبتاً کوتاه ارائه می‌دهند و تضاد آشکاری با روش‌های سنتی تر ارائه می‌دهند (Souissi et al. ۲۰۱۸). در طول دهه گذشته،

محققان از متغیرهای مختلف و تکنیک‌های آماری متعدد با دقت‌های متفاوت برای ترسیم مرزهای پتانسیل آب‌های زیرزمینی استفاده کرده‌اند. این روش‌ها طیف وسیعی از رویکردها را در بر می‌گیرند، از جمله مدل وزن شواهد (طهماسبی پور و همکاران ۲۰۱۶)، مدل نسبت فرکانس احتمالی (ماناپ و همکاران ۲۰۱۴؛ داودی مقدم و همکاران ۲۰۱۵)، عامل قطعیت (نمپک و همکاران ۲۰۱۴)، گاما فازی (آنتوناکوس و همکاران ۲۰۱۴)، آنتروپی شانون (نقیبی و همکاران ۲۰۱۵)، و تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره (سینگ و همکاران ۲۰۱۸؛ ساندووال و تیوران جونیور، ۲۰۱۹ و همکاران ۲۰۱۹). علاوه بر این، تکنیک‌های یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی (گلکاریان و همکاران ۲۰۱۸؛ پراساد و همکاران ۲۰۲۰)، شبکه‌های عصبی مصنوعی (لی و همکاران ۲۰۱۲؛ لی و همکاران ۲۰۱۹)، روش‌های رگرسیون لجستیک (چن و همکاران ۲۰۱۸)، و گروه‌های یادگیری ماشین (کمالی مسکونی و همکاران ۲۰۲۰) نیز قابل توجه بوده‌اند. در میان این تکنیک‌های متنوع، RS و GIS به ویژه برجسته شده‌اند. در مقایسه با روش‌های مرسوم بررسی هیدروژئولوژیکی، آنها در تولید نتایج سریع و مقرون به صرفه ثابت شده‌اند (Oh et al. ۲۰۱۱)، به ویژه در مناطق خشک و کم‌آب با دسترسی محدود به داده‌ها. این زمینه در دهه‌های اخیر، با استفاده از محققان متعدد از RS و GIS برای اکتشاف منابع آب زیرزمینی، توجه قابل توجهی به خود جلب کرده است (دپیا و همکاران ۲۰۱۶؛ چن و همکاران ۲۰۱۸؛ رحمان و همکاران ۲۰۲۲).

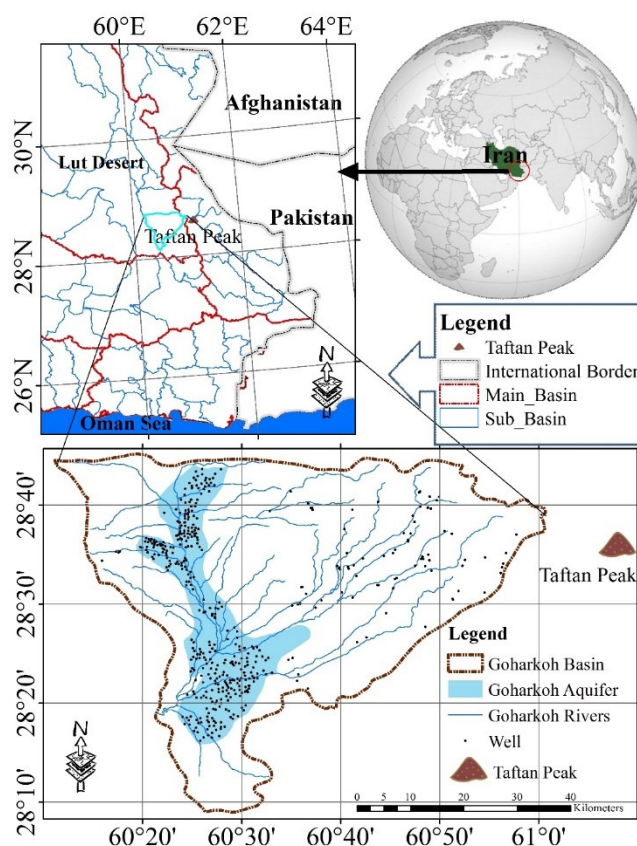
این مطالعه یک روش پیشگامانه را در محیط خشک دشت گوهرکوه معرفی می‌کند، جایی که فناوری‌های RS، GIS و تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) به طور هماهنگ یکپارچه شده‌اند. این نوآوری روش شناختی یک چارچوب کامل و کارآمد برای ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی، با تأکید قوی بر ارزیابی جامع عوامل توپولوژیکی، زمین‌شناسی، هیدروکلیماتولوژیکی و پوشش زمین ایجاد می‌کند. هدف اصلی استفاده موثر از این رویکرد یکپارچه برای شناسایی و ارزیابی مناطق بالقوه آب زیرزمینی (GWPZs) در داخل آبخوان است. با استفاده از قابلیت‌های جمعی RS، GIS و MCDM، این تحقیق در تلاش است تا بر محدودیت‌های ذاتی روش‌های هیدروژئولوژیکی مرسوم غلبه کند. پیش‌بینی می‌شود که این رویکرد جدید مدیریت پایدار منابع آبخوان، افزایش درآمد سرانه و افزایش حکمرانی آب‌های زیرزمینی در دشت گوهرکوه را به‌طور چشمگیری تقویت کند.

داده و روش شناسی

منطقه مورد مطالعه

مناطق شرقی و مرکزی ایران که سالانه کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر بارندگی دارند، به عنوان اقلیم‌های فوق خشک و خشک شناخته می‌شوند (کابولی و همکاران ۲۰۲۱). به دلیل کمبود بارندگی سالانه، تنوع زمانی و مکانی قابل توجه آن، و نرخ تبخیر بالا، جریان‌های سطحی قابل توجه و ثابت به ندرت در این مناطق تشکیل می‌شود. جریان‌های سطحی موجود که اتفاق می‌افتند معمولاً فصلی و

غیرقابل پیش‌بینی هستند، و آنها را برای بهره‌برداری پایدار غیرقابل اعتماد می‌کند. در نتیجه، اتکای فزاینده‌ای به استخراج منابع آب زیرزمینی وجود دارد. با این حال، ذکر این نکته ضروری است که ذخایر آب زیرزمینی در این نواحی اغلب فراوان نیستند و استفاده از آنها را پیچیده‌تر می‌کند (صفدری و همکاران ۲۰۲۲). حوضه آبریز دشت گوهرکوه در جنوب شرقی‌ترین قسمت کویر لوت ایران از ۶۰ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۷ دقیقه طول شرقی و از ۲۸ درجه و ۷ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصه آن رسوبات آبرفتی گسترده است که به عنوان مخزن اصلی ذخیره آب زیرزمینی عمل می‌کند و آبخوان گوهرکوه را تشکیل می‌دهد. میانگین ارتفاع دشت گوهرکوه از سطح دریا حدود ۱۳۵۰ متر برآورد شده است. مساحت کل حوضه آبریز تقریباً ۲۸۷۰ کیلومتر مربع است که حدود ۵۵ درصد آن را دشت‌های آبرفتی کم ارتفاع و ۴۵ درصد بقیه را مناطق کوهستانی و مرتفع تشکیل می‌دهد. آبخوان گوهرکوه که جزو آبخوان‌های آزاد طبقه‌بندی می‌شود، در داخل این نهشته‌های آبرفتی و پنکه‌ای قرار گرفته و مساحتی در حدود ۴۸۷ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد (رضایی و سرگزی، ۱۳۸۹). در دهه‌های اخیر، دشت گوهرکوه کاهش قابل توجهی در سطح آب‌های زیرزمینی داشته است که عمدتاً به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است. این کاهش با گسترش مجتمع‌های کشت و صنعت و مجموعه‌ای از خشکسالی‌های طولانی بیشتر می‌شود.

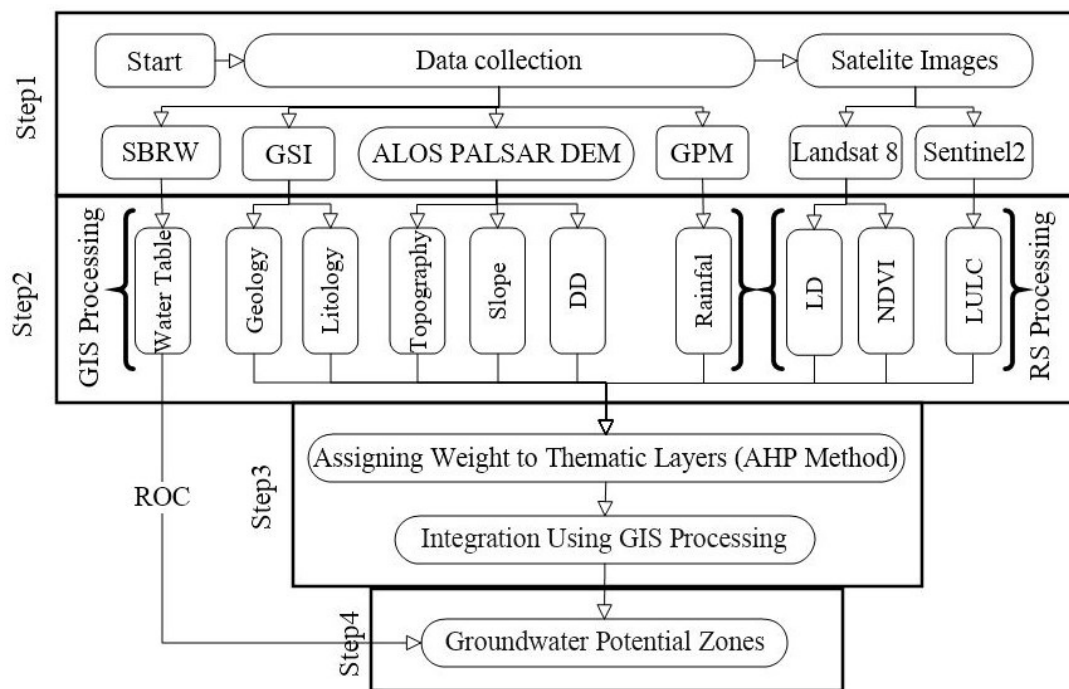


داده ها و روش پژوهش

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، زیر واحدی از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره است که شامل تجزیه و تحلیل و تصمیم‌گیری مرتبط با اهداف چندگانه است (Wang et al., ۲۰۰۹; Murma et al., ۲۰۱۹; Cay and Uyan, ۲۰۱۳). ارزیابی چندمعیاره مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی بر تعریف نرخ کلاس‌های مختلف در هر لایه اعمال می‌شود. وزن هر لایه موضوعی با توجه به تأثیر آن‌ها بر پتانسیل آب زیرزمینی و با در نظر گرفتن روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی ساعتی (Saaty's AHP) تخصیص داده می‌شود (Saaty, ۱۹۸۰). در تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، تخصیص وزن به هر عامل تأثیرگذار با در نظر گرفتن نقش عملی آن در یک منطقه خاص اعمال می‌شود (Chow and Sadler, ۲۰۱۰; Agarwal and Garg, ۲۰۱۶; Jhariya et al., ۲۰۱۷; Murma et al., ۲۰۱۹). تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP) یک رویکرد ذهنی است که در آن انتخاب زیرواحد و تخصیص وزن به آن بر اساس مقایسه بین معیارهای مختلف برگرفته از استراتژی‌های مناسب تصمیم‌گیری پیشنهاد شده توسط ساعتی (Saaty, ۱۹۸۰) است. روش تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP) با توجه به محاسبه وزن از یک ماتریس ترجیحی که لایه‌های نقشه را نشان می‌دهد، اعمال می‌شود. وزن‌ها با مقایسه معیارهای مربوط بر اساس عوامل ترجیحی ایجاد می‌شوند. توانایی مدیریت تعداد زیادی از داده‌های ناهمگن برای وزن مورد نیاز، حتی برای داده‌های عظیم در یک روش روبه جلو صریح، این روش را به روشی محبوب در روش‌های مختلف سیستم اطلاعات جغرافیایی تبدیل کرده است (Chen et al., ۲۰۱۰; Feizizadeh and Blaschke, ۲۰۱۲; Khan and Jhariya, ۲۰۱۹).

این مطالعه از یک روش چهار مرحله‌ای سیستماتیک برای ارزیابی GWPZs در دشت گوهرکوه استفاده کرد. این روش شامل: (۱) جمع‌آوری داده‌های جامع، (۲) توسعه لایه‌های موضوعی از طریق پردازش RS و GIS، (۳) استفاده از تحلیل همپوشانی با استفاده از AHP برای شناسایی GWPZ ها، و (۴) اعتبار سنجی و تایید پیش‌بینی شده است. نقشه‌برداری GWPZs با استفاده از داده‌های چاه موجود از منطقه. لایه‌های موضوعی با استفاده از داده‌های تصویر ماهواره‌ای RS و رقومی‌سازی نقشه‌های موجود با استفاده از GIS تهیه شد. ۹ معیار حیاتی برای ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد: سنگ شناسی، زمین شناسی، تراکم زهکشی، شیب شیب، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شاخص پوشش گیاهی، تراکم خطی، کاربری/پوشش زمین (LULC) و بارندگی سالانه. این معیارها تحت ارزیابی اولیه از طریق روش AHP قرار گرفتند و به دنبال آن تخصیص وزن، نرمال‌سازی و رتبه‌بندی انجام شد و در مدلی که با استفاده از یک شاخص همپوشانی وزنی ساخته شد به اوج خود

رسید. علاوه بر این، اعتبار سنجی کمی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی پیش بینی شده با استفاده از تجزیه و تحلیل منحنی مشخصه عملیاتی گیرنده (ROC) انجام شد، همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است.



نتایج و بحث

فرآیند تحلیلی به کار رفته در این مطالعه به یافته های روشنگری در مورد پتانسیل آب زیرزمینی در دشت گوهرکوه ختم شد. پس از ارزیابی وزن انجام شده با استفاده از AHP، هر لایه شطرنجی موضوعی تحت استانداردسازی و طبقه بندی مجدد قرار گرفت. با همسویی با روش های به کار رفته در مطالعات اخیر، مانند روش های (Khan et al. ۲۰۲۲؛ Woyessa ۲۰۲۱ و Ndhlovu)، یک سیستم ارزش رتبه بندی از ۱ تا ۵ اتخاذ شد. این رتبه بندی ها به ترتیب با دسته های بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار بالا برای هر لایه موضوعی مطابقت دارد. جدول ۵ وزن های نرمال شده اختصاص داده شده به هر لایه موضوعی و رتبه های نرمال شده تخصیص یافته به هر زیر کلاس در این لایه ها را نشان می دهد. طبق داده های جدول، لایه سنگ شناسی بیشترین وزن (۰.۲۸) و لایه بارندگی کمترین وزن (۰.۰۱) را به خود اختصاص داد. وزن برای زیر کلاس های داخلی هر لایه بین ۰.۳۳ و ۰.۰۷ متغیر بود که منعکس کننده همبستگی مستقیم یا معکوس مربوطه با نفوذپذیری آب های زیرزمینی و ظرفیت های تغذیه است.

با استفاده از AHP، مشخص شد که لایه موضوعی لیتولوژی دارای وزن قابل توجهی ۲۸ درصد است (همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است)، که آن را به مهم ترین عامل تأثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تبدیل می کند. با توجه به همبستگی مستقیم بین سنگ شناسی و نفوذپذیری، کلاس هایی که نفوذپذیری بالاتری داشتند رتبه های بالاتری را به خود اختصاص دادند و برعکس برای کلاس های کمتر نفوذپذیر. این منجر به طبقه بندی مجدد لایه موضوعی سنگ شناسی به پنج گروه مجزا شد، در نتیجه یک لایه سنگ شناسی تجدیدنظر شده منعکس کننده سطوح مختلف نفوذپذیری ایجاد شد. بالاترین رتبه این لایه (کلاس ۵) به رسوبات رسوبی کواترنر (Q) نسبت داده شد.

این مطالعه نشان داد که سنگ شناسی از دوره های زمین شناسی پلیوسن، میوسن و ائوسن، که اغلب از کنگلومرا تشکیل شده اند، نفوذپذیری خوب تا متوسطی از خود نشان می دهند. برعکس، سنگ شناسی هایی که قدمت آن ها به دوران پالئوسن، کرتاسه، الیگوسن، و پرمین بازمی گردد، که اغلب با ترکیبی از مخلوط های غنی و سنگ های سخت مشخص می شوند، نفوذپذیری ضعیفی را نشان می دهند، همانطور که توسط (مالیک و همکاران ۲۰۱۹) پشتیبانی می شود. در نتیجه، به لایه موضوعی زمین شناسی (سن) وزن قابل توجهی ۲۳ درصد اختصاص یافت (به جدول ۵ مراجعه کنید). در این لایه، زیر کلاس ها - یعنی کواترنر و پلیوسن، میوسن، ائوسن، پالئوسن، و گروه ترکیبی کرتاسه، الیگوسن و پرمین- در مقیاسی از خیلی خوب تا خیلی ضعیف، مطابق با مقادیر عددی از ۵ تا رده بندی شدند.

در حوضه آبخیز گوهرکوه، لایه موضوعی تراکم زهکشی با وزن قابل توجه ۱۵ درصد (همانطور که در جدول ۵ نشان داده شده است) نسبت داده شد و آن را به عنوان سومین عامل تأثیرگذار منطقه برای پتانسیل آب زیرزمینی قرار داد. با توجه به رابطه معکوس بین تراکم زهکشی و تجمع آب های سطحی، مناطق با تراکم زهکشی کمتر در رتبه های بالاتری قرار گرفتند. بر این اساس، زیر کلاس های درون این لایه به عنوان (۲-۰)، (۴-۲)، (۶-۴)، (۸-۶)، و (۱۰-۸) در مقیاس بسیار خوب تا رتبه بندی شدند. خیلی فقیر. این سیستم رتبه بندی مطابق با مقادیر عددی از ۵ تا ۱ است.

در ارزیابی حوضه آبخیز گوهرکوه، لایه موضوعی شیب شیب با وزن ۱۲ درصد (به جدول ۵ مراجعه کنید)، به عنوان چهارمین عامل مهم تأثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی شناخته شد. با توجه به رابطه معکوس بین شیب شیب و تجمع آب های سطحی، مناطق با شیب ملایم تر رتبه های بالاتری را دریافت کردند. در نتیجه، زیر کلاس های درون این لایه، که به صورت (۳-۰)، (۳-۲)، (۳-۵)، (۵-۵)، (۸-۱۰) و (۱۰-۸) تعریف شده اند، رتبه هایی از خیلی خوب تا خیلی ضعیف دارند. این رتبه بندی مطابق با یک محدوده عددی از ۵ تا ۱ است.

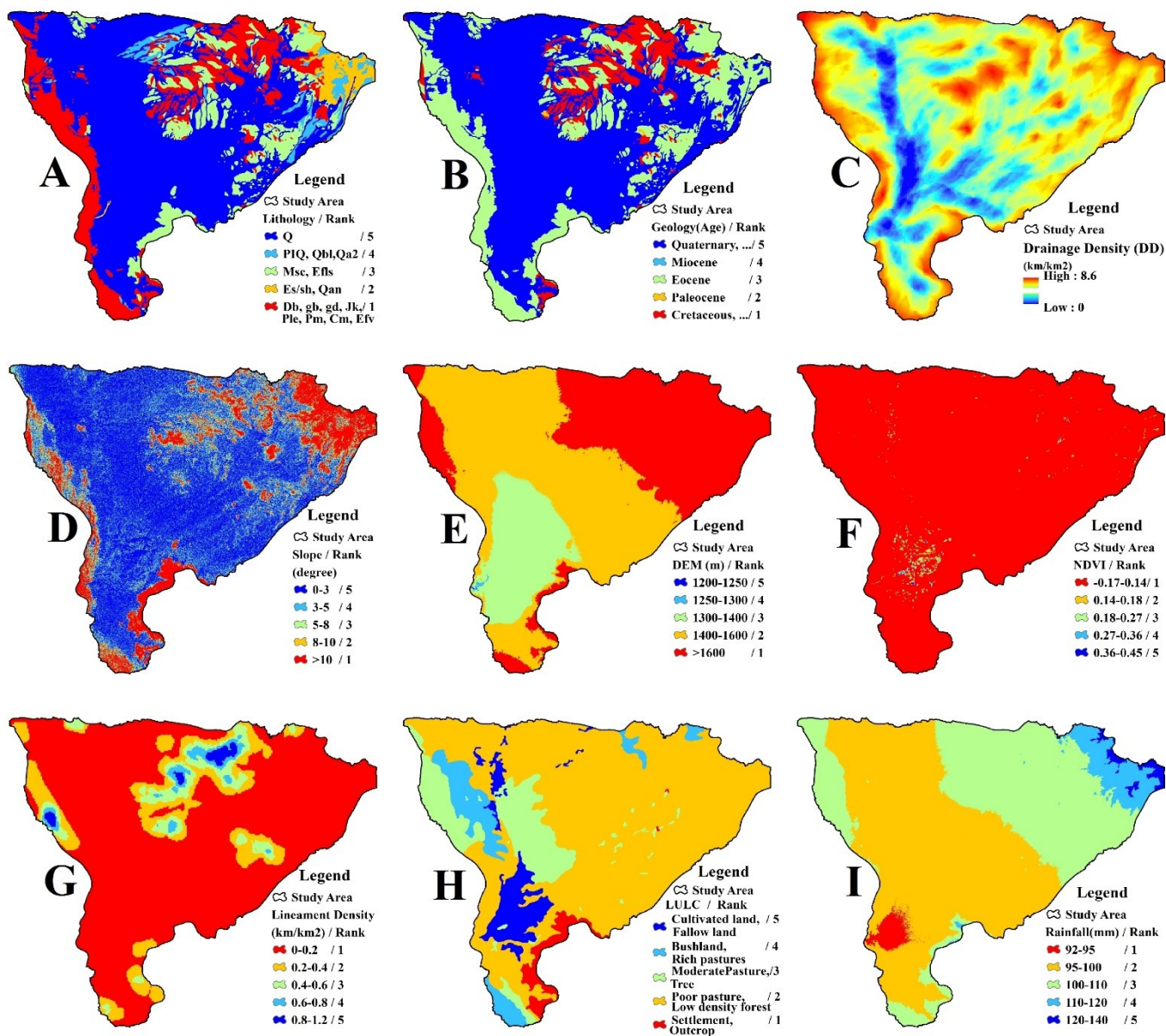
طبق جدول ۵، لایه موضوعی DEM به عنوان پنجمین عامل حیاتی موثر بر پتانسیل آب زیرزمینی در حوضه آبخیز گوهرکوه، با وزن اختصاص داده شده ۱۱ درصد در جدول ۵ شناخته شده است. (۲۰۱۹)، یک همبستگی معکوس بین تجمع آب سطحی، تراکم زهکشی و DEM و یک همبستگی مستقیم با شیب وجود دارد (Arulbalaji et al. ۲۰۱۹). این رابطه مستلزم تخصیص وزن های بالاتر به ارتفاعات پایین و وزن های پایین تر به ارتفاعات بالاتر است. بر این اساس، زیر کلاس های درون این لایه به عنوان (۱۲۵۰-۱۳۰۰)، (۱۳۰۰-۱۳۵۰)، (۱۳۵۰-۱۴۰۰)، (۱۴۰۰-۱۴۵۰)، (۱۴۵۰-۱۵۰۰)، و (۱۶۰۰-۱۶۵۰)، از خیلی خوب تا خیلی ضعیف رتبه بندی شده اند. این رتبه بندی ها مطابق با یک محدوده عددی از ۵ تا ۱ است.

پوشش گیاهی لایه موضوعی، رتبه ششم، وزن ۵٪ را دریافت می کند (جدول ۵). NDVI برای طبقه بندی تراکم پوشش گیاهی به پنج زیر کلاس استفاده شد. این زیر کلاس ها از پتانسیل بسیار ضعیف، مربوط به محدوده NDVI بسیار کم، تا پتانسیل بسیار بالا، مرتبط با محدوده NDVI بالا هستند. این طبقه بندی با محدوده عددی ۱ تا ۵، همانطور که در شکل F۶ نشان داده شده است، نشان داده می شود. شایان ذکر است که اکثر مناطق مورد مطالعه از نظر پوشش گیاهی در رتبه بسیار پایینی قرار دارند.

وزن لایه موضوعی چگالی خطی در پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه ۳ درصد بود (جدول ۵). نقشه چگالی خطواره طبقه بندی شده مجدد منطقه را به پنج کلاس مجزا ترسیم می کند، همانطور که در شکل G۶ نشان داده شده است. این طبقات از پتانسیل بالا، مربوط به چگالی خطی بسیار بالا، تا پتانسیل بسیار کم، مرتبط با چگالی خطواره بسیار کم، متغیر هستند. رتبه بندی این کلاس ها از ۵ تا ۱ است و زیر کلاس های با تراکم بالاتر رتبه های بالاتری را دریافت می کنند. در نتیجه، زیر کلاس های (۰.۸-۱.۰۹)، (۰.۶-۰.۸)، (۰.۴-۰.۶)، (۰.۲-۰.۴)، و (۰.۰-۰.۲) به ترتیب از خیلی خوب تا خیلی ضعیف هستند.

در ارزیابی کلی پتانسیل آب زیرزمینی برای حوضه آبخیز گوهرکوه، معیار LULC به عنوان وزن ۲٪ در نظر گرفته شده است که در جدول ۵ نشان داده شده است. متعاقباً، نقشه LULC مجدد طبقه بندی شده، منطقه را به پنج کلاس مجزا طبقه بندی می کند. این طبقات بر اساس پتانسیل نفوذ آب، از پتانسیل بسیار بالا تا بسیار کم مرتب شده اند. سیستم رتبه بندی برای این کلاس ها با مقادیر عددی ۵ تا ۱ نشان داده شده است، همانطور که در شکل H۶ نشان داده شده است.

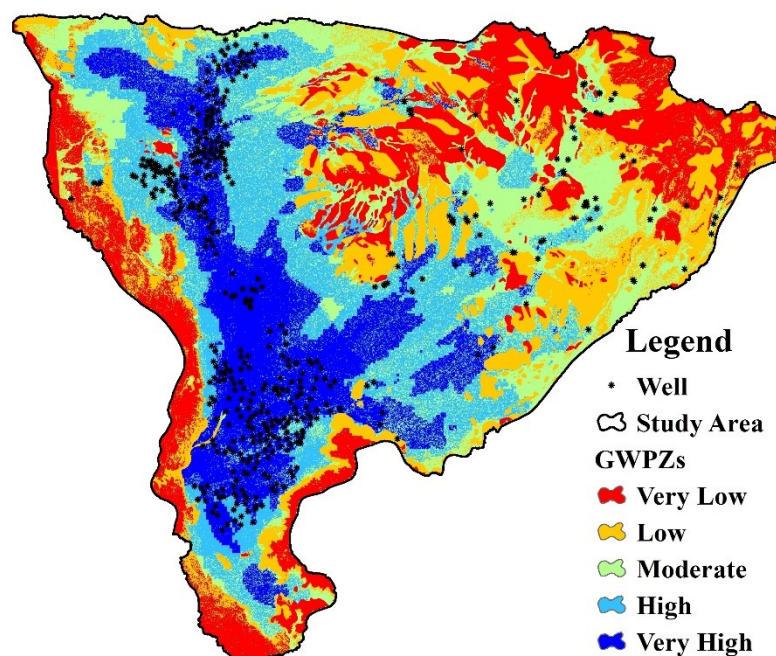
وزن دهی و درجه بندی مقادیر بارندگی سالانه بر اساس روش (Khan et al. ۲۰۲۲) است که در آن وزن های بالاتری به مقادیر بارندگی بالاتر اختصاص می یابد و بالعکس (شکل I۶). لایه توزیع مکانی مجموع بارندگی سالانه در حوضه آبخیز گوهرکوه با وزن ۱ درصد (جدول ۵) کمترین سهم را در ارزیابی پتانسیل آب های زیرزمینی دارد. با این حال، همانطور که توسط محققانی مانند (Uc Castillo و همکاران ۲۰۲۲) و (Abdullateef et al. ۲۰۲۱) اشاره شد، بارندگی منبع اصلی هیدرولوژیکی تغذیه آب زیرزمینی در مناطق نیمه خشک است.



تجزیه و تحلیل همپوشانی وزنی برای ترسیم GWPZها انجام شد، که اهمیت نسبی لایه‌های موضوعی مختلف و زیر کلاس‌های مربوطه را در بر می‌گرفت. در طول تجزیه و تحلیل پوشش، وزن اختصاص داده شده به هر لایه موضوعی در رتبه زیر کلاس‌های آن ضرب می‌شود و متعاقباً این محصولات در تمام لایه‌ها یکپارچه می‌شوند. وزن‌های ویژه لایه‌های موضوعی و زیر کلاس‌های آنها در جدول ۵ به تفصیل آمده است. شاخص پتانسیل آب زیرزمینی (GWPI)، مشتق شده از معادله (۱۲)، در نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی (شکل ۷) ارائه شده است. این تجمیع نه عامل تأثیرگذار منجر به طبقه‌بندی GWPZها به پنج دسته مجزا می‌شود: پتانسیل بسیار خوب، خوب، متوسط، ضعیف و بسیار ضعیف. منطقه بالقوه «بسیار خوب» با شرایط سنگ‌شناسی و

زمین‌شناسی مطلوب همراه با تراکم زهکشی کم و شیب‌های ملایم مشخص می‌شود که قابلیت‌های نفوذ را به ویژه در بخش‌های صاف و پایین دست حوضه افزایش می‌دهد. جدول ۶ که درصدهای مساحت هر کلاس پتانسیل آب زیرزمینی را نشان می‌دهد، نشان می‌دهد که این پهنه تقریباً ۲۰ درصد از کل منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد.

مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی بسیار خوب و خوب که به ترتیب حدود ۱۹/۹۸ درصد و ۲۰/۴۵ درصد از مساحت را پوشش می‌دهند، در سازندهای زمین‌شناسی نهشته‌های آبرفتی و کنگلومراهای کنونی قرار دارند. این پهنه‌ها که با واحدهای ژئومورفولوژی دشت‌های آبرفتی و دشت‌های مخروط افکنه مشخص می‌شوند، بیشتر تحت تأثیر عواملی مانند تراکم کم زهکشی، شیب و ارتفاع کم، تراکم پوشش گیاهی و کاربری اراضی کشاورزی قرار دارند. این شرایط شرایط ایده‌آلی را برای نفوذ آب به زیرسطح فراهم می‌کند و در نتیجه منابع آب زیرزمینی را تقویت و توسعه می‌دهد. برعکس، مناطق شرقی حوضه، به دلیل تراکم زهکشی بالا تحت تأثیر ارتفاع و شیب زیاد همراه با سنگ‌شناسی عمدتاً غیر قابل نفوذ، پتانسیل آب زیرزمینی بسیار ضعیفی را نشان می‌دهند، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است. به طور مشابه، مناطق حاشیه‌ای غربی منطقه مورد مطالعه بسیار نشان می‌دهد. پتانسیل ضعیف آب زیرزمینی به دلیل غلبه سنگ‌شناسی مخلوط رنگارنگ با نفوذپذیری کم. در مجموع، پهنه‌های با پتانسیل متوسط، ضعیف و بسیار ضعیف به ترتیب تقریباً ۲۰/۱۹، ۲۰/۸۵ و ۱۸/۵۳ درصد از مساحت حوزه آبخیز گوهرکوه را تشکیل می‌دهند. به طور کلی، منطقه مورد مطالعه عمدتاً پتانسیل بسیار خوب، خوب و متوسطی را برای آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده نیاز به استراتژی‌های مدیریت یکپارچه آب است که تامین آب خانگی، نیازهای آب زیست‌محیطی، کشاورزی و صنعت را مورد توجه قرار می‌دهد.



نتیجه گیری

در این تحقیق، تکنیک‌های RS، GIS و MCDM در یک فرآیند چهار مرحله‌ای ساختاریافته برای ارزیابی GWPZs در دشت گوهرکوه، واقع در قسمت جنوب شرقی خشک‌ترین حوضه زهکشی ایران، کویر لوت، مورد استفاده قرار گرفتند. این فرآیند مستلزم جمع‌آوری داده‌های جامع، پردازش دقیق RS و GIS، استخراج وزن‌ها با استفاده از AHP، و تجزیه و تحلیل همپوشانی برای شناسایی GWPZها بود که به اعتبارسنجی مدل ختم شد. چالش ناشی از کمبود داده‌های منطقه‌ای در لایه‌های موضوعی مهم با استفاده استراتژیک از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک‌های پردازش RS مورد بررسی قرار گرفت. استفاده از روش AHP برای ارزیابی معیارها نشان داد که نه عامل منتخب - سنگ‌شناسی، زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، شیب شیب، DEM، شاخص پوشش گیاهی، تراکم خطواره، LULC و بارندگی سالانه - ۲۸٪، ۲۳٪، ۱۵٪ کمک کردند. ۱۲٪، ۱۱٪، ۵٪، ۳٪، ۲٪ و ۱٪ به مدل‌سازی پتانسیل آب زیرزمینی. CR ۰,۰۹۴ به دست آمد که نشان دهنده درجه قابل قبولی از سازگاری در قضاوت‌های متخصص در مورد وزن این معیارها و زیر کلاس‌های آنها مطابق با روش AHP است.

نتایج شاخص همپوشانی وزنی در پنج دسته بالقوه متمایز بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم طبقه‌بندی شد. مشخص شد که مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی بسیار بالا، که کمتر از ۲۰ درصد از منطقه مورد مطالعه را در بر می‌گیرد، عمدتاً در مناطق کم ارتفاعی قرار دارند که با حداقل تراکم زهکشی و شیب ملایم، به ویژه در اطراف رسوبات آبرفتی اخیر مشخص می‌شوند. این امر با

تمرکز متراکم فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری قابل‌توجه از منابع آب زیرزمینی مشهود است، همانطور که تعداد بالای چاه‌های عملیاتی در این مناطق نشان می‌دهد. برعکس، مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی بالا و متوسط، که ۲۰/۴۵ درصد و ۲۰/۱۹ درصد از مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند، توزیع پراکنده‌تری از خود نشان دادند. این پهنه‌ها عموماً در حاشیه مناطق با پتانسیل بسیار بالا و در دامنه‌های کوهپایه‌ای واقع شده‌اند، الگویی که توسط سکونتگاه‌های پراکنده روستایی که در دامنه‌های شرقی حوضه گوهرکوه به باغداری مشغول هستند، برجسته می‌شود. مناطق باقی‌مانده که با رخنمون‌های صخره‌ای غیرقابل نفوذ، زمین شیب‌دار، پوشش گیاهی کم و تراکم زهکشی بالا مشخص می‌شوند، دارای پتانسیل آب زیرزمینی ضعیف تا بسیار ضعیف هستند. این مناطق به ترتیب ۲۰/۸۵ درصد و ۱۸/۵۳ درصد از مساحت حوضه را پوشش می‌دهند که عمدتاً در لبه‌های شرقی، مرکزی و غربی حوضه دیده می‌شوند. تجزیه و تحلیل بصری توزیع فضایی چاه‌های استخراج آب زیرزمینی در حوضه نشان داد که ۶۰٪ از چاه‌ها در منطقه با پتانسیل بسیار بالا، ۲۰٪ در منطقه با پتانسیل بالا و بقیه در سایر مناطق بالقوه قرار دارند. حفاری ۴۰ حلقه چاه با عمق بیش از ۵۰ متر که هر یک با دبی بیش از ۲۰ لیتر در ثانیه در مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی بسیار بالا هستند، صحت نقشه برداری پتانسیل آب زیرزمینی در دشت گوهرکوه را اثبات می‌کند. علاوه بر این، اعتبار کمی نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی، با استفاده از منحنی ROC با مقدار $AUC = 0.815$ ، دقت پیش‌بینی بالای مطالعه را تأیید می‌کند.

این تحقیق کمک‌های قابل توجهی به مدیریت موثر منابع آب زیرزمینی ارائه می‌دهد. تعیین مناطق با توجه به پتانسیل آب زیرزمینی آنها - از بسیار کم تا خیلی زیاد - راه را برای تدوین استراتژی‌های هدفمند برای کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی و بهبود شیوه‌های مدیریت منابع هموار می‌کند. نظارت مؤثر بر سفره‌های زیرزمینی موجود و اکوسیستم‌های مشابه برای برآوردن نیازهای آبی منطقه مورد نظر در آینده قابل پیش‌بینی، جلوگیری از تخلیه بیشتر این منابع حیاتی و ترویج توسعه پایدار بسیار مهم است. مدل مفهومی مورد استفاده در این مطالعه ثابت کرده است که در پرداختن به اهداف خاص این تحقیق ماهر است و کارایی و کاربرد آن را در زمینه مدیریت آب‌های زیرزمینی نشان می‌دهد.