



مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

پژوهش‌های آب‌بخیزداری

شاپا: ۲۹۸۱-۲۰۳۸



مراکز تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

بهینه‌سازی شبکه پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های آماری و MCDM

- حمید غلامی^{۱*}، شهرام گلزاری^۲، علی‌اکبر محمدی‌فر^۳، حوریه زحمتکش^۴، مریم زارع^۵
- ۱- استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران و دانشیار هسته پژوهشی یادگیری عمیق، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
۳- پژوهشگر پسا دکتري گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران
۴ و ۵- کارشناس شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان، بندرعباس، هرمزگان، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

آب‌های زیرزمینی در تأمین نیازهای جوامع در بخش‌های گوناگون شرب، صنعت و کشاورزی و غیره نقش مهمی دارد. اهمیت این منابع حیاتی، در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کاهش نزولات جوی مواجه هستند، دوچندان است. زیرا، در این مناطق آبخوان‌ها به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تأمین آب جوامع به‌شمار می‌آیند. همچنین، به‌دلیل موقعیت مکانی این منابع در مناطق ساحلی، با اثرات زمینی و تغییرات آب و هوایی دریایی مواجه هستند و هم‌زمان نیز تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی می‌باشند. از این‌رو، آگاهی از ویژگی‌های کمی و کیفی سفره‌های آب زیرزمینی و پایش آن‌ها موضوع بسیار ضروری تلقی می‌شود. پایش پیوسته شبکه آب زیرزمینی مستلزم صرف هزینه، وقت، کار و نیروی انسانی است و بهینه‌سازی شبکه پایش می‌تواند راهکار مفیدی برای کاهش مشکلات نامبرده باشد. بنابراین، پژوهش با هدف بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی در دشت گهکیم سعادت‌آباد استان هرمزگان با استفاده از روش‌های آماری اجرا شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا با استفاده از بررسی منابع، دستورالعمل‌های وزارت نیرو و استفاده از دیدگاه خبرگان آب زیرزمینی، ۹ معیار (میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی، میانگین سالانه افت آب زیرزمینی، هدایت آبی، تراکم چاه‌های

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، نشانی الکترونیکی: Hgholami@hormozgan.ac.ir

استناد: غلامی، ح.، گلزاری، ش.، محمدی‌فر، ع.ا.، زحمتکش، ح.، زارع، م. ۱۴۰۴. بهینه‌سازی شبکه پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های آماری و MCDM. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۸(۲): ۳۸-۶۱.

شناسه دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2024.367105.1595

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۴۷، تابستان ۱۴۰۴، صفحه‌های ۳۸ تا ۶۱.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



بهره‌برداری، فاصله از رود، سازند زمین‌شناسی، کاربری زمین، فاصله از گسل و فاصله از چشمه و قنات) انتخاب شدند. سپس، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، هر کدام از معیارها وزن‌دهی شدند و نقشه مربوط به هر یک از آن‌ها برای انجام فرایند مکان‌یابی تهیه شد. در این پژوهش، به‌منظور اجرای فرایند مکان‌یابی چاه‌های مشاهده‌ای از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS و WASPAS استفاده شد. سپس، به‌منظور ارزیابی شبکه پایش کنونی با نتایج مکان‌یابی، شبکه تیسن مربوط به هر آبخوان رسم شد. همچنین، میانگین امتیاز نقشه‌های مکان‌یابی در هر پلیگون تیسن به‌دست آمد. برای هر چاه و هر پلیگون، چاه‌هایی که میانگین امتیاز کمتر از $0/3$ داشتند، به‌عنوان چاه‌های نامناسب انتخاب شدند. سپس، به‌منظور اطمینان از صحت انتخاب چاه‌های نامناسب، آزمون همگنی پتیت و استاندارد بهنجارداده‌های آب زیرزمینی در چاه‌های نامناسب، اجرا شد. در گام بعد برای مشخص کردن اهمیت نسبی ۴۰ چاه موجود در منطقه از روش تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد و چاه‌های با اهمیت نسبی کم، حذف شدند. سپس، برای آگاهی از اندازه خطای استاندارد ناشی از حذف چاه‌ها، از روش درون‌یابی کریجینگ استفاده شد. سرانجام، به‌منظور گروه‌بندی چاه‌ها با ویژگی‌های مشابه، عمل خوشه‌بندی آن‌ها انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج وزن‌دهی معیارها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی نشان داد که از میان ۹ معیار استفاده شده در پژوهش، معیار تراکم چاه‌های بهره‌برداری با وزن $0/217$ و معیار فاصله از گسل با وزن $0/31$ به‌ترتیب رتبه اول و آخر را به‌دست آورده‌اند. مقایسه مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای فرایند مکان‌یابی نیز بیانگر دقت یکسان هر دو مدل TOPSIS و WASPAS بود. از این‌رو، نقشه میانگین دو مدل تهیه شد و برای انجام گام‌های بعدی پژوهش استفاده شد. بر پایه نتایج ارزیابی شبکه پایش کنونی با نتایج مکان‌یابی (شبکه بهینه)، تعداد ۳ چاه به‌عنوان چاه‌های نامناسب شناسایی شد. همچنین، بر اساس اندازه ارزش P value مربوط به آزمون پتیت و آزمون استاندارد بهنجار، مشخص شد که هر سه چاه به‌عنوان چاه‌های ناهمگن به‌درستی انتخاب شده‌اند. بر اساس یافته‌های به‌دست‌آمده از روش PCA نیز تعداد ۶ چاه (شماره ۸، ۹، ۱۵، ۱۰، ۳۲ و ۳۷) در گروه چاه‌های با اهمیت نسبی منفی بودند که این تعداد چاه حذف شدند. اندازه خطای استاندارد پس از حذف چاه‌های کم اهمیت، 14% افزایش یافت و تفاوت محسوسی ایجاد نشد. از این‌رو، بر اساس نتایج این پژوهش، می‌توان چاه‌های کم اهمیت را از شبکه پایش حذف کرد. همچنین، ۴۰ چاه موجود در دشت گهک سعاد آباد درون ۵ خوشه، طبقه‌بندی شدند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف اصلی این پژوهش، بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی از دیدگاه کمی و کیفی با استفاده از مدل‌های آماری و MCDM بود. نتایج بیانگر کارایی و دقت زیاد روش‌های MCDM بود. بر اساس نقشه مکان‌یابی تولیدشده به‌وسیله مدل‌های نامبرده برای چاه‌های مشاهده‌ای، منطقه مطالعه‌شده در ۵ گروه از اولویت بسیار کم تا اولویت بسیار زیاد طبقه‌بندی شد. از این‌رو، مدیران آبخیز می‌توانند از یافته‌های این پژوهش برای توسعه شبکه پایش و صدور مجوزهای جدید برای حفر چاه‌های جدید در مکان‌های مناسب و نامناسب استفاده کنند. همچنین، با توجه به اهمیت پایش آب در مناطق ساحلی، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای دیگر دشت‌های استان هرمزگان، نیز پیشنهاد می‌شود. به‌منظور مقایسه روش‌های گوناگون آماری، آب‌ساختی و داده‌کاوی مانند مدل‌های یادگیری ماشینی، استفاده هم‌زمان از آن‌ها در پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر، در پژوهش‌های آینده برای ساخت شبکه پایش آب زیرزمینی، استفاده از معیارهای مؤثر دیگری مانند معیارهای تحلیل اقتصادی و هزینه ساخت شبکه پایش، معیارهای فاصله و مجاورت با دریا و معیارهای فاصله و نزدیکی به مسیرهای ارتباطی نیز پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی

آب‌های زیرزمینی، پایش، گهک سعاد آباد، مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

مقدمه

اهمیت وجود آب های زیرزمینی، به عنوان منابع محدود آب شیرین در مناطق خشک و نیمه خشک، حیاتی است. زیرا، در این مناطق رویدادهای تغییرات آب و هوایی، مانند خشکسالی های طولانی مدت، بخش جدایی ناپذیر برنامه ریزی استفاده از آب هستند (طاهری و همکاران ۲۰۲۰). نگرانی های مدیریت این منابع فقط مصرف و استخراج آب نیست، بلکه نظارت پیوسته بر کیفیت آب، از جمله آلودگی های طبیعی یا انسانی را نیز شامل می شود (طاهری و همکاران ۲۰۲۰). پایش آب های زیرزمینی و جمع آوری داده ها پیش نیاز مدیریت مؤثر منابع نامبرده است.

شاخص های اصلی استفاده شده در توسعه، مدیریت و برنامه ریزی آب های زیرزمینی، سطح و کیفیت آب زیرزمینی می باشد. این دو متغیر به عنوان شاخص هایی برای وضعیت یک منبع آب زیرزمینی استفاده شده اند و تعادل میان آب دهی های آن و تغذیه ها را منعکس می کنند (الزوباری و همکاران ۲۰۲۳). پایش بلندمدت بدون توجه به بهینه سازی، سبب افزایش هزینه می شود. از این رو، طراحی شبکه پایش منابع آب باید بر اساس اهداف مشخص و از پیش تعیین شده باشد (پیرسون و همکاران ۲۰۱۱). شبکه های پایش آب زیرزمینی اهمیت به سزایی دارند و طراحی شبکه پایش کمی و کیفی آب های زیرزمینی یک گام ضروری در تشریح وضعیت سفره آب زیرزمینی است. اطلاعات استخراج شده از یک شبکه پایش با طراحی صحیح باید نماینده ای قابل اعتماد از وضعیت کمی و کیفی آبخوان مطالعه شده باشد (پیرسون و همکاران ۲۰۱۱). در حالت کلی پایش آب های زیرزمینی به دو روش آماری و زمین شناسی انجام می شود (هلنا و همکاران ۲۰۰۰). روش های پیشرفته مانند زمین آمار، شبکه عصبی و دستورالعمل ژنتیک مثال هایی از روش آماری است که بر پایه روش های شبیه سازی، تحلیل پراکنش و احتمالاتی می باشند. از سوی دیگر، روش های زمین شناسی است که بر پایه اطلاعات کمی و کیفی زمین شناسی و آب های زیرزمینی استوار است (لوکاس و جوزین ۲۰۰۸). روش های داده کاوی

به عنوان سومین روش در پایش شبکه های آب زیرزمینی استفاده می شوند. روش های داده کاوی اطلاعات مربوط به نمونه ها را جمع آوری می کنند، تعمیم می دهند و برای آن ها تصمیم گیری می کنند (دمیرسی و همکاران ۲۰۲۱). به منظور مدیریت کارآمد کیفیت آب زیرزمینی، ابتدا باید مناطقی که منابع آب زیرزمینی زیاد و قابل توسعه دارند، بررسی شوند. برآورد و پیش بینی دقیق ویژگی های تولید آب زیرزمینی برای استفاده بهینه و مدیریت نظام مند منابع آب زیرزمینی ضروری است. برای به دست آوردن اندازه گیری های دقیق، روش های اکتشاف سنتی استفاده شده برای عامل های گوناگون مرتبط با آب های زیرزمینی، همراه با تعاملات پیچیده آن ها باید در نظر گرفته شود. این روش به زمان، هزینه و نیروی انسانی قابل توجهی برای پژوهش های میدانی نیاز دارد. افزون بر این، وجود آب های زیرزمینی در یک منطقه ویژه به عامل های فهرست بندی شده در کلان داده ها مانند پستی بلندی، ساختارهای زمین شناسی، سنگ شناسی، تراکم شکست، اتصال، شیب، ظرفیت آب زیرزمینی و تغییرات این عامل ها بر اساس شرایط اقلیمی بستگی دارد (لی و همکاران ۲۰۱۹). اگرچه می توان با روش های فیزیکی سطح آب های زیرزمینی را محاسبه کرد، اما محدودیت های عملی در استفاده از آن ها وجود دارد (دمیرسی و همکاران ۲۰۲۱).

به روش های تصمیم گیری چندمعیاره به عنوان یکی از ابزارهای مدیریتی امروزه بسیار توجه شده است. از مزایای این روش ها می توان به قابلیت استفاده در تحلیل و پشتیبانی تصمیمات گوناگون حتی در شرایطی که اهداف چندگانه و متناقض وجود دارد، اشاره کرد (سوری و همکاران ۲۰۱۷). استفاده از مدل های تصمیم گیری چندمعیاره در زمینه مدیریت و پایش کمی و کیفی آب های زیرزمینی به وسیله محققان، نتایج ارزشمندی به همراه داشته است. در دهه های گذشته انواع گوناگونی از این مدل ها توسعه یافته است که هر یک از آن ها ساختار و دامنه کاربرد متفاوتی دارند. در این مدل ها از رویکرد منطقی

را برای محافظت از سلامت انسان پیشنهاد کردند. بوت و همکاران (۲۰۲۳) در ارزیابی وضعیت کیفیت آب‌های زیرزمینی در دشت ساحلی غیس نکور از ترکیب روش‌های آماری و ابزارهای نقشه برداری GIS استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که آنیون‌های محلول مهم ارزیابی‌شده در آب‌های زیرزمینی منطقه نامبرده در دامنه معیارهای تعیین‌شده برای مصرف انسانی، نیست. حسین و همکاران (۲۰۲۴) منابع آب زیرزمینی برای تأمین آب آشامیدنی در منطقه حومه شهری داکا، بنگلادش را از نظر کمی و کیفی ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد بیشترین نرخ کاهش سطح آب زیرزمینی (۱/۱۸ متر در سال) نزدیک مناطق صنعتی بود و بیشترین تغذیه آب زیرزمینی (۴۸۰ میلی‌متر در سال) در زمین‌های کشاورزی روستایی و کمترین تغذیه (۲۲۰ میلی‌متر در سال) در مناطق شهری بود. همچنین تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی و نتایج خوشه‌بندی سلسله مراتبی این پژوهش نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی تحت تأثیر تعامل سنگ-آب و مداخلات انسانی است. در پژوهشی رجائیان و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی را با استفاده از MODFLOW و MT3DMS در آبخوان هشگرد، ایران بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد با مسدود کردن چاه‌های غیرمجاز و اصلاح پروانه چاه‌های مجاز، میانگین ذخیره‌سازی ۷/۲۳ میلیون مترمکعب در سال افزایش یافت و غلظت نیترات و سولفات ۰/۰۶ و ۱/۱۴ میلی‌گرم کاهش یافت. نتایج پژوهش‌های نامبرده بیانگر آن است که بیشتر پژوهش‌ها در زمینه ارزیابی کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی آبخوان‌ها اجرا شده است و به بهینه‌سازی تعداد چاه‌های آب زیرزمینی کمتر توجه شده است. از سوی دیگر، بهینه‌سازی آبخوان‌ها می‌تواند در کاهش هزینه و صرفه‌جویی در زمان و سهولت دستیابی به پایش کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی نقش مهمی ایفا کند. ازاین‌رو، این پژوهش با هدف بهینه‌سازی شبکه پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت گهکیم سعادت آباد انجام شد.

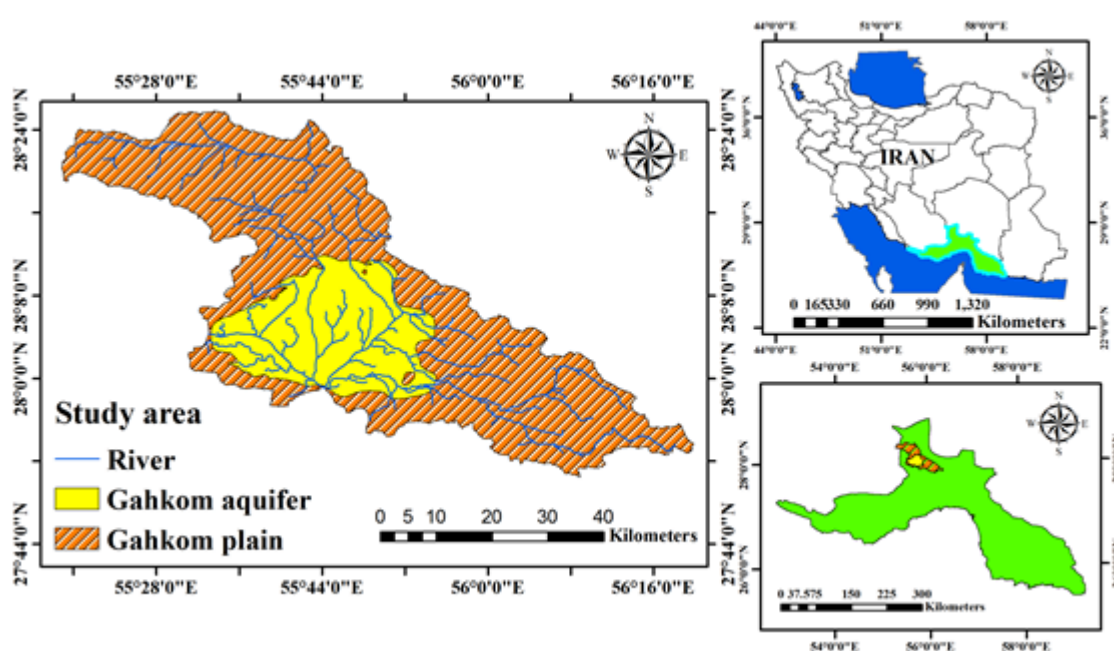
و ساختاریافته برای مدل‌سازی مسائل تصمیم‌گیری پیچیده استفاده می‌کنند و با استفاده از آنها می‌توان با در نظر گرفتن معیارهای پرشمار کمی و کیفی، بهترین گزینه را از میان چندین گزینه انتخاب کرد. (حاجی‌زادگان ۲۰۱۵). منابع آب زیرزمینی در مناطق ساحلی که معمولاً به‌عنوان مرکز توسعه اجتماعی و اقتصادی در نظر گرفته می‌شوند، اهمیت زیادی دارند. زیرا، توسعه اجتماعی و اقتصادی در این مناطق وابسته به در دسترس بودن منابع آب است (هان و کورل ۲۰۲۱). همچنین، در مناطق ساحلی به‌دلیل موقعیت مکانی این منابع، با اثرات زمینی و تغییرات آب و هوایی دریایی مواجه هستند و هم‌زمان نیز تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی می‌باشند (ریچاردسون و همکاران ۲۰۲۴). استان هرمزگان به‌عنوان یکی از مناطق ساحلی کشور جز اقلیم‌های خشک و کم باران به‌شمار می‌آید. از آنجایی که در تأمین آب لازم برای انسان در مصارف گوناگون، آبخوان‌ها نقش مهمی دارند، ازاین‌رو، اهمیت پایش آب‌های زیرزمینی در این مناطق دوچندان است. تاکنون پژوهش‌های پرشماری در زمینه پایش آب‌های زیرزمینی انجام شده است. در این راستا، استادعلی‌عسکر و شایان‌نژاد (۲۰۲۱) در بررسی تغییرات سطح و کیفیت آب زیرزمینی در سفره آبخوان اصفهان-برخوار دریافتند، در نواحی پیرامون دریاچه در بخش‌های مرکزی به‌دلیل تبخیر آبخوان برخوار-اصفهان و ساختار زمین‌شناسی منطقه، غلظت TDS به‌مراتب بیشتر بود و از سوی دیگر، هم در دوره خشک‌سالی و هم به‌دلیل افزایش بهره‌برداری از چاه‌های آبکشی، سطح آب سالانه ۰/۵ تا ۰/۱ متر بر ثانیه کاهش یافت و باعث نابودی سفره آب زیرزمینی شد. در هند، راویندرا و همکاران (۲۰۲۳) کیفیت آب زیرزمینی را به‌منظور ارزیابی سطوح آلودگی با استفاده از روش‌های WPI و WQI در بخشی از منطقه گونتور پایش و بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد کیفیت این آب زیرزمینی برای مصارف شرب مناسب نیست. ازاین‌رو، این پژوهشگران اقدام‌های پیشگیرانه (تأمین آب آشامیدنی سالم، نمک‌زدایی، فلوریداسیون، نیترات‌زدایی، مواد غذایی کلسیم و برداشت آب باران)

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه شده

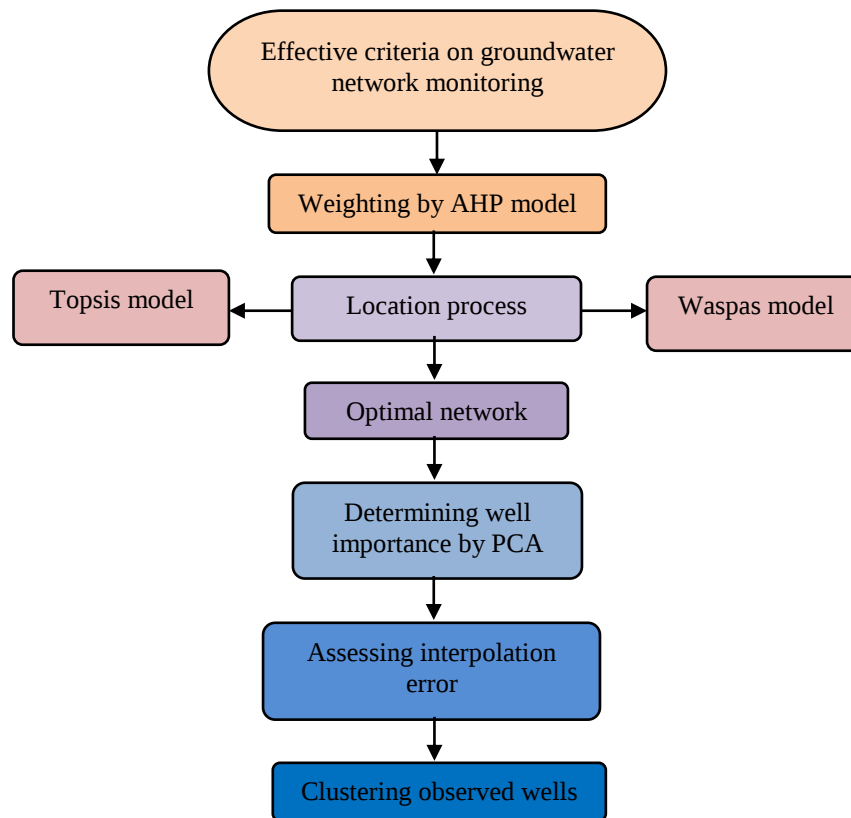
منطقه گهکم سعادت‌آباد با کد ۲۷۱۱ در شرق آبخیز کل- مهران و جزایر خلیج فارس است. مساحت این محدوده ۲۳۸۲/۶ کیلومتر مربع است که ۱۶۳۸/۱ کیلومتر مربع از آن در بلندی‌ها و ۷۴۴/۵ کیلومتر مربع در دشت است. مساحت آبخوان این محدوده

۶۱۰/۴ کیلومتر مربع شامل دو آبخوان گهکم سعادت‌آباد و سیرمند است. اندازه میانگین سالانه بارش در آبخوان ۲۳۴ میلی‌متر و اندازه تبخیر در این محدوده در طبقه ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰ میلی‌متر است (نگارندگان). موقعیت منطقه مطالعه‌شده در شکل ۱ و روندنمای پژوهش در شکل ۲ نشان‌داده شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه‌شده در استان هرمزگان و ایران.

Figure 1- Location of study area in the Hormozgan Province and Iran.



شکل ۲- روندنمای پژوهش.

Figure 2- Research diagram.

روش پژوهش

انتخاب و وزن‌دهی معیارها با استفاده از روش تحلیل

سلسله مراتبی

استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری نیازمند تعیین معیارهای تأثیرگذار بر فرایند مکان‌یابی می‌باشد. در این پژوهش، پس از بررسی پژوهش‌های پیشین و دستورالعمل‌های وزارت نیرو و استفاده از دیدگاه خبرگان آب زیرزمینی، ۹ معیار شامل: میانگین سالانه سطح آب زیرزمینی، میانگین سالانه افت آب زیرزمینی، هدایت آبی، تراکم چاه‌های بهره‌برداری، فاصله از رود، سازند زمین‌شناسی (جدول ۱)، کاربری زمین، فاصله از گسل و فاصله از چشمه و قنات انتخاب شدند. سپس، برای فرایند وزن‌دهی، نقشه هر یک از آن‌ها تهیه شد. در این پژوهش از روش AHP برای وزن‌دهی عامل‌ها استفاده شد. از روش AHP در زمینه مسائل مربوط به آب‌های زیرزمینی به‌طور فراوانی

استفاده می‌شود که نتایج قابل قبولی به‌همراه دارد. در این روش ابتدا پرسش‌نامه‌ها به‌وسیله افراد واجد شرایط تکمیل می‌شود. سپس، تصمیم‌گیرنده برای هر جفت از عامل‌های درگیر، مقایسه انجام می‌دهد. در این گام، ابتدا به‌شکل توصیفی و در گام بعد به‌شکل کمی (بر اساس جدول ۲) در ۹ مقیاس مقایسه انجام می‌شود (ساعتی ۲۰۰۰). سرانجام، از نتایج مقایسه انجام‌شده، ماتریس باینری به‌دست می‌آید و وزن معیارها که اعدادی نسبی هستند، با قضاوت‌های شفاهی که به‌شکل شفاهی، عددی یا گرافیکی انجام شده‌اند، به‌دست می‌آید (خیرخواه‌زرکش ۲۰۰۵). در پایان، نتایج مقایسه‌ها برای محاسبه شاخص ناسازگاری به نرم‌افزار Expert Choice وارد می‌شود. اگر شاخص ناسازگاری کمتر از ۰/۱ باشد، نتایج قابل قبول است و غیر از آن در وزن‌دهی تجدیدنظر می‌شود (ساعتی ۲۰۰۰).

جدول ۱- توصیف سازندهای زمین‌شناسی در منطقه مطالعه‌شده.

Table 1- Descriptions of the lithology formations in the study area.

GEO-UNIT	Description	Age
EOas-ja	Undivided Asmari and Jahrum Formation, regardless to the disconformity separates them	Paleocene-Oligocene
Mmn	Low weathering gray marls alternating with bands of more resistant shelly limestone (MISHANFM)	Miocene
MuPlaj	Brown to grey, calcareous, feature-forming sandstone and low weathering, gypsum- veined, red marl and siltstone (AGHAJARIFM)	Miocene
OMr	Red, grey, and green silty marls interbedded with subordinate silty limestone and minor sandstone ribs (RAZAKFM)	Oligocene-Miocene
Plbk	Alternating hard of consolidated, massive, feature forming conglomerate and low -weathering cross bedded sandstone (BAKHTYARIFM)	Pliocene
Qft2	Low level Piedmont fan and Valley terrace deposits	Quaternary
pC-Ch	Rock salt, gypsum & blocks of contorted masses of sedimentary material such as black laminated fetid limestone, brown cherty dolomite, red sandstone & variegated shale in association with igneous rocks such as diabase, basalt, rhyolite and trachyte	PreCambrian-Cambrian

جدول ۲- اندازه‌های عددی قضاوت‌های کلامی برای مقایسه‌های زوجی.

Table 2- Numerical values of verbal judgments for pairwise comparisons.

Preferences (Verbal Judgments)	Numerical Value
Absolutely more preferred/important/desirable	9
Very strongly preferred/important/desirable	7
Strongly preferred/important/desirable	5
Slightly more preferred/important/desirable	3
Equally preferred/important/desirable	1
Intermediate preferences	2, 4, 6, and 8

اجرای مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

انواع گوناگونی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) وجود دارد که در دهه‌های گذشته به‌وسیله پژوهشگران پرشماری توسعه یا بهبود یافته‌اند. تفاوت‌های اصلی این روش‌ها به سطح پیچیدگی دستورالعمل‌ها، روش‌های وزن‌دهی برای معیارها، شیوه نمایش معیارهای ارزیابی ترجیحات، امکان نامشخص داده‌ها و نوع تجمیع داده‌ها مربوط می‌شود (باچکیویچ و همکاران ۲۰۲۱، طاهر دوست و معدنچی ۲۰۲۳). در این پژوهش از دو مدل TOPSIS و WASPAS استفاده شد. از این‌رو، پس از محاسبه وزن معیارها و تهیه نقشه‌های رستری، ماتریس تصمیم‌گیری برای اجرای مدل‌های نامبرده آماده شد.

در این پژوهش بر خلاف دیگر پژوهش‌های تکراری محاسبات بر اساس پیکسل‌ها انجام شد و پیکسل‌ها به‌عنوان گزینه‌های مدل‌ها در نظر گرفته شدند. بر این اساس در آبخوان گهکم سعادت‌آباد تعداد ۷۶۵۰۴ پیکسل برای رتبه‌بندی به‌کار برده شد. همچنین، با توجه به تعداد زیاد گزینه‌ها از زبان برنامه‌نویسی پایتون برای اجرای مدل‌ها استفاده شد.

مدل TOPSIS

مدل TOPSIS یکی از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است و بر این مفهوم استوار است که جایگزین انتخاب‌شده باید کوتاه‌ترین فاصله هندسی را از راه حل ایده‌آل مثبت و طولانی‌ترین فاصله هندسی را از راه حل ایده‌آل منفی داشته باشد (لی و همکاران ۲۰۲۲). در این پژوهش گام‌های اجرای این مدل

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (7)$$

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (8)$$

اندازه (C_i^*) میان ۰ و ۱ متغیر است. عدد ۱ بیانگر بیشترین رتبه و عدد صفر بیانگر پایین‌ترین رتبه است (قهرمان و همکاران ۲۰۰۷).

مدل WASPAS

مدل WASPAS یکی از روش‌های جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در وظایف تصمیم‌گیری پیچیده بسیار کارآمد است. این روش به‌ندرت در پژوهش‌های مدیریت منابع آب استفاده شده است و از ترکیب مدل مجموع وزنی (WSM) و مدل محصول وزنی (WPM) تشکیل شده است که دقت و قابلیت رتبه‌بندی بهتری در مقایسه با دو مدل دارد. (زاوادسکاس و همکاران ۲۰۱۲، بیات و همکاران ۲۰۲۲).

گام‌های این مدل به شرح زیر بود (قربابی و همکاران ۲۰۱۶، دوسی و همکاران ۲۰۱۸).

گام اول: ماتریس تصمیم اولیه ایجاد شد.

گام دوم: ماتریس تصمیم‌گیری بهنجار شده خطی برای معیارها با استفاده از رابطه‌های ۹ و ۱۰ محاسبه شد.

$$\bar{K}_{ij} = \frac{K_{ij}}{\max_j K_{ij}} \quad (9)$$

$$\bar{K}_{ij} = \frac{\min_j K_{ij}}{K_{ij}} \quad (10)$$

$\bar{K}_{ij}$: اندازه بهنجار شده K_{ij} است.

گام سوم: محاسبه (L_j^1) VSM و (L_j^2) VPM برای هر جایگزین با استفاده از رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ انجام شد.

$$L_j^1 = \sum_{i=1}^m w_i \bar{K}_{ij} \quad (11)$$

$$L_j^2 = \prod_{i=1}^m (\bar{K}_{ij})^{w_i} \quad (12)$$

W_i : وزن (اهمیت نسبی) معیار i است.

به شرح زیر بود (سو و همکاران ۲۰۱۶، سان و همکاران ۲۰۲۰).

گام اول: با استفاده از رابطه ۱ ماتریس تصمیم ایجاد شد.

(۱)

$$A = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & \dots & F_j & \dots & F_n \\ \begin{matrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_i \\ \vdots \\ M_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1j} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2j} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{i1} & C_{i2} & \dots & C_{ij} & \dots & C_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mj} & \dots & C_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

M_i : نمونه i ام ($i=1, 2, \dots, m$), F_j : عامل j ام ($j=1, 2, \dots, n$), C_{ij} : اندازه‌های عملکرد هر یک از M_i با سنج F_j مربوطه است.

گام دوم: رابطه استاندارد برای شاخص مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از رابطه ۲ و ۳ تعیین شد.

(۲)

$$X_{ij} = (Z_{ij} - \min(Z_j)) / (\max(Z_j) - \min(Z_j)) \quad (3)$$

$$X_{ij} = (\max(Z_j) - Z_{ij}) / (\max(Z_j) - \min(X_j)) \quad (4)$$

X_{ij} : آیین هدف ارزیابی ($i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$) اندازه شاخص بهنجار شده آیین شاخص ارزیابی، و Z_{ij} : اندازه داده اصلی شاخص است.

گام سوم: راه حل ایده‌آل مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵ تعیین شد.

$$Y_j^+ = \max(X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jn}) \quad (4)$$

$$Y_j^- = \min(X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jn}) \quad (5)$$

راه حل ایده‌آل مثبت:

$$(Y_j^+ = (Y_1^+, Y_2^+, \dots, Y_m^+))$$

راه حل ایده‌آل منفی:

$$(Y_j^- = (Y_1^-, Y_2^-, \dots, Y_m^-))$$

گام چهارم: فاصله هر راه حل تا راه حل ایده‌آل مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه شد. سرانجام رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از رابطه ۸ انجام شد.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^*)^2} \quad (6)$$

از عنصر i از جز اصلی j است. هر چه ضریب بیشتر باشد، اهمیت نسبی چاه بیشتر است (سانچز مارتوز و همکاران ۲۰۰۱). بر اساس دیدگاه پترسون (۲۰۰۱)، تعداد چاهها باید کمتر یا برابر با تعداد مشاهدهها که همان تعداد سالهای آماری است، باشد. در این پژوهش از آمار سالانه سطح آب زیرزمینی ۴۰ چاه در دشت گهک سعاد آباد استفاده شد. آخرین آمار در دسترس مربوط به اسفند ۱۴۰۰ بود. قبل از این تاریخ از هر کدام از چاهها تعداد ۴۰ برداشت سطح آب زیرزمینی برای تحلیل PCA انتخاب شد. به این ترتیب برای هر تحلیل مولفه اصلی تعدادی چاه به عنوان چاه مؤثر شناسایی شد. سرانجام، تعداد دفعاتی که هر چاه در تحلیل شرکت داده شد و همچنین تعداد دفعاتی که به عنوان چاه مؤثر شناسایی شد نیز مشخص شد. برای تعیین اهمیت نسبی هر چاه از رابطه ۱۵ استفاده شد (بذرافشان و گرکانی نژاد ۲۰۱۸).

$$\text{Relative important} = \frac{N}{n} \quad (15)$$

N : تعداد دفعاتی که هر چاه به عنوان چاه مؤثر در نظر گرفته می شود، n : تعداد دفعاتی که هر چاه در تحلیل شرکت داده شده است. سرانجام، اندازه خطای پایش برای حذف چاههای بی اثر با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه شد (بذرافشان و گرکانی نژاد ۲۰۱۸).

$$\text{Error} = \frac{(m_n - m_0)}{m_0} * 100 \quad (16)$$

m_n : میانگین اندازه حذف چاهها بر اساس اهمیت نسبی محاسبه شده، m_0 : میانگین اندازه همه چاههای موجود است.

بررسی اثر حذف چاههای کم اهمیت بر خطای درون یابی

برای تعیین اندازه خطای درون یابی پس از حذف چاههای کم اهمیت از روش کریجینگ استفاده شد. کریجینگ، روش درون یابی پیشرفته ای است که برای داده هایی که روندهای موضعی تعریف شده ای دارند، مناسب است. این روش با کمترین پراکنش، درون یابی را برآورد می کند و اندازه خطای آن تابع مشخصات واریوگرام (ساختار فضایی) است. معادله مدل در حالت کلی به شکل زیر است.

گام چهارم: معیار کل مدل WASPAS برای هر جایگزین با استفاده از رابطه ۱۳ به دست آمد.

$$L_j = (1 - \delta)L_j^2 + \delta L_j^1 \quad (13)$$

δ : سنجه مدل از ۰ تا ۱ است. هنگامی که $\delta = 0$ باشد مدل WASPAS به WSM و هنگامی که $\delta = 1$ باشد به VPM تبدیل می شود. سرانجام با توجه به کاهش (L_i) گزینه های جایگزین رتبه بندی شدند.

مقایسه شبکه پایش کنونی با نتایج مکان یابی (شبکه بهینه) و اجرای آزمون همگنی داده ها

در این گام برای ارزیابی شبکه پایش کنونی با نتایج مکان یابی، شبکه تیسن مربوط به هر آبخوان رسم شد. سپس، میانگین امتیاز نقشه های مکان یابی در هر پلیگون تیسن به دست آمد (مهتا و همکاران ۲۰۲۳). برای هر چاه و هر پلیگون، چاههایی که میانگین امتیاز کمتر از ۰/۳ داشتند به عنوان چاههای نامناسب در نظر گرفته شد. سپس، برای اطمینان از انتخاب درست چاههای نامناسب از آزمون های همگنی داده ها استفاده شد. برای انجام این آزمون ابتدا داده های ماهانه چاههای نامناسب تهیه شد و کمبود داده های آماری آنها با استفاده از همبستگی و وایزی برطرف شد. سرانجام، از دو روش آزمون همگنی شامل روش پتیت یا Petits و روش استاندارد بهنجار (SNHT) برای انجام آزمون همگنی استفاده شد (امامی و همکاران ۲۰۲۰). در این آزمون ها در شرایطی که Pvalue مشاهده شده کمتر از سطح معنی داری ۰/۰۵ باشد، داده ها غیر همگن می باشند.

مشخص کردن اهمیت چاهها با تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA)

در این پژوهش چاههای کم اهمیت با استفاده از روش PCA حذف شدند. PCA روشی است که با استفاده از آن بخش های اضافی موجود در داده ها حذف می شوند و در نتیجه داده ها به ابعاد مؤثر تبدیل می شوند (برو و اسمیلد ۲۰۱۴). در این روش برای محاسبه اهمیت هر چاه از ضریب همبستگی میان اجزای اصلی و داده های مشاهده شده استفاده شد.

$$\text{Cor}(Z_j, X_i) = \lambda_j^2 a_{i,j} \quad (14)$$

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (17)$$

$Z^*(X_i)$: ایار برآوردی، λ_i : وزن ایستگاه λ_m و $Z(X_i)$: اندازه متغیر اندازه‌گیری شده است (قهرودی تالی ۲۰۱۵). سعی واریوگرام، بر این اساس که خواص پدیده‌ها در مکان‌های نزدیک در مقایسه با فواصل دورتر شباهت بیش‌تری دارند، درجه همبستگی میان نقاط را اندازه‌گیری می‌کند (قهرودی تالی ۲۰۱۵). در یک واریوگرام در محور (X) فاصله میان نمونه‌ها و در محور (Y) مربع اختلاف میان اندازه یا پراکنش نمونه‌ها رسم می‌شود و هر نقطه در نمودار سعی واریوگرام موقعیتی از دو نقطه را نشان می‌دهد. اگر همبستگی فضایی میان داده‌ها وجود داشته باشد دو جفت به هم نزدیک در قسمت چپ محور (X) و پایین محور (Y) قرار می‌گیرند. همان‌طور که نقاط از هم دور می‌شوند به طرف راست محور (X) حرکت می‌کنند و به‌طور کلی مربع اختلافات بیشترشده و در سمت بالای محور (Y) قرار می‌گیرند. در این تحلیل نمونه‌های جفت با فاصله و جهت مشابه هستند که پراکنش مشابه نیز دارند که این رابطه ایستایی نامیده می‌شود. خودهمبستگی فضایی به فاصله میان نمونه‌های جفت وابسته است و با تغییر فاصله تغییر می‌کند که چنین تغییرات فضایی پایدار در خودهمبستگی را ایزوتروپی می‌نامند. امکان دارد که خودهمبستگی افزون بر تغییر فاصله، با تغییر جهت نیز تغییر کند. اثر تغییر جهت در سعی واریوگرام انیزوتروپی نامیده می‌شود (حکیم‌دوست و همکاران ۲۰۱۵). در این پژوهش از میان ۵ نوع واریوگرام خطی، خطی تا آستانه، کروی، نمایی و گوسی بهترین واریوگرام انتخاب شد و درون‌یابی در دو گام انجام شد. در گام اول با استفاده از تمام چاه‌ها درون‌یابی انجام شد. سپس، چاه‌های با اهمیت نسبی منفی حذف شدند و مجدد درون‌یابی انجام شد. سپس، ریشه دوم میانگین مربع خطا RMSE برای حالت‌های درون‌یابی محاسبه شد و درصد کاهش یا افزایش خطا با حذف چاه‌های کم‌اهمیت مشخص شد (اقبالیان و بهمنی ۲۰۲۰).

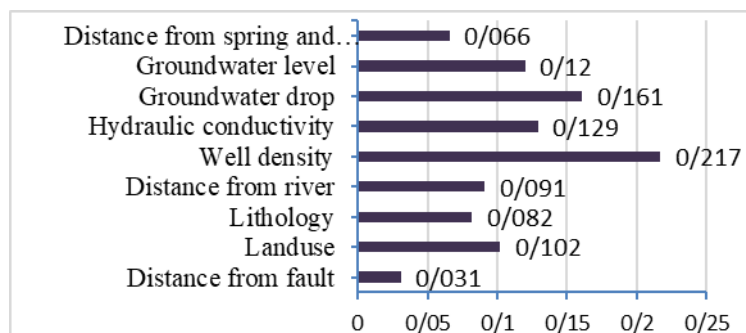
خوشه‌بندی چاه‌های مشاهده‌ای

یکی از روش‌های علمی دسته‌بندی ایستگاه‌ها از دیدگاه کیفیت آب زیرزمینی استفاده از تحلیل خوشه‌ای است. در این روش می‌توان ایستگاه‌هایی که آب آن‌ها از دیدگاه کیفیت مشابه هستند، در گروه‌های مجزا طبقه‌بندی کرد. به بیان دیگر ایستگاه‌ها به خوشه‌هایی متمایز با بیشترین شباهت تقسیم می‌شوند (دین‌پژوه ۲۰۲۲). از مشخصه‌های مهم خوشه‌بندی، ارائه نمودار گرافیکی دندوگرام است. تعداد خوشه‌ها به شکل قراردادی تعیین می‌شود و با توجه به مقیاس پژوهش‌ها می‌توان با جابه‌جا کردن خط تقسیم که برای تعیین خوشه‌ها از طول یک دندوگرام کشیده می‌شود، تعداد خوشه‌ها را تغییر داد و آن‌ها را کم یا زیاد کرد (بذرافشان و گرکانی‌نژاد ۲۰۱۸). در گام پایانی پژوهش عمل خوشه‌بندی چاه‌ها انجام شد.

نتایج و بحث

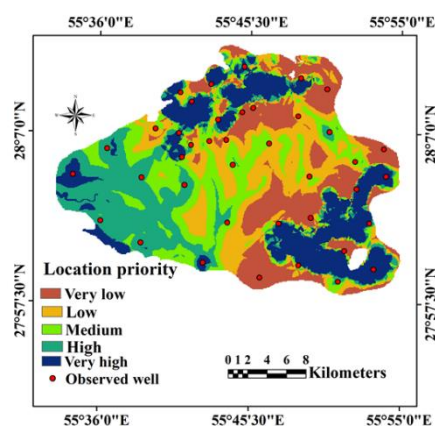
نقشه نتایج وزن‌دهی به هر یک از معیارها با روش AHP در شکل ۳ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، از میان معیارهای استفاده شده در این پژوهش معیار تراکم چاه‌های بهره‌برداری با وزن ۰/۲۱۷، افت سطح آب زیرزمینی با وزن ۰/۱۶۱، هدایت آبی با وزن ۰/۱۲۹، سطح آب زیرزمینی با وزن ۰/۱۲۰، کاربری زمین با وزن ۰/۱۰۲، فاصله از رود با وزن ۰/۰۹۱، سنگ‌شناسی با وزن ۰/۰۸۲، فاصله از چشمه و قنات با وزن ۰/۰۶۱ و فاصله از گسل با وزن ۰/۰۳۱ رتبه اول تا آخر را به دست آوردند. همچنین، نرخ ناسازگاری در این مقایسه‌ها ۰/۰۷ به دست آمد که نشان‌دهنده سازگار بودن قضاوت‌ها بود. در این پژوهش عملکرد روش AHP زیاد بود که با یافته‌های پژوهش‌های دیربیا و همکاران (۲۰۲۴)، شینده و همکاران (۲۰۲۴) و زودیه و همکاران (۲۰۲۴) مطابقت دارد. روش AHP به عنوان یک مزیت در به دست آوردن وزن‌های جایگزین بسیار بزرگ، مناسب است و می‌توان با استفاده از این روش داده‌های کیفی را به شکل کمی نیز توصیف کرد (رازی و همکاران ۲۰۲۴). همچنین

نقشه‌های مکان‌یابی با استفاده از مدل TOPSIS و WASPAS به‌ترتیب در شکل ۴ و ۵ ارائه شده است.



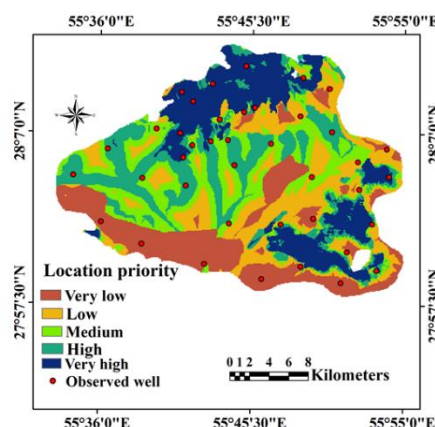
شکل ۳- وزن معیارهای انتخاب‌شده با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی.

Figure 3- Weights of selected criteria using the Analytic Hierarchy Process.



شکل ۴- نقشه مکان‌یابی چاه‌های مشاهده‌ای با استفاده از مدل TOPSIS.

Figure 4- Location map observational wells by TOPSIS model.



شکل ۵- نقشه مکان‌یابی چاه‌های مشاهده‌ای با استفاده از مدل WASPAS.

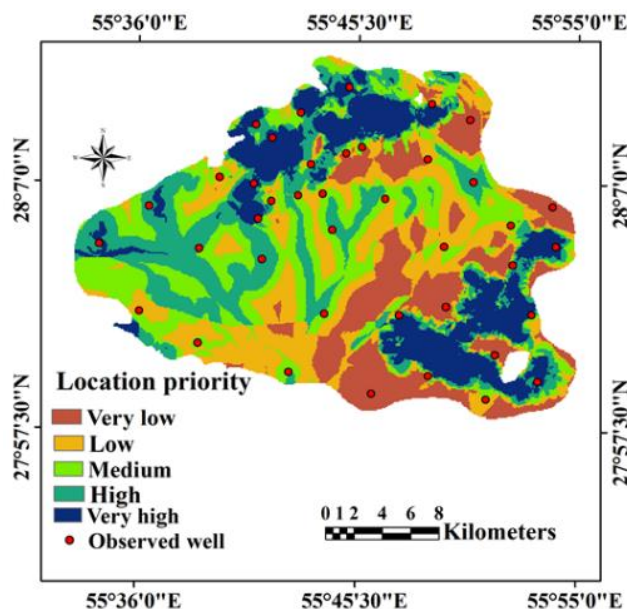
Figure 5- Location map observational wells by TOPSIS model.

محاسبات تکراری از هر دو نقشه تاپسیس و واسپاس میانگین گرفته شد و دیگر تحلیل‌ها بر اساس نقشه میانگین انجام شد (شکل ۶). با دقت در نقشه نهایی

بر اساس نقشه‌های مکان‌یابی مشخص شد که استفاده از هر دو روش تاپسیس و واسپاس تقریباً نتایج یکسانی به‌همراه داشت. از این‌رو، برای پرهیز از

شناخته شده‌اند (کارتیکیان و همکاران ۲۰۲۱). مدل تاپسیس به‌عنوان بهترین روش تصمیم‌گیری چندمعیاره از دیدگاه دقت یا تأیید صحت زمانی به‌شمار می‌آید (نارمادا دوی و همکاران ۲۰۲۳). روش واسپاس نیز در مقایسه با روش‌های مستقل (WPS و WSM) دقت و عملکرد بهتری دارد (راجا و همکاران ۲۰۲۳). از این‌رو، استفاده از این مدل‌ها در زمینه پژوهش‌های مربوط به پایش آب‌های زیرزمینی پیشنهاد می‌شود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش دهقان رحیم‌آبادی (۲۰۲۴)، ماندال و همکاران (۲۰۲۲) و راجا و همکاران (۲۰۲۳) مبنی بر پایش کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی هم‌راستا است.

مکان‌یابی و انطباق آن با نقشه کاربری زمین مشاهده شد در جاهایی که تراکم چاه‌های بهره‌برداری بیشتر و همچنین کاربری از نوع زراعت آبی بود، اولویت مکان‌یابی نیز افزایش یافت. زیرا، در اثر استفاده از آب زیرزمینی برای آبیاری زمین‌های زراعی، سطح آب کاهش یافت. هر عاملی که باعث تغییرات سطح سفره آب زیرزمینی شود، سبب افزایش لزوم پایش و حفر چاه مشاهده‌ای در آن مکان می‌شود. از این‌رو، جاهایی که تراکم چاه بهره‌برداری بیشتر بود در اولین اولویت‌ها قرار گرفتند. به‌طور کلی مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، دارای قضاوت شفاف و صحت زیاد هستند و در زمینه مدیریت منابع آب به‌عنوان یک روش مفید

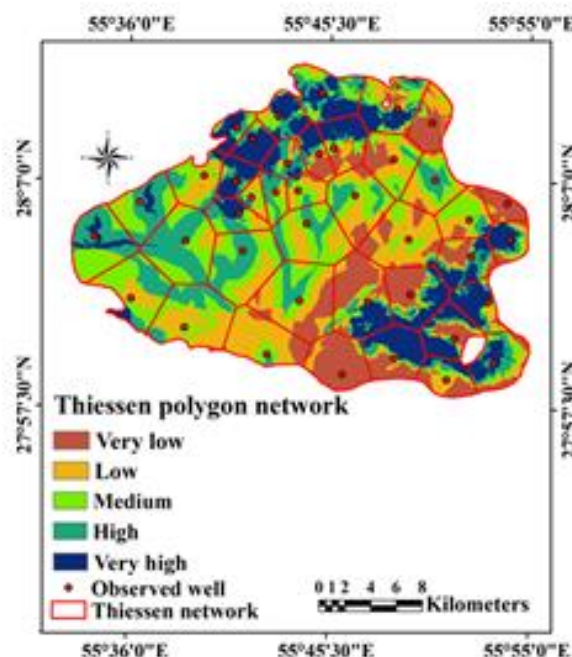


شکل ۶- نقشه میانگین اولویت مکان‌یابی چاه‌های آب زیرزمینی.

Figure 6- Map of the average spatial priority of groundwater wells.

شدند که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول ۳، از میان ۴۰ چاه در دشت گهکم سعادت‌آباد، تقریباً ۸٪ چاه‌ها معادل ۳ چاه (شماره ۱، ۲۴ و ۲۹) با میانگین امتیاز کمتر از ۰/۳ به‌عنوان چاه‌های نامناسب مشخص شدند که در شکل ۸ موقعیت ۳ چاه نامبرده نشان داده شده است.

پس از انجام فرایند مکان‌یابی، برای مقایسه شبکه پایش کنونی با نتایج مکان‌یابی، ابتدا شبکه تیسین مربوط به هر آبخوان در نقشه میانگین به‌دست آمده از دو مدل TOPSIS و WASPAS رسم شد (شکل ۷). بر اساس امتیازات مکان‌یابی برای هر چاه و هر پولیگون، چاه‌هایی که دارای میانگین امتیاز کمتر از ۰/۳ بودند به‌عنوان چاه‌های نامناسب در نظر گرفته



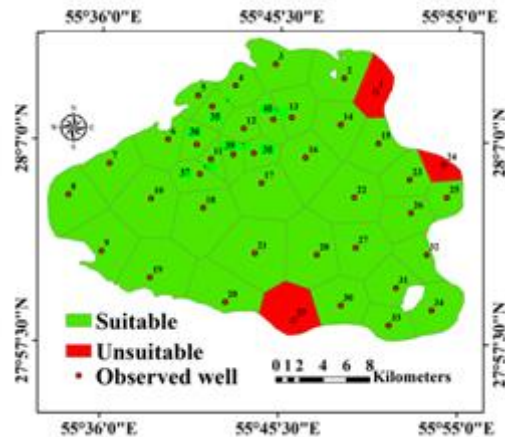
شکل ۷- نقشه شبکه‌بندی تیسن نشان‌دهنده مناطق تحت تأثیر چاه‌های مشاهده‌ای.

Figure 7- Thiessen network map indicating impacted areas by observational wells

جدول ۳- میانگین امتیاز مکان‌یابی در شبکه تیسن.

Table 3- The mean of the location score in the Thiessen network

Thiessen network number	Observation well number	Average site selection score	Thiessen network number	Observation well number	Average site selection score
1	1	0.222	21	21	0.369
2	2	0.595	22	22	0.313
3	3	0.708	23	23	0.412
4	4	0.739	24	24	0.168
5	5	0.771	25	25	0.642
6	6	0.485	26	26	0.533
7	7	0.610	27	27	0.487
8	8	0.618	28	28	0.426
9	9	0.524	29	29	0.111
10	10	0.593	30	30	0.607
11	11	0.463	31	31	0.621
12	12	0.673	32	32	0.713
13	13	0.574	33	33	0.412
14	14	0.352	34	34	0.556
15	15	0.468	35	35	0.887
16	16	0.413	36	36	0.807
17	17	0.480	37	37	0.614
18	18	0.519	38	38	0.426
19	19	0.462	39	39	0.566
20	20	0.319	40	40	0.517

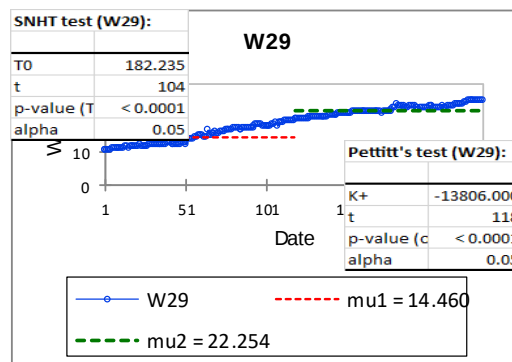
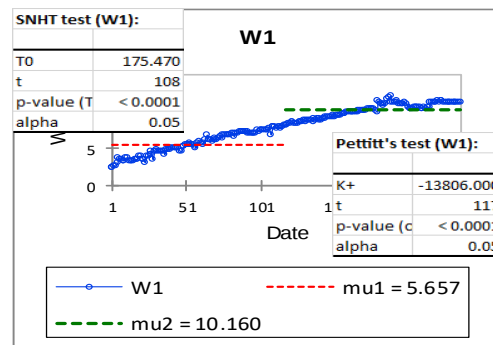
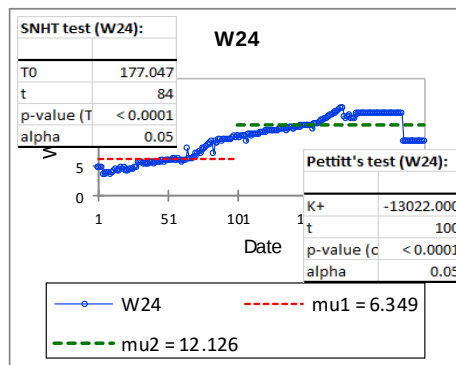


شکل ۸- چاه‌های مناسب و نامناسب از دیدگاه مکان‌یابی.

Figure 8- Suitable and unsuitable wells in terms of location

بود. از این‌رو، ۳ چاه انتخاب شده در فرایند مکان‌یابی به‌عنوان چاه غیرهمگن در نظر گرفته شدند، که این نتایج نشان از انتخاب صحیح این چاه‌ها به‌عنوان چاه نامناسب و دقت روش‌های استفاده شده در فرایند مکان‌یابی چاه‌های مشاهده‌ای دارد.

به‌منظور اطمینان از انتخاب صحیح چاه‌های نامناسب و انتخاب صحیح شبکه بهینه، آزمون همگنی پتیت و SNHT اجرا شد که نتایج آن در شکل‌های ۹ تا ۱۱ ارائه شده است. با توجه به شکل‌های نامبرده مشخص شد در هر ۳ چاه، اندازه Pvalue مربوط به آزمون پتیت و SNHT کمتر از سطح معنی داری ۵ درصد

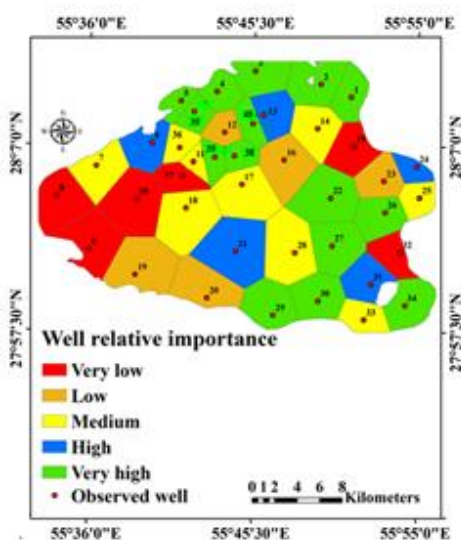


شکل ۱۱- نتایج آزمون همگنی به ترتیب در چاه شماره ۱، ۱۴ و ۲۹.

Figure 11- The results of the homogeneity test respectively in well No. 1, 14 and 29.

لوکاسپینار (۲۰۲۴) هماهنگی دارد. پس از حذف چاه‌ها با کم‌ترین اهمیت نسبی، خطای درونیابی با استفاده از روش کریجینگ محاسبه شد. به این منظور از میان مدل‌های گوناگون روش کریجینگ (خطی، کروی، سهمی و گوسی)، واریوگرام گوسی با کمترین اندازه RSS به‌عنوان مدل برتر در مقایسه با دیگر مدل‌ها انتخاب شد که نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۱۳ ارائه شده است. این یافته‌ها با نتایج پژوهش اصغری سراسکانرود و همکاران (۲۰۲۱) و محمودی‌زاده و اسماعیلی (۲۰۲۱) مبنی بر برتری سمی واریوگرام گوسی در مقایسه با دیگر واریوگرام‌های مربوط به روش کریجینگ مطابقت دارد.

نتایج مربوط به اهمیت نسبی چاه‌ها و پلیگون‌های تیسن با استفاده از روش PCA در شکل ۱۲ و جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس این نتایج، از میان ۴۰ چاه موجود در دشت گهکم سعادت‌آباد، ۳۸٪ از چاه‌ها با اهمیت نسبی خیلی زیاد، ۱۲٪ با اهمیت نسبی زیاد، ۲۳٪ با اهمیت نسبی متوسط و ۱۲٪ با اهمیت نسبی کم شناسایی شدند. همچنین ۱۵٪ از چاه‌های مشاهده‌ای (چاه‌های شماره ۸، ۹، ۱۰، ۱۵، ۳۲ و ۳۷) با کم‌ترین اهمیت نسبی مشخص شدند. از این‌رو، شناسایی و حذف این ۶ چاه کم اهمیت سبب صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و کاهش هزینه‌های مربوط به پایش شد. این نتایج با یافته‌های علی و همکاران (۲۰۲۴)، پاتنیک و همکاران (۲۰۲۴)،



شکل ۱۲- اهمیت نسبی چاه‌های مشاهده‌ای آب زیرزمینی.

Figure 12- The relative importance of groundwater observational wells.

جدول ۴- اهمیت نسبی چاه‌های آب زیرزمینی دشت گهکم سعادت‌آباد.

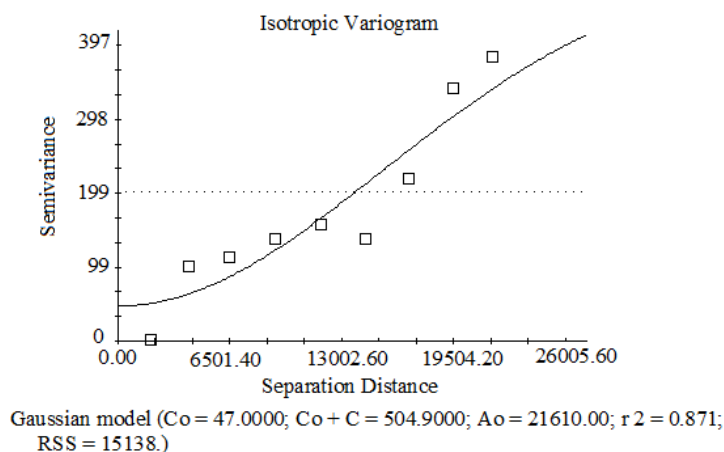
Table 4- The relative importance of the groundwater wells in the Gahkom Saadatabad Plain.

well number	Relative importance	well number	Relative importance	well number	Relative importance	well number	Relative importance
W14	0.422	W36	0.310	W9	-0.355	W4	0.649
W17	0.421	W28	0.258	W37	-0.411	W39	0.643
W33	0.415	W11	0.226	W8	-0.493	W1	0.632
W25	0.326	W7	0.128	W32	-0.606	W3	0.623
W18	0.323	W20	0.071	W15	-0.632	W2	0.613
W29	0.691	W16	-0.015	W30	0.683	W13	0.562
W27	0.690	W12	-0.121	W40	0.677	W24	0.556
W26	0.686	W23	-0.207	W34	0.674	W21	0.550
W22	0.685	W19	-0.228	W35	0.667	W31	0.522
W5	0.683	W10	-0.315	W38	0.667	W6	0.485

جدول ۵- واریوگرام‌های برازش داده شده در دشت گهکم سعادت‌آباد.

Table 5- The fitted variograms in the Gahkom Saadatabad Plain.

Model	Nugget Co	Sill Co + C	Range Parameter Ao	Effective Range	Proportion C/(Co + C)	r ²	RSS
Spherical	1.00000	412.90000	38420.0000	38420.0000	0.998	0.843	19111
Exponential	1.00000	412.90000	18710.0000	56130.0000	0.998	0.803	26911
Linear	1.00000	412.90000	27130.0000	27130.0000	0.998	0.866	15836
Linear to sill	1.00000	412.90000	27130.0000	27130.0000	0.998	0.866	15836
Gaussian	47.00000	504.90000	21610.0000	37429.6180	0.907	0.871	15138



شکل ۱۳- بهترین واریوگرام (مدل گوسی).

Figure 13- The best variogram (Gaussian model).

است. از این رو، این نتایج با یافته‌های نوری‌قیداری (۲۰۱۳)، بابائی‌حصار و همکاران (۲۰۱۶) و رهنما و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد. البته باید توجه داشت که همیشه حذف چاه‌های کم‌اهمیت منجر به افزایش خطای درون‌یابی نمی‌شود و با توجه به ویژگی و ماهیت چاه، خطای درون‌یابی می‌تواند افزایش یا کاهش یابد (بابائی‌حصار و همکاران ۲۰۱۶).

پس از انتخاب بهترین واریوگرام، اندازه آماره خطای RMSE که بیانگر درصد کاهش یا افزایش خطا پس حذف چاه‌های کم‌اهمیت است، محاسبه شد (جدول ۶). بر اساس نتایج جدول ۶، اندازه RMSE پس از حذف چاه‌های کم‌اهمیت فقط ۱۴٪ افزایش یافت. از این رو، حذف اینگونه چاه‌ها تأثیر زیادی بر دقت درون‌یابی نداشت. این یافته بیانگر استاندارد بودن روش استفاده‌شده در شناسایی چاه‌های کم‌اهمیت

جدول ۶- اندازه آماره خطای استاندارد.

Table 6- The value of the standard error statistic.

Description	RMSE
Standard error before removing low-importance wells	0.68
Standard error after removing low-importance wells	0.79
Error percentage change	14.71

جدول ۷ نشان‌دهنده شده است. بر اساس این نتایج، چاه‌های مشاهده‌ای در ۵ خوشه گروه‌بندی شدند که از

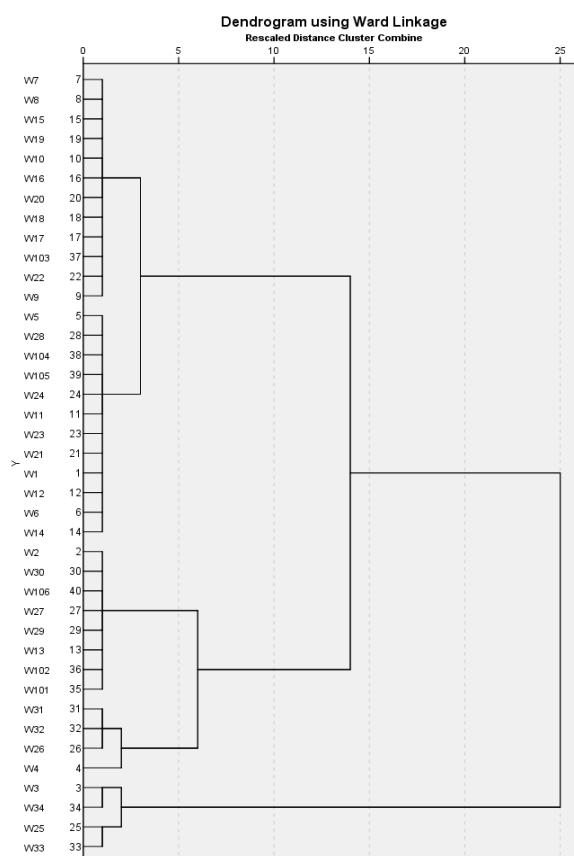
نتایج مربوط به خوشه‌بندی چاه‌های آب در منطقه مطالعه‌شده در شکل ۱۴ و به‌منظور تفسیر بهتر در

میان ۴۰ چاه دشت گهکم سعادت‌آباد بیشترین تعداد چاه‌ها (۱۲ چاه) مربوط به خوشه ۵ و کمترین تعداد چاه‌ها (۴) مربوط به خوشه ۳ و ۴ بود. از این رو، می‌توان گفت در زمان‌هایی به دلیل نبودن امکان پایش برخی چاه‌ها، می‌توان از اطلاعات چاه‌های مشابه استفاده کرد.

جدول ۷- نتایج تحلیل خوشه‌بندی چاه‌های مشاهده‌ای آب زیرزمینی در دشت گهکم سعادت‌آباد.

Table 7- The results of clustering analysis for the groundwater observational wells in the Gahkom Saadatabad Plain.

Well	Cluster number	Well	Cluster number	Well	Cluster number	Well	Cluster number
1:W1	1	11:W11	1	21:W21	1	31:W31	4
2:W2	2	12:W12	1	22:W22	5	32:W32	4
3:W3	3	13:W13	2	23:W23	1	33:W33	3
4:W4	4	14:W14	1	24:W24	1	34:W34	3
5:W5	1	15:W15	5	25:W25	3	35:W35	2
6:W6	1	16:W16	5	26:W26	4	36:W36	2
7:W7	5	17:W17	5	27:W27	2	37:W37	5
8:W8	5	18:W18	5	28:W28	1	38:W38	1
9:W9	5	19:W19	5	29:W29	2	39:W39	1
10:W10	5	20:W20	5	30:W30	2	40:W40	2



شکل ۱۴- نتایج تحلیل خوشه‌بندی چاه‌های مشاهده‌ای آب زیرزمینی در دشت گهکم سعادت‌آباد.

Figure 14- The results of the clustering analysis for the groundwater observational wells in the Gahkom Saadatabad Plain.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به کاهش نزولات جوی و کمبود منابع آب سطحی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان تنها منبع تأمین‌کننده آب لازم در بخش‌های گوناگون شرب، کشاورزی و غیره شناخته شده‌اند. همچنین، پایش و آگاهی از ویژگی‌های کمی و کیفی این منابع ارزشمند، بسیار ضروری است. پایش پیوسته آبخوان‌ها مستلزم صرف هزینه، زمان و نیروی کار انسانی است. از این‌رو، بهینه کردن تعداد چاه‌های آب مشاهده‌ای و انتخاب چاه‌های مؤثر برای فرایند پایش می‌تواند راهکار مفیدی برای کاهش هزینه‌ها، زمان و همچنین افزایش دقت و صحت اطلاعات به‌دست آمده باشد. از این‌رو، این پژوهش با هدف بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی در منطقه دشت گهک سعاد آباد انجام شد. بر پایه یافته‌های این پژوهش نقشه میانگین مکان‌یابی چاه‌های مشاهده‌ای با استفاده از مدل‌های TOPSIS و WASPAS در ۵ گروه با اولویت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شد. از سطح کل منطقه مطالعه‌شده، ۳۸٪ منطقه از دیدگاه حفر چاه مشاهده‌ای در اولویت خیلی کم تا کم بود. همچنین ۳۸٪ از منطقه نیز در اولویت زیاد تا خیلی زیاد بود بخش‌های شمال‌غربی و جنوب‌شرقی منطقه را در بر می‌گرفت. از سوی دیگر، ۲۴٪ باقی‌مانده از سطح منطقه نیز در اولویت متوسط بود. در این پژوهش بر خلاف دیگر پژوهش‌های انجام‌شده، در فرایند وزن‌دهی معیارها از پیکسل‌ها به‌عنوان گزینه برای رتبه‌بندی استفاده شد که این کار سبب افزایش دقت و صحت نقشه به‌دست آمده از فرایند مکان‌یابی شد. پیشنهاد می‌شود مدیران آبخیز بر اساس نقشه به‌دست آمده در این پژوهش نسبت به صدور و عدم صدور مجوز برای حفر چاه در مکان‌های مناسب و نامناسب اقدام کنند و به این ترتیب کمک ارزشمندی به ثبات منابع آب زیرزمینی کنند. از سوی دیگر، در این پژوهش همزمان با تعیین اهمیت نسبی هر یک از چاه‌های موجود در منطقه، تعدادی از چاه‌ها با اهمیت نسبی منفی شناسایی و حذف شدند. حذف چاه‌های کم

اهمیت در مرحله پایش کمی و کیفی آبخوان‌ها، منجر به کاهش هزینه، صرفه‌جویی در زمان می‌شود و دقت و صحت اطلاعات به‌دست آمده از پایش افزایش خواهد داد. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود عمل بهینه‌سازی شبکه پایش آب زیرزمینی در بقیه دشت‌های استان نیز انجام شود. افزون بر این، به‌منظور مقایسه میان انواع گوناگون روش‌های آماری، آب‌زمین‌شناختی و روش‌های داده‌کاوی مانند مدل‌های یادگیری ماشین، استفاده هم‌زمان آن‌ها در پژوهش‌های مربوط به پایش شبکه‌های آب‌های زیرزمینی و ارزیابی و انتخاب بهترین روش برای بهینه‌سازی شبکه پایش نیز پیشنهاد می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش می‌توان گفت افزون بر ۹ معیار انتخاب‌شده در این پژوهش، معیارهای دیگری را نیز برای اولویت‌بندی مناطق برای ساخت شبکه پایش باید در نظر گرفت. یکی از مهم‌ترین این معیارها، جبهه‌های ورودی و خروجی آبخوان است. لزوم پایش مناطق در شناخت و پیش‌بینی آب زیرزمینی اهمیت زیادی دارد. مشخص است که مناطق نزدیک به ورودی و خروجی آبخوان اولویت زیادی برای ساخت شبکه پایش دارند. پس از مکان‌یابی اولیه نیاز است که اینگونه تحلیل‌ها انجام شود و مناطقی که در مکان‌یابی اولیه به‌عنوان بخش‌های با اهمیت زیاد شناخته شده‌اند، در گام بعد نیز اولویت‌بندی شوند. معیار بعدی تحلیل اقتصادی و هزینه ساخت شبکه‌های پایش و اولویت‌بندی از دیدگاه اقتصادی است. معیار مهم دیگر، دوری یا نزدیکی به راه‌ها است که مناطق نزدیک به خطوط ارتباطی اهمیت بیشتری برای ساخت شبکه پایش دارند. می‌توان نتیجه گرفت گام بعدی اولویت‌بندی از دیدگاه معیارهای مهم است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: راهنمایی، مفهوم سازی، انجام تحلیل های نرم افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله، تحلیل های آماری.

نویسنده دوم: ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج. نویسنده سوم: تحلیل های آماری. نویسنده چهارم و پنجم: بررسی نتایج.

فهرست منابع

- Ali S, Verma S, Agarwal MB, Islam R, Mehrotra M, Kumar Deolia R, Kumar J, Singh Sh, Mohammadi AA, Raj D, Kumar Gupta M, Dang PH, Fattahi M. 2024. Groundwater quality assessment using water quality index and principal component analysis in the Achnera block, Agra district, Uttar Pradesh, Northern India. *Scientific Reports*. 14(1): 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56056-8>
- Al-Zubari W, Al-Shaabani A, Abdulhameid N. 2023. Spatial optimization of the groundwater quality monitoring network in the kingdom of bahrain. *Water*, 15(12): 1-14. <https://doi.org/10.3390/w15122169>
- Asghari Sarasekanrood S, Ghale E, Ebadi E. 2021. Investigation of land use changes and its relationship with groundwater level (Case study: Ardabil Plain). *RS and GIS for Natural Resources*. 12(1): 86-106. (In Persian). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1400.12.1.5.6>
- Babaeihesar S, Hamdami Q, Ghasemieh H. 2016. Identify the effective wells in determination of groundwater depth in Urmia plain using principle component analysis. *Journal of Water and Soil*. 31(1): 40-50. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i1.48750>
- Bączkiewicz A, Wątróbski J, Kizielewicz B, Sałabun W. 2021. Towards objectification of multi-criteria assessments: (2021). A comparative study on MCDA methods. conference: 16th Conference on Computer Science, 25. pp. 417-425. <https://doi.org/10.15439/2021F61>
- Bayat F, Roozbahani A, Hashemy Shahdany SM. 2022. Performance evaluation of agricultural surface water distribution systems based on water-food-energy nexus and using AHP-entropy-WASPAS technique. *Water Resources Management*. 36(12): 4697-4720. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03273-3>
- Bazrafshan O, Gerkani Nezhad Moshofi Z. 2018. Optimization of piezometric wells number for groundwater level prediction using factor analysis (Case study: Minab plain). *Irrigation and Water Engineering*. 9(2): 80-94. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/IWE.2019.87268>
- Bouhout S, Haboubi K, El Abdouni A, El Hammoudani Y, Haboubi CH, Dimane F, Hanafi I, Salahdine Elyoubi M. 2023. Appraisal of groundwater quality status in the Ghiss-Nekor coastal plain. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10):57-66. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452702015>
- Bro R, Smilde AK. 2014. Principal component analysis. *Analytical Methods*. 6(9): 2812-2831. <https://doi.org/10.1039/C3AY41907J>
- Dehghan Rahimabadi P, Behnia M, Nasabpour Molaei S, Khosravi H, Azarnivand H. 2024. Assessment of groundwater resources potential using Improved Water Quality Index (ImpWQI) and entropy-weighted TOPSIS model. *Sustainable Water Resources Management*. 10(1): 1-7. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00988-y>
- Demirci M, Tasar B, Kaya YZ, Gemici E. 2021. Monthly groundwater level modeling using data mining approaches. *Air and Water Components of the Environment Conference Proceedings*, Cluj Napoca, Romania. 2021(1): 75-86. https://doi.org/10.24193/AWC2021_07
- Deveci M, Canitez F, Gokasar I. 2018. WASPAS and TOPSIS based interval type-2 fuzzy MCDM method for a selection of a car sharing station. *Sustainable Cities and Society*. 41:777-791. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.05.034>
- Devi RN, Sowmiya S, Sundareswaran R, Broumi S. 2023. Waste to energy treatment for India using CRITIC-WASPAS method under Interval-Valued Pythagorean Neutrosophic Fuzzy set. *Neutrosophic Sets and Systems*. 61(1): 493-506. https://digitalrepository.unm.edu/nss_journal
- Dinpazhoo Y. 2022. Clustering of observation wells of Khoy Plain aquifer from the view of water quality using the K-Means. *Hydrogeology*, 7(1):25-41. (In Persian). <https://sid.ir/paper/1036888/en>
- Diribaa D, Karuppannan Sh, Takele T, Husein M. 2024. Delineation of groundwater potential zonation using geoinformatics and AHP techniques with remote sensing data. *Heliyon*. 10(3): 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25532>
- Eghbalian S, Bahmani O. 2020. Study of local and temporal changes of groundwater quality standards of Hamedan-Bahar plain using (GIS) over a 10 years' period. *Environmental Science and Technology*. 22(3): 83-98. (In Persian).

- Emami H, Salajagheh A, Moghadam Niya AR, Khalighi Sigaroudi. 2020. Investigating the accuracy and efficiency of TRMM satellite in estimating monthly rainfall in the Gorgan River watershed. *Ecohydrology*. 7(3): 719-729. (In Persian).
https://doi.org/10.22059/ije.2020.261641.917
- Ghahroudi Tali, M. 2015. The introduction to geographic information systems. 1 (ed) Payanname Noor University. 214 p. (In Persian).
- Ghorabae MK, Zavadskas EK, Amiri M, Esmaeili A. 2016. Multi-criteria evaluation of green suppliers using an extended WASPAS method with interval type-2 fuzzy sets. *Journal of Cleaner Production*, 137: 213-229. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.031
- Hajizadegan S. 2015. Comparison and application of multi-criteria decision-making methods in selecting the optimal process for sewage treatment. Master's thesis, Birjand University. (In Persian). 105p.
- Hakimdoost SY, Pourzeydi AM, Gerami MS. 2017. Spatial analysis of torrential rain in Mazandaran Province in the geographic information system (GIS) environment. *Scientific Research Quarterly of Geographical Data*, 7(102): 191-203. (In Persian).
https://doi.org/10.22131/sepehr.2017.27477
- Han D, Currell MJ. 2021. Review of drivers and threats to coastal groundwater quality in China. *Science of The Total Environment*, 806:1-20.
https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150913
- Helena B, Pardo R, Vega M, Barrado E, Manuel J, Fernandez L. 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer by principal component analysis. *Water Research*, 34(3): 807-816. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00225-0
- Hossain J, Rahman Z, Maksud Kamal ASM, Chowdhury MA, Hossain SH, Rahman M, Zahid A, Towfiqul Islam AR. 2024. Quantitative and qualitative assessment of groundwater resources for drinking water supply in the peri-urban area of Dhaka, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*. 25: 101-146. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101146
- Kahraman C, Ates NY, Cevik S, Gulbay M, Aysa Erdogan S. 2007. Hierarchical fuzzy TOPSIS model for selection among logistics information technologies. *Journal of Enterprise Information Management*. 20(2): 143-168. DOI:10.1108/17410390710725742
- Kheirkhah Zarkesh, M., 2005. DSS for flood water site selection in Iran. PhD thesis. Wageningen University. 273 p.
- Lee S, Hyun Y, Lee MJ. 2019. Groundwater potential mapping using data mining models of big data analysis in Goyang-si, South Korea. *Sustainability*.11(6):1-21.
https://doi.org/10.3390/su11061678
- Li Zh, Luo Z, Wang Y, Fan G, Zhang J. 2022. Suitability evaluation system for the shallow geothermal energy implementation in region by entropy weight method and TOPSIS method. *Renewable Energy*. 184: 564-576. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.112
- Lucas L, Jauzein M. 2008. Use of principal component analysis to profile temporal and spatial variations of chlorinated solvent concentration in groundwater. *Environmental Pollution*. 151(1): 205-212. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.01.054
- Luque-Espinar JA, López-Chicano M, Pardo-Igúzquiza E, Chica-Olmo M. 2024. Using numerical methods for map the spatiotemporal geogenic and anthropogenic influences on the groundwater in a detrital aquifer in south Spain. *Journal of Environmental Management*, 355(3): 1-12.
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120442
- Mahmodizadeh S, Esmaeily A. 2021. Geostatistical modelling of spatial changes in groundwater quality using GIS and wilcox model (Case study: Central and Kenark Districts, Chabahar). *Environment and Water Engineering*. 7(1): 103-118. (In Persian).
https://doi.org/10.22034/jewe.2020.255847.1460
- Mandal T, Saha S, Das J, Sarkar A. 2022. Groundwater depletion susceptibility zonation using TOPSIS model in Bhagirathi River Basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*. 8(2):1711-1731.
https://doi.org/10.1007/s40808-021-01176-7
- Mehta D, Dhabuwala J, Yadav S M, Kumar V, Azamathulla HM. 2023. Improving flood forecasting in Narmada River Basin using hierarchical clustering and hydrological modelling. *Results in Engineering*. 20(13): 1-13. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101571
- Zewdie MM, Kasie LA, Bigale S. Groundwater potential zones delineation using GIS and AHP techniques in upper parts of Chemoga watershed. *Ethiopia Appl Water Sci*. 14(85): 1-28.. 10.1007/s13201-024-02119-0
- Nouri Gheidari MH. 2013. Determination of effective wells to monitor the ground water level using the principal components analysis. *Water and Soil Sciences*. 17(64): 149-158. (In Persian).
http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-1537-fa.html
- Ostad-Ali-Askar K, Shayannejad M. 2021. Quantity and quality modelling of groundwater to manage water resources in Isfahan-Borkhar aquifer. *Environment Development and Sustainability*.23(11):15943-15959.
https://doi.org/10.1007/s10668-021-01323-1

- Patnaik M, Tudu CH, Kumar Bagal D. 2024. Monitoring groundwater quality using principal component analysis. *Applied Geomatics*. 16(1): 281-291. <https://doi.org/10.1007/s12518-024-00552-z>
- Pearson S, Falteisek J, Berg J. 2011. Minnesota groundwater level monitoring network-guidance document for network development. Technical Report, 96 p. https://files.dnr.state.mn.us/publications/waters/groundwater_network_guidance.pdf.
- Petersen W. 2001. Process identification by principal component analysis of river waterquality data. *Ecological Modelling*. 138(1-3): 193-213. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00402-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00402-6)
- Rahnama S, KhasheiSiuki A, Shahidi A. 2023. Investigating the effect of temporal and spatial variations on groundwater piezometric monitoring network design using principal components analysis (PCA). *Journal of Aquifer and Qanat*. 4(1): 16-29. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/jaaq.2023.5153.1046>
- Raja CH, Ramachandran M, Ramu K, Sivaji CH. 2023. Dharumapuri district, tamil nadu, groundwater quality status in relation to WASPAS system pollution. *REST Journal on Advances in Mechanical Engineering*. 2(3): 48-59. <https://doi.org/10.46632/jame/2/3/5>
- Rajaeian SH, Ketabchi H, Ebadi T. 2024. Investigation on quantitative and qualitative changes of groundwater resources using MODFLOW and MT3DMS: A case study of Hashtgerd aquifer, Iran. *Environment Development and Sustainability*. 26(2): 1-26. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02904-4>
- Ravindra B, Subba Rao N, Dhanamjaya Rao EN. 2023. Groundwater quality monitoring for assessment of pollution levels and potability using WPI and WQI methods from a part of Guntur district, andhra pradesh, India. *Environment, Development and Sustainability*. 25(12): 14785-14815. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02689-6>
- Razi MH, Zahratunnisa Z, Retongga N. 2024. Delineation of groundwater potential zone using remote sensing and GIS-based AHP for sustainable groundwater management in Aceh Besar Regency, Aceh Province, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 11(2): 5237-5249. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2024.112.5237>
- Richardson CM, Davis KL, Ruiz-González C, Guimond JA, Michael HA, Paldor A, Moosdorf N, Paytan A. 2024. The impacts of climate change on coastal groundwater. *Nature Reviews Earth and Environment*. 5(2): 100-119. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00500-2>
- Saaty TL. 2000. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory*. 2nd ed. Pittsburgh, PA: RWS Publications. 245 p.
- Sanchez- Martos F, Jimenez- Espinosa R, Pulido- Bosch A. 2001. Mapping groundwater quality variables using PCA and geostatistics: a case study of Bajo Andarax, southeastern Spain. *Hydrological Sciences Journal*. 46(2): 227-242. <https://doi.org/10.1080/02626660109492818>
- Shinde S, Barai1 V, Gavit, B, Kadam S Atre A, Baliram Pande Ch, Chandra Pal S, Radwan N, Debele Tolche A, Elkhachy I. 2024. Assessment of groundwater potential zone mapping for semi-arid environment areas using AHP and MIF techniques. *Environmental Sciences Europe*, 36(1): 1-20. <http://dx.doi.org/10.1186/s12302-024-00906-9>
- Karthikeyan1 S, Arumugam S, Muthumanickam J, Kulandaisamy P, Subramanian M, Annadurai R, Sekar S. 2021. Causes of heavy metal contamination in groundwater of Tuticorin industrial block, Tamil Nadu, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15): 18651-18666. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-11704-0>
- Soori S, Baharvand S, Amiri V. 2017. Delineation of groundwater potential using AHP-Fuzzy (A case study: Romeshgan Plain). *Scientific Research Journal of Environmental Geology*. 11(40): 11-26. (In Persian).
- Sun X, Guo CH, Cui J. 2020. Research on evaluation method of water resources carrying capacity based on improved TOPSIS model. *Hydroscience*. 106(5): 68-74. <https://doi.org/10.1051/lhb/2020040>
- Taherdoost H, Madanchian M. 2023. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia*. 3(1): 77-87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- Taheri K, Missimer TM, Amini V, Bahrami J, Omidipour RA. 2020. GIS-expert-based approach for groundwater quality monitoring network design in an alluvial aquifer: A case study and a practical guide. *Environmental Monitoring and Assessment*. 192:1-20. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08646-y>
- Xu J, Feng P, Yang P. 2016. Research of development strategy on China's rural drinking water supply based on SWOT-TOPSIS method combined with AHP-entropy: A case in Hebei Province. *Environmental Earth Sciences*. 75(1): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4885-6>
- Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J, Zakarevicius A. 2012. Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Elektron Elektrotech*. 122(6):3-6. <https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.181>



Optimizing the Quantitative and Qualitative Groundwater Monitoring Network Using Statistical and MCDM Methods

Hamid Gholami^{1*}, Shahram Golzari², Ali Akbar Mohammadifar³, Hoorieh Zahmatkesh⁴,
Maryam Zare⁵

1- Professor, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Hormozgan, Iran

2- Associate professor, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Hormozgan, Iran and Associate professor, Deep Learning Research Group, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Hormozgan, Iran

3- Ph.D., Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Hormozgan, Iran

4 and 5- M.Sc., Hormozgan Regional Water Company, Bandar-Abbas, Hormozgan, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Groundwater plays a key role in supplying the requirements of the communities in various sectors such as drinking, industry and agriculture, etc. The important of this vital resource is even greater in arid and semi-arid regions that face decrease in precipitation. Because aquifers are considered as the main sources of water supply for communities in these areas. Also, due to their location, these resources in the coastal areas are impacting by climatic changes in the interaction of land and sea, and also, at the same time they are influencing by human activities. Therefore, understanding of the quantitative and qualitative characteristics of groundwater tables and their monitoring is necessary. Continuous monitoring of the groundwater network requires spending money, time, labor, and manpower, and optimizing the monitoring network can be a useful solution to reduce the aforementioned problems. Therefore, the research was conducted with the aim of optimization the groundwater monitoring network in the Gahkom Saadatabad plain, Hormozgan province, using statistical methods.

Materials and Methods

In this research, first, by reviewing sources, Ministry of Energy guidelines, and using the perspective of groundwater experts, 9 criteria (consisting of the mean ground water level, mean annual drop of ground water, hydraulic conductivity, density of exploitation wells, distance from the river, Geological formation, land-use, distance from the fault and distance from the spring) were selected. Then, using the Analytical Hierarchy (AHP) method, each of the criteria was weighted, and a map was prepared for each of them to carry out the location process.

Article Type: Research Article

***Corresponding Author's E-mail:** Hgholami@hormozgan.ac.ir

Citation: Gholami, H., Golzari, Sh., Mohammadifar, A.A., Zahmatkesh, H., Zare, M. 2025. Optimizing the Quantitative and Qualitative Groundwater Monitoring Network Using Statistical and MCDM Methods. Watershed Management Research. 38(2): 38-61.

DOI: 10.22092/WMRJ.2024.367105.1595

Received: 29 September 2024, **Received in revised form:** 14 November 2024, **Accepted:** 19 December 2024

Published online: 22 June 2025

Watershed Management Research, Vol.38, No.2, Ser. No:147, Summer 2025, pp. 38-61.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



In this research, TOPSIS and WASPAS multi criteria decision making models were employed to implement the process of locating observed wells. Then, to evaluate the current monitoring network with location results, the Thyssen network for each aquifer was drawn. Also, the mean score of the location maps in each Thyssen polygon was obtained. For each well and each polygon, wells with the mean score of less than 0.3 were considered as unsuitable wells. Next, in order to ensure the accuracy of the selection of unsuitable wells, Pettitt's homogeneity test and standard normality test were performed. In the next step, the principal component analysis (PCA) method was used to determine the relative importance of 40 wells in the region, and wells with low relative importance were eliminated. Then, the Kriging interpolation method was used to find out the standard error value due to the removal of the wells. Finally, clustering analysis was used to group wells with the similar characteristics.

Results and Discussion

The results of the AHP showed that among the 9 criteria used in the research, the density of exploitation wells with a weight = 0.217 and the distance from the fault with a weight = 0.031 were ranked as first and last ranks, respectively. Comparison of multi-criteria decision-making models for the location process also indicated the same accuracy of both TOPSIS and WASPAS models. Therefore, the mean map of the two models was prepared and used to carry out the next steps of the research. Based on the results of the evaluation of the current monitoring network with the results of location (optimal network), 3 wells were identified as unsuitable wells. Also, based on the P value of the Petit test and the standard normal test, it was determined that all three wells were correctly selected as Heterogeneous wells. Based on the findings obtained from the PCA method 6 wells (numbers 8, 9, 15, 10, 32, and 37), were included in the group of wells with negative relative importance, and this wells were removed. The size of the standard error increased by 14% after removing the unimportant wells, and there was no significant difference. Therefore, based on the results of this study, less important wells can be removed from the monitoring network. Also, 40 wells located in the Gahkom Saadatabad plain was classified into 5 clusters.

Conclusion and Suggestions

The main objective of this research was to optimize the groundwater monitoring network from a quantitative and qualitative perspective using statistical and MCDM models. The results revealed the high efficiency and accuracy of MCDM methods. Based on the results of the location map of observed wells generated by the mentioned models, the study area was classified into 5 groups from very low priority to very high priority. Therefore, watershed managers can use the findings of this study to develop a monitoring network and issue new permits to drill new wells in suitable and unsuitable locations. Also, considering the importance of water monitoring in coastal areas, it is recommended to use the mentioned methods for other plains of Hormozgan province. In order to compare different statistical, hydrological and data mining methods such as machine learning models, it is suggested to use them simultaneously in future studies. On the other hand, in future studies for construction of ground water monitoring network, it is also recommended to use other effective criteria such as economic analysis criteria and the cost of constructing the monitoring network, criteria of distance and proximity to the sea, and criteria of distance and proximity to communication routes.

Keywords: Data mining, Gahkom Saadat Abad, groundwater, monitoring, multi criteria decision making models

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declare that they have no conflict of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Author's Contribution

First author: guidance, conceptualization, performing software/statistical analyses, writing the first draft of the article, statistical analyses.

Second author: editing and revising the article, controlling the results.

Third author: statistical analysis.

Fourth and fifth authors: control of results.