



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 نظری‌پور

زمستان ۱۴۰۱

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 (۰.۲۹)، زمین‌شناسی (۰.۲۵) و تراکم زهکشی (۰.۱۵) در پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بوده است. کمترین تأثیرگذاری مربوط به بارش (۰.۱) 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 بسیار خوب 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.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱.....	فصل اول: کلیات پژوهش.....
۲.....	۱-۱- مقدمه.....
۳.....	۲-۱- بیان مسئله.....
۵.....	۳-۱- سؤال‌های پژوهش.....
۵.....	۴-۱- فرضیه‌های پژوهش.....
۵.....	۵-۱- ضرورت پژوهش.....
۷.....	۶-۱- اهداف پژوهش.....
۷.....	۱-۵-۱- هدف اصلی.....
۷.....	۲-۵-۱- اهداف جزئی.....
۸.....	۶-۱- ساختار پژوهش.....
۹.....	فصل دوم: پیشینه پژوهش.....
۱۰.....	۱-۲- مقدمه.....
۱۰.....	۲-۲- پیشینه پژوهش.....
۴۰.....	فصل سوم: داده‌ها و روش‌شناسی.....
۴۱.....	۱-۳- مقدمه.....
۴۱.....	۲-۳- محدوده پژوهش.....
۴۲.....	۳-۳- داده‌های پژوهش.....
۴۲.....	۱-۳-۳- فاکتورهای تأثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی.....
۴۲.....	۲-۳-۳- داده‌های منابع آب دشت گوهرکوه.....
۴۹.....	۴-۳- روش‌شناسی پژوهش.....
۴۹.....	۱-۴-۳- تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره.....

۴۹	۲-۴-۳- تخصیص وزن و نرمال سازی با استفاده از AHP
۵۲	۳-۴-۳- تعیین مناطق بالقوه آب زیرزمینی
۵۳	۴-۴-۳- تأیید و اعتبارسنجی مناطق بالقوه آب زیرزمینی
۵۷	فصل چهارم: یافته‌های پژوهش و بحث
۵۷	۱-۴- مقدمه
۵۷	۲-۴- توزیع فضایی لایه‌های موضوعی
۵۸	۱-۲-۴- لیتولوژی
۶۰	۲-۲-۴- زمین شناسی
۶۱	۳-۲-۴- تراکم زهکشی
۶۳	۴-۲-۴- گرادیان شیب
۶۳	۵-۲-۴- ارتفاع
۶۶	۶-۲-۴- شاخص پوشش گیاهی
۶۷	۷-۲-۴- تراکم خطواره
۶۹	۸-۲-۴- کاربری زمین/ پوشش زمین
۷۰	۹-۲-۴- بارش
۷۱	۳-۴- اختصاص وزن و رتبه به لایه‌های موضوعی
۷۳	۴-۴- ادغام لایه‌های موضوعی و تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی
۷۸	۵-۴- اعتبارسنجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی
۸۱	فصل پنجم: نتیجه گیری
۸۲	۱-۵- مقدمه
۸۲	۲-۵- نتیجه گیری
۸۴	۳-۵- پیشنهادات
۸۶	منابع

فهرست اشکال

صفحه	عنوان شکل
۵۵.....	شکل ۳-۱. چارچوب روش شناختی پژوهش.....
۶۰.....	شکل ۴-۱. توزیع فضایی لایه لیتولوژی در منطقه مورد مطالعه.....
۶۱.....	شکل ۴-۲. توزیع فضایی لایه زمین شناسی در منطقه مورد مطالعه.....
۶۲.....	شکل ۴-۳. توزیع فضایی لایه تراکم زهکشی در منطقه مورد مطالعه.....
۶۴.....	شکل ۴-۴. توزیع فضایی لایه گرادیان شیب در منطقه مورد مطالعه.....
۶۵.....	شکل ۴-۵. توزیع فضایی لایه ارتفاع در منطقه مورد مطالعه.....
۶۷.....	شکل ۴-۶. توزیع فضایی لایه پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه.....
۶۸.....	شکل ۴-۷. توزیع فضایی لایه تراکم خطواره در منطقه مورد مطالعه.....
۷۰.....	شکل ۴-۸. توزیع فضایی لایه کاربری و پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه.....
۷۱.....	شکل ۴-۹. توزیع فضایی لایه بارش در منطقه مورد مطالعه.....
۷۷.....	شکل ۴-۱۰. پهنه بندی پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در منطقه مورد مطالعه.....
۷۹.....	شکل ۴-۱۱. همپوشانی لایه موقعیت چاه ها با لایه پهنه بندی پتانسیل آب زیرزمینی.....
۸۰.....	شکل ۴-۱۲. اعتبارسنجی نتایج پهنه بندی پتانسیل آب زیرزمینی با منحنی ROC.....

فهرست جداول

عنوان جدول	صفحه
جدول ۱-۲. مرور مطالعات خارجی مرتبط با موضوع از نظر روش‌شناسی و تعداد پارامترها.....	۳۶
جدول ۲-۲. مرور مطالعات داخلی مرتبط با موضوع از نظر روش‌شناسی و تعداد پارامترها.....	۳۷
جدول ۳-۲. مرور مطالعات خارجی مرتبط با موضوع از نظر انتخاب نوع پارامترها.....	۳۸
جدول ۴-۲. مرور مطالعات داخلی مرتبط با موضوع از نظر انتخاب نوع پارامترها.....	۳۹
جدول ۱-۳. محدوده شاخص گیاهی برای کلاس‌های مختلف پوشش زمین.....	۴۸
جدول ۲-۳. مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی برای اهمیت نسبی.....	۵۰
جدول ۱-۴. زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه.....	۵۹
جدول ۲-۴. ماتریس مقایسه زوجی برای روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی.....	۷۲
جدول ۳-۴. ماتریس مقایسه زوجی نرمال شده برای روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی.....	۷۲
جدول ۴-۴. وزن‌ها و رتبه‌های (نرمال شده) اختصاص داده شده به لایه‌های موضوعی.....	۷۴
جدول ۵-۴. مناطق پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه.....	۷۷

فصل اول

کلیات پژوهش

اخیراً بحران آب در بیشتر بخش‌های ایران به ویژه با اقلیم‌های خشک در نتیجه افزایش جمعیت، کشاورزی ناکارآمد و سوء مدیریت منابع آب اتفاق افتاده است (Madani, ۲۰۱۴). این عوامل منجر به کاهش شدید ذخیره آبخوان‌ها شده است. چنانچه این شرایط در ادامه یابد، تقاضای آب در آینده به اندازه کافی تأمین نخواهد شد (Trinder and Liu, ۲۰۲۰). برای کاهش اثرات بحران آب بر زندگی مردم، بایستی منابع آب را به نحو مطلوب مدیریت نمود تا به توسعه پایدار دست یافت (Scott and Rajabifard, ۲۰۱۷). آب‌های زیرزمینی، منبع اصلی تأمین آب در اکثر مناطق ایران به ویژه مناطق با اقلیم‌های خشک می‌باشد (Masoumi et al. ۲۰۲۲). نقشه مکانی دقیق از پراکندگی پتانسیل آب‌های زیرزمینی در هر حوضه می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان برای مدیریت بهینه آب در هر منطقه کمک کند (Kumar et al. ۲۰۲۱). از این‌رو، این پژوهش سعی در بررسی پتانسیل آب‌زیرزمینی در دشت گوهرکوه در واقع در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران را دارد. بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی با توسعه مجتمع‌های کشت و صنعت به همراه خشکسالی‌های مداوم دهه‌های اخیر منجر به افت آب‌های زیرزمینی در این دشت گردیده است. در این بررسی سعی شده است از معیارهای مؤثر در پتانسیل آب زیرزمینی شامل شیب، مدل رقومی ارتفاع، بارش، تراکم زهکشی، تارکم خطواره، کاربری زمین/ پوشش زمین، زمین‌شناسی، لیتولوژی، خاک و پوشش گیاهی در یک فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی دشت گوهرکوه استفاده گردد. تمامی معیارهای انتخاب شده به طور گسترده برای ارزیابی پتانسیل آب‌های زیرزمینی توسط محققان قبلی به ویژه در ارزیابی پتانسیل آب‌زیرزمینی در مناطق خشک استفاده شده است (Khan et al. ۲۰۲۲; Algaydi et al. ۲۰۱۹; Al-Ruzoug et al. ۲۰۱۹; Elewa and Qaddah. ۲۰۱۱; Mallick et al. ۲۰۱۹; Uc Castillo et al. ۲۰۲۲; al. ۲۰۱۹). علاوه بر این، در دسترس بودن داده‌ها در انتخاب معیارهای مؤثر در پتانسیل آب زیرزمینی لحاظ شده است. از فرایند تحلیل شبکه به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تعیین وزن معیارها و انتخاب گزینه بهینه استفاده می‌گردد. علاوه بر این از تکنیک همپوشانی وزنی برای تلفیق معیارهای مختلف و شناسایی پهنه‌های متفاوت پتانسیل آب‌زیرزمینی استفاده می‌گردد. در نهایت، برای صحت‌سنجی نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب‌زیرزمینی از موقعیت مکانی و داده‌های دبی چاه‌های مورد بهره‌برداری در دشت گوهرکوه استفاده می‌گردد. تمامی این رویکردها و روش‌شناسی مورد استفاده

در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی توسط محققان پیشین مورد استفاده قرار گرفته است (فرجی سبکبار و همکاران، ۱۳۹۰؛ کثیری و همکاران، ۱۳۹۹؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ رحیمی و همکاران، ۱۳۹۵؛ Agarwal et al. ۲۰۱۳; Rajasekhar et al. ۲۰۱۹). به طور کلی، لایه معیارهای مؤثر در پتانسیل آب زیرزمینی از نقشه‌های توپوگرافی، نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه خاک‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای، مدل رقومی ارتفاع و داده‌های موقعیت منابع چاه‌ها تهیه می‌گردد.

۱-۲- بیان مسئله

بخش‌های شرقی و مرکزی ایران، کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر بارش در سال دریافت می‌کنند و در زمره اقلیم‌های فراخشک، نیمه‌خشک و خشک قرار می‌گیرند. به دلیل کمبود دریافت بارش سالانه، تغییرپذیری زمانی و مکانی قابل توجه آن و از طرفی بزرگی تبخیر، جریان‌های سطحی متعدد و قابل توجهی در این مناطق شکل نمی‌گیرد. اندک جریان‌های سطحی موجود در این مناطق، فصلی و متغیر بوده و میزان اعتماد به آن‌ها اندک می‌باشد. این منابع آب‌های سطحی در فصل بهار و به ویژه تابستان، کم‌آب و بدون آب هستند. بنابراین عمده تمرکز برای بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی می‌باشد. شایان ذکر است که منابع آب زیرزمینی نیز در این مناطق از غنای کافی برخوردار نیست. آب‌های زیرزمینی یکی از بارزش‌ترین و محدودترین ذخایر انباشته شده در زیرزمین بوده و برای اکوسیستم‌های آبرزی، انسانی و خاکی همیشه ارزشمند است (Fitts. ۲۰۰۲; Khan and Wen. ۲۰۲۱). ویژگی‌های ژئومورفیک، شیب منطقه، سنگ-شناسی، ساختارهای زمین‌شناسی و شبکه‌های زهکشی از مهمترین عوامل ایجاد و توزیع منابع آب زیرزمینی به شمار می‌روند (Gyeltshen et al. ۲۰۲۰). در دهه‌های گذشته، تقاضا برای آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به طور چشمگیری رشد یافته است که به طور مداوم فشار عظیمی را بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کند. آب‌های زیرزمینی همیشه به عنوان یک منبع آبی مهم برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک در نظر گرفته شده است. منابع آب زیرزمینی در نتیجه افزایش سریع جمعیت، صنعتی شدن، رشد کشاورزی و بهره‌برداری بیش از حد از سیستم‌های آبخوان به تدریج کاهش می‌یابد و به طور کامل احیاء نمی‌شود (Mishra et al. ۲۰۲۱). پایش و نظارت بر تحقیقات هیدروژئولوژیکی با یکپارچه‌سازی سیستماتیک داده‌ها، امکان تعیین سریع و مقرون به صرفه مناطق بالقوه آب زیرزمینی را فراهم می‌کند (Barik et al. ۲۰۱۷). بررسی‌های ژئوفیزیکی و هیدروژئولوژیکی،

نقشه‌برداری رخنمون، حفر چاه و غیره رایج‌ترین رویکردهای مورد استفاده برای شناسایی مناطق پتانسیل آب‌زیرزمینی هستند. اما این روش‌ها اغلب وقت‌گیر و هزینه‌بر هستند (Jha et al. ۲۰۱۰). در مقابل، فناوری‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی بسترهای منحصر به فردی را ایجاد می‌کنند که می‌توان از آن‌ها برای ارزیابی منابع طبیعی؛ به دلیل بازده بالا، هزینه کم و توانایی ایجاد تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی پیچیده و داده‌های زمانی – مکانی از یک مکان وسیع در یک دوره کوتاه استفاده نمود (Souissi et al. ۲۰۱۸). محققان برای تعیین مرزهای پتانسیل آب زیرزمینی در دو دهه اخیر از متغیرهای مختلف (جدول ۲-۳ و ۲-۴) و تکنیک‌های آماری متعدد (جدول ۱-۲ و ۲-۲) با دقت‌های مختلف استفاده نموده‌اند. این رویکردها شامل، مدل زون شواهد (Tahmassebpour et al. ۲۰۱۹; Corsini et al. ۲۰۱۶; al)، مدل نسبت فراوانی احتمالاتی (Manap et al. ۲۰۱۵; Moghaddam et al. ۲۰۱۴)، گاما-فازی (Antonakos et al. ۲۰۱۴)، آنتروپی شانون (Naghib and Pourghasemi. ۲۰۱۵)، تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (Brito et al. ۲۰۲۰; Samdoval and Tiburan. ۲۰۱۹; Singh et al. ۲۰۱۸)، تکنیک-های یادگیری ماشین جنگل تصادفی (Prasad et al. ۲۰۲۰; Golkarian et al. ۲۰۱۸)، شبکه عصبی مصنوعی (Lee et al. ۲۰۱۲; Li et al. ۲۰۱۹)، مجموعه یادگیری ماشین (Kamali Maskooni et al. ۲۰۲۰)، تابع شواهد قطعی (Nampak et al. ۲۰۱۴) و روش‌های رگرسیون لجستیک (Chen et al. ۲۰۱۸) می‌باشند.

در میان تکنیک‌های متنوع، سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، در مقایسه با روش‌های رایج بررسی‌های هیدروژئولوژیکی در تولید نتایج سریع بوده و همچنین مقرون به‌صرفه عمل نموده (Oh et al. ۲۰۱۱) و کاربردهای زیادی در اکتشاف آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و کم‌آب و با عدم موجودی داده‌های کافی داشته‌اند. آب‌های زیرزمینی را فقط می‌توان به طور غیرمستقیم با استفاده از داده‌های سنجش از دور، پیش‌بینی نمود؛ زیرا روی سطح زمین وجود ندارند. تاکنون تحقیقات زیادی از روش‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تعیین منابع آب زیرزمینی استفاده نموده‌اند (Arulbalaji et al. ۲۰۱۹; Fildes et al. ۲۰۲۰; Mukherjee and Singh. ۲۰۲۰). سنر و همکاران (Sener et al. ۲۰۰۵) بیان کرده‌اند که تکنیک‌های سنجش از دور می‌توانند به طوثر مؤثری ویژگی‌های سطح زمین (به عنوان مثال، زمین‌شناسی و خطواره‌ها) را تشخیص دهند و همچنین می‌توان از آن برای تشخیص مناطق تغذیه آب زیرزمینی استفاده نمود. در دهه‌های اخیر، بسیاری از محققان در این زمینه علاقه زیادی نشان داده‌اند و از روش‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی

استفاده نموده‌اند (Deepa et al. ۲۰۱۶; Chen et al. ۲۰۱۸; Kamruzzaman et al. ۲۰۲۰). داده‌های سنجش از دور برای تخمین کیفی منابع آب زیرزمینی با تجزیه و تحلیل و استخراج مورفولوژی سطح، ساختارهای زمین‌شناسی و نشانه‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند. علاوه بر این، یک نمای کلی بهبودیافته و تحلیل سازمان‌یافته از واحدهای ژئومورفیک، ویژگی‌های خطی و توپوگرافی ارائه می‌کند که محیط‌های آب زیرزمینی را کنترل می‌کنند. سیستم اطلاعات جغرافیایی برای بهره‌برداری، مدیریت و متمایز نمودن محصولات سنجش از دور، کاوش مکان‌ها، ادغام عوامل بالقوه برای تغذیه آب‌های زیرزمینی و ایجاد روابط وزنی مناسب استفاده شده است. به گونه‌ای که منطقه تغذیه آب زیرزمینی و مکانیسم جریان آن را می‌توان با این تکنیک‌ها تعیین نمود.

۳-۱- سؤال‌های پژوهش

۱. الگوی توزیع مکانی پهنه‌های با پتانسیل بالای آب‌زیرزمینی در دشت گوهرکوه چگونه است؟
۲. ارتباط بین الگوی‌های مکانی پتانسیل آب زیرزمینی و مؤلفه‌ها و فاکتورهای دخیل در پتانسیل آب زیرزمینی در دشت گوهرکوه چگونه است؟

۴-۱- فرضیه‌های پژوهش

۱. مناطق به پتانسیل بالای آب زیرزمینی در دشت گوهرکوه در شیب‌های کم و رسوبات آبرفتی نفوذپذیر در انتهای حوضه آبریز قرار گرفته است.
۲. توپولوژی، زمین‌شناسی، پوشش زمین و هیدرواقلیم به ترتیب اثرگذارترین مؤلفه‌ها در پتانسیل آب زیرزمینی در دشت گوهرکوه می‌باشند.

۵-۱- ضرورت پژوهش

از آن‌جا که منابع آب سطحی در بسیاری از مناطق کشور ایران به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار محدود است، آب‌های زیرزمینی به عنوان مناسب‌ترین منبع در دسترس جهت تأمین آب مورد نیاز به حساب می‌آید. آب زیرزمینی از طرفی به دلیل شیرین بودن، ترکیبات شیمیایی ثابت‌تر، آلودگی کمتر و سطح اطمینان بیشتر به عنوان یک منبع قابل اتکاء به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب شده و از سوی دیگر با تأثیر بر توان اکولوژیک

سرزمین یک پدیده مهم و مؤثر در توسعه اقتصادی، تنوع اکولوژیکی و سلامت جامعه به حساب می‌آید. بخشی از آب حاصل از ریزش‌های جوی متناسب با ویژگی‌های زمین، به درون زمین نفوذ کرده و منابع آب زیرزمینی را شکل می‌دهد. مقدار نفوذ و حجم آب‌های زیرزمینی در مکان‌های مختلف، متفاوت بوده و بستگی به عوامل و فاکتورهای متعدد از جمله نوع، مقدار و شدت بارش، جنس خاک، درجه حرارت، کاربری اراضی، شیب و ارتفاع و غیره دارد. واضح است که در دسترس بودن آب زیرزمینی از جایی به جایی دیگر متفاوت باشد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که جریان سطحی در نتیجه کمبود بارش و فزونی تبخیر و تعرق، بسیار محدود است؛ مردم برای تأمین نیاز آب برای مصارف مختلف از جمله شرب و کشاورزی به اشکال آب زیرزمینی مانند قنات، چاه و چشمه وابسته هستند. آبخوان‌ها به دلیل افت تراز آبی، کاهش کیفیت، تأثیرپذیری از تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی و تغییر نظام بارش و رخداد خشکسالی‌های متوالی، از چالش‌های مهم توسعه پایدار به شمار می‌آیند.

امروزه محدودیت و نبود آب زیرزمینی در دشت‌های ایران بسیار بحرانی و حاد شده است. برداشت بی‌رویه و غیراصولی از منابع آب زیرزمینی در این مناطق می‌تواند پیامدهای بسیار فاجعه‌باری داشته باشد. لازم است یک برنامه مدیریتی برای برداشت آب‌های زیرزمینی با علم به میزان موجودی منابع آب زیرزمینی و میزان تغذیه و شارژ سالانه آن داشت. بنابراین، شناسایی منابع آب زیرزمینی و پتانسیل‌یابی آن بایستی با برنامه‌های تغذیه طبیعی و مصنوعی سفره آب زیرزمینی برای بهبود و تدقیق منابع آب زیرزمینی همراه باشد. همان‌گونه که برداشت بیش از حد سبب افت سطح آب‌های زیرزمینی می‌گردد؛ کاهش بسترهای تغذیه طبیعی آب در نتیجه مداخلات انسانی مانند شهرسازی، صنعت، جاده‌سازی و غیره نیز در این باره مؤثر است. بنابراین نیاز به تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی یک مداخله هوشمند برای تقویت منابع آب‌های زیرزمینی محسوب می‌گردد. آب‌های زیرزمینی در طی دهه‌های اخیر عمدتاً به دلیل برداشت بی‌رویه با کاهش کمی و کیفی مواجه بوده‌اند. مدیریت منابع آب زیرزمینی از طریق اکتشاف و بهره‌برداری متناسب با پتانسیل آبخوان یکی از استراتژی‌های کارآمد در مدیریت منابع آب زیرزمینی می‌باشد. واضح است که پتانسیل آب‌های زیرزمینی به ویژگی‌های مختلف از رویه زمین، زیر سطح زمین و پارامترهای هواشناسی بستگی دارد. بنابراین، شناسایی و لحاظ نمودن پارامترهای مؤثر جهت تعیین پهنه‌های با پتانسیل بالای آب زیرزمینی با بهره‌گیری از روش‌های نوین تهیه و تلفیق مجموعه داده‌ها و اتخاذ روش‌های نوین تصمیم‌گیری مانند سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری در سامانه اطلاعات جغرافیایی، لازم و اجتناب‌پذیر است.

خشکی زیاد و بارش کم دو عامل اصلی محیطی مسئول منابع ناچیز آب سطحی در نیمه شرقی ایران هستند. این امر مستلزم بهبود دانش و نقشه‌برداری از منابع آب زیرزمینی موجود در این مناطق است. در مقیاس محلی، دشت گوهر کوه واقع در استان سیستان و بلوچستان، یکی از مناطق امیدوارکننده برای توسعه کشاورزی و گردشگری است. آب زیرزمینی تنها منبع آبی برای مصارف خانگی، کشاورزی و استفاده صنعتی در این منطقه است. افزایش مداوم جمعیت، کشاورزی و صنعت، تقاضای آب را افزایش داده و بحران آب را تشدید می‌کنند. با این حال، تلاش‌ها برای مدیریت مصرف آب در جهت غلبه بر بحران آب ادامه دارد. تشخیص و مدیریت پتانسیل آبدهی آبخوان به دلیل تقاضای آب، مورد توجه زیادی قرار گرفته است.

با توجه به موضوعاتی که در بالا ذکر شد، هدف از این پژوهش شناسایی مناطق بالقوه آب‌زیرزمینی در آبخوان دشت گوهرکوه با تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌باشد. تحقیق حاضر به تأثیر مؤلفه‌های توپولوژی، زمین‌شناسی، هیدروکلیماتولوژیکی و پوشش زمین بر روی آبخوان دشت گوهرکوه پرداخته و متعاقباً برای تولید نقشه پتانسیل آب‌زیرزمینی مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این لایه‌ها با استفاده از روش‌های چندگانه زمین فضایی ایجاد شده‌اند. نتایج این مطالعه می‌تواند استفاده پایدار از منابع آبخوان، افزایش درآمد سرانه و مدیریت منابع آب زیرزمینی را بهبود ببخشد.

۱-۶- اهداف پژوهش

۱-۶-۱- هدف اصلی

شناسایی الگوهای مکانی پتانسیل‌های متفاوت منابع آب‌زیرزمینی در دشت گوهرکوه

۱-۶-۲- اهداف جزئی

۱. شناسایی فاکتورهای مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی و ارتباط بین آن‌ها در دشت گوهرکوه.

۲. تهیه نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب‌زیرزمینی در دشت گوهرکوه.

۳. ارزیابی نتایج پهنه‌بندی پتانسیل آب‌زیرزمینی و مقایسه نتایج با واقعیت‌ها و شرایط موجود.

۴. شناسایی و معرفی بسترهای دارای پتانسیل بالا جهت استخراج آب زیرزمینی با هدف کاهش هزینه‌های مالی و زیست‌محیطی.

۵. شناسایی و معرفی مناطق دارای پتانسیل بالای تغذیه مصنوعی آب‌خوان دشت گوهرگوه با هدف تقویت منابع آب زیرزمینی.

۷-۱- ساختار پژوهش

این پژوهش در فصل اول در برگیرنده مقدمه، بیان مسئله و موضوع پژوهش، پرسش، ضرورت و اهداف و مشکلات پژوهش می‌باشد. در فصل دوم به مروری بر مبانی نظری و پیشینه و بررسی‌های صورت گرفته در جهان و ایران در زمینه و مرتبط با موضوع پژوهش پرداخته شده است. در این فصل ضمن مرور جامع مطالعات مرتبط با موضوع به ویژه در دو دهه اخیر، تلاش می‌گردد یک مدل مفهومی برای حل مسأله پژوهش توسعه یابد. در فصل سوم موقعیت جغرافیایی دشت گوهر، داده‌های مورد استفاده در پژوهش و روش‌های به کارگیری این داده‌ها جهت تجزیه و تحلیل نتایج تشریح می‌گردد. در فصل چهارم به یافته‌های پژوهش در زمینه درجه تأثیرگذاری فاکتورهای دخیل در پتانسیل آب زیرزمینی و تلفیق آن‌ها با شاخص همپوشانی وزنی و نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در دشت گوهرکوه می‌پردازد. مقایسه نقشه پیش‌بینی شده پتانسیل آب زیرزمینی با داده‌های موقعیت و دبی چاه‌های موجود در دشت با استفاده از روش‌های رایج صحت‌سنجی نیز بخش پایانی فصل چهارم را شامل می‌شود. فصل پایانی (پنجم) شامل نتیجه‌گیری و منابع پژوهش می‌باشد.

فصل دوم

پیشینه پژوهش

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به روش‌های مختلف انجام می‌گیرد. انتخاب لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در تغذیه آب‌های زیرزمینی و تشخیص درجه اهمیت آن‌ها در تغذیه آبخوان‌ها یکی از مراحل مهم پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در هر روش پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی به شمار می‌رود. در این قسمت از پژوهش سعی شده است با مرور ادبیات و پیشینه پژوهش به روش‌های پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، معیارهای مؤثر و همچنین تکنیک‌هایی صحت‌سنجی نقشه پیش‌بینی پتانسیل منابع آب زیرزمینی پرداخته شود تا یک مدل مفهومی برای دستیابی به هدف تحقیق تعیین گردد.

۲-۲- پیشینه پژوهش

توسعه کشاورزی و افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی در ماهی‌دشت استان کرمانشاه شده است. در جهت تعدیل این بحران، تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی و انتخاب مکان مناسب برای اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی در دستور کار قرار گرفته است. برای مکان‌یابی پخش سیلاب در ماهی‌دشت از هفت عامل مؤثر در مکان‌یابی تغذیه مصنوعی شامل شیب، ضخامت آبرفت، زمین‌شناسی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، کاربری اراضی، عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی و شبکه آبراه‌های در سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شده است. سپس، محدوده‌های تغییراتی لایه‌ها بر اساس اهمیت آن‌ها در مکان‌یابی، طبقه‌بندی شده و لایه‌های اطلاعاتی نسبت به یکدیگر و طبقات هر لایه اطلاعاتی با توجه به اهمیت در مکان‌یابی، با استفاده از سیستم تحلیل سلسه‌مراتبی ارزش‌گذاری و در نهایت با استفاده از روش همپوشانی شاخص وزنی، تلفیق شده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده است که در حدود ۶ درصد از گستره دشت به عنوان مناسب‌ترین مکان برای تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی به روش پخش سیلاب می‌باشند (تیزرو و همکاران، ۱۳۹۱).

کارآیی روش تحلیل سلسله‌مراتبی در پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی دشت قروه - دهگلان مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور از پارامترهای پنج‌گانه شامل بارندگی، سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، تراکم خطواره و شیب زمین استفاده شده است. نظر کارشناسان برای مقایسات زوجی این پارامترها در قالب پرسشنامه اخذ و وزن نرمال شده پارامترها بر اساس مقیاس ساعتی و اهمیت نسبی آن‌ها در پتانسیل آب زیرزمینی با روش تحلیل سلسله‌مراتبی و فن بردار ویژه تعیین گردیده است. در نهایت نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی به روش ترکیب خطی

وزنی تهیه شده است. اعتبارسنجی نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی بر پایه مدل نسبت فراوانی و با استفاده از نتایج پمپاژ ۲۰ حلقه چاه در منطقه مورد مطالعه انجام گرفته است. نتایج حاصل از مقایسه پتانسیل پیش‌بینی شده آب زیرزمینی و توصیف ظرفیت ویژه چاه‌ها نشان داده است که دقت نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی ۸۵ درصد بوده است (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۶).

از روش فازی بهبودیافته در پتانسیل‌یابی مکان‌های مناسب تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی دشت همدان- بهار استفاده شده است. در این بررسی، معیارهای هشتگانه شامل شیب، ضخامت آبرفت، سنگ‌شناسی، تراکم آبراهه، تراکم گسل، بارش، کاربری اراضی و کیفیت آب برای شناسایی مناطق مناسب تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی انتخاب شده‌اند. سپس، از تابع عضویت لجستیکی برای فازی‌سازی معیارها و تخصیص وزن به معیارها استفاده شده است. در نهایت از عملگر گاما به منظور تلفیق و ترکیب نقشه‌های شاهد وزن‌دار بهره گرفته شده و محل‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی به ترتیب اولویت شناسایی شده‌اند. نتایج این بررسی به طور سوگیرانه به برتری روش فازی در پتانسیل‌یابی و کاهش عدم قطعیت در تخصیص وزن معیارها می‌پردازد. نویسندگان ادعا کرده‌اند که روش فازی داده محور عملکرد بهتری نسبت به روش‌های دانش‌محور در تلفیق نقشه‌های وزن‌دار پیوسته و تولید مدل‌های مکانی دارد. زیرا دخالت ندادن نظر شخصی در وزن‌دهی و عدم طبقه‌بندی و ساده‌سازی داده‌های پیوسته، از بروز خطاهای تصادفی جلوگیری می‌کند (فرخ‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸).

مناطق با پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی در شهرستان سمنان با رویکرد تلفیقی سیستم سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی شناسایی گردیده است. برای این منظور از لایه‌های هشت‌گانه شامل شیب، فاصله از شبکه آبراهه سطحی، رده خاک، نوع اقلیم، پوشش سطحی، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی و فاصله از گسل استفاده شده است. برای وزن‌دهی به معیارها و شاخص‌های انتخابی از روش سلسله مراتبی و برای تلفیق و همپوشانی لایه‌های از محاسبه گر رستری در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شده است. جهت تجزیه، تحلیل و اولویت‌بندی معیارهای شناسایی شده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است. برای این منظور اقدام به تهیه پرسشنامه جهت گردآوری نظرات ده نفر از کارشناسان و متخصصان گردیده است. با مقایسه زوجی معیارها و شاخص‌ها نسبت به همدیگر، نمره‌دهی و اهمیت آن‌ها مشخص شده است. معیار سنگ‌شناسی به عنوان مؤثرترین معیار در پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی در شهرستان سمنان شناخته شده است. نتایج بررسی نشان داده است که

مکان‌های تغذیه مصنوعی شناسایی شده از لحاظ عملی و کاربردی تناسب بالایی داشته و روش‌شناسی مورد استفاده جهت تعیین مناطق با پتانسیل تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی عملکرد خوبی داشته است (سلیمانی ساردو و همکاران، ۱۳۹۵).

پخش سیلاب به عنوان یک استراتژی برای مهار سیلاب و بهره‌وری از آن محسوب می‌شود. تعیین عرصه‌های مناسب برای پخش سیلاب و وارد کردن آن به یک سازند نفوذپذیر، یکی از مهمترین عوامل تعیین‌کننده موفقیت طرح‌های پخش سیلاب می‌باشد. در این راستا، با تلفیق سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره، مناسب‌ترین عرصه‌ها برای اجرای عملیات پخش سیلاب در دشت گربایگان فسا شناسایی شده است. برای این منظور از هشت پارامتر تأثیرگذار شامل شیب، کیفیت آب، زمین‌شناسی، ضخامت آبرفت، کاربری اراضی، قابلیت انتقال، ژئومورفولوژی و تراکم زهکشی استفاده شده است. با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای که شکل کلی‌تر از فرایند تحلیل سلسله مراتبی است و مقایسه زوجی به ترتیب وزن هر معیار و وزن کلاس‌های هر لایه محاسبه و نواحی دارای محدودیت برای پخش سیلاب در مرحله بعدی حذف گردیده است. سپس با استفاده از توابع تحلیلی سیستم اطلاعات جغرافیایی، کل محدوده برای هریک از معیارهای انتخاب شده، پهنه‌بندی و در نهایت با تلفیق نقشه‌های پهنه‌بندی شده بر اساس وزن اکتسابی از روش تحلیل شبکه‌ای، نقشه نهایی در پنج کلاس از کاملاً مناسب تا نامناسب تهیه گردیده است. برای دستیابی به نتایج بهتر، از روش شکست طبیعی، برای تقسیم‌بندی منطقه به کلاس‌های پنج‌گانه کاملاً مناسب تا نامناسب نیز استفاده شده است. علاوه بر کنترل زمینی، به منظور بررسی کارایی همزمان سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری، نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق پخش سیلاب با عرصه‌های کنترل همپوشانی داده شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که مناطق کاملاً مناسب برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، اغلب در نهشته‌های کواترنری، واحدهای ژئومورفولوژیکی پدیمنتی و مخروط‌افکنه‌ای با شیب کمتر از ۳ درصد واقع شده‌اند (فرجی سبکبار و همکاران، ۱۳۹۰).

بسیاری از دانشمندان از تکنیک‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی استفاده کرده‌اند. بکارگیری توأمان این تکنیک‌ها با نقشه‌های مربوط به زمین، به خوبی به عنوان تکنیکی برای نقشه‌برداری زیرزمینی و اکتشاف، به ویژه در مناطق خشک و فاقد اطلاعات داده‌ای مناسب، شناخته شده است. با این رویکرد، پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مهران مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، از لایه‌های

اطلاعاتی هفتگانه شامل عمق آب زیرزمینی، شیب، ارتفاع، سنگ‌شناسی، تراکم زهکشی، تراکم خطواره یا گسله‌ها و کاربری اراضی استفاده شده است. از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی برای وزن‌دهی به لایه‌ها استفاده شده و کلاس‌بندی و وزن‌های هر لایه مشخص گردیده است. برای تلفیق لایه‌ها و تولید نقشه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی از توابع همپوشانی لایه‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شده است. نتایج این بررسی پهنه‌های دارای پتانسیل کم، متوسط و زیاد آب زیرزمینی در منطقه مهران را نشان داده است (محمودی جم و همکاران، ۱۳۹۵).

نقشه تهیه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در محدوده یاسوج- سی سخت با استفاده از دو مدل داده‌کاوی و آماری شامل جنگل تصادفی و مدل آماری رگرسیون خطی تعمیم‌یافته انجام گرفته است. برای این منظور، لایه‌های اطلاعاتی شامل درجه شیب، جهت شیب، طول شیب، ارتفاع از سطح دریا، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از گسل، فاصله از آبراهه، بارندگی، کاربری اراضی، سنگ‌شناسی، شاخص موقعیت توپوگرافی و شاخص قدرت جریان به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر پتانسیل آب زیرزمینی تعیین شده است. سپس، از پراکنش ۳۶۲ چشمه موجود در سطح منطقه، ۷۰ درصد به عنوان نمونه‌های آموزشی و ۳۰ درصد به عنوان نمونه‌های کنترلی استفاده شده‌اند. نتایج نشان داده است که سطح طبقات حضور آب زیرزمینی با پتانسیل خیلی زیاد در هر دو روش جنگل تصادفی و رگرسیون خطی تعمیم‌یافته، همانند می‌باشد. همچنین با حساسیت‌سنجی عوامل مرثر در هر دو روش، عامل‌های بارندگی، ارتفاع از سطح دریا و فاصله از گسل به عنوان حساس‌ترین عوامل تعیین شده‌اند. ارزیابی دقت مدل‌های داده‌کاوی نیز با استفاده از منحنی عملکرد نسبی مورد سنجش قرار گرفته و نتایج نشان داده است که مدل جنگل تصادفی در تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی دارای عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیون خطی تعمیم‌یافته بوده است (آوند و همکاران، ۱۳۹۸).

مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل تکنیک ترجیح بر اساس مشابهت به راه‌حل ایده‌ال که با اختصار تاپسیس (TOPSIS) نامیده می‌شود و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه دشت یزد- اردکان در سیستم اطلاعات جغرافیایی بکار گرفته شده‌اند. ابتدا عوامل طبیعی مؤثر در ایجاد مکان‌های احتمالی ذخایر آب زیرزمینی تعیین گردیده است. این معیارها شامل زمین ریخت‌شناسی (ژئومورفولوژی)، زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی، اقلیمی و کاربری یا پوشش سطح زمین بوده است. در مبحث

زمین‌ریخت‌شناسی، مهم‌ترین معیارها مؤثر بر ایجاد و یا تغییر در منابع آب به سه گروه مناطق پست، اراضی تپه ماهوری و مناطق کوهستانی تقسیم شده است. معیارهای زمین‌شناسی به دو گروه لیتولوژی و تکتونیک تقسیم شده و در گروه لیتولوژی مهم‌ترین سازندها و تشکیلات زمین‌شناسی تأثیرگذار بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی به چهار گروه سازندهای درشت دانه، متوسط، ریزدانه و آذرین تقسیم شده است. در گروه تکتونیک نیز خطواره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. مهم‌ترین معیار هیدرولوژیکی و اقلیمی به ترتیب، تراکم آبراهه و بارش انتخاب گردیده است. مهم‌ترین معیار توپوگرافی، نیز شیب تعیین شده است که نقش مهمی در نفوذ یا ایجاد رواناب ناشی از بارش دارد. انواع پوشش سطح زمین نیز باعث تغییر در سرعت جریان سطحی و تغییر در میزان نفوذ آب گردیده و از این لحاظ در معیار کاربری اراضی انتخاب شده است. با بررسی نتایج حاصل از اعمال دو مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل تکنیک ترجیح بر اساس مشابَهت به راه‌حل ایده‌ال و فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر روی معیارهای انتخابی، مشاهده شده است که به ترتیب روش تحلیل سلسله مراتبی با ۶۹/۵ درصد و روش تاپسیس با ۳۴/۴ درصد مناطق با پتانسیل خوب و بالا از نظر منابع آب زیرزمینی را تفکیک نموده‌اند. از این نظر روش تحلیل سلسله مراتبی کارایی بیشتری در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دارا بوده است که با نتایج (نخعی و همکاران، ۱۳۹۱) و (مهریان و همکاران، ۱۳۹۰) همخوانی داشته است. همچنین به منظور برآورد دقت مدل‌های مورد استفاده، از منابع آب موجود در منطقه به تعداد ۵۲۹ مورد استفاده شده که ۱۰ درصد منابع آبی موجود در حوضه بوده‌اند. نتایج این بررسی با نیز نشان داده است که نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی تهیه شده به روش تحلیل سلسله مراتبی بیشترین تشابه را با منابع آبی موجود دارا می‌باشد (مفیدفر و همکاران، ۱۳۹۴).

در پژوهشی مشابه، پهنه‌بندی پتانسیل‌سنجی منابع آب زیرزمینی دشت اردکان - یزد با استفاده از تحلیل فرایند سلسله مراتبی انجام گرفته است. در این پژوهش، چهار عامل تأثیرگذار شامل عوامل زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی، فاصله از گسل و تراکم گسل)، عامل اقلیمی (بارش)، عامل هیدرولوژیکی (فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه) و عامل توپولوژی (شیب و طبقات ارتفاعی) برای پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شده است. زون‌دهی به معیارها و زیرمعیارها توسط فرایند تحلیل سلسله مراتبی انجام گرفته است. مقایسه بین عوامل چهارگانه نشان داده است که وزن مربوط به عامل اقلیمی (بارش) بیشینه و در سوی دیگر وزن عامل توپولوژی کمینه می‌باشد. بعد از نرمال‌سازی لایه‌ها و محاسبه میزان سازگاری با روش بردار ویژه، تلفیق لایه‌ها در محاسبه گر رستری سیستم اطلاعات جغرافیایی

انجام و نقشه نهایی پهنه‌بندی پتانسیل منابع آب زیرزمینی تهیه گردیده است. نتایج این بررسی نشان‌دهنده پتانسیل بالای منابع آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان بوده است. به گونه‌ای که ۶۰ درصد مساحت دشت دارای پتانسیل خیلی زیاد شناسایی گردیده است (عبدالهی و بالاجه، ۱۳۹۸). نتایج این پژوهش با رویکرد مشابه پژوهش (مهدیفر و همکاران، ۱۳۹۴) تقریباً یکسان است.

پتانسیل‌یابی مناطق مستعد برای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در حوضه رومشگان از زیرحوضه‌های کرخه در استان لرستان با رویکرد میان‌یابی در سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است. برای این منظور، از لایه‌های اطلاعاتی هفت‌گانه شامل شیب، سنگ‌شناسی، گسل، بارش، آبراهه، کاربری اراضی و ارتفاع بهره گرفته شده است. یافته‌های حاصل از بررسی عوامل مؤثر در تعیین پتانسیل مناطق مختلف حوضه آبریز در منابع آب زیرزمینی نشان داده است که فاکتورهای سنگ‌شناسی، شیب و بارش اهمیت بیشتری نسبت به سایر فاکتورها داشته‌اند. علاوه بر آن پهنه‌های با پتانسیل بالا در قسمت‌های غربی و شرقی حوضه و پهنه‌های با پتانسیل پایین در بخش مرکزی حوضه شناسایی شده است. مساعد بودن شرایط سنگ‌شناسی (آهک و گنجلومرا)، شیب کم و بارش زیاد (۴۵۰ تا ۶۵۰ میلیمتر در سال) بیش از سایر فاکتورها در تغذیه آب‌های زیرزمینی و پتانسیل آن مؤثر بوده است (انتظاری و غلامی، ۱۳۹۳).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در دشت همدان - بهار با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است. برای این منظور از لایه‌های مدل رقومی ارتفاع، ضخامت آبرفت، زمین‌شناسی، سطح ایستابی، شاخص رطوبت توپوگرافی، جهت شیب، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی استفاده گردیده است. مازاد بر آن یک لایه اطلاعاتی از ۴۰ حلقه چاه با بیشترین دبی در بین چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نیز برای استفاده گردیده است. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل بر اساس سطح زیر نمودار (AUC) از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) نشان داده است که مدل تولید شده عملکرد بسیار خوبی در پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی دارا بوده است. نتایج حاصل از آزمون جک‌نایف (Jackknife) جهت تعیین مهمترین پارامترهای تأثیرگذار و تحلیل حساسیت نیز نشان داده است که پارامتر ارتفاع، ضخامت آبرفت، زمین‌شناسی و سطح ایستابی مهم‌ترین متغیرهای اثرگذار بر پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی بوده است (زرنندی و همکاران، ۱۳۹۶).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی برپایه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) در دشت ناز سازی انجام گرفته است. در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی از عوامل مؤثر بر نفوذپذیری خاک و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شامل لایه‌های زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، شیب، جهت شیب، بارش، دما، ارتفاع، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه و تراکم آبراهه، فاصله از جاده و تراکم آبراهه استفاده شده است. علاوه بر آن از موقعیت مکانی و آمار چشمه‌ها و قنوت و مختصات ۱۴۲ چاه پیژومتری و آمار تراز آب آن‌ها در منطقه مورد بررسی به مثابه ورودی تهیه لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز برای فرایند پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی با بهره‌گیری از فرایند تحلیل شبکه‌ای استفاده شده است. در گام نخست، لایه‌های اطلاعاتی به صورت لایه رستری تهیه شده و سپس هریک از عوامل در بردار وزن به دست آمده از روش فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) ضرب و نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی منطقه از راه حاصل جمع لایه‌های نهایی عوامل اقلیمی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، توپولوژی و زیست محیطی تهیه شده است. در نهایت با بهره‌گیری از منحنی ویژگی‌های عامل نسبی (ROC)، نقشه تهیه شده، اعتبارسنجی گردیده است. ارزیابی دقت روش فرایند تحلیل شبکه‌ای با استفاده از مقایسه نقشه موقعیت منابع آب زیرزمینی شامل چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوت و نقشه پتانسیل برآورد شده نشان داده است که بیش از ۹۹ درصد منابع آب زیرزمینی در مناطق با پتانسیل زیاد قرار داشته‌اند. بر اساس نقشه نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، پهنه‌های با پتانسیل زیاد و بسیار زیاد، بیشتر منطبق بر ارتفاعات کم به دلیل شیب کمتر، تراس‌های آبرفتی، مخروط‌افکنه‌ها و مناطق دشتی بوده است (کشیری‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۹).

بر اساس مدل‌های آنتروپی شانون و نسبت فراوانی، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت سرو در استان آذربایجان غربی مطالعه شده است. برای این منظور، داده‌های آبدی چاه‌های بهره‌برداری محدوده مورد مطالعه به عنوان متغیر وابسته جمع‌آوری و پس از آن، آبدی چاه‌های مذکور به دو گروه آبدی بالا (بیش از ۱۱ مترمکعب بر ساعت) و آبدی پایین (کمتر از ۱۱ مترمکعب بر ساعت) تقسیم گردیده است. در نهایت داده‌های آبدی بالا نیز به دو دسته جهت ساخت مدل یا محله واسنجی (داده‌های آموزش) و صحت‌سنجی یا اعتبارسنجی (داده‌های آزمایش) تقسیم گردیده است. سپس عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی شامل شیب زمین، جهت شیب، ارتفاع، بارش، انحنای کلی زمین، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، فاصله تا گسل و نقشه خاک‌شناسی به عنوان متغیرهای

مستقل تهیه گردیده است. متغیرهای مستقل به شبکه ۲۰ در ۲۰ متر بر اساس مدل رقومی ارتفاع تبدیل و برای طبقه‌بندی آن‌ها از روش شکست طبیعی (Breaks Natural) یا جنک (Jenks' Method) بر اساس مرور منابع استفاده شده است. در نهایت، پس از تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی توسط مدل‌های مذکور، ارزیابی عملکرد مدل‌ها بر اساس سطح زیر نمودار (AUC) از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) نشان داده است که هر دو مدل دارای صحت قابل قبولی بوده؛ اما مدل نسبت فراوانی دارای عملکرد بهتری بوده است. مهمترین فاکتورهای مؤثر در پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی دشت سرو نیز به ترتیب اهمیت، کاربری اراضی، خاک، زمین‌شناسی و طبقات ارتفاعی بوده است (خوش‌طینت و همکاران، ۱۳۹۹).

از روش نسبت فراوانی (FR) برپایه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی دشت الشتر در استان لرستان استفاده شده است. برای این منظور از هفت فاکتور مؤثر بر رخداد و وقوع آب‌های زیرزمینی شامل شیب، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، انحنای زمین، شاخص توان رودخانه (SPI)، زمین‌شناسی و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، استفاده شده است. مازاد بر آن، از تعداد ۲۸ حلقه چاه موجود در منطقه که دارای آبدهی بالای ۱۱ مترمکعب بر ساعت بوده‌ان نیز استفاده شده است. تعداد ۲۰ حلقه چاه برای مرحله آموزش و تعداد هشت حلقه چاه برای مرحله اعتبارسنجی و آزمایش استفاده شده است. مجموعه گروه چاه‌های واسنجی به عنوان متغیر وابسته و پارامترهای انتخابی از جمله شیب، طبقات ارتفاعی و غیره به عنوان متغیرهای مستقل به تکنیک نسبت فراوانی معرفی شده‌اند. با استفاده از این تکنیک، احتمال رخداد چاه قرار گرفته در هر کلاس برای تمامی پارامترها محاسبه گردیده است. نقشه تهیه شده در نهایت به پنج کلاس دارای پتانسیل خیلی‌زیاد یا پتانسیل خیلی‌کم طبقه‌بندی شده است. طبق اعتبارسنجی صورت گرفته بر مبنای منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)، مدل نسبت فراوانی دارای ۸۵ درصد صحت برای تهیه نقشه‌های پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت الشتر بوده است. نتایج نشان داده است که حاشیه‌های شمالی و غربی دشت الشتر دارای پتانسیل بالا و مرکز دشت دارای پتانسیل متوسط بوده است. رخداد آب زیرزمینی در دشت الشتر با شیب دارای رابطه عکس بوده است و آب‌های زیرزمینی در شیب‌های کم رخمون داشته‌اند. با افزایش رطوبت توپوگرافی نیز احتمال رخداد آب زیرزمینی بیش‌تر شده است؛ زیرا که افزایش این فاکتور به معنی افزایش رطوبت می‌باشد. با افزایش ارتفاع نیز احتمال رخداد آب زیرزمینی کاهش یافته است. انحنای مسطح و مقعر دارای تأثیر بیشتری بر رخداد آب‌های

زیرزمینی نسبت به انحنای محدب داشته است. بیشترین رخداد آب‌های زیرزمینی نیز در کاربری‌های اراضی ویژه از جمله زراعت دیم و آبی وجود داشته است. فاکتور توان آبراهه نیز با رخداد آب زیرزمینی رابطه عکس داشته است. از نظر فاکتور زمین‌شناسی نیز آبرفت‌های کهن دارای تأثیر بیشتری در رخداد آب زیرزمینی در دشت الشتر بوده‌اند (نوحانی و همکاران، ۱۳۹۷).

کارایی مدل نسبت فراوانی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت ازنا- الیگودرز در استان لرستان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا لایه‌های رقمی یازده فاکتور مؤثر در پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی شامل ارتفاع زمین، سنگ‌شناسی، انحنای سطح زمین، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، تراکم شبکه آبراهه‌ها، فاصله از گسل، تراکم گسل، خاک‌شناسی و شاخص رطوبت توپوگرافی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تهیه شده است. تعداد ۳۷۰ حلقه چاه موجود در منطقه نیز با آبدهی بیشتر از ۱۱ مترمکعب بر ساعت به عنوان چاه‌های دارای آبدهی مناسب انتخاب و لایه موقعیت رقمی آن‌ها به صورت تصادفی به گروه‌های آموزشی (۷۰٪) و اعتبارسنجی (۳۰٪) تقسیم شده است. سپس لایه‌های مربوط به متغیرهای محیطی طبقه‌بندی و بر اساس تراکم چاه‌ها و مدل نسبت فراوانی، وزن هر یک از کلاس‌ها تعیین گردیده است. در نهایت نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی بر اساس مدل نسبت فراوانی تهیه شده است. صحت نقشه نهایی بر اساس منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)، ارزیابی گردیده است. نتایج نشان داده است که نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی تهیه شده بر اساس مدل نسبت فراوانی دارای اعتبار بالایی بوده است. مناطق با ارتفاع و شیب کم‌تر دارای پتانسیل بالای از منابع آب زیرزمینی بوده است. از جنبه کاربری اراضی، مناطق با پوشش گیاهی زراعی و مرتع نیز دارای پتانسیل بیشتری برای منابع آب زیرزمینی بوده‌اند. مناطق با تراکم بیشتر آبراهه‌ها عموماً در مناطق با تراکم بیشتر گسل‌ها قرار داشته و این مناطق نیز دارای پتانسیل بالایی از منابع آب زیرزمینی بوده‌اند (قربانی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۶).

نقشه پتانسیل آب زیرزمینی منطقه لنجانان استان اصفهان به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل وزن شواهد و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است. برای این منظور از لایه‌های اطلاعاتی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای زمین، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، خاک‌شناسی، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از گسل، تراکم گسل، تراکم آبراهه و فاصله از آبراهه به عنوان متغیرهای مستقل و تعداد ۶۲۴ حلقه چاه با آبدهی بیش از ۱۱ مترمکعب بر ساعت به عنوان متغیر وابسته استفاده شده است. ۷۰ درصد چاه‌ها برای

واسنجی و ۳۰ درصد برای مرحله اعتبارسنجی استفاده شده است. برای اعتبارسنجی نتایج مدل از منحنی مشخصه عملکرد (ROC) استفاده شده است. مساحت زیر منحنی (AUC) برای مدل وزن شواهد، مقدار ۸۱/۶ درصد به دست آمده که نشان از اعتبار و عملکرد خوب مدل در تعیین پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بوده است. نتایج حساسیت سنجی مدل به متغیرهای مستقل نیز نشان داده است که مدل به دو متغیر کاربری اراضی و شیب به شدت حساس بوده است. بیش از ۶۰ درصد منطقه دارای پتانسیل آب زیرزمینی متوسط تا خیلی زیاد بوده است. در مناطق با ارتفاع و شیب کم به علت بالا بودن سطح نفوذ و حرکت آب در خاک، پتانسیل آب زیرزمینی بیشتر بوده است. همچنین جهت شیب شرق و مسطح نسبت به سایر جهات دارای پتانسیل آب زیرزمینی بالاتری بوده است. از جنبه کاربری اراضی نیز، اراضی زراعی و مناطق با پوشش غنی تر گیاهی دارای پتانسیل آب زیرزمینی بیشتری بوده‌اند. هرچه میزان فاصله از آبراهه کم‌تر و تراکم زهکشی نیز بیش‌تر بوده، پتانسیل آب زیرزمینی نیز بالاتر بوده است. از جنبه خاک‌شناسی نیز رسوبات آبرفتی نرم دارای پتانسیل بالاتری نسبت به سایر رسوبات بوده است. مطابق تمرکز بالای عوامل مؤثر در ایجاد شرایط مساعد آب زیرزمینی، بخش شرقی منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل بالا از آب زیرزمینی بوده است (ترابی‌پوده و همکاران، ۱۴۰۰).

حوضه آبرده- اقلید یکی از زیرحوضه‌های کویر ابرقو – سیرجان در شمال استان فارس واقع شده و افت آب زیرزمینی در بیشتر مساحت آن بیش از ۵ متر بوده است. شناسایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی و اصلاح شیوه بهره‌برداری از این منابع بسیار مهم تلقی شده است. در این راستا، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز آبرده – اقلید با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انجام گرفته است. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی، نقشه توپوگرافی و نقشه زمین‌شناسی اقدام به تهیه لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در پتانسیل منابع آب زیرزمینی شامل توپولوژی (طبقات ارتفاعی، شیب و جهت شیب)، زمین‌شناسی (لیتولوژی، تراکم گسل و فاصله از گسل)، هیدرولوژی (تراکم آبراهه و فاصله از آبراهه) و اقلیمی (دما و بارش) گردیده است. وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی بر اساس سیستم تحلیل سلسله مراتبی انجام گرفته است. مؤلفه‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی و اقلیمی با توجه به اهمیت آن‌ها در نفوذپذیری خاک و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، بالاترین ارجحیت و وزن را شامل شده‌اند و مؤثرترین عامل در تغذیه منابع آب زیرزمینی بوده‌اند. پس از ضرب لایه رستری هریک از عوامل در بردار وزن مخصوص خود و جمع وزن لایه‌های نهایی، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی به دست آمده است. نتایج

نشان داده است که پهنه‌های با پتانسیل بالا و خوب بیشتر منطبق بر تراس‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ها بوده است. پهنه‌های بدون پتانسیل و با پتانسیل کم منطبق بر حداکثر ارتفاعات به دلیل شیب زیاد و مناطق دارای مارن و شیل به دلیل نفوذپذیری کم و تبخیر بالا بوده است. بیشترین مساحت حوضه به مناطق دارای پتانسیل خوب و متوسط بوده است. مناطق با پتانسیل بالا و خوب در نواحی جنوب و جنوب‌شرق و شمال‌غربی حوضه و مناطق بدون پتانسیل و کم پتانسیل در نواحی کوهستانی جنوب‌غربی، شمال‌غربی و نواحی مرکزی و شمالی حوضه بوده است (یمانی و علی‌زاده، ۱۳۹۳). مهمترین نقص پژوهش جاری را می‌توان عدم اعتبارسنجی یافته‌های حاصل از فرایند مدل‌سازی و پیش‌بینی منابع آب زیرزمینی دانست.

پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت نورآباد ممسنی در شمال‌غربی استان فارس با استفاده از مدل آنتروپی شانون بررسی شده است. برای این منظور از لایه‌های تأثیرگذار بر تغذیه منابع آب زیرزمینی شامل شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، لیتولوژی، فاصله از گسل، تراکم گسل و طبقات ارتفاعی به عنوان متغیرهای مستقل استفاده شده است. این لایه‌ها را نقشه توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و لایه رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۳۰ متر استخراج شده‌اند. موقعیت چشمه‌های موجود در منطقه به عنوان یکی از نمودهای منابع آب زیرزمینی نیز به عنوان متغیر وابسته در مدل آنتروپی شانون بکار گرفته شده است. نتایج پژوهش نشان داده است که بیشترین چشمه‌ها در طبقات ارتفاعی پست و شیب اندک قرار داشته که ناشی از تراکم زهکشی پایین و در نتیجه نفوذ بیشتر آب به درون درز و شکاف‌ها در این طبقات بوده است. رابطه معکوس بین فاصله از گسل و همچنین فاصله از آبراهه با تعداد چشمه‌ها نیز وجود داشته است. بیشترین وزن مربوط به عامل لیتولوژی و تراکم آبراهه بوده است. برای تعیین دقت و ارزیابی عملکرد مدل از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) استفاده شده است. مساحت زیر منحنی (AUC) برای مدل آنتروپی، مقدار ۸۵ درصد به دست آمده که نشان از اعتبار و عملکرد خوب مدل در تعیین پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بوده است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۸).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد در استان اصفهان با استفاده از مدل ارزش اطلاعات (IV) و مدل وزن شواهد (WOE) مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا ۴۴۸۴ حلقه چاه

موجود در منطقه با آبدهی بالاتر از ۱۱ لیتر بر ثانیه به صورت تصادفی به دسته آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شده‌اند. سپس متغیرهای مؤثر در پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای سطح زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، کاربری اراضی، خاک، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی به عنوان متغیرهای مستقل تهیه و سپس با استفاده از روش همپوشانی وزنی، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی تولید شده و به چهار طبقه پتانسیل کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شده است. در نهایت برای تعیین صحت نقشه نهایی از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) استفاده شده است. میزان دقت برای مدل شاخص آماری برابر ۹۳/۲ درصد و از آن مدل وزن شواهد ۷۴/۱ درصد بوده است. مناطقی با ارتفاع پست و شیب‌های کم، بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی را دارا بوده‌اند (یونسی و همکاران، ۱۳۹۹).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش همپوشانی وزنی در محدوده تاقدیس پابده در رشته کوه زاگرس و سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است. برای این منظور از نقشه‌های توپوگرافی رقومی شده محدوده مورد مطالعه در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰، تصویر ماهواره‌ای محدوده مورد مطالعه از سنجنده لندست و نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شده است. لایه‌های مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در این پژوهش شامل لایه لیتولوژی، تراکم زهکشی، فاصله از شکستگی‌ها، تراکم شکستگی‌ها، توپوگرافی و شیب بوده است. با توجه به تأثیر و اهمیت متفاوت هر کدام از عوامل لایه‌ها در پتانسیل‌یابی منابع آب، به منظور تهیه نقشه پتانسیلی، به هر کدام از این پارامترها بر اساس نظر کارشناس، بازدیدهای صحرایی و مطالعات پیشین در منطقه، در مرحله اول وزن‌دهی، وزنی بین ۱ تا ۹ برای کلاس‌های هر لایه در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد به لایه‌های مؤثر نیز وزنی بین ۱ تا ۹ تعلق گرفته است. در نهایت، تلفیق لایه‌ها با استفاده از روش همپوشانی شاخص وزنی انجام و نقشه پتانسیل آب زیرزمینی منطقه تهیه شده است. نقشه نهایی به پنج کلاس کیفی شامل مناطق بدون پتانسیل تا مناطق دارای پتانسیل بالا تقسیم شده است (آب‌شیرینی و همکاران، ۱۳۸۷).

با هدف مشخص کردن مناطق با پتانسیل بالای آب زیرزمینی در سازندهای سخت حوضه آبریز خرم‌آباد از سیستم اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و روش سلسله مراتبی فازی استفاده شده است. برای این منظور از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست، بازدید میدانی و داده‌های محیطی مانند لیتولوژی، طبقات ارتفاعی، شیب، پوشش گیاهی،

تراکم زهکشی، تراکم گسل و بارش استفاده شده است. با اعمال وزن محاسبه شده هر معیار و با استفاده از همپوشانی به روش سلسله مراتبی فازی، نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شده است. نتایج نشان داده است که قریب به ۱۰ درصد منطقه در پهنه‌های با پتانسیل بالا قرار داشته و بیشترین پتانسیل تشکیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای آهکی و کنگلومراهای کواترنری واقع بوده است. به منظور صحت‌سنجی روش استفاده شده از تلفیق نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی و لایه‌های اطلاعاتی چشمه‌های موجود در سازندهای منطقه مورد مطالعه استفاده شده است (بهارود و همکاران، ۱۳۹۹).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش منطق فازی در استان خراسان جنوبی انجام گرفته است. برای این منظور از چهار مؤلفه زمین‌شناسی، هیدرولوژی، جغرافیایی و انسانی با ۱۶ عامل شامل لیتولوژی، تراکم گسل، فاصله از گسل، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه، سطح آب زیرزمینی، بارش، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، اقلیم، پوشش گیاهی، دما، خاک و کاربری اراضی استفاده شده است. در مجموع پنج منطقه پتانسیلی خیلی کم تا خیلی زیاد شناسایی شده است. در نهایت حوضه‌های آبی استان بر اساس نقشه پتانسیل آب زیرزمینی کلاس‌بندی و با نتایج به دست آمده از چاه‌های اکتشافی تطابق داده شده است. نتایج این فرایند نشان داده است که حدود ۱۷ درصد از مساحت استان دارای کلاس پتانسیل آبی بالا و بسیار بالا بوده که منطبق بر رسوبات دوران چهارم و مناطق دارای شکستگی‌های بالا بوده است. مناطق دارای پتانسیل خیلی کم نیز منطبق بر ارتفاعات، لیتولوژی متراکم و مناطق بیابانی بوده است (حیدری آقاگل و همکاران، ۱۳۹۶).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در مرکز و شرق ایران با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است. در این بررسی، از لایه‌های شیب، جهت شیب، ارتفاع، کاربری اراضی، پوشش زمین، خاک و بارش استفاده شده است. در این پژوهش، پس از تهیه لایه‌ها، اقدام به طبقه‌بندی آن‌ها شده و با توجه به شناخت و تجربه بر مبنای میزان تأثیر در نفوذ از ۱ تا ۹ ارزش‌گذاری شده‌اند. به گونه‌ای که ارزش یک کمترین و ارزش ۹ بالاترین میزان تأثیر در تغذیه منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهند. پس از تعیین وزن هر لایه، با استفاده از تکنیک همپوشانی وزن‌دار، لایه‌ها با همدیگر تلفیق شده و نقشه پتانسیل مکانی منابع آب زیرزمینی حاصل شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که بارش با وزن ۲۵ درصد و شیب با وزن ۵ درصد به عنوان مؤثرترین و کم‌اثرترین

پارامترها لحاظ شده‌اند. نقشه پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی نشان داده است که کلاس‌های طبقات بسیار پایین و پایین در استان‌های اصفهان، یزد، سیستان و بلوچستان، کرمان و سمنان واقع شده است. استان‌های فارس، خراسان شمالی، خراسان رضوی و جنوبی در شرایط مطلوب از نظر پتانسیل منابع آب زیرزمینی قرار داشته‌اند (بالویی، ۱۳۹۹). مهمترین نقطه ضعف‌های این بررسی، شامل قدرت تفکیک فضایی پژوهش می‌باشد که از مقیاس‌های محلی مانند دشت‌ها و آبخوان‌های کوچک مقیاس صرف‌نظر شده است. از طرف دیگر، تعداد لایه‌های انتخابی به عنوان عوامل تأثیرگذار در تغذیه منابع آب زیرزمینی به شیوه علمی انتخاب نشده و وزن‌دهی به معیارها بسیار سوگیرانه بوده است.

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی خرم‌آباد با استفاده از شاخص آماری (Statistical Index) یا همان ارزش اطلاعات (Information value) بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا ۲۱۲ حلقه چاه موجود در منطقه با آبدهی بیشتر از ۱۱ لیتر بر ثانیه به صورت تصادفی به دو دسته آموزشی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شده‌اند. سپس لایه‌های رقومی متغیرهای مؤثر در پتانسیل آب‌های زیرزمینی شامل لایه ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، خاک، زمین‌شناسی، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، فاصله از گسل و تراکم گسل به عنوان متغیرهای مستقل تهیه شده‌اند. سپس با استفاده از روش همپوشانی وزنی نقشه نهایی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه در چهار طبقه مختلف پتانسیل شامل کم، متوسط، زیاد و خیلی‌زیاد تهیه شده است. در نهایت برای تعیین صحت نقشه نهایی از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) استفاده شده است که میزان دقت نقشه نهایی، ۸۲ درصد به دست آمده است (فلاح و همکاران، ۱۳۹۶).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی در دشت ورامین صورت گرفته است. برای این منظور، از معیارهای تراکم آبراهه‌ای، فاصله از آبراهه، شیب، طبقات ارتفاعی، ضخامت آبخوان، تراز آب زیرزمینی، مقدار بارندگی، شاخص رطوبت توپوگرافی و میزان نفوذپذیری استفاده شده است. پس از تهیه لایه رستری معیارهای مزبور و طبقه‌بندی آن‌ها، به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی، وزن‌دهی معیارها انجام گرفته و با تعیین نرخ تأثیرگذاری برای هر کلاس و استفاده از روش منطق فازی، نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب

زیرزمینی به دو روش تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل سلسله مراتبی فازی به روش رویهم‌گذاری تهیه شده است. دقت هر دو روش به کمک چاه‌هایی با آبدهی بالا مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که با توجه به پیچیدگی‌های هیدروژئولوژیکی موجود در منطقه، دقت روش تحلیل سلسله مراتبی فازی ۶۱ درصد و روش سلسله مراتبی ۵۴ درصد بوده است. مناطق با پتانسیل بالا بیشتر در نیمه شمالی دشت قرار گرفته‌اند که پوشیده از رسوبات درشت‌دانه دوران کواترنر بوده‌اند (رزندی و همکاران، ۱۳۹۴).

مقایسه دو روش تصمیم‌گیری فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در منطقه قلعه رزه و بیدروبه در شمال غرب استان خوزستان انجام گرفته است. برای این منظور از لایه‌های اطلاعاتی تراکم خطواره، فاصله از خطواره، زمین‌شناسی، شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه و بارش با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸، نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی و اطلاعات هواشناسی منطقه مورد مطالعه تهیه شده است. تعیین نقش و اهمیت متغیرهای مورد انتخاب بر اساس نظر کارشناسان انجام و سپس با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی و الگوریتم فازی-فرایند تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی بین لایه‌های اطلاعاتی این پارامترها اعمال گردیده است. به منظور صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با نقشه موقعیت چاه‌های منطقه مورد مطالعه مقایسه گردیده است. نتایج نشان داده است که فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) انعطاف‌پذیری بیشتر و قابلیت بالاتری در تعیین و شناسایی مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی دارد (مجیری و همکاران، ۱۳۹۴).

پتانسیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت کوهستان شمال غرب شاهرود با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور انجام گرفته است. در این منطقه به دلیل وجود سنگ‌های کربناته و همچنین عملکرد فرسایش و نیروهای تکتونیکی، آبخوان‌های نسبتاً مناسبی شکل گرفته است. برای این منظور لایه‌های اطلاعاتی گسل، لیتولوژی، شیب، جهت شیب، آبراهه، مقدار بارندگی و نوع بارش توسط روش تحلیل سلسله مراتبی ارزیابی شده‌اند. نقشه زمین‌شناسی، لیتولوژی و گسل با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ و پردازش‌ها بر روی تصاویر ماهواره لندست ۸ و سنتینل ۱ و سایر لایه‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع مأموریت توپوگرافی رادار شاتل (SRTM) به دست آمده است. وزن لایه‌های موضوعی و کلاس‌های هر لایه با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی

روش تحلیل فرایند سلسله مراتبی تخصیص داده شده است. سپس وزن لایه‌ها و کلاس‌های هر لایه با استفاده از روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) ترکیب شده‌اند. نتایج این بررسی نشان داده است که نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی عمدتاً توسط عوامل بارش، سنگ‌شناسی و تراکم خطواره‌ها کنترل می‌شوند. نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی به چهار کلاس ضعیف، متوسط، خوب و خیلی خوب تقسیم شده است. بیش از ۶۵ درصد منطقه دارای پتانسیل ضعیف و متوسط بوده که شامل سازندهای شمشک، لالون، شیلی و مارنی است. منطقه پتانسیل خوب و خیلی خوب نیز با حدود ۳۴ درصد گستره در سازندهای آهکی واقع شده‌اند. به منظور اعتبارسنجی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی، از داده‌های مربوط به چاه‌های بهره‌برداری، چشمه‌های موجود و مطالعات ژئوالکتریکی در منطقه استفاده شده است (رنجیری و همکاران، ۱۳۹۹).

مناطق با پتانسیل آب‌های زیرزمینی در حوضه رودخانه حبله‌رود با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی تعیین شده است. برای این منظور از هفت معیار متوسط بارندگی سالانه، تراکم آبراهه، تراکم گسل، لیتولوژی، ژئومورفولوژی، شیب زمین و کاربری اراضی استفاده شده است. نقشه معیارهای هفت‌گانه تهیه و به کمک روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) وزن‌دهی شده‌اند. با تعیین نرخ تأثیرگذاری برای هر کلاس، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی به روش رویهم‌گذاری تهیه شده و دقت این روش به کمک داده‌های دبی ۸۸ حلقه چاه و چشمه موجود در منطقه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی زیاد، بیشتر در مناطق پوشیده از رسوبات متصل و دارای کنگلومرا، ماسه سنگ و تراس‌های قدیمی با تراکم زیاد گسل هستند. معیار بارندگی سالانه و معیار ژئومورفولوژی به ترتیب بااهمیت‌ترین و کم‌اهمیت‌ترین در تأثیرگذاری بر منابع آب زیرزمینی بوده‌اند (اسدی نلیوان و همکاران، ۱۳۹۹).

نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی شهرستان کرمان با استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی بررسی شده است. برای این منظور از تلفیق اطلاعات استخراج شده از داده‌های ماهواره‌ای، نقشه‌های زمین‌شناسی، داده‌های هواشناسی لایه‌های بارش، سنگ‌شناسی، گسل، تراکم گسل، طبقات ارتفاعی، شیب، پوشش زمین و پوشش گیاهی تهیه شده‌اند. هر کدام از لایه‌ها با استفاده از روش زون‌دهی سلسله مراتبی بر اساس اهمیت متغیرها، وزن‌دهی شده‌اند. از یک مدل همپوشانی وزن‌دار به منظور تلفیق لایه‌ها و تعیین مناطق احتمال حضور

آب‌های زیرزمینی استفاده شده است. پس از همپوشانی لایه‌ها، نقشه نهایی به چهار کلاس تقسیم شده است. نتایج نشان داده است که فقط ۳ درصد از گستره شهرستان کرمان دارای پتانسیل بالا برای حضور منابع آب زیرزمینی بوده که در زمین‌های کشاورزی متراکم قرار دارد (پهلوان و همکاران، ۱۳۹۲).

پتانسیل منابع آب زیرزمینی در دشت سرخون هرمزگان با استفاده از ترکیب روش‌های داده‌کاوی شامل چهار روش جنگل تصادفی (RF)، مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)، الگوریتم دامین (Domain)، مدل جمعی تعمیم‌یافته (GAM) بررسی شده است. برای این منظور از یازده معیار شامل درصد شیب، جهت شیب، انحنای مقطع، انحنای توپوگرافی، انحنای کلی، فاکتور طول شیب، شاخص قدرت جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی، کاربری اراضی، خاک و مدل رقومی ارتفاع استفاده شده است. همچنین به منظور اعتبارسنجی از تعداد ۷۶ حلقه چاه که دارای دبی بالایی بوده‌اند جهت شبیه‌سازی (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) استفاده شده است. پیش از مدل‌سازی، آزمون هم‌خطی بر روی معیارها انجام گرفته و مشاهده شده است که هیچ نوع هم‌خطی بین متغیرها وجود ندارد. بر اساس نتایج ارزیابی مدل‌سازی با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) نشان داده است که هر چهار روش استفاده شده دارای دقت عالی و سطح زیر نمودار (AUC) بالای ۹۰ درصد جهت پیش‌بینی داشته‌اند. در نهایت چهار روش با استفاده از روش میانگین‌گیری، ترکیب شده‌اند. پتانسیل نهایی نشان داده است که ۳۲/۸۹ درصد از اراضی دارای پتانسیل خوب از نظر بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی بوده‌اند. همچنین نتایج فاکتورها نشان داده است که معیارهای شیب، ارتفاع و شاخص قدرت جریان دارای بالاترین میزان اهمیت بوده‌اند (ریاحی و همکاران، ۱۳۹۹).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی برای حوضه‌های آبریز منتهی به دشت تبریز بررسی شده است. برای این منظور از مؤلفه‌های اقلیمی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، توپولوژی و زیست محیطی استفاده شده است. این معیارها شامل بارش، دما، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، زمین‌شناسی، تراکم گسل، فاصله از گسل، طبقات ارتفاعی، شیب، جهت شیب و پوشش گیاهی می‌باشند. در نهایت، پنج طبقه با پتانسیل بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم در منطقه شناسایی شده است. نتایج نشان داده است که مناطق با پهنه‌های پتانسیل زیاد و بسیار زیاد بیشتر بر ارتفاعات پایین و رسوبات آبرفتی درشت‌دانه

دوران چهارم و مخروط‌افکنه‌ها منطبق بوده است. مناطق با پهنه‌های پتانسیلی کم و بسیار کم نیز به ترتیب بر ارتفاعات زیاد به دلیل شیب زیاد و مناطق دارای سازند مارنی و شیلی به علت نفوذپذیری خیلی کم و تبخیر زیاد منطبق بوده است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز زنجانرود با استفاده از داده‌های سنجش از دور و تحلیل‌های مکانی در سیستم اطلاعات جغرافیایی انجام گرفته است. برای این منظور از هفت زیرمعیار مؤثر در تشکیل آبخوان شامل شیب، لیتولوژی، مقدار بارندگی، تراکم آبراهه، تراکم چشمه، تراکم خطوارگی و کاربری اراضی استفاده شده است. از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای وزن‌دهی به معیارها استفاده شده و پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی از قضاوت‌های شفاهی کارشناسان برای مقایسه عناصر ماتریس استفاده شده که این قضاوت‌ها به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تقسیم‌بندی شده است. پس از تعیین وزن نسبی عناصر، وزن نهایی هر زیرمعیار در فرایند تحلیل سلسله مراتبی از مجموع حاصل ضرب اهمیت معیارها در وزن نسبی زیرمعیارها به دست آمده است. در نهایت به منظور تلفیق لایه‌های اطلاعاتی وزن‌دهی شده از مدل تاپسیس استفاده شده و نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در چهار رده اهمیت (غنی، مناسب، ضعیف و بسیار ضعیف) به دست آمده است. نتایج حاصل از مدل، با استفاده از موقعیت چاه‌های بهره‌برداری منطقه و روش‌های ژئوالکتریکی صحت‌سنجی شده‌اند. نتایج پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی نشان داده‌اند که پهنه‌های غنی و مناسب اکثراً در دشت گسترش داشته و آبخوان وسیع و مناسب در ارتفاعات زنجانرود وجود نداشته است. موقعیت چاه‌های با دبی بالاتر نیز بیشتر در درون پهنه‌های با پتانسیل غنی و مناسب قرار داشته است که صحت عملکرد مدل را تأیید نموده است (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۹).

پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی تاکدیس کمستان در استان خوزستان با تلفیق داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به روش تحلیل سلسله مراتبی انجام گرفته است. برای این منظور از لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در پتانسیل منابع آب زیرزمینی شامل زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، شکستگی‌ها، خاک‌شناسی، پوشش زمین، شیب و بارش استفاده شده است. این لایه‌های از منابع مختلف از جمله تصاویر سنجنده ETM+ ماهواره LANDSAT، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی و اطلاعات و داده‌های هواشناسی تهیه گردیده است. برای تعیین وزن، از روش مقایسه زوجی در فرایند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است. سپس لایه‌های وزن‌دار با یکدیگر تلفیق و نقشه

پتانسیل منابع آب زیرزمینی تهیه شده است. برای ارزیابی دقت و صحت نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی از موقعیت و دبی چشمه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. نتایج نشان داده است که حدود ۵۰ درصد از منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل خیلی خوب و خوب از نظر آب زیرزمینی بوده‌اند که عمدتاً در گستره‌های آهکی سازند آسماری و ایلام - سروک قرار داشته‌اند. اکثر موقعیت چشمه‌های با دبی بالا نیز در این گستره قرار داشته‌اند. زمین‌شناسی و بارش مهمترین نقش را در موقعیت منابع آب زیرزمینی در تقادیس کمستان داشته‌اند (صابری و همکاران، ۱۳۹۱).

پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی در مناطق کارستی نواحی خشک در ایران مرکزی (رشته کوه شتری) برآورد شده است. برای این منظور از هشت معیار مؤثر در تغذیه آب زیرزمینی شامل لیتولوژی، مقدار شیب، جهت شیب، تراکم شبکه آبراهه‌ها، بارش، تراکم شکستگی‌ها، عوارض کارستی و پوشش خاک - اپی کارست استفاده شده است. وزن‌دهی به لایه‌های اطلاعاتی بر اساس نظر کارشناسی انجام و تلفیق آن‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی از طریق همپوشانی وزنی صورت گرفته است. برای کنترل بر وزن‌دهی لایه‌های اطلاعاتی از نقشه‌های زمین‌شناسی و بازدید صحرایی نیز استفاده شده است. نتایج نشان داده است که کمتر از ۱۰ درصد گستره دارای تغذیه سالانه متوسط ۴۵ درصد بوده است؛ در حالیکه متوسط درصد تغذیه سالانه در این رشته‌کوه حدود ۳۰ درصد برآورد شده است (ضیاء و همکاران، ۱۳۹۸).

پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان در استان کردستان بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور و با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام گرفته است. برای این منظور از لایه‌های مؤثر در تغذیه آبخوان از جمله لیتولوژی، نفوذپذیری خاک، تراکم زهکشی، تراکم گسل، شیب و طبقات ارتفاعی استفاده شده است. از فرایند تحلیل شبکه (ANP) به عنوان یک روش چندمعیاره اتخاذ تصمیم (MCDM) برای مشخص کردن وزن لایه‌های موضوعی مختلف و کلاس‌های آن‌ها استفاده شده است. ادغام لایه‌ها با استفاده از روش همپوشانی وزنی بر اساس وزن اکتسابی از مدل صورت گرفته است. در نهایت پتانسیل آب زیرزمینی دشت با استفاده از روش شکست طبیعی، در پنج کلاس پتانسیل بالا تا بدون پتانسیل پهنه‌بندی گردیده است. مناطق با پتانسیل منابع آب زیرزمینی بالا در حدود ۱۰ درصد از کل گستره اغلب در نهشته‌های کواترنری ضخیم لایه نزدیک به آبراهه‌های اصلی قرار

داشته‌اند. نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی با استناد به تراز ایستابی دشت، قابلیت انتقال آبخوان و دبی چاه‌های منطقه اعتبارسنجی شده و نتایج بیانگر توانایی مدل در پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی بوده است (رحیمی و سلیمانی، ۱۳۹۵).

پتانسیل منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز صوفی‌چای در آذربایجان شرقی با استفاده از مدل نسبت فراوانی و سیستم اطلاعات جغرافیایی بررسی و ارزیابی شده است. ابتدا، چاه‌های با آبدهی بالای ۱۱ لیتر بر ثانیه در حوضه مورد مطالعه انتخاب شده‌اند. سپس، ۷۰ درصد چاه‌ها برای برای مرحله مدل‌سازی و ۳۰ درصد آن‌ها برای مرحله صحت‌سنجی به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. عوامل هیدروژئولوژیکی مؤثر در وقوع آب زیرزمینی شامل ارتفاع، شیب، توپوگرافی، تراکم رودخانه، تراکم خطواره، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی و کاربری اراضی برای این منظور انتخاب شده‌اند. تعداد و درصد پیکسل در هر کلاس و تعداد و درصد چاه‌ها در هر کلاس برای اجرای مدل محاسبه و مورد استفاده قرار گرفته است. ارزش هر کلاس در لایه اعمال و در نهایت لایه‌ها در سیستم اطلاعات جغرافیایی با روش همپوشانی وزنی، تلفیق و نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی ایجاد شده است. جهت ارزیابی و صحت‌سنجی نقشه پیش‌بینی شده پتانسیل آب زیرزمینی از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که مناطق با پتانسیل کم در بخش‌های شمالی و مرکزی حوضه دارای توپوگرافی ناهموار، شیب زیاد و سنگ‌های مقاوم و مناطق با پتانسیل زیاد در بخش‌های جنوبی حوضه با شیب کم، توپوگرافی هموار و رسوبات آبرفتی منطبق بوده است (بیابانی و همکاران، ۱۳۹۹).

ارزیابی متغیرهای مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی دشت قروه – دهگلان بر اساس تحلیل حساسیت در قالب تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) انجام گرفته است. برای این منظور از متغیرهای سنگ‌شناسی، بارندگی، تراکم زهکشی، تراکم خطواره و شیب زمین استفاده شده است. برای تعیین وزن معیارها از فرایند تحلیل سلسله مراتبی و روش بردار ویژه استفاده شده است. برای تعیین شاخص پتانسیل آب زیرزمینی نیز از روش ترکیب خطی وزنی (WLC) استفاده شده است. در نهایت، تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره نیز با روش حذفی انجام و دقت نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در هر مرحله به وسیله داده‌های ظرفیت ویژه

چاه‌های دشت قروه – دهگلان مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که مدل ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی به شدت به متغیر سنگ‌شناسی حساس بوده است (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴).

نقشه پتانسیل آب زیرزمینی شهرستان نهاوند با استفاده از مدل تلفیقی وزن شواهد و رگرسیون لجستیک تهیه و ارزیابی شده است. برای این منظور از عامل‌های زاویه شیب، وجه شیب، طول شیب، ارتفاع، انحنای سطح، انحنای آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، سنگ‌شناسی و کاربری اراضی به عنوان عامل‌های مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شده است. علاوه بر این، موقعیت تعداد ۲۷۳ چشمه نیز به عنوان متغیر وابسته تهیه شده است. تعداد ۱۹۱ موقعیت (۷۰ درصد) به عنوان داده‌های آموزشی به منظور مدل‌سازی و ۸۲ مورد (۳۰ درصد) برای ارزیابی و کنترل عملکرد مدل با استفاده از منجنی تشخیص عملکرد نسبی استفاده شده است. دقت‌های به دست آمده از مدل وزن شواهد و رگرسیون لجستیک به ترتیب ۸۰/۴ و ۸۲/۵ درصد بوده است (رضوی‌ترمه و همکاران، ۱۳۹۸).

از هفت معیار مؤثر برای ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در حوضه آبریز زنجانرود شامل شیب، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، تراکم چشمه، سنگ‌شناسی، تراکم خطواره و بارندگی در یک سیستم تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. در ابتدا، معیارها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی، وزن‌دهی شده و سپس با روش تکنیک ترجیح بر اساس مشابهت به راه‌حل ایده‌ال همپوشانی شده‌اند. در نهایت، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در چهار کلاس تهیه شده است. تجزیه و تحلیل حساسیت برای تعیین تأثیر هر یک از معیارها بر روی نقشه به دست آمده نیز انجام شده است. در نهایت، مدل با استفاده از توزیع فضایی چاه‌های پی‌زومتری با دبی بالا و بررسی‌های میدانی ژئوالکتریک تأیید شده است (Shabani et al, ۲۰۲۲). ارزیابی پهنه‌های پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از کاربرد ترکیبی تکنیک‌ها و ابزارهای پیشرفته مانند سنجش از دور (RS)، ضریب تأثیرگذاری چندگانه (MIF) مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی، تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) و تکنیک‌های بررسی مقاومت الکتریکی در شهر رایپور (Raipur) از ایالت چتیسگر (Chhattisgarh) هند انجام شده است. لایه‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، بارندگی، خطواره، پوشش زمین- کاربری اراضی، تراکم زهکشی، نوع خاک، شیب و بافت خاک بسته به تأثیر آن‌ها بر پتانسیل آب زیرزمینی در سیستم تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی شده‌اند. از تکنیک‌های مقاوت

الکتریکی شامل صداگذاری الکتریکی عمودی (VES) و پیکربندی شلومبرژه (Schlumberger) برای اعتبارسنجی استفاده شده است. مناطق بالقوه آب زیرزمینی حاصل از این روش‌ها به پنج ناحیه با پتانسیل کم تا خیلی زیاد طبقه‌بندی شده است. نتایج پهنه‌بندی بالقوه آب زیرزمینی نشان داده است که پهنه‌های با پتانسیل بالا در بخش‌های غرب و شمال شرق وجود داشته است؛ در حالیکه پتانسیل آب زیرزمینی کم تا متوسط در بخش‌های مرکزی و شرقی قرار داشته است. نتایج به‌دست آمده با استفاده از داده‌های حلقه‌های چاه موجود در منطقه و بکارگیری منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) تأیید شده و دقت نتیجه حاصل ۸۰ درصد بوده که کارایی رویکرد پیشنهادی در تعیین محدوده بالقوه آب زیرزمینی را توجیه کرده است (Jhariya et al, ۲۰۲۱). مناطق بالقوه آب زیرزمینی در حوضه نیمه خشک سن لوئیس پوتوسی در مکزیک با استفاده از سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سیستم تحلیل سلسله مراتبی تعیین شده است. برای این منظور، هفت لایه موضوعی (زمین‌شناسی، تراکم خطواره، پوشش - کاربری زمین، شاخص رطوبت توپوگرافی، بارندگی، تراکم زهکشی و شیب در فرمت رستری تهیه شده‌اند. پس از اجرای فرایند تحلیل سلسله مراتبی و تخصیص رتبه، لایه‌های موضوعی با استفاده از محاسبه‌گر رستری برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی یکپارچه‌سازی شده‌اند. نتایج نشان داده است که ۶۸/۲۱ درصد از مساحت منطقه به عنوان کم‌پتانسیل آب زیرزمینی و ۲۶/۳۰ درصد به عنوان متوسط پتانسیل طبقه‌بندی شده‌اند. اعتبارسنجی با استفاده از ارزیابی داده‌های ۱۵ حلقه چاه توزیع شده در منطقه مورد مطالعه انجام شده است. علاوه بر این، منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) نشان داده است که پیش‌بینی رضایت‌بخش بوده است (Uc Castillo et al, ۲۰۲۰). مناطق بالقوه آب زیرزمینی در شمال اتیوپی با استفاده از تحلیل فضایی و ابزارهای تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره بررسی و ارزیابی شده است. برای این منظور، هشت فاکتور بیوفیزیکی و محیطی مانند ژئومورفولوژی، سنگ-شناسی، شیب، بارندگی، پوشش و کاربری زمین، خاک، تراکم خطواره و تراکم زهکشی لحاظ شده است. در نهایت، پس از سازماندهی این نقشه‌های موضوعی، ارزش وزنی برای هریک از آن‌ها با پیروی از فرایند تحلیل سلسله مراتبی تعیین گردیده است. در نهایت، همه عوامل با هم ادغام و مدل را با استفاده از همپوشانی وزنی محاسبه شده تا مناطق بالقوه آب زیرزمینی شناسایی گردد. یافته‌ها بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی را در بخش مرکزی و شرقی نشان داده است، در حالی که بخش‌های شمالی و غربی پتانسیل ضعیفی از نظر در دسترس بوده آب‌های زیرزمینی را نشان داده است. اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی شده از طریق روی هم گذاری لایه

چاه‌ها و چشمه‌ها با لایه پتانسیل آب زیرزمینی پیش‌بینی شده انجام گرفته است (Hussein et al, ۲۰۱۷). مناطق بالقوه آب زیرزمینی در یک حوضه رودخانه‌ای کوچک و استوایی در غرب‌سوی گهات جنوب‌غربی از هند بررسی شده است. در این بررسی از ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک فرایند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است. در مجموع ۱۲ لایه موضوعی مانند زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، پوشش زمین/ کاربری زمین، تراکم خطواره، تراکم زهکشی، بارندگی، خاک، شیب، ناهمواری، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص موقعیت توپوگرافی و انحنای تهیه و مورد مطالعه قرار گرفته است. وزن‌های اختصاص داده شده به هر کلاس در تمامی نقشه‌های موضوعی بر اساس ویژگی‌ها و ظرفیت پتانسیل آب از طریق تکنیک تحلیل فرایند سلسله مراتبی بوده است. دقت نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی با نمونه‌های آب زیرزمینی از جمله تعداد ۳۶ حلقه چاه موجود در منطقه بررسی و تأیید شده است. به گونه‌ای که دقت کلی روش پتانسیل‌سنجی حدود ۸۵ درصد برآورده شده است. نقشه مناطق پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمده در ۵ کلاس بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم طبقه‌بندی شده است. نتایج این بررسی نشان داده است که حدود ۵۹ درصد از حوضه رودخانه دارای پتانسیل آب زیرزمینی متوسط بوده است (Arulbalaji et al, ۲۰۱۹). پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از رویکرد اکتشاف میدانی و تحلیل فضایی مبتنی بر تحلیل فرایند سلسله مراتبی در یک آبخوان سخت سنگی در حوضه آبریز هیمالیا ارزیابی شده است. برای این منظور از لایه‌های موضوعی تراکم خطواره، واحدهای لیتولوژی، تراکم زهکشی، شیب، پوشش زمین/ کاربری زمین و ترکیب خاک استفاده شده است. فرایند وزن‌دهی و تلفیق لایه‌های موضوعی به ترتیب بر اساس فرایند تحلیل سلسله مراتبی و شاخص همپوشانی وزنی انجام گرفته است. سپس، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های موقعیت چشمه‌ها و همچنین نتایج حاصل از توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) تأیید شده است (Sapkota et al, ۲۰۲۱). از داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه ارسی غربی از مناطق مرکزی اتیوپی استفاده شده است. پارامترهای تأثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی از طریق لندست ۸، مدل رقومی ارتفاع، داده‌های خاک، داده‌های لیتولوژی و بارندگی به دست آمده است. این پارامترها شامل شیب، ارتفاع، تراکم زهکشی، تراکم خطواره، پوشش زمین/ کاربری اراضی، لیتولوژی، خاک و بارندگی بوده‌اند. از داده‌های گمانه نیز برای اعتبارسنجی نتایج استفاده شده است. پس از سازماندهی لایه‌های موضوعی با ابزارهای تحلیل فضایی، وزن پارامترها با توجه به درصد تأثیر بر پتانسیل و تغذیه

آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی با لحاظ تأثیر نسبی آن‌ها تعیین شده است. در تحلیل همپوشانی وزنی، از نقطه نظر تأثیر، شیب، کاربری اراضی/ پوشش زمین و لیتولوژی هر کدام ۲۴ درصد را به خود اختصاص داده‌اند. کمترین تأثیر از آن گروه خاک بوده است. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی به چهار گروه پتانسیل کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شده است. ۶۱/۲۷ درصد از گستره منطقه دارای پتانسیل زیاد و ۳۵/۴۶ درصد دارای پتانسیل متوسط بوده است. پتانسیل بالای آب زیرزمینی در بخش‌های مرکزی و غربی منطقه و پتانسیل آب زیرزمینی متوسط در بخش‌های شرقی غالب بوده است. نتایج اعتبارسنجی از توافق بسیار خوب (۸۷/۶۱ درصد) را بین داده‌های ثبت آب زیرزمینی و کلاس‌های پتانسیل آب زیرزمینی مشخص شده، نشان داده‌اند (Kabeto et al, ۲۰۲۲). پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی با تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی و ارتباط آن با سطح آب زیرزمینی در بخش ساحلی جنوب هند بررسی شده است. تجزیه و تحلیل همپوشانی وزنی مبتنی بر سیستم وزن‌دهی فرایند تحلیل سلسله مراتبی برای تعیین محدوده مناطق بالقوه آب زیرزمینی استفاده شده است. برای این منظور، لایه‌های موضوعی مختلفی مانند زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، خاک، تراکم خطواره، تراکم زهکشی، بارندگی و کاربری زمین / پوشش زمین استفاده شده است. نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی بال اختصاص وزن مناسب به نقشه‌های موضوعی مختلف و افزودن آن‌ها به نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شده است. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمده با سطح آب زیرزمینی و موقعیت حلقه‌های چاه، اعتبارسنجی شده است (Suganthi et al, ۲۰۱۳). ارزیابی یکپارچه از پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های مکانی- فضایی در حوضه رودخانه زامبیزی در آفریقای جنوبی انجام شده است. برای این منظور از فرایند تحلیل سلسله مراتبی، سنجش از دور، تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و عوامل مؤثر بر وقوع و حرکت آب زیرزمینی استفاده شده است. لایه‌های موضوعی هفت‌گانه شامل خطواره، لیتولوژی، پوشش زمین/ کاربری اراضی، خاک، شیب، بارندگی و تراکم زهکشی تهیه و سپس با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی بر اساس میزان تأثیر آن‌ها بر وقوع و حرکت آب‌های زیرزمینی وزن‌دهی و مقیاس‌بندی شده‌اند. بر اساس تلفیق لایه‌های موضوعی با تکنیک همپوشانی وزنی، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی تهیه و چهار منطقه با پتانسیل خیلی خوب (۰/۴٪)، پتانسیل خوب (۲۷٪)، پتانسیل متوسط (۶۱٪) و پتانسیل ضعیف (۱۲٪) مشخص شده است. اعتبارسنجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از گمانه‌های موجود نشان داده است که ۸۹ درصد بر روی پهنه‌های بالقوه متوسط تا خیلی خوب قرار گرفته‌اند)

(Ndhlovu and Woyessa, ۲۰۲۱). نقشه‌نگاری مناطق بالقوه برای تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی در استان پارچین‌بوری تایلند انجام گرفته است. برای این منظور از لایه‌های موضوعی کاربری اراضی، شیب، لیتولوژی، خاک، تراکم زهکشی و تراکم خطواره استفاده شده است. وزن و رتبه این شش عامل تأثیرگذار با ارزیابی رابطه متقابل تأثیرات اصلی و جزئی هر عامل بر اساس مرور ادبیات انجام گرفته است. همپوشانی لایه‌های موضوعی برای تهیه نقشه پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی با تحلیل همپوشانی وزنی انجام و در نهایت قابلیت اطمینان نقشه پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از ظرفیت ویژه مشاهده شده توسط اداره منابع آب زیرزمینی تایلند ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است که تنها ۲/۲۶ درصد از منطقه دارای پتانسیل تغذیه بالا بوده که در مناطق مرکزی استان قرار داشته‌اند. بر اساس شاخص تحلیل حساسیت پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی، لیتولوژی به عنوان کارآمدترین عامل تأثیرگذار در پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی بوده است. نتایج محاسبه مساحت زیر نمودار (AUC) از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) برابر ۸۶ درصد بوده که دقت پیش‌بینی نسبتاً خوب را تأیید کرده است (Kaewdum and Chotpantararat, ۲۰۲۱). روش تحلیل همپوشانی وزنی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) ترکیب‌شده با فناوری اطلاعات زمین برای کشف مناطق بالقوه آب زیرزمینی در منطقه عسیر از عربستان سعودی استفاده شده است. برای این منظور، دوازده لایه موضوعی شامل زمین‌شناسی، بافت خاک، هدایت هیدرولیکی، تراکم زهکشی، نزدیکی به بسترهای آب سطحی، بارش، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم خطواره، پوشش گیاهی، پوشش زمین/ کاربری زمین، زاویه شیب، ارتفاع و موقعیت چاه‌ها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تولید نقشه مناطق بالقوه آب زیرزمینی (GPZM) تهیه و پردازش شده است. پس از آنف مناطق بالقوه آب زیرزمینی تهیه و به پنج طبقه از پتانسیل بسیار خوب تا پتانسیل بسیار ضعیف تقسیم شده‌اند. مناطق بالقوه آب زیرزمینی با تجزیه و تحلیل توزیع چاه‌های موجود در منطقه و داده‌های بازدهی چاه‌های منتخب مورد تأیید قرار گرفته‌اند. با این پهنه‌بندی مبتنی بر کیفیت، مشخص شده است که ۸۲ درصد از چاه‌های موجود در منطقه با پتانسیل بسیار خوب و خوب قرار گرفته‌اند. تجزیه و تحلیل آماری نشان داده است که ۱۴/۶ و ۲۸/۸ درصد از مساحت کل منطقه در پهنه بسیار خوب و خوب و ۲۷/۳ و ۲۰/۲ درصد به ترتیب در منطقه متوسط و ضعیف از پتانسیل قرار گرفته‌اند (Mallick et al, ۲۰۱۹). از اطلاعات سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای منطقه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی در

مناطق نیمه‌خشک جنوب‌غربی عربستان استفاده شده است. این پژوهش بر شناسایی پارامترهای مؤثر ضروری با استفاده از ابزارهای تجزیه و تحلیل چندمعیاره و اطلاعات زمینی در تهیه مناطق بالقوه آب زیرزمینی متمرکز بوده است. برای این منظور از هفت لایه موضوعی شامل تراکم زهکشی، تراکم خطواره، زمین‌شناسی، شیب، پوشش گیاهی، بارش و ارتفاع استفاده شده است. لایه‌های موضوعی با استفاده از تکنیک همپوشانی وزنی تلفیق و نقشه پتانسیل آب زیرزمینی به پنج گروه از پتانسیل بسیار بالا تا ناچیز تقسیم شده است. نتایج نشان داده است که ۵۷ درصد از منطقه مورد مطالعه (در بخش‌های جنوب‌غربی) دارای پتانسیل متوسط تا بسیار بالا بوده که به رسوبات وادی‌ها، توپوگرافی پایین، کیفیت خوب آب و وجود تخلخل و نفوذپذیری نسبت داده شده است. در مقابل، ۴۳ درصد باقیمانده از گستره منطقه (بخش‌های شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی) پهنه‌های با پتانسیل ناچیز را نشان داده‌اند. مناطق پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مکان‌های چاه‌ها در پتانسیل‌های متوسط تا بسیار بالا تأیید شده است (Khan et al, ۲۰۲۲).

جدول ۱. مرور مطالعات اخیر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در مناطق مختلف دنیا از نظر روش شناسی و تعداد پارامترها

منبع (ادبیات)	موقعیت مکانی پژوهش	تعداد پارامترهای استفاده شده	روش شناسی پژوهش	اعتبارسنجی
			وزن دهی	تلفیق
Khan et al. (۲۰۲۲)	عربستان	۷	کتابخانه‌ای	موقعیت چاه، کیفیت آب
Mallick et al. (۲۰۱۹)	عربستان	۱۲	FAHP	موقعیت چاهها
Kaewdum and Chotpantararat, ۲۰۲۱	تایلند	۶	کتابخانه‌ای	ظرفیت ویژه چاه
Ndhlovu and Woyessa, ۲۰۲۱	افریقای جنوبی	۷	AHP	مظاهر آب زیرزمینی
Suganthi et al. ۲۰۱۳	جنوب هند	۷	AHP	تراز آب زیرزمینی و موقعیت چاهها
Kabeto et al. ۲۰۲۲	مناطق مرکزی اتیوپی	۸	AHP	موقعیت چاهها
Sapkota et al. ۲۰۲۱	نپال	۶	AHP	موقعیت چشمه‌ها و مقاومت الکتریکی
Arulbalaji et al, ۲۰۱۹	جنوب غربی هند	۱۲	AHP	موقعیت چاهها
Hussein et al. ۲۰۱۷	شمال اتیوپی	۸	AHP	موقعیت چشمه‌ها و چاهها
Uc Castillo et al. ۲۰۲۰	سن لوئیس مکزیک	۷	AHP	زمان ماندگاری آب چاهها
Jhariya et al. ۲۰۲۱	هند	۹	AHP	موقعیت چاهها و مقاومت الکتریکی
Brito et al ۲۰۲۰	برزیل	۶	AHP	ظرفیت ویژه چاهها
Al-Ruzouq et al. ۲۰۱۹	امارت متحده عربی	۸	AHP	موقعیت و دبی چاهها و مقاومت الکتریکی
Mumtaz et al. ۲۰۱۹	شبه جزیره عربستان	۸	AHP	موقعیت چاهها
Balamurugan et al. ۲۰۱۷	هند	۸	مدل نسبت فراوانی	موقعیت چشمه‌ها
Agarwal and Garg. ۲۰۱۶	هند	۸	AHP	موقعیت و دبی چاهها
Senthilkumar et al. ۲۰۱۹	هند	۸	AHP	تراز آب زیرزمینی و موقعیت چاهها
Manap et al. ۲۰۱۴S	مالزی	۸	مدل نسبت فراوانی	موقعیت و دبی چاهها
Mukherjee et al. ۲۰۲۰	هند	۸	AHP	موقعیت و دبی چاهها
Elew and Qaddah ۲۰۱۰	مصر	۹	مدل سازی احتمال فضایی وزن دار	موقعیت و دبی چاهها
Machiwal et al. ۲۰۱۱	هند	۷	AHP	موقعیت و دبی چاهها
Oh et al. ۲۰۱۱	کره جنوبی	۱۵	مدل نسبت فراوانی	ظرفیت ویژه چاهها
Ozdemir et al. ۲۰۱۱	ترکیه	۱۷	نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک، وزن شواهد	منحنی مشخصه عملکرد سیستم

جدول ۲. مرور مطالعات اخیر پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در مناطق مختلف ایران از نظر روش‌شناسی و تعداد پارامترها

منبع (ادبیات)	موقعیت مکانی پژوهش	تعداد پارامترهای استفاده شده	روش‌شناسی پژوهش	اعتبارسنجی
طاهری تیزرو و همکاران (۱۳۹۱)	ماهی‌دشت کرمانشاه	۷	AHP	ندارد
رحمتی و همکاران (۱۳۹۶)	دشت قروه- دهگلان	۵	AHP	ظرفیت ویژه چاه‌ها
سلیمانی ساردو و همکاران (۱۳۹۵)	سمنان	۸	AHP	ندارد
فرجی سبکبار و همکاران (۱۳۹۰)	دشت گربایگان فسا	۸	ANP	موقعیت عرصه‌های تغذیه مصنوعی
شعبانی و همکاران (۱۳۹۹)	زنجانرود	۷	AHP	موقعیت و دبی چاه‌ها و پی‌جویی ژئوالکتریک
رضوی ترمه و همکاران (۱۳۹۸)	شهرستان نهاوند	۱۵	مدل وزن شواهد و مدل رگرسیون لجستیک	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
بیابانی و همکاران (۱۳۹۹)	صوفی‌چای- آذربایجان غربی	۹	مدل نسبت فراوانی	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
رحیمی و همکاران (۱۳۹۵)	دشت قروه- دهگلان	۶	ANP	تراز ایستایی، قابلیت انتقال آبخوان و دبی چاه‌ها
مفیدیفر و همکاران (۱۳۹۴)	رشته کوه شتری، طبس	۸	AHP	صحت‌سنجی تغذیه چشمه‌های نمونه
صابری و همکاران (۱۳۹۱)	تاق‌دیس کمستان، خوزستان	۷	AHP	موقعیت و دبی چشمه‌ها
رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۵)	دشت تبریز	۱۱	ANP	موقعیت چاه، چشمه و قنات
ریاحی و همکاران (۱۳۹۹)	دشت سرخون، هرمزگان	۱۲	مدل جنگل تصادفی	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
اسدی نیلوان و همکاران (۱۳۹۹)	حبله‌رود	۷	AHP	موقعیت و دبی چاه و چشمه‌ها
رنجبری و همکاران (۱۳۹۹)	شمال غربی شاهرود	۷	AHP	دبی چاه و چشمه‌ها و پی‌جویی ژئوالکتریک
رزندی و همکاران (۱۳۹۴)	دشت ورامین	۹	FAHP	موقعیت چاه
فلاح و همکاران (۱۳۹۶)	دشت خرم‌آباد	۱۳	روش شاخص آماری	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
بهاروند و همکاران (۱۳۹۹)	حوضه آبریز خرم‌آباد	۷	AHP	موقعیت چشمه‌ها
آبشیرینی و همکاران (۱۳۸۷)	تاق‌دیس پابده، زاگرس	۶	مرور کتابخانه‌ای	ندارد
یونسی و همکاران (۱۳۹۹)	نجف‌آباد	۱۱	مدل ارزش اطلاعات و مدل وزن شواهد	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
شفیعی و همکاران (۱۳۹۸)	نورآباد ممسنی	۱۰	مدل آنتروپی شانون	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
یمانی و علیزاده (۱۳۹۳)	حوضه آبهاده - اقلید	۱۰	AHP	ندارد
ترابی‌پوده و همکاران (۱۴۰۰)	لنجانان، اصفهان	۱۳	مدل وزن شواهد	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
قربانی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۶)	دشت ازنا- الیگودرز	۱۳	مدل نسبت فراوانی	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
نوحانی و همکاران (۱۳۹۷)	دشت الشتر، لرستان	۸	مدل نسبت فراوانی	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
خوش‌طینت و همکاران (۱۳۹۹)	دشت سرو، آذربایجان غربی	۱۰	مدل آنتروپی شانون و نسبت فراوانی	منحنی مشخصه عملکرد سیستم
کثیری و همکاران (۱۳۹۹)	دشت ناز، ساری	۱۳	ANP	موقعیت چشمه، قنات و چاه

جدول ۳. مرور مطالعات اخیر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در مناطق مختلف دنیا از نظر انتخاب نوع پارامترهای مؤثر در منابع آب زیرزمینی

مرور منابع	G	GM	SW	ST	DEM	SL	R	DD	LD	TWI	SPI	LULC	VC	WT	HC	LI	TPI	SC	Other
Khan et al. ۲۰۲۲	.				.	.	.	.	.				.						
Mallick et al. ۲۰۱۹	.		.	.	.	.	.	.	.	.		.	.		.				
Kaewdum and Chotpantarat, ۲۰۲۱				.		.		.	.			.							
Ndhlovu and Woyessa, ۲۰۲۱				.		.	.	.	.			.				.			
Suganthi et al. ۲۰۱۳	.	.		.			.	.	.			.							
Kabeto et al. ۲۰۲۲				.	.	.	.	.	.			.				.			
Sapkota et al. ۲۰۲۱				.		.		.	.			.				.			
Arulbalaji et al, ۲۰۱۹	.	.		.	.	.	.	.	.	.		.					.	.	
Hussein et al. ۲۰۱۷		.		.		.	.	.	.			.				.			
Uc Castillo et al. ۲۰۲۰	.					.	.	.	.	.		.							
Jhariya et al. ۲۰۲۱	.	.				.	.	.	.			.		.					
Shabani et al, ۲۰۲۲						.	.	.	.			.				.			
Al-Ruzouq et al. ۲۰۱۹	.	.			.	.	.	.	.										
Parta et al. ۲۰۱۸	.	.		.	.	.	.	.				.	.	.	.				
Arulbalaji et al. ۲۰۱۹	.	.		.		.	.	.	.	.		.							
Al-Shabeeb et al. ۲۰۱۵				.	.	.	.	.	.			.							
Adeyeye et al. ۲۰۱۸	.		.	.	.	.		.	.			.							
Pinto et al. ۲۰۱۷	.			.	.	.	.	.	.			.			.				
Jasrotia et al. ۲۰۱۶		.		.		.		.	.			.		.					
Bathis and Ahmed. ۲۰۱۶		.		.		.	.	.	.			.							
Yeh et al. ۲۰۱۶	.					.		.	.			.							
Senanayake et al. ۲۰۱۶	.	.		.	.	.		.	.			.							
Zaidi et al. ۲۰۱۵	.	.				.		.	.			.							
Mallick et al. ۲۰۱۴	.	.	.	.	.		.	.	.			.							
Mahmoud et al. ۲۰۱۴				.	.	.	.	.	.			.							
Bagyaraj et al. ۲۰۱۳	.	.				.		.	.			.							
Agatwal et al. ۲۰۱۳	.	.		.	.	.		.	.			.		.					
Al-Ruzouq et al. ۲۰۱۹	.	.		.	.	.	.	.	.			.							
Mumtaz et al. ۲۰۱۹	.			.		.	.	.	.			.					.		
Agarwal and Garg, ۲۰۱۶	.	.		.		.	.	.	.			.		.					
Tahmassebpour et al. ۲۰۱۶				.	.	.	.	.	.			.				.		.	
Naghibi and Pourghasemi, ۲۰۱۵				.	.	.	.	.	.	.	.	.						.	

GM= Geomorphology | SW= Surface water body | ST= Soil texture | DEM= Digital elevation model | SL= Slope | R=Rainfall | DD= Drainage density | LD= Lineament density | TWI=Topographic wetness index | SPI= Stream power index | LULC = Land use/Land cover | VC = Vegetation cover | WT = Water table depth | HC= Hydraulic conductivity | LI=Lithology | TPI=Topographic Position Index | G=Geology | GWI= Groundwater level | SC= Surface curvature |

جدول ۴. مرور مطالعات اخیر پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در مناطق مختلف ایران از نظر انتخاب نوع پارامترهای مؤثر در منابع آب زیرزمینی

مرور منابع	G	GM	SW	ST	DEM	SL	R	DD	LD	TWI	SPI	LULC	VC	WT	HC	LI	TPI	SC	Other
رضوی ترمه و همکاران (۱۳۹۸)					•	•		•	•	•	•	•				•		•	
رحمتی و همکاران (۱۳۹۶)						•	•	•	•							•			
بیابانی و همکاران (۱۳۹۹)				•	•	•		•	•							•			•
رحیمی و سلیمانی (۱۳۹۵)				•	•	•		•	•							•			•
ضیاء و همکاران (۱۳۹۵)						•	•	•	•							•			•
صابری و همکاران (۱۳۹۱)	•	•		•		•	•		•			•							
شعبانی و همکاران (۱۳۹۹)						•	•	•	•			•				•			•
رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۵)	•				•	•	•	•	•				•						•
ریاحی و همکاران (۱۳۹۹)				•	•	•				•	•	•						•	•
پهلوان و همکاران (۱۳۹۲)					•	•	•		•			•	•			•			
اسدی نلیوان و همکاران (۱۳۹۹)		•				•	•	•	•			•				•			
رنجبری و همکاران (۱۳۹۹)						•	•	•	•							•			
مجیری و همکاران (۱۳۹۴)	•				•	•	•	•	•										
رزندی و همکاران (۱۳۹۴)					•	•	•	•		•				•		•			
فلاح و همکاران (۱۳۹۶)	•			•	•	•		•	•	•		•						•	
حیدری آفاگل و همکاران (۱۳۹۶)				•	•	•	•	•	•			•		•		•			•
بهاروند و همکاران (۱۳۹۹)					•	•	•	•	•				•			•			
آبشیرینی و همکاران (۱۳۸۷)					•	•		•	•							•			
یونسی و همکاران (۱۳۹۹)				•	•	•		•		•		•				•		•	
شفیعی و همکاران (۱۳۹۸)					•	•		•	•			•				•			
یمانی و علیزاده (۱۳۹۳)					•	•	•	•	•					•		•			•
ترابی پوده و همکاران (۱۴۰۰)	•			•	•	•		•	•	•		•						•	
قربانی نژاد و همکاران (۱۳۹۶)	•			•	•	•		•	•	•		•						•	
نوحانی و همکاران (۱۳۹۷)	•				•	•				•	•	•						•	
خوش طینت و همکاران (۱۳۹۹)	•			•	•	•	•	•	•			•						•	
کثیری و همکاران (۱۳۹۹)	•				•	•	•	•	•				•	•					•
رزندی و همکاران (۱۳۹۶)	•				•	•		•		•									
انتظاری و غلامی (۱۳۹۳)					•	•		•	•			•				•			
مفیدی فر و همکاران (۱۳۹۴)		•				•	•	•	•			•				•			

GM= Geomorphology | SW= Surface water body | ST= Soil texture | DEM= Digital elevation model | SL= Slope | R=Rainfall | DD= Drainage density | LD= Lineament density | TWI=Topographic wetness index | SPI= Stream power index | LULC = Land use/Land cover | VC= Vegetation cover | WT = Water table depth | HC= Hydraulic conductivity | LI=Lithology | TPI=Topographic Position Index | G=Geology | GWI= Groundwater level | SC= Surface curvature |

فصل سوم

داده‌ها و روش‌شناسی

۳-۱-مقدمه

در این فصل از پژوهش به معرفی ویژگی‌های محدوده مورد مطالعه، همچنین داده‌های مورد استفاده در پژوهش پرداخته خواهد شد.

۳-۲- محدوده پژوهش

گوهرکوه در منتهی الیه جنوب‌شرقی حوضه آبریز کویرلوت قرار دارد. این حوضه آبریز در محدوده ۶۰ درجه و ۱۱ دقیق تا ۶۱ درجه و ۷ دقیقه طول شرقی و ۲۸ درجه و ۷ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی در شهرستان خاش از استان سیستان و بلوچستان واقع شده است. در این منطقه، رسوبات آبرفتی که منبع اصلی ذخیره آب زیرزمینی هستند، آبخون گوهرکوه را تشکیل می‌دهند. حوضه آبریز گوهرکوه از شمال به حوضه آبریز رودخانه نازیل و روددر و آبادی‌های کورین، از سمت شرق به کوه‌های شهسواران، سیاه بندان، خارستان و قله تفتان و حوضه آبریز منتهی به دشت خاش، از سمت جنوب به باتلاق هامون تگو و چاه غیب هامون و از سمت غرب به حوضه آبریز مسیل های منتهی به رود شور و کویر بوت منتهی می‌گردد. متوسط ارتفاع دشت گوهرکوه ۱۳۵۰ متر محاسبه شده است. مساحت کل حوضه آبریز حدود ۲۸۷۰ کیلومتر مربع می‌باشد. حدود ۵۵ درصد از سطح کل منطقه را مناطق پست آبرفتی و ۴۵ درصد آن را نواحی کوهستانی و ارتفاعات شکل داده‌اند. تعداد زیادی از مسیل‌ها در ارتفاعات دشت و محدوده دشت گوهرکوه وجود دارند که عمدتاً فاقد آب جاری دائمی هستند. رودخانه زیبای کاواری در منطقه گوهرکوه از توابع بخش نوک آباد واقع شده که پوشیده از نی و در زمان پرآبی پذیرای پرندگان مهاجر است. اما مهمترین منبع آب این دشت، منابع آب زیرزمینی است که چاه‌ها، قنات‌ها و چشمه‌ها می‌باشند. اغلب چاه‌های عمیق در دشت گوهرکوه تمرکز یافته‌اند. منابع آب زیرزمینی این منطقه مورد استفاده کشاورزی، شرب و صنایع قرار می‌گیرد. هیدروگراف واحد دشت گوهرکوه حالت نزولی دارد و به معنی روند کاهشی تغییرات آب زیرزمینی این منطقه و کاهش ذخیره آبخوان می‌باشد. بیلان آب زیرزمینی دشت گوهرکوه نیز منفی می‌باشد که در نتیجه بهره‌برداری‌های بیش از حد و کاهش بارندگی در دوره خشکسالی اخیر بوده است. آبخوان گوهرکوه از نوع آبخوان‌های آزاد بوده که در نهشته‌های آبرفتی و مخروط‌افکنه‌ای قرار دارد. مساحت آبخوان گوهرکوه حدود ۴۸۷ کیلومتر مربع می‌باشد. مقدار بارش سالانه در این بخش نیز بسیار متغیر بوده و از ۱۲۰ تا ۱۶۰ میلیمتر است.

۳-۳- داده‌های پژوهش

این مطالعه شامل جمع‌آوری داده‌های بیوفیزیکی مانند کاربری زمین/ پوشش زمین، خاک، توپوگرافی، شیب، بارش، لیتولوژی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، تراکم خطواره، تراکم زهکشی و داده‌های موقعیت و تراز آب چاه‌ها موجود در دشت گوهرکوه می‌باشد.

۳-۳-۱- فاکتورهای تأثیرگذار بر پتانسیل آب‌زیرزمینی

مرور جامعه مقالات مرتبط با ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی به روش‌شناسی‌های مختلف (جدول ۲-۱ و ۲-۲) در مناطق مختلف از جمله بنگلادش (Adham et al., ۲۰۱۰)، مصر (Abdalla, ۲۰۱۲)، هند (Gupta and Magesh et al., ۲۰۱۲; Mukherjee et al., ۲۰۱۲; Nag and Ghosh, ۲۰۱۳; Patil Srivastava, ۲۰۱۰; Selvam et al., ۲۰۱۶; Deepa et al., ۲۰۱۴; and Mohite, ۲۰۱۵)، ایران (Rahmati et al., ۲۰۱۵)، کره جنوبی (Lee et al., ۲۰۱۲)، تایوان (Yeh et al., ۲۰۰۹)، تایلند (Chotpantararat et al., ۲۰۱۴; Konkul et al., ۲۰۱۴)، سریلانکا (Senanayake et al., ۲۰۱۶) در راستای تعیین فاکتورهای تأثیرگذار بر پتانسیل آب-زیرزمینی انجام گرفته است. خلاصه و جزئیات این منابع در جداول (۲-۳ و ۲-۴) آورده شده است. نتایج این مرور جامع نشان داد که عوامل مؤثر بر نفوذ مشابه و متفاوت بودند. از طرفی نوع فاکتورهای تأثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی به نوع اقلیم منطقه و نوع سازند آن بستگی دارد. از جمله پرکاربردترین فاکتورهای تأثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی عبارتند از مؤلفه‌های توپولوژی، زمین‌شناسی، هیدرواقلیم و پوشش زمین. این مؤلفه‌ها شامل فاکتورهای شیب و ارتفاع، لیتولوژی، تراکم خطواره، بارش، تراکم آبراهه، خاک، کاربری اراضی و پوشش گیاهی می‌باشند. سپس با مقایسه درصد عوامل تأثیرگذار بر نفوذ آب از طریق مطالعات فوق، مشخص گردید بیش از ۵۰ درصد از عوامل تأثیرگذار مورد استفاده در مطالعات، شامل تراکم خطواره، تراکم زهکشی، کاربری اراضی/ پوشش زمین، شیب، مدل رقومی ارتفاع، بارش، لیتولوژی، زمین‌شناسی، خاک و پوشش گیاهی بوده است. این فاکتورها با ویژگی‌های هرگونه آبخوان مرتبط بوده و در مناطق مشابه با منطقه مورد مطالعه بررسی و تأیید شده‌اند. انتظار می‌رود این اقدام منجر به اطمینان بیشتر به نقشه پتانسیل آب‌زیرزمینی گردد.

لیتولوژی: سو همکاران (Su et al., ۲۰۰۰) و شبان و همکاران (Shaban et al., ۲۰۰۶) نشان داده‌اند که رخنمون‌ها و شکستگی‌های سنگ رابطه مستقیمی با شارژ و تغذیه آب زیرزمینی دارند که در هر سنگ، بدنه آبی متفاوتی شکل می‌گیرد که میزان تغذیه و شارژ آن برابر است. به بیان آلری و همکاران (O'Leary et al., ۱۹۷۶)، آب‌های زیرزمینی به طور قابل توجهی تحت تأثیر انواع مختلف سنگ در معرض سطح زمین (برونزد) قرار می‌گیرند. برخی از تحقیقات این عامل را نادیده گرفته و به جای آن از سایر ویژگی‌های فیزیکی مرتبط با تخلخل ثانویه مانند خطواره‌ها و زهکشی استفاده می‌کنند (El-Baz and Himida, ۱۹۹۵). داده‌های لیتولوژی (سنگ‌شناسی) از نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و ترکیب باندهای ۱، ۳ و ۵ تصویر ETM⁺ سنجنده لندست به دست آمده است. این مطالعه مقادیر نفوذ واحدهای سنگ‌شناسی را بر اساس نرخ نفوذ تعیین در نظر می‌گیرد. وزن‌دهی و رتبه‌بندی واحدهای سنگی در منطقه مورد مطالعه به عنوان سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین طبقه‌بندی می‌شوند. تخلخل سنگ‌های رسوبی به طور کلی بین ۱۰ تا ۳۰ درصد است که بستگی به تخلخل ثانویه ناشی از شکستگی‌ها دارد. سنگ‌های آذرین و دگرگونی عموماً تخلخل اولیه کمتری دارند (Davis, ۱۹۶۹).

گرادیان شیب: گرادیان شیب، فاکتور غالبی است که بر نرخ نفوذ بارندگی تأثیر می‌گذارد (Selvam et al., ۲۰۱۴; Yeh et al., ۲۰۱۶). موجودیت و جریان آب زیرزمینی به شدت توسط شیب زمین کنترل می‌شود (Yeh et al., ۲۰۱۶). شیب زمین به طور مستقیم بر میزان نفوذ بارش و یا آب‌های سطحی تأثیر می‌گذارد. در شیب‌های تند و مرتفع، حجم تغذیه آب زیرزمینی کمتر است؛ زیرا آب با سرعت روی سطح زمین جریان می‌یابد و زمان کافی برای نفوذ ندارد. در حالی که مناطق صاف‌تر و پست‌تر می‌تواند سرریز آب را زهکشی و تغذیه آب زیرزمینی را افزایش دهد. شیب زمین علاوه بر تأثیرگذاری بر نفوذ آب باران و جریان سطحی، بر نرخ سرعت رواناب نیز تأثیرگذار است و منجر به فرسایش خاک می‌گردد. به طور کلی، شیب‌های ملایم یا مسطح برای تغذیه آب‌های زیرزمینی بسیار مهم هستند. شیب بر اساس اطلاعات رستری مدل رقومی ارتفاع با تفکیک ۱۲/۵ متر از ALOS PALSAR تهیه شده است. مقادیر گرادیان شیب به وسیله تقسیم زاویه مخالف (بالا) بر گوشه مجاور و ضرب در عدد ۱۰۰ محاسبه شده است. بر طبق مطالعات پیشین، شیب به شش درجه از گرادیان طبقه‌بندی می‌شود. اگر شیب بیشتر از ۵ درجه باشد، بارش به سرعت به رواناب تبدیل می‌شود و آب به راحتی ذخیره نمی‌شود. اگر شیب بین ۰ تا ۱ درجه باشد (دشت)، بارش به نفوذ می‌کند. شیب زمین، همچنین ممکن است جهت جریان کلی آب زیرزمینی را نشان دهد.

تراکم زهکشی: شکل زمین و ویژگی‌های زهکشی مرتبط با هیدروژئولوژی و هیدرولوژی آن بوده و شارژ (تغذیه) و تخلیه آب را کنترل و تعیین می‌کند (Ramingswong, ۲۰۰۳). تراکم زهکشی، پتانسیل ناحیه تغذیه آب‌زیرزمینی را مشخص می‌کند (Yeh et al., ۲۰۰۹)، که در آن شبکه زهکشی بر اساس لیتولوژی بوده و شاخص نرخ نفوذ قابل توجهی را ایجاد می‌کند. تراکم پایین زهکشی، نسبت خالی بالایی دارد که نشان‌دهنده پتانسیل بالا برای تغذیه آب زیرزمینی می‌باشد (Murty, ۲۰۰۰; Kumar et al., ۲۰۰۷). طول تراکم زهکشی ($D_d (km^{-1})$) از طول زهکشی کل تقسیم بر هر ناحیه (Greenbaum, ۱۹۸۵) با استفاده از رابطه (۱-۳) مشتق شده است:

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{A} \quad \text{رابطه (۱-۳)}$$

در این جا، $\sum_{i=1}^n S_i$ اشاره به طول کل زهکشی در حوضه آبریز دارد (L) و A به مساحت واحد اشاره دارد (L^2). طول کل تراکم زهکشی با تغذیه آب زیرزمینی همبستگی دارد، که در آن یک منطقه با تراکم زهکشی بالا به مقدار زیادی رواناب سطحی و حجم اندک تغذیه آب‌زیرزمینی کمک می‌کند. وزن‌دهی و درجه‌بندی تراکم طول زهکشی بر اساس روش سلوام و همکاران (Selvam et al., ۲۰۱۶) به سه نوع طبقه‌بندی می‌شود. برای ارزیابی تراکم زهکشی، از داده آبراهه استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع همراه با توپوگرافی منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود. الگوی زهکشی منطقه مورد مطالعه، الگوی دندریتیک می‌باشد. رده‌های ۱ و ۲ از آبراهه‌ها به دلیل شیب بیشتر و نفوذپذیری کمتر عملاً نقش ناچیزی در تغذیه آب‌زیرزمینی دارند. از این رو، بر اساس رابطه استراهلر (۱)، رده‌های ۱ و ۲ حذف و فقط رده‌های ۳ به بالا برای تراکم زهکشی استفاده می‌شوند.

تراکم خطواره: آلری و همکاران (O'Leary et al., ۱۹۷۶) پیشنهاد کرده‌اند که خطواره‌ها ساده هستند با ویژگی‌های خطی پیچیده از ساختارهای زمین‌شناسی مختلف؛ به عنوان مثال، گسل‌ها، درز و ترک‌ها، شکاف‌ها و شکستگی‌های باز. بر اساس نظر کومار و همکاران (Kumar et al., ۲۰۰۷) و سلوام و همکاران (Selvam et al., ۲۰۱۴) در یک منظره سنگ سخت، خطواره‌ها نشان‌دهنده مناطق گسلی و شکستگی‌ها هستند که منجر به افزایش تخلخل و نفوذپذیری ثانویه می‌گردد. به این ترتیب، خطواره‌ها شاخص خوبی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی هستند و به طور

کلی به تحلیل سنجش از دور از شکستگی‌ها یا ساختارها اشاره دارد (Yeh et al., ۲۰۰۹). طول تراکم خطواره L_d (km^{-1}) از طول خطواره کل در واحد سطح بر اساس رابطه (۲-۳) مشتق می‌گردد:

$$L_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{A} \quad \text{رابطه (۲-۳)}$$

در این جا، $\sum_{i=1}^{i=n} L_i$ اشاره به طول خطواره کل (L) و A به مساحت واحد اشاره دارد (L^2). طول بالای خطواره یا شکستگی در واحد سطح به درجه بالایی از شکستگی‌ها اشاره داشته و منطقه‌ای با پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی بالا را نشان می‌دهد. وزن‌دهی و درجه‌بندی تراکم طول خطواره بر اساس روش سلوام و همکاران (Selvam et al., ۲۰۱۶) به چهار نوع طبقه‌بندی می‌شود. ارزیابی تراکم خطواره بر اساس نقشه زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ترکیب باندهای ۱، ۴ و ۸ تصویر لندست ۸ با اعمال فیلترهای جهت‌دار به دست می‌آید. خطواره، اشکال ژئومورفیک خطی است که در سطح زمین ظاهر می‌شود.

کاربری زمین/ پوشش زمین: کاربری زمین و پوشش زمین از عوامل تأثیرگذار مهم بر تغذیه آب‌های زیرزمینی هستند (Chotpanarat and Boonkaewwan, ۲۰۱۸). لدوچ و همکاران (Leduc et al., ۲۰۰۱) دریافته‌اند که یکی از مشارکت‌کننده‌های مهم و اصلی که در حجم تغذیه آب زیرزمینی اثر می‌گذارد مربوط به تغییرات در بهره‌برداری از زمین است. پاتیل و موهیت (Patil and Mohite, ۲۰۱۴) و شبان و همکاران (Shaban et al., ۲۰۰۶) نیز به این نتیجه رسیده‌اند که پوشش سطح زمین بر تغذیه آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. داده‌های کاربری اراضی / پوشش زمین در این مطالعه بر اساس نقشه کاربری اراضی ۱:۱۰۰۰۰۰ اداره کل منابع طبیعی و تصویر OLI سنجنده لندست ۸ تهیه شده است. در محدوده دشت، کاربری و پوشش اصلی زمین، عمدتاً زمین‌های زراعی و در محدوده بین دشت و تا کوه عمدتاً مراتع ضعیف با بوته‌زارها می‌باشد.

مدل رقومی ارتفاع:

ارتفاع توپوگرافی احتمالاً بر وقوع چشم‌انداز آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد و توسط فرایندهای مختلف ژئومورفولوژیکی و هیدروژئومورفولوژیکی (به عنوان مثال، زمین‌شناسی، شرایط هواشناسی، تخریب زمین و غیره) تنظیم می‌گردد

(Pourghasemi et al., ۲۰۱۲). نقشه ارتفاع توپوگرافی منطقه مورد مطالعه توسط مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج شده از داده ALOS PALSAR RTC توسعه داده شده است (Laurencelle et al., ۲۰۱۵). هنگام تخصیص وزن برای ترسیم منطقه پتانسیل آب زیرزمینی، وزن‌های بالا برای ارتفاع کم و وزن‌های پایین برای ارتفاع بالا اختصاص داده می‌شود (Arulbalaji et al., ۲۰۱۹).

بارش:

در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی، بارش یکی از متغیرهای جوی ضروری است. بنابراین، درک رفتارهای زمانی و فضایی بارش برای مطالعه منابع آب ضروری است. بارش، عامل مهم تغذیه آب‌های زیرزمینی تلقی می‌شود. شکل بارش شامل باران و برف در تغذیه آب‌های زیرزمینی متفاوت عمل می‌کنند. از طرف دیگر مشخصه‌های بارش به‌ویژه شدت آن نیز در میزان نفوذ آب به درون زمین و تغذیه آب‌زیرزمینی تأثیرگذار است. ویژگی‌های بارش معمولاً تغییرات فضایی قابل توجهی را حتی در حوضه‌های آبریز کوچک نشان می‌دهند. بنابراین، توصیف مناسب تغییرات مکانی بارش برای پیش‌بینی رفتار آب در یک حوضه آبریز ضروری است. داده‌های بارندگی از دو منبع استخراج شده است. داده‌های مبتنی بر ایستگاه‌های باران‌سنجی از شرکت سهامی آب منطقه‌ای برای داخل و پیرامون منطقه مورد مطالعه دریافت و میانگین بارندگی سالانه بر اساس داده‌های روزانه و ماهانه محاسبه گردیده می‌گردد. از روش میانبایی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع (Bati, ۲۰۲۲) جهت تهیه نقشه هم‌بارش سالانه استفاده می‌گردد. امروزه، انواع متعددی از پایگاه‌های داده بارش اعم از ایستگاهی و شبکه‌ای یافت می‌شود به گونه‌ای که انتخاب داده نهایی را مشکل می‌سازد. به دلیل محدود بودن حوضه آبریز مورد مطالعه، ایستگاه‌های باران‌سنجی از تراکم و دوره آماری مطلوبی برخوردار نیست. از طرف دیگر، ثبت داده‌های بارش در اندک ایستگاه‌های باران‌سنجی به صورت روزانه همراه با داده‌های مفقوده فراوان می‌باشد. داده‌های شبکه‌ای بارش به دلیل قدرت تفکیک زمانی و مکانی امروزه در مطالعات هیدرواقليمی به فراوانی استفاده می‌شود. بر اساس دو معیار قدرت تفکیک زمانی و مکانی می‌توان داده‌های شبکه‌ای مطلوب را انتخاب کرد. در سال‌های اخیر، با توسعه سریع تکنیک‌های سنجش از دور، محصولات بارش ماهواره‌ای جهانی بیشتری تولید و در دسترس عموم قرار گرفته است. از جمله این محصولات، مأموریت اندازه‌گیری بارندگی گرمسیری (TRMM)، تخمین بارش با اطلاعات سنجش از دور با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

(PERSIANN) و اندازه‌گیری بارش جهانی (GPM) و بارش برآورد شده مادون قرمز با داده‌های ایستگاهی کاگروه مخاطرات اقلیمی (CHIRPS) می‌باشند. بر این اساس، دو پایگاه داده شامل پایگاه داده محلی که یک پایگاه داده ملی مبتنی بر داده‌های مشاهداتی ایستگاه مبنا و یک پایگاه داده دیگر شامل CHIRPS که مبتنی بر داده‌های تلفیقی سنجش از دور و ایستگاه می‌باشند مورد استفاده قرار گرفته است. پوشش زمانی داده بارش GPM از ۱۹۸۱ تاکنون، تفکیک زمانی آن در مقیاس روزانه، پنج‌روزه و ماهانه و با دو تفکیک مکانی ۰/۲۵ در ۰/۲۵ و ۰/۰۵ در ۰/۰۵ درجه قوسی در مقیاس جهانی می‌باشد (Funk et al, ۲۰۱۵). در این بررسی از مقیاس ۰/۰۵ در ۰/۰۵ درجه قوسی در مقیاس روزانه استفاده می‌گردد. وزن‌دهی و درجه‌بندی مقدار بارش سالانه بر اساس روش خان و همکاران (Khan et al., ۲۰۲۲) به پنج نوع طبقه‌بندی می‌شود. وزن‌های بالاتر به مقادیر بارش بیشتر اختصاص داده می‌شود و برعکس.

پوشش گیاهی:

پوشش گیاهی علاوه بر تأثیرگذاری بر نفوذ آب به داخل زمین و تغذیه سفره‌های زیرزمینی از فرسایش سطحی هم جلوگیری نموده و جریان سطحی کاهش و به تأخیر می‌اندازد. شاخص نرمال شده تفاضلی پوشش گیاهی (NDVI)، پوشش گیاهی را با اندازه‌گیری تفاضل بین مادون قرمز نزدیک که پوشش گیاهی به شدت آن را انعکاس می‌دهد و نتوز قرمز که پوشش گیاهی آن را جذب می‌کند، محاسبه می‌کند. شاخص NDVI از تصاویر بازتاب سطحی لندست ۸ (L^۸SR) برای نمایش پوشش گیاهی سبز تعیین می‌گردد. اعداد رقمی (DN) از تصاویر L^۸SR به مقادیر بازتاب طبق معادله زیر تبدیل می‌گردد:

DN values + reflectance additive band

رابطه (۳-۳)

برای زاویه خورشید تصحیح زیر صورت می‌گیرد:

Reflectance / sin (sun elevation)

رابطه (۴-۳)

آن‌گاه شاخص پوشش گیاهی (NDVI) طبق فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \quad \text{رابطه (۳-۵)}$$

در این‌جا، NIR باند مادون قرمز نزدیک و Red باند قرمز می‌باشد. مقادیر شاخص NDVI بین ۱- تا ۱+ نوسان دارد که البته دامنه دقیق و مشخصی برای یک نوع عارضه مشخص وجود ندارد. اما مقادیر منفی این شاخص بسیار محتمل است که شامل پهنه‌های آبی، ابر و برف باشد. دامنه ۰ تا ۰/۴ پوشش گیاهی کم و اندک و بدون پوشش گیاهی و دامنه ۰/۴ و بیشتر، پوشش گیاهی سبز و برگی را نشان می‌دهد. این شاخص به خوبی قابلیت استخراج نقشه‌های تراکم پوشش گیاهی، نقشه‌های کاربری اراضی و نوع کشت و سلامت گیاهی و بسیاری از موارد دیگر را دارا می‌باشد.

جدول ۳-۱. محدوده شاخص گیاهی NDVI برای کلاس‌های مختلف پوشش زمین (Akbar et al., ۲۰۱۹).

دامنه شاخص	نوع عارضه زمینی محتمل
۰/۱۵ تا -۰/۲۸	آب
۰/۱۴ تا ۰/۱۵	عوارض انسان‌ساز
۰/۱۸ تا ۰/۱۴	زمین‌های بایر
۰/۲۷ تا ۰/۱۸	بوته‌زار و علف‌زار (مرتع)
۰/۳۶ تا ۰/۲۷	پوشش گیاهی پراکنده
۰/۷۴ تا ۰/۳۶	پوشش گیاهی متراکم

زمین‌شناسی:

زمین‌شناسی، آبخوان‌های ذخیره آب زیرزمینی را تعیین می‌کند. نوع سنگ زمین‌شناسی در معرض سطح زمین تأثیر قابل توجهی بر تغذیه آب زیرزمینی دارد (Shaban et al, ۲۰۰۶). در این‌جا، نقشه زمین‌شناسی از بررسی زمین-شناسی منطقه مورد مطالعه به دست آمده است. نقشه مزبور ابتدا اسکن، تصحیح و سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS دیجیتالی می‌گردد تا لایه‌های موضوعی زمین‌شناسی آماده گردد.

۳-۳-۲- داده‌های منابع آب دشت گوهرکوه

داده‌های موقعیت مظاهر آب زمینی شامل چاه‌ها از بخش آب زیرزمینی شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان اخذ گردیده است.

۳-۴- روش شناسی پژوهش

۳-۴-۱- تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره

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. تولنایی 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).

۳-۴-۲- تخصیص وزن و نرمال‌سازی با استفاده AHP

در یک تحلیل فرایند سلسله مراتبی، توابع تصمیم‌گیری از طریق فرایندهای مختلف مانند دسته‌بندی پارامترهای متفاوت، ترتیب سلسله مراتبی، قضاوت‌های مبتنی بر اهمیت نسبی مجموعه‌ای از عناصر و استنتاج نتایج آن است

(Saaty, ۱۹۹۹; Agarwal et al., ۲۰۱۳). تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP)، برای بار نخست توسط ساعتی برای حل یک مسئله پیچیده با تقسیم آن به دسته‌های مختلف و ادغام هر زیربخش برای پیدا کردن یک تصویر بزرگ که باید حل شود، معرفی شد. در این پژوهش، تعداد ۱۰ لایه موضوعی توسعه یافته است و روابط آن‌ها با کمک تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP)، تعریف شده است. مراحل مربوط به استنتاج وزن‌ها از لایه‌های موضوعی اصلی و زیرکلاس‌های آن‌ها در منابع متعدد نشان داده شده است (Saaty, ۲۰۰۴; Kumar et al., ۲۰۱۴; Agarwal et al., ۲۰۱۳; Jhariya et al., ۲۰۱۶; Murmu et al., ۲۰۱۹). مرحله اول شامل تعیین مقادیر اهمیت نسبی است. در این مرحله مقادیر اهمیت (اولویت) هر معیار نسبت به سایر معیارها مطابق جدول (۲-۳) مشخص می‌گردد تخصیص ارزش‌های اهمیت در این پژوهش شامل ارزیابی هر معیار در برابر سایر معیارها در سطح سلسله مراتبی است. مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی مرجع استاندارد است که برای نهایی کردن مقادیر نسبی مهم استفاده می‌شود. در این مقیاس استاندارد، نمره ۱ بیانگر دو موضوع با اهمیت یکسان است؛ در حالی که نمره ۹ نشانگر یک موضوع بسیار مهم است.

جدول ۲-۳. مقیاس ۱-۹ ساعتی برای اهمیت نسبی (Saaty, ۱۹۸۰)

مقیاس	اهمیت نسبی
۱	اهمیت برابر
۲	یکی از معیارها نسبت به دیگری اهمیت ضعیف دارد.
۳	یکی از معیارها نسبت به دیگری اهمیت متوسط دارد.
۴	یکی از معیارها نسبت به دیگری اهمیت فراتر از متوسط دارد.
۵	یکی از معیارها نسبت به دیگری اهمیت قوی دارد.
۶	یکی از معیارها نسبت به دیگری اهمیت فراتر از قوی دارد.
۷	یکی از معیارها نسبت به دیگری اهمیت خیلی قوی دارد.
۸	یکی از معیارها نسبت به دیگری اهمیت خیلی خیلی قوی دارد.
۹	یکی از معیارها نسبت به دیگری اهمیت فوق‌العاده دارد.

در تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP)، یک مقایسه از معیارهای در نظر گرفته شده از نظر تعداد (n) باید انجام بگیرد (در این مورد، مدل رقومی ارتفاع، شیب، تراکم زهکشی، تراکم خطواره، کاربری زمین/ پوشش زمین، زمین-شناسی، لیتولوژی، خاک، پوشش گیاهی و بارش) و یک ماتریس مربع از $A = (a_{ij})$ ایجاد گردد. ماتریس مربع به دست آمده از طریق ماتریس مقایسه زوجی به شرح زیر نرمال می‌شود (معادله ۳-۶).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه (۳-۶)}$$

محاسبه مقدار ویژه و بردار ویژه به شرح زیر است (معادلات (۳-۷) و (۳-۸)):

$$A = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \text{ and } w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \text{ \& } w' = AW = \begin{bmatrix} w'_1 \\ w'_2 \\ \vdots \\ w'_n \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۳-۷)}$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \left(\frac{w'_1}{w_1} + \frac{w'_2}{w_2} + \dots + \frac{w'_n}{w_n} \right) \quad \text{رابطه (۳-۸)}$$

در این جا، W بردار ویژه، w_i مقدار ویژه از معیار i و λ_{max} مقدار ویژه از ماتریس مقایسه زوجی می باشد.

قضایوت عدم قطعیت بر اساس شاخص سازگاری ساعتی (CI) است که از طریق رابطه (۳-۹) محاسبه می گردد:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{رابطه (۳-۹)}$$

در این جا، n نماینده تعداد معیارها یا کلاس ها می باشد.

اندازه گیری نسبت سازگاری (CR) یک ماتریس زوجی است که از طریق معادله (۳-۱۰) محاسبه می گردد:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{رابطه (۳-۱۰)}$$

در این جا، RI شاخص نسبت است. مقادیر RI نشان دهنده اعداد مختلف از n هستند که در جدول (۳-۳) نشان داده

شده است (Saaty, ۱۹۸۰). مقادیر CR بایستی کمتر یا برابر با ۰/۱ باشد (Maity and Mandal, ۲۰۱۷). اگر از

شرایط ذکر شده منحرف گردد، ارزیابی مجدد وزن مربوطه باید به دور از تناقض انجام گیرد؛ در غیر این صورت، تحلیل فرایند سلسله مراتبی ممکن است نتایج معیوب دهد (Chakraborty and Banik, ۲۰۰۶).

جدول ۳-۳. شاخص نسبت (RI) ساعتی برای مقادیر متفاوت از 'n' (Saaty, ۱۹۸۰).

تعداد معیار (N)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
شاخص نسبت (RI)	۰	۰	۰/۵۸	۰/۸۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹

۳-۴-۳- تعیین مناطق بالقوه آب زیرزمینی

روش‌شناسی تفصیلی اتخاذ شده برای مرزبندی مناطق بالقوه آب زیرزمینی با کمک ابزارهای مختلف مانند GIS، RS و MCDM در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. ادغام نقشه‌های موضوعی انتخاب شده برای محاسبه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از رابطه (۳-۱۱) در محیط GIS تکمیل شده است.

$$GWPZ = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (w_j * w_i) \quad \text{رابطه (۳-۱۱)}$$

در این جا، w_i و w_j وزن‌های نرمال شده از کلاس‌های i^{th} و j^{th} لایه‌های موضوعی می‌باشند. m بیانگر تعداد کل لایه‌های موضوعی و n نشان‌دهنده تعداد کل کلاس‌ها در هر لایه موضوعی است. مقادیر بالای حاصل از این رابطه نشان دهنده پتانسیل بیشتر برای وقوع آب‌های زیرزمینی است (Agarwal and Garg, ۱۹۹۹; Malczewski, ۲۰۱۶).

۳-۴-۴- تأیید و اعتبارسنجی مناطق بالقوه آب زیرزمینی

بررسی دقت مدل پیش‌بینی و پیش‌یابی برای جلوگیری از خطاها و بهبود تصمیم‌گیری مطالعات زیست محیطی بسیار ضروری است. تأیید و اعتبارسنجی مناطق بالقوه حاصل از فرایند تحلیل سلسله مراتبی و همپوشانی وزنی، با داده‌های موقعیت و عملکرد آب زیرزمینی از تعداد چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه بررسی شده است. این داده‌ها از طریق بخش مطالعات آب زیرزمینی وابسته به شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان تهیه شده است. بنابراین، نقشه پیش‌یابی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های بازدهی چاه و روش منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) اعتبارسنجی و تأیید می‌گردد.

الف. اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های چاه

مناطق بالقوه آب زیرزمینی پیش‌بینی شده توسط مدل حاصل از ادغام تکنیک‌های مختلف مانند GIS، RS و MCDA با بررسی همبستگی داده‌های جمع‌آوری شده از حلقه‌های چاه موجود در منطقه اعتبارسنجی می‌گردد. یک رویکرد سریع برای اعتبارسنجی نقشه پیش‌بینی شده عبارت است از همپوشانی لایه موقعیت چاه‌ها با لایه مناطق بالقوه آب زیرزمینی حاصل از فرایند مدل‌سازی. در این رویکرد سریع و ابتدایی، به صورت بصری می‌توان موقعیت چاه‌ها را بررسی و درباره اعتبار نقشه پیش‌بینی شده مناطق بالقوه آب زیرزمینی قضاوت نمود. قرارگیری تعداد زیادتری از چاه‌ها در مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی بالا بیانگر دقت مدل پیش‌بینی است. بیان کمی این روش اعتبارسنجی، استفاده از داده‌های بازده چاه‌ها می‌باشد. برای این منظور عملکرد و بازده چاه‌ها از لحاظ آبدی به ۵ کلاس مطابق با کلاس‌های پتانسیل متفاوت آب زیرزمینی گروه‌بندی می‌گردد. آن‌گاه تعداد چاه‌هایی که از لحاظ بازده واقعی در کلاس پتانسیل مورد انتظار نقشه پتانسیل آب زیرزمینی واقع شده‌اند شناسایی می‌گردد. آن‌گاه، دقت پیش‌بینی از طریق نسبت درصدی تعداد این چاه‌ها به کل چاه‌ها محاسبه می‌گردد.

ب. اعتبارسنجی با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم

تجزیه و تحلیل منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) یک تکنیک استاندارد برای ارزیابی دقت یک تست تشخیصی است. منحنی ROC روی محور افقی (X -axis) مقادیر مثبت کاذب و روی محور عمودی (Y -axis) مقادیر مثبت واقعی را ترسیم می‌کند (Pradhan, ۲۰۱۳). ناحیه زیر سطح منحنی (AUC) از ROC دقت یک فرایند پیش‌بینی را با توضیح توانایی سیستم در انتظار وقوع دقیق یا عدم وقوع رویدادهای از پیش تعریف شده را نشان می‌دهد. یک منحنی با بزرگترین سطح زیرمنحنی (AUC)، بهترین روش است. نقیبی و همکاران (Naghbi et al., ۲۰۱۵) رابطه بین سطح زیر منحنی (AUC) و دقت پیش‌بینی را به صورت زیر خلاصه کرده‌اند: عالی (۰/۹ تا ۱)، بسیار خوب (۰/۸ تا ۰/۹)، خوب (۰/۷ تا ۰/۸)، متوسط (۰/۶ تا ۰/۷) و ضعیف (۰/۵ تا ۰/۶). این منحنی توسط ترسیم نسبت یا نرخ مثبت صحیح (True Positive Rate) که به اختصار TPR نامیده می‌شود بر حسب نرخ مثبت کاذب (False Positive Rate) که به اختصار FPR نامیده می‌شود، ایجاد می‌گردد. در روش مرسوم، نرخ مثبت کاذب (FPR) و نرخ مثبت صحیح (TPR) به ترتیب در محور و بیان می‌گردند (روابط ۳-۱۲ و ۳-۱۳).

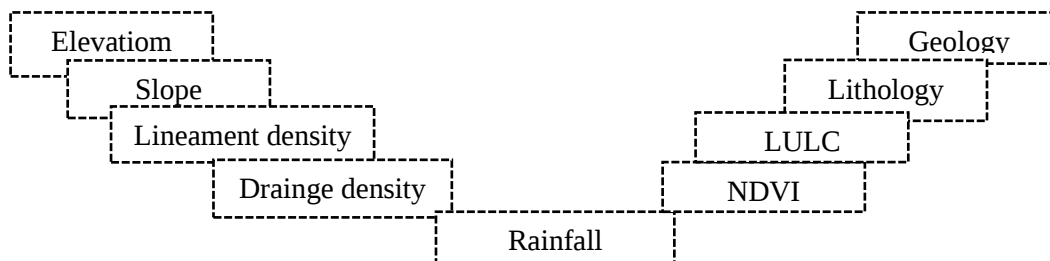
$$X = FPR = 1 - \frac{TN}{TN + FP} \quad \text{رابطه (۱۲-۳)}$$

$$Y = TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad \text{رابطه (۱۳-۳)}$$

در پژوهش حاضر، حجم نمونه تعداد ۴۸۵ حلقه چاه دایر و بازده خیلی کم تا خیلی بالا دامنه‌ای از ۰ تا ۵ است. سطح زیر منحنی (AUC) از نمودار ROC برای اندازه‌گیری این که مدل پیشنهادی چقدر مناطق با عملکرد متفاوت را پیش‌بینی می‌کند، استفاده می‌شود. این نمودار مقایسه بین دو نحوه عملکرد بین درصد مثبت کاذب و درصد مثبت صحیح را ارزیابی می‌کند. درصد مثبت واقعی، نمونه‌ای را نشان می‌دهد که بازده مورد انتظار از نقشه پیش‌بینی با بازده واقعی مطابقت دارد. از سوی دیگر، درصد مثبت کاذب، نشان‌دهنده درصد موارد مثبت تشخیص نادرست است.

چارچوب روش شناختی اتخاذ شده در این مطالعه برای تعیین مناطق پتانسیل آب زیرزمینی در شکل (۱-۳) ارائه شده است.

مرور منابع (نهایی سازی نمایه های ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی)

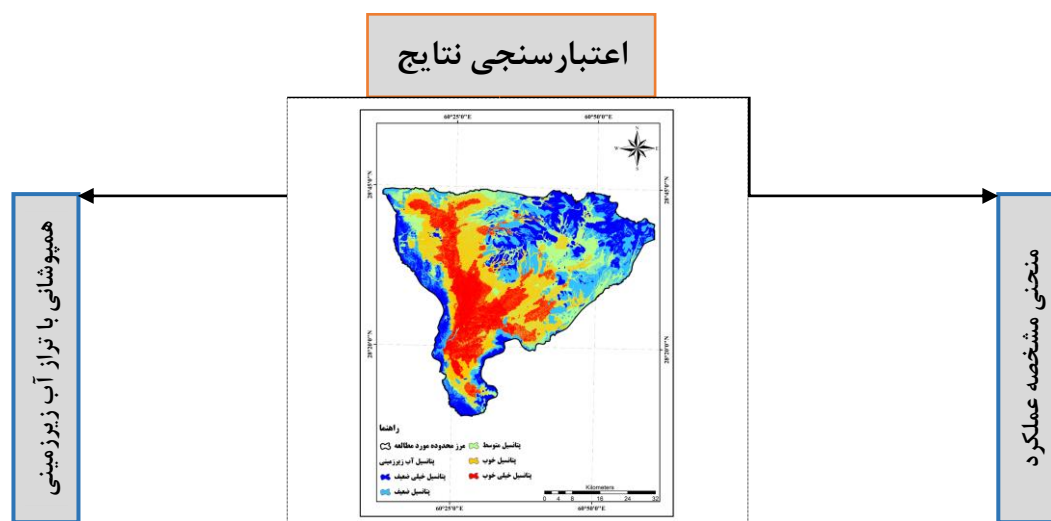


اختصاص وزن به لایه های موضوعی (روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی)

طبقه بندی مجدد لایه های موضوعی و اختصاص رتبه به هر کلاس
نمره نسبی: ۱ تا ۵؛ ارزش بالاتر بیانگر سهم بیشتر در پتانسیل آب زیرزمینی

تلفیق لایه های موضوعی به لایه شاخص پتانسیل آب زیرزمینی (روش همپوشانی وزن دار)

تولید نقشه مناطق پتانسیل آب زیرزمینی



شکل ۳-۱. چارچوب روش شناختی اتخاذ شده در این مطالعه برای تعیین مناطق پتانسیل آب زیرزمینی

فصل چهارم

یافته‌های پژوهش و بحث

۴-۱- مقدمه

در این بخش، ابتدا توزیع فضایی لایه‌های موضوعی منطقه مورد مطالعه تشریح می‌گردد. سپس فرایند تخصیص وزن و نرمال‌سازی و بازطبقه‌بندی لایه‌های موضوعی بررسی می‌گردد. تلفیق لایه‌های موضوعی و پهنه‌بندی مناطق بالقوه آب زیرزمینی، مرحله بعدی را شامل می‌گردد. در نهایت، نقشه پیش‌بینی شده مناطق بالقوه آب زیرزمینی با استفاده از دو تکنیک توصیفی و کمی تأیید و اعتبارسنجی می‌گردد. همان‌گونه که پیش‌تر بیان گردید، بر اساس مرور ادبیات پژوهش، لایه‌های تأثیرگذار بر پتانسیل آب زیرزمینی در با تأکید بر مناطق خشک شامل لایه‌های موضوعی لیتولوژی، زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، گرادیان شیب، مدل رقومی ارتفاع، شاخص پوشش گیاهی، تراکم خطواره، کاربری زمین/پوشش زمین و بارش به عنوان لایه‌های تأثیرگذار در پتانسیل آب زیرزمینی منطقه گوهرکوه انتخاب گردیده‌اند. فرایند تخصیص وزن و نرمال‌سازی وزن‌ها از طریق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) انجام گرفته است. پس از تعیین وزن‌نهایی لایه‌ها و رتبه کلاس‌ها، ادغام لایه‌های موضوعی جهت تولید نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی از طریق شاخص همپوشانی وزنی انجام گرفته است. اعتبارسنجی نتایج پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی نیز بر اساس دو تکنیک توصیفی و کمی صورت گرفته است.

۴-۲- توزیع فضایی لایه‌های موضوعی

۴-۲-۱- لیتولوژی

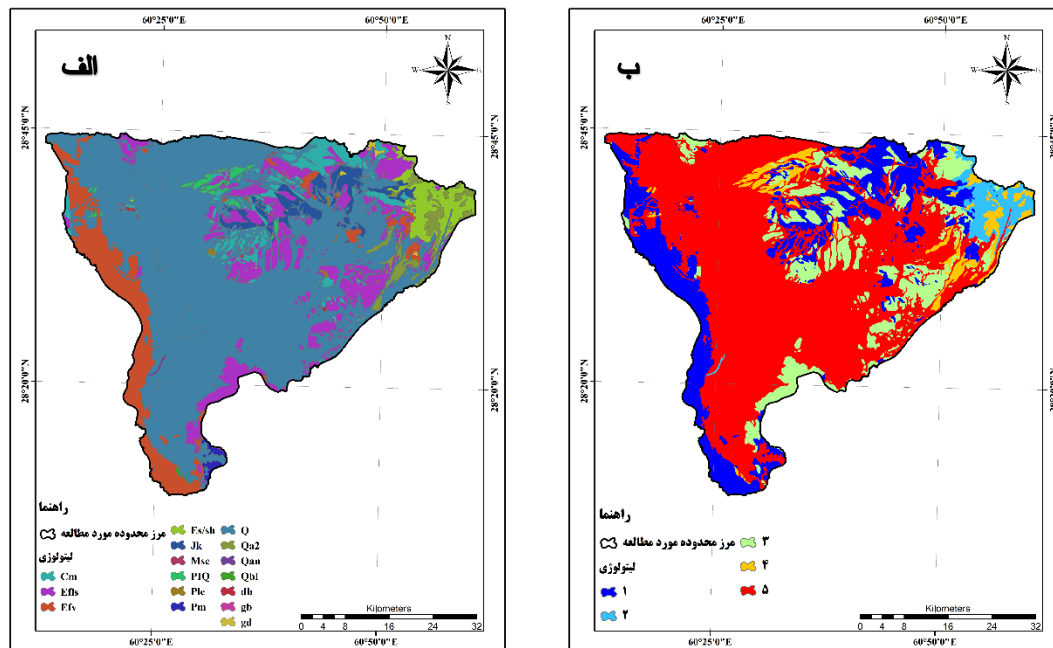
آب‌های زیرزمینی به طور قابل توجهی تحت تأثیر انواع مختلف سنگ در معرض سطح زمین (برونزد) قرار می‌گیرند. در هر سنگ، بدنه آبی متفاوتی شکل می‌گیرد. لیتولوژی برای ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی بسیار مهم است؛ زیرا به طور قابل توجهی بر نفوذ آب در یک منطقه خاص تأثیرگذار است. مشخصه‌های سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی (سن) منطقه مورد مطالعه در جدول (۴-۱) آورده شده است. توزیع فضایی لیتولوژی‌ها نیز در شکل (۴-۱ الف) نشان داده شده است.

جدول ۴-۱. زمین‌شناسی (سن) و سنگ‌شناسی (لیتولوژی) منطقه مورد مطالعه

کد اختصاری	توضیحات سنگ‌شناسی	سن زمین‌شناسی
Q	نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر	کواترنر
Qa ^۲	کنگلومرا و توف همراه با اجزاء آندزیتی و داسیتی	
Qan	جریان آندزیتی قدیمی همراه با کمی بازالت	
Qbl	الیوین بازالت و آندزیت همراه با کنگلومرا و میان لایه	
PIQ	کنگلومرای پلی میکتیک	پلیوسن
Msc	کنگلومرا و ماسه سنگ همراه با سیلتستون و کمی شیل	میوسن
gd	گرانودیوریت	الیگوسن
Efv	شیل، شیل آهکی و آهک	ائوسن
Efls	آهک، ماسه سنگ، سیلتستون، شیل و به طور بخشی شیل آهکی	
Es/sh	ماسه سنگ سبز تا خاکستری، شیل و کمی آهک	
Ple	گل سنگ، سیلتستون و ماسه سنگ، احتمالاً هم ارز سازند لوت	پالئوسن
Jk	سنگهای بازیک دگرگون شده، شیل آهکی دگرگون شده و ماسه سنگ	کرتاسه
db	دیاباز	
gb	گابرو	
Cm	آمیزه رنگین	
Pm	مرمر	پرمین

منطقه مورد مطالعه عمدتاً با نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر پوشیده شده است. نهشته‌های کواترنری در گستره دشت به طور عمده شامل آبرفت دانه درشت، متوسط و ریز است. ذرات دانه درشت و متوسط در مناطق مرکزی و شرقی و ذرات دانه ریز در بخش غربی دشت و در مخروط افکنه واقع شده است. این نهشته‌ها بستری مناسب برای تشکیل و تغذیه آبخوان می‌باشند. بعد از آن، سازندهای کنگلومرای پتانسیل خوبی برای نفوذ دارا می‌باشند؛ منتها گستره فضایی حضور این لیتولوژی در سطح منطقه مورد مطالعه به شدت محدود است. لیتولوژی‌های نفوذناپذیر و سخت عمدتاً در رخنمون‌های سنگی مناطق مرکزی و کناره غربی منطقه مورد مطالعه یافت می‌شود که دارای پتانسیل کم آب زیرزمینی می‌باشند. وزن اختصاصی به لایه موضوعی لیتولوژی، ۲۹ درصد بوده است. از این رو، مهمترین فاکتور تأثیرگذار در پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه شناخته شده است. از آن‌جا که نفوذپذیری سازند با لیتولوژی در ارتباط است؛ کلاس‌های نفوذپذیرتر دارای رتبه بالاتر بوده و برعکس. از این رو، لایه موضوعی لیتولوژی به پنج گروه بازطبقه‌بندی شده و یک لایه جدید لیتولوژی ایجاد گردیده است که میزان کلاس‌های آن بیانگر

نفوذپذیری می‌باشند. بالاترین رتبه (کلاس ۵) به گروه نهشته‌های رسوبی دوره کواترنر (Q) اختصاص داده شده است (شکل ۴-۱ ب).

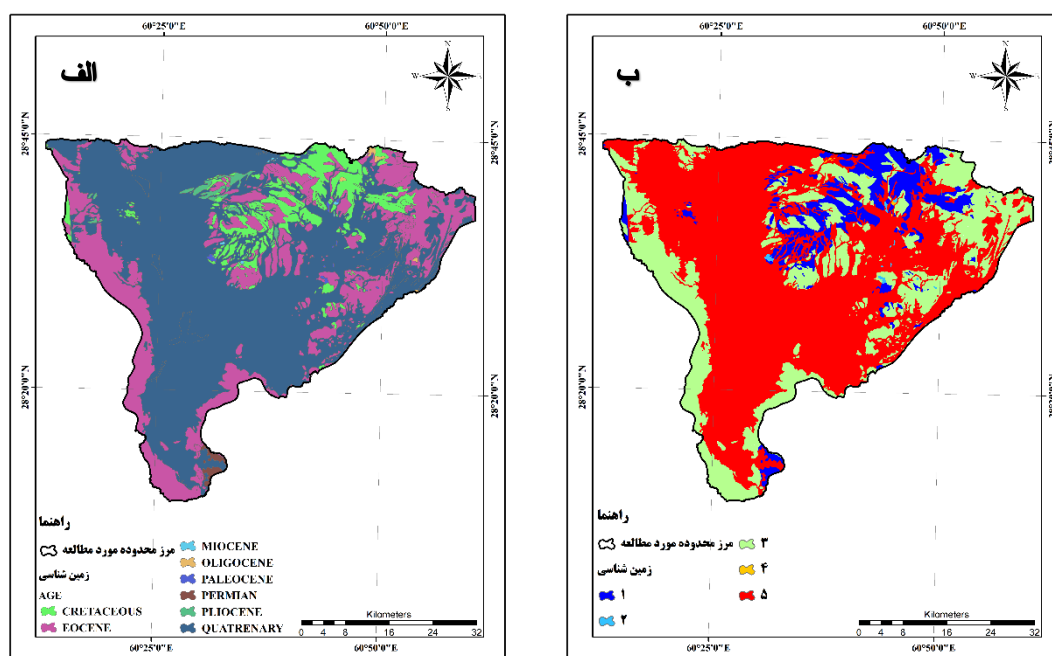


شکل ۴-۱. توزیع فضایی لیتولوژی (الف) و لیتولوژی بازطبقه بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۴-۲-۲- زمین‌شناسی

حوضه آبریز دشت گوهرکوه در حدفاصل واحدهای زمین‌ساختی نهپندان، خاش، مکران، بلوک لوت و ایران مرکزی واقع شده است. سازندهای سنگی موجود در محدوده مورد مطالعه را از نظر ساختمانی می‌توان به دو زون فلیش خاور ایران و زون لوت وابسته به ایران مرکزی دانست. ناحیه مورد مطالعه، از نهشته‌های فلیش و سنگ‌های آمیزه رنگین خاور و جنوب‌خاوری ایران تشکیل شده و بیرون‌زدگی‌های موجود، ترکیب و ویژگی‌های خاص سنگ‌های این بخش از ایران را دارا می‌باشند. رسوبات دشت به سن کواترنر بوده (شکل ۴-۲ الف) و بر اساس نگاشت چاه‌های حفاری، رسوبات دشت دارای اندازه‌های مختلف از سیلت تا شن است (رضایی و سرگزی، ۱۳۸۹). بخش عمده دشت گوهرکوه از لیتولوژی آبرفت با سن زمین‌شناسی کواترنر تشکیل شده است. لیتولوژی‌هایی با سن زمین‌شناسی پلیوسن، میوسن و انوسن نیز با ترکیبات بعضاً کنگلومرایبی از نفوذپذیری خوب تا متوسط برخوردار هستند.

لیتولوژی‌ها با سن زمین‌شناسی پالئوسن، کرتاسه، الیگوسن و پرمین که غالباً با آمیزه‌های زنگین و سنگ‌های سخت همراه می‌باشند از نفوذپذیری ضعیف برخوردار هستند. وزن اختصاصی به لایه موضوعی زمین‌شناسی (سن)، ۲۵ درصد بوده است. از این رو به کلاس‌های (کواترنر و پلیوسن)، (میوسن)، (ائوسن)، (پالئوسن) و (کرتاسه، الیگوسن و پرمین) به ترتیب رتبه‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف با دامنه اعداد ۵ تا ۱ تعلق گرفته است (شکل ۴-۲).

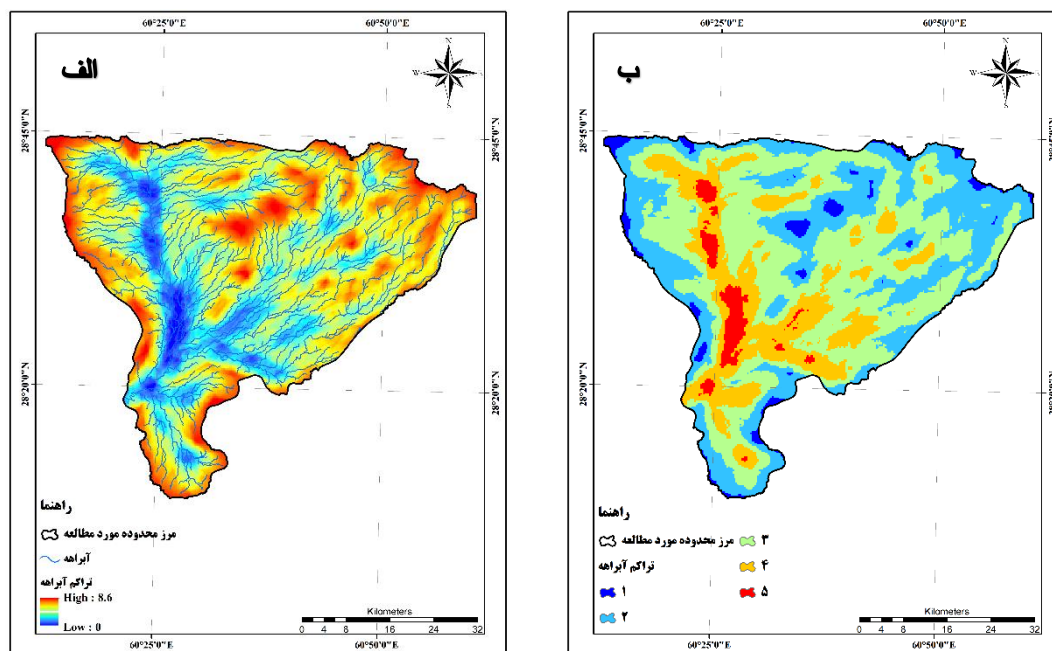


شکل ۴-۲. توزیع فضایی زمین‌شناسی (الف) و زمین‌شناسی بازطبقه بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۴-۲-۳- تراکم زهکشی

شبکه زهکشی در پتانسیل آب زیرزمینی به ویژه در سرزمین‌های خشک فاکتوری بسیار تأثیرگذار می‌باشد. شبکه زهکشی بیانگر جریان تجمعی آب در سطح حوضه آبریز نیز بوده و با نفوذپذیری آب به زیرزمین در ارتباط تنگاتنگ است. در یک شبکه زهکشی، عمدتاً رده‌های پایین مانند رده‌های شماره ۱ و ۲ به دلیل شیب بیشتر دارای نفوذپذیری کمتر بوده و برعکس رده‌های بالاتر (بالاتر از ۳) دارای نفوذپذیری زیادتری می‌باشند. بنابراین، نقش رده‌های پایین، قابل چشم‌پوشی بوده و می‌توان اثر آن‌ها را در پتانسیل آب زیرزمینی لحاظ نکرد. البته این شرایط

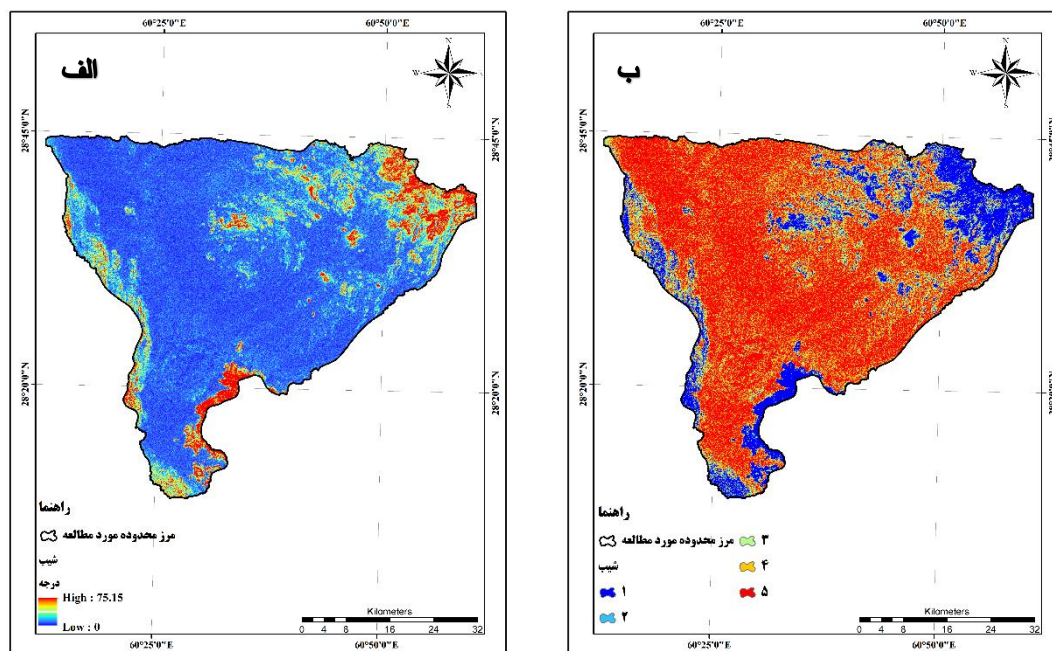
در محیط‌های متفاوت جغرافیایی صدق نمی‌کند. الگوی زهکشی منطقه مورد مطالعه، الگوی دندریتیک می‌باشد. تراکم زهکشی در این الگوی زهکشی در مناطق پایین دست که رده آبراهه‌ها افزایش می‌یابد، کاهش می‌یابد. دامنه تراکم زهکشی در منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۸/۶ (کیلومتر در کیلومتر مربع) متغیر است. الگوی توزیع تراکم‌های اندک زهکشی در مناطق مسطح و دشتی قرار گرفته است. این الگوی تراکم کم به صورت جریان آبراهه اصلی نمود می‌یابد که از جهت شمالی- جنوبی و شرقی- غربی دارد (شکل ۳-۴ الف). از این رو، تراکم زهکشی یک فاکتور بسیار مهم در پتانسیل آب زیرزمینی در مناطق خشک با توپوگرافی ناهموار تلقی می‌شود که به طور غیرمستقیم نقش بارش را نیز بیان می‌کند. با ملاحظه واقعیت‌های محیطی حوضه آبریز دشت گوهرکوه، وزن نهایی اختصاص داده شده به لایه موضوعی تراکم زهکشی، ۱۵ درصد بوده که از لحاظ جایگاه، سومین لایه موضوعی مهم در پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌آید. از آن جا که تراکم زهکشی با مقدار تجمعی آب سطحی ارتباط معکوس دارد؛ بنابراین کلاس‌های کم تراکم دارای رتبه بالاتری می‌باشند. از این رو به کلاس‌های (۲-۰)، (۴-۲)، (۶-۴)، (۸-۶) و (۱۰-۸) به ترتیب رتبه‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف با دامنه اعداد ۵ تا ۱ تعلق گرفته است (شکل ۳-۴ ب).



شکل ۳-۴. توزیع فضایی تراکم زهکشی (الف) و تراکم زهکشی بازطبقه‌بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۴-۲-۴- گرادیان شیب

گرادیان شیب به طور مستقیم بر روی نرخ نفوذ آب‌های سطحی به زیرمین تأثیرگذار است. به بیانی دیگر، در شیب‌های کمتر نرخ نفوذ آب به زیرمین افزایش و برعکس در شیب‌های بیشتر، کاهش می‌یابد. در شیب‌های کم، سرعت جریان سطحی کاهش یافته و تجمع آب افزایش می‌یابد. بنابراین کاهش سرعت جریان سطحی و افزایش تجمع جریان منجر به نفوذ بیشتر آب به زیرمین می‌گردد. در شیب‌های زیاد عمده‌تأ آب‌های سطحی فرصتی برای نفوذ پیدا نمی‌کنند؛ مگر اینکه درز و شکاف‌ها، ترک و گسل‌ها باعث نفوذ شوند. بنابراین با ملاحظه شرایط زمین‌شناسی، لیتولوژی و خطواره‌ها در محیط‌های جغرافیایی خاص مانند دشت گوهرکوه می‌توان از نقش شیب‌های زیاد در پتانسیل آب‌زیرزمینی چشم‌پوشی نمود. البته این شرایط برای سایر محیط‌های جغرافیایی با برخورداری از سازندهای نفوذپذیر در ارتفاعات صدق نمی‌کند. از طرف دیگر، شیب بر الگوی زهکشی و تراکم زهکشی حوضه نیز تأثیرگذار است. تراکم زهکشی در شیب‌های بیشتر به عمده‌تأ بالا بوده و جریان آب‌سطحی را به آسانی زهکشی نموده و وارد جریان اصلی می‌نماید. در مناطق با شیب اندک شرایط متفاوت است. تراکم زهکشی در این مناطق پایین بوده و رده‌های بالا از الگوی زهکشی نمود می‌یابد که در میزان تغذیه و پتانسیل آب‌زیرزمینی تأثیرگذار است. دامنه شیب در منطقه مورد مطالعه از صفر تا ۷۵/۱۵ درجه متغیر است. شیب‌های زیاد در بخش‌های شرقی منطقه مورد مطالعه در ارتفاعات تفتان و در کرانه‌های شرقی و جنوب‌شرقی منطقه مورد مطالعه نمود دارد. در سایر بخش‌های دشت گرادیان شیب اندک است. حداقل شیب در خروجی حوضه آبریز دشت در گوشه جنوب‌غربی دشت وجود دارد (شکل ۴-۴ الف). از این رو، گرادیان شیب نیز یک فاکتور بسیار مهم در پتانسیل آب‌زیرزمینی در مناطق خشک با توپوگرافی ناهموار تلقی می‌شود که به طور غیرمستقیم نقش شبکه زهکشی و جریان تجمعی را نیز بیان می‌کند. با ملاحظه واقعیت‌های محیطی حوضه آبریز دشت گوهرکوه، وزن نهایی اختصاص داده شده به لایه موضوعی گرادیان شیب، ۱۱ درصد بوده که از لحاظ جایگاه، چهارمین لایه موضوعی مهم در پتانسیل آب‌زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌آید. از آن جا که گرادیان شیب با مقدار تجمعی آب سطحی ارتباط معکوس دارد؛ بنابراین کلاس‌های کم شیب دارای رتبه بالاتری می‌باشند. از این رو به کلاس‌های (۰-۳)، (۴-۲)، (۵-۳)، (۸-۵) و (۱۰-۸) به ترتیب رتبه‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف با دامنه اعداد ۵ تا ۱ تعلق گرفته است (شکل ۴-۴ ب).

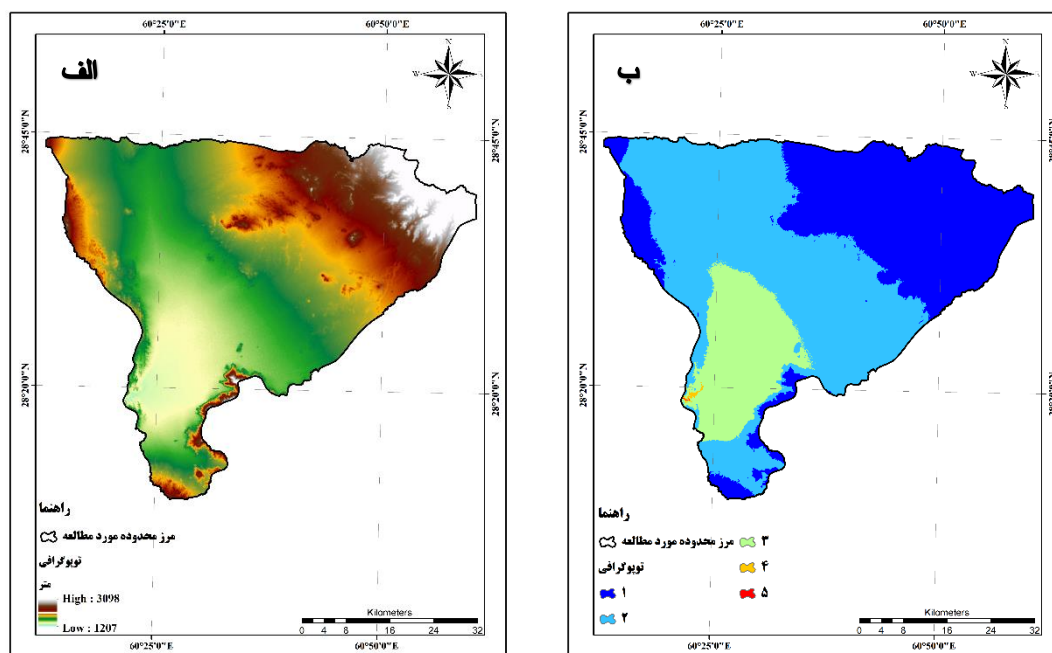


شکل ۴-۴. توزیع فضایی گرادیان شیب (الف) و گرادیان شیب بازطبقه‌بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۴-۲-۵- ارتفاع

ارتفاع ناهمواری بیان غیرمستقیم نقش فاکتورهای تأثیرگذار در نفوذ آب به زیرزمین مانند شیب، شبکه زهکشی، جریان تجمعی، خاک و غیره می‌باشد. در ارتفاعات بیشتر عمدتاً به دلیل شیب بیشتر، نرخ نفوذ آب باران و جریان‌های سطحی به زیرزمین برای تغذیه آبخوان‌ها و تقویت پتانسیل آب‌زیرزمینی اندک است. در سوی مخالف، ارتفاعات بیشتر محل انباشت برف و باران‌های بیشتر بوده و توان تغذیه آب زیرزمینی را افزایش می‌دهند. بنابراین نقش توپوگرافی به شدت به محیط جغرافیایی و اقلیمی حوضه‌های آبریز وابسته است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک به ویژه در عرض‌های جغرافیایی پایین به دلیل شرایط حرارتی، بارش برف نادر است. بنابراین ناهمواری مرتفع فاقد انباشت برف بوده و نقش بارزی در تقویت منابع آب زیرزمینی ندارند. از سوی دیگر، در ارتفاعات بالاتر به دلیل شیب بیشتر، تراکم زهکشی بالا بوده و بارش باران بلافاصله به جریان‌های سطحی منتقل شده و به سمت پایین دشت و مناطق دشتی زهکشی می‌گردد. شرایط خشکی محیط جغرافیایی با فقر پوشش گیاهی نیز این فرایند را تسریع می‌نماید. بنابراین شرایط اقلیمی و زیستی محیط‌های جغرافیایی مناطق کوهستانی و ناهموار بر نقش متفاوت آن‌ها در پتانسیل آب زیرزمینی تأثیرگذار است. دامنه ارتفاع ناهمواری در سطح منطقه مورد مطالعه از

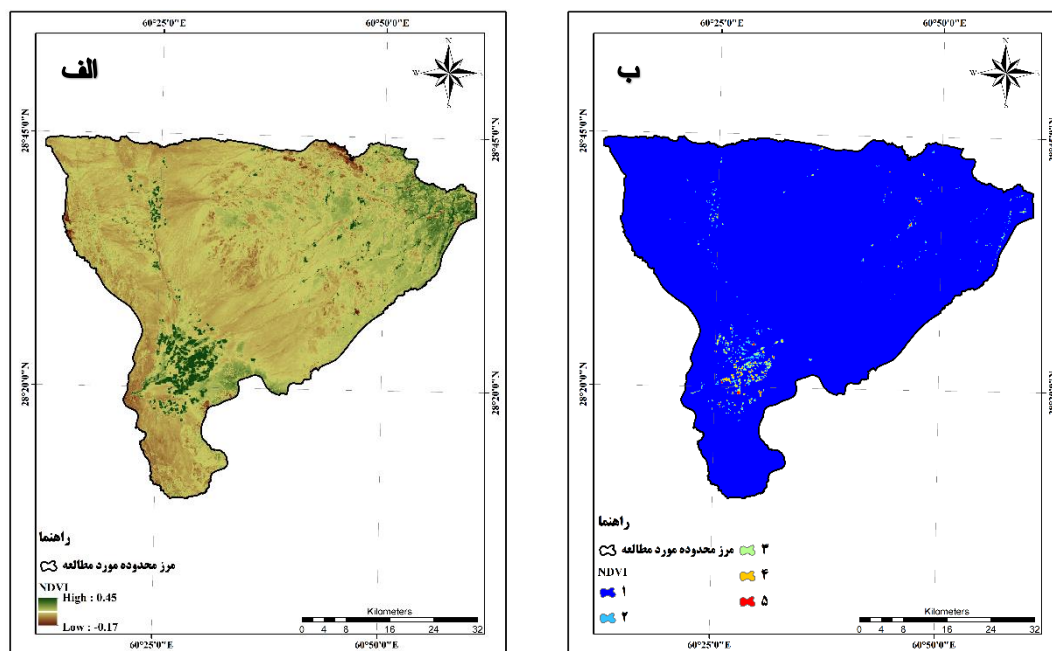
۱۲۰۷ تا ۳۰۹۸ متر متغیر است. ارتفاع متوسط حوضه مورد مطالعه، ۱۳۵۰ متر است. به این معنی که گستره زیادی از منطقه مورد مطالعه دارای ارتفاع کمتر از ۱۴۰۰ متر بوده و بخش غربی منطقه مورد مطالعه را شامل می‌گردد. ارتفاعات زیاد به صورت محدود در بخش شرقی متمرکز شده که محل شکل‌گیری شبکه آبراه‌های درختی‌شکل در حوضه آبریز دشت گوهرکوه می‌باشد (شکل ۴-۵ الف). از این رو، ارتفاع ناهمواری نیز به مانند گرادیان شیب، یک فاکتور بسیار مهم در پتانسیل آب زیرزمینی در مناطق خشک با توپوگرافی ناهموار تلقی می‌شود که به طور مستقیم و غیرمستقیم نقش شیب، بارش، شبکه زهکشی و جریان تجمعی را نیز بیان می‌کند. با ملاحظه واقعیت‌های محیطی حوضه آبریز دشت گوهرکوه، وزن نهایی اختصاص داده شده به لایه موضوعی گرادیان شیب، ۱۰ درصد بوده که از لحاظ جایگاه، پنجمین لایه موضوعی مهم در پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه به شمار می‌آید. از آن‌جا که گرادیان شیب با مقدار تجمعی آب سطحی و تراکم زهکشی ارتباط معکوس و با شیب ارتباط مستقیم دارد؛ بنابراین کلاس‌های کم ارتفاع دارای رتبه بالاتری می‌باشند. از این رو به کلاس‌های (۱۲۵-۱۲۰۰)، (۱۲۵۰-۱۳۰۰)، (۱۴۰۰-۱۳۰۰)، (۱۶۰۰-۱۴۰۰) و (>1600) به ترتیب رتبه‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف با دامنه اعداد ۵ تا ۱ تعلق گرفته است (شکل ۴-۵ ب).



شکل ۴-۵. توزیع فضایی ارتفاع (الف) و ارتفاع بازطبقه‌بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۴-۲-۶- شاخص پوشش گیاهی

پوشش گیاهی علاوه بر تأثیرگذاری بر نفوذ آب به داخل زمین و تغذیه سفره‌های زیرزمینی از فرسایش سطحی نیز جلوگیری نموده و جریان سطحی را کاهش و به تأخیر می‌اندازد. با این وجود، پوشش گیاهی متراکم، نقش بارزی در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی دارد. پوشش گیاهی بسته به نوع خود مانند درخت، درختچه، بوته و علفزار از شدت بارش کاسته و فرصت نفوذ بارش در خاک را افزایش می‌دهد. شاخص‌های بیانگر پوشش گیاهی از جمله NDVI، لندفرم زمین را بر اساس شدت پوشش گیاهی طبقه‌بندی می‌کند. شاخص پوشش گیاهی، پوشش گیاهی سبز را منعکس می‌کند. بنابراین، شاخص پوشش گیاهی، سطح آبیاری‌شده توسط آبخوان را تخمین می‌زند و محتوی رطوبتی خاک آبخوان تأثیر می‌گذارد. هدف شاخص پوشش گیاهی، نمایش و موجودی پیکسل‌ها (مناطق) با پوشش گیاهی سبز می‌باشد. مناطق پوشش گیاهی متراکم منعکس‌کننده شرایط بارندگی یا آبیاری زیاد و وجود پتانسیل بالای آبخوان است. علاوه بر آن، شاخص پوشش گیاهی به طور مستقیم قادر به شناسایی سیستم‌های گسل، شکستگی‌ها و درزهای سطح زمین برای ظهور آب زیرزمینی از طریق رشد پوشش گیاهی است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پوشش گیاهی طبیعی به دلیل کمبود بارش فقیر و تنک می‌باشد. پوشش‌های گیاهی سبز عمدتاً مربوط به فعالیت‌های کشاورزی و زراعت‌های آبی می‌باشد. مکان‌گزینی این پوشش‌های گیاهی عمدتاً به مناطق پست و زمین‌های هموار قابل کشت و کار محدود می‌شود. با ملاحظه واقعیت‌های محیطی حوضه آبریز دشت گوهرکوه، وزن نهایی اختصاص داده شده به لایه موضوعی پوشش گیاهی، ۵ درصد بوده است. دامنه شاخص پوشش گیاهی از ۰/۱۷- تا ۰/۴۵ در سطح منطقه مورد مطالعه متغیر است. ارزش‌های بالا و خیلی‌بالا از شاخص پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، واقع بر مناطق پست دشت در روی مخروط‌افکنه با غلبه بر زراعت و باغداری می‌باشد. از سوی دیگر در مناطق خشک و نیمه‌خشک، عمدتاً پوشش‌های گیاهی نیمه‌متراکم شامل درختچه‌ها و درختان بر مسیر آبراهه‌ها منطبق می‌باشند. معیشت ساکنان منطقه مورد مطالعه در مناطق مرتفع‌تر، عمدتاً باغداری با غلبه بر باغات میوه است. شاخص پوشش گیاهی در مناطق خشک به خوبی این الگوها را بیان می‌کند (شکل ۴-۶ الف). شاخص NDVI بر اساس تراکم پوشش گیاهی به پنج کلاس طبقه‌بندی شده که از پتانسیل بسیار ضعیف (دامنه شاخص بسیار کم) تا پتانسیل بسیار بالا (دامنه شاخص بالا) متغیر است. این کلاس‌ها با دامنه اعداد ۱ تا ۵ نشان داده شده‌اند (شکل ۴-۶ ب). غالب گستره منطقه مورد مطالعه دارای رتبه بسیار پایین است.

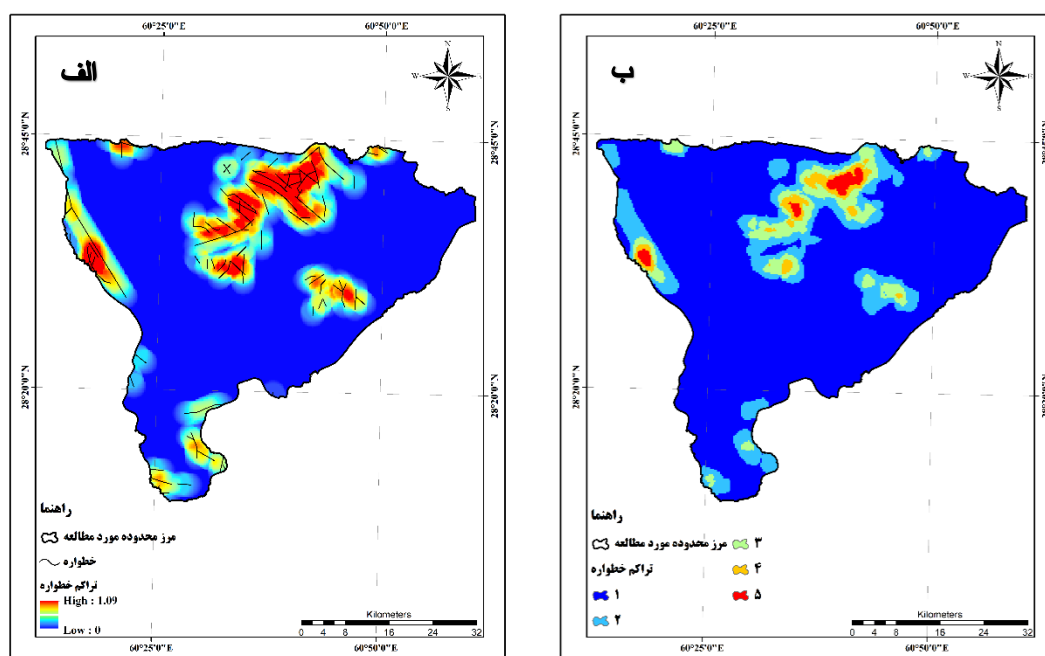


شکل ۴-۶. توزیع فضایی پوشش گیاهی (الف) و پوشش گیاهی بازطبقه‌بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۴-۲-۷- تراکم خطواره

تجزیه و تحلیل خطواره‌ها برای اکتشاف آب زیرزمینی اهمیت قابل توجهی دارد. خطواره‌ها بیانگر نشت آب از طریق گسل‌ها، درز و ترک‌ها، شکاف‌ها و شکستگی‌های باز بوده و به عنوان مجرای حرکت آب زیرزمینی عمل می‌نمایند و ظرفیت نگهداری آب را دارند. شکستگی در سنگ‌ها باعث افزایش نفوذپذیری و تخلخل ثانویه آنها می‌شود و در نتیجه نفوذ عمودی آب را برای شارژ مجدد سفره‌ها تسریع می‌کند. به همین دلیل شناسایی شکستگی‌ها در سنگ‌ها به عنوان یک مورد فاکتور اصلی در شناسایی مناطق بالقوه آب زیرزمینی لحاظ می‌گردد. بخش میانی منطقه مورد مطالعه عمدتاً با رخنمون‌های سنگی سخت مشخص است که علاوه بر هوازدگی، باز درز و ترک، شکستگی‌ها و سیستم‌های گسلی مشخص می‌گردد. مناطق غربی منطقه مورد مطالعه نیز با امتداد گسل نصرت‌آباد تطبیق دارد. تراکم خطواره‌ها نشان‌دهنده تغذیه آبخوان بوده و با تعداد بیشتر، عرض و طول بزرگتر آنها مرتبط هستند. تراکم بالا از طول خطواره‌ها نشان‌دهنده تخلخل ثانویه بوده و بنابراین منطقه با پتانسیل بالای آب زیرزمینی را نشان می‌دهند. از آنجا که بخش زیادی از منطقه مورد مطالعه را مناطق دشتی و هموار با سازند آبرفت‌های عهد حاضر پوشش می‌دهد؛ تراکم بالا از خطواره به صورت محدود در بخش‌های مرکزی و پیرامون منطقه مورد مطالعه نمود

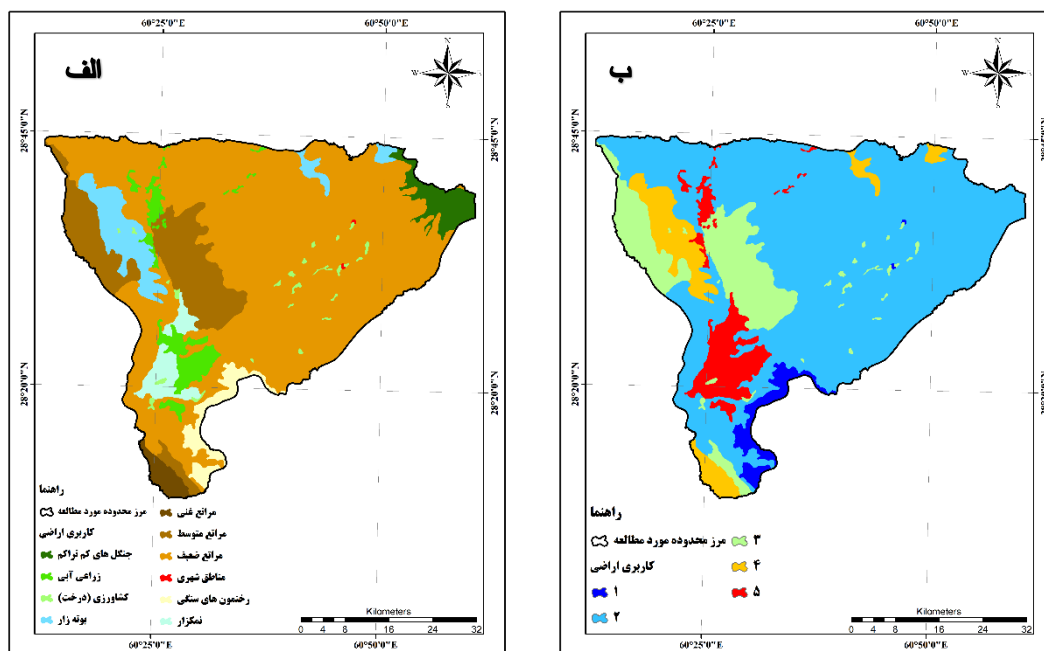
دارد. در این مناطق، خطواره‌ها نشان‌دهنده مناطق گسلی و شکستگی‌ها هستند که منجر به افزایش تخلخل و نفوذپذیری ثانویه می‌گردند (شکل ۴-۷الف). وزن اختصاصی به لایه موضوعی تراکم خطواره‌ها در پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، ۳ درصد می‌باشد. تراکم خطواره بالا تا بسیار بالا برای تغذیه آبخوان، نشت و پتانسیل آن عالی است. دامنه تراکم خطواره‌ها از صفر تا $1/09$ کیلومتر بر کیلومتر مربع در منطقه مورد مطالعه متغیر است. نقشه بازطبقه‌بندی شده تراکم خطواره‌ها به پنج کلاس تقسیم گردیده است که از پتانسیل بالا (چگالی خطواره بسیار بالا) تا پتانسیل بسیار کم (چگالی خطواره بسیار کم) با دامنه رتبه‌های ۵ تا ۱ مشخص می‌گردد (شکل ۴-۷ب). بنابراین کلاس‌های تراکم زیاد دارای رتبه بالاتری می‌باشند. از این رو به کلاس‌های $(0/8-0/6)$ ، $(0/4-0/2)$ و $(0/2-0/4)$ ، به ترتیب رتبه‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف با دامنه اعداد ۵ تا ۱ تعلق گرفته است. رتبه‌ها برای تراکم خطواره‌ها، بر اساس مجاورت از خطواره‌ها لحاظ شده‌اند. به این مفهوم کخ با افزایش فاصله از خطواره‌ها، شدت پتانسیل آب زیرزمینی کاهش یابد.



شکل ۴-۷. توزیع فضایی تراکم خطواره (الف) و تراکم خطواره بازطبقه‌بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۴-۲-۸- کاربری زمین / پوشش زمین

پوشش سطح زمین بر تغذیه آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. کاربری زمین و پوشش زمین از عوامل تأثیرگذار مهم بر تغذیه آب‌های زیرزمینی هستند. به گونه‌ای که یکی از مشارکت‌کننده‌های مهم و اصلی که در حجم تغذیه آب زیرزمینی اثر می‌گذارد مربوط به تغییرات در بهره‌برداری از زمین است. الگوهای پوشش زمین / کاربری زمین، اطلاعاتی را در مورد نفوذ و رواناب ارائه می‌کنند که توسط ماهیت مواد سطحی کنترل می‌گردد. الگوهای کاربری اراضی / پوشش زمین مانند زمین‌های کشت‌شده و بایر، بوته‌زار و مرتع غنی، مراتع متوسط و درختان پراکنده، مراتع ضعیف، سکونت‌گاه‌ها و رخنه‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. کشاورزی شغل اصلی ساکنان این منطقه است. در محدوده دشت، کاربری و پوشش اصلی زمین، عمدتاً زمین‌های زراعی و در محدوده بین دشت و تا کوه عمدتاً مراتع ضعیف با بوته‌زارها می‌باشد (شکل ۴-۸الف). در زمین‌های کشاورزی به دلیل عملیات شخم، نفوذ آب بیشتر است. بوته‌زارهای متراکم و مراتع غنی نیز به دلیل تراکم نسبی خوب پوشش گیاهی، پتانسیل بالایی از نفوذ آب دارند. وزن اختصاصی به لایه موضوعی کاربری زمین / پوشش زمین در پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، ۲ درصد می‌باشد. نقشه بازطبقه‌بندی شده کاربری زمین / پوشش زمین به پنج کلاس تقسیم گردیده است که از پتانسیل خیلی زیاد برای نفوذ آب تا پتانسیل بسیار کم با دامنه رتبه‌های ۵ تا ۱ مشخص می‌گردد (شکل ۴-۸ب).

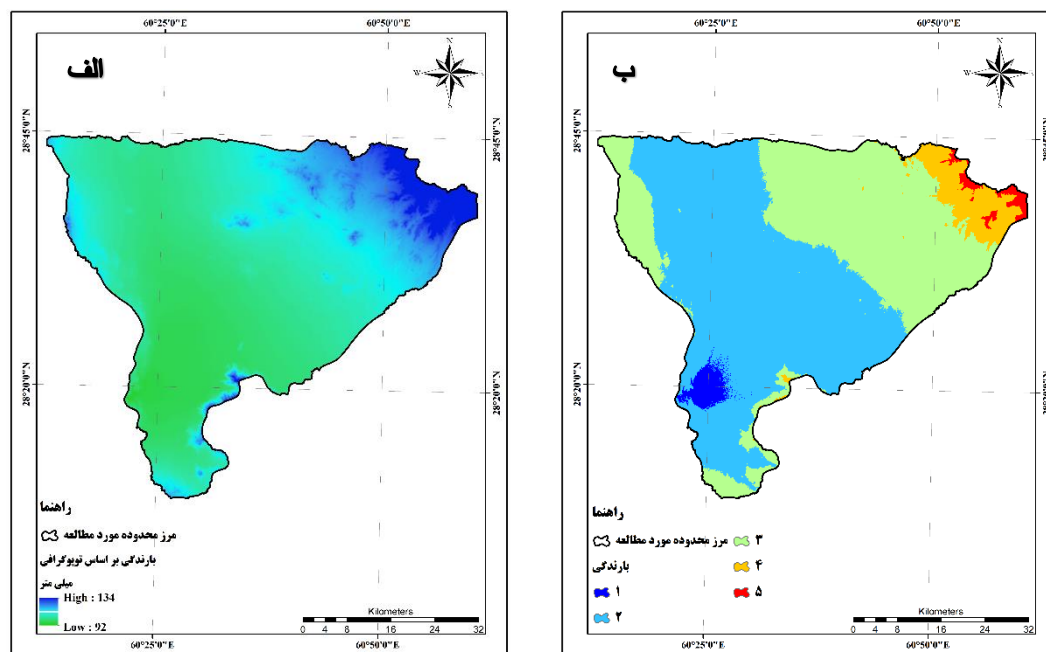


شکل ۴-۸. توزیع فضایی کاربری زمین / پوشش زمین (الف) و کاربری / پوشش زمین بازطبقه‌بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۴-۲-۹- بارش

مقدار بارش سالانه به عنوان فاکتور مثبت در تراز آب در یک حوضه آبریز شناخته می‌شود. با این وجود مقدار بارش سالانه در مناطق خشک بسیار اندک و تغییرات زمانی و مکانی بالایی دارد. از سوی دیگر، مقدار تبخیر سالانه در این مناطق بسیار فراتر از مقدار بارش سالانه بوده و مانع از شکل‌گیری جریان‌های جریان‌های سطحی دائمی می‌گردد. توزیع فضایی بارش در اغلب گستره سرزمینی ایران به شدت به ناهمواری‌ها وابسته است. حوضه آبریز دشت گوهرکوه نیز از این قاعده مستثنی نبوده و مقدار بارش بیشتر بر ناهمواری‌های مرتفع‌تر منطبق است. مقدار بارش سالانه از ۹۲ تا ۱۳۴ میلیمتر در سطح حوضه آبریز متغیر است. بارش‌های اندک در مناطق مسطح و دشتی و بارش‌های زیاده‌تر در مناطق مرتفع شامل دامنه‌های قله تفتان نمود دارد (۴-۹ الف). از این رو، مقدار بارش سالانه یک فاکتور تعیین‌کننده در پتانسیل آب زیرزمینی به ویژه در حوضه‌های آبریز خشک با توپوگرافی ناهموار نمی‌باشد. زیرا پتانسیل‌های بالای آب در مناطق مسطح دشتی مانند پلایا و مخروط‌افکنه‌ها واقع شده‌اند که اغلب دارای بارش اندک‌تر می‌باشد. از سوی دیگر، مقدار بارش سالانه بیشتر عمدتاً بر ارتفاعات متمرکز بوده که دارای شیب سرزمینی

زیاد می‌باشد و مانع از نفوذ به درون زمین می‌گردد. این شرایط منجر به جریان سطحی در آبراهه‌ها شده و به مناطق مسطح و هموار منتقل می‌گردد. بنابراین در وزن‌دهی به لایه بارش در پتانسیل آب زیرزمینی به در محیط‌های جغرافیایی خاص مانند سرزمین‌های خشک و ناهموار بایستی دقت لازم به عمل آید. با ملاحظه واقعیت‌های محیطی حوضه آبریز دشت گوهرکوه، وزن نهایی اختصاص داده شده به لایه موضوعی بارش سالانه تنها ۱ درصد بوده است. از آن‌جا که مقدار بارش سالانه با مقدار منابع آب زیرزمینی ارتباط مستقیم دارد؛ بنابراین کلاس‌های پربارش دارای رتبه بالاتری می‌باشند. از این رو به کلاس‌های ۱۲۰-۱۴۰، ۱۱۰-۱۲۰، ۱۰۰-۱۱۰، ۹۵-۱۰۰ و ۹۲-۹۵ میلیمتر به ترتیب رتبه‌های خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف با دامنه اعداد ۵ تا ۱ تعلق گرفته است (شکل ۴-۹ ب).



شکل ۴-۹. توزیع فضایی بارش (الف) و بارش بازطبقه‌بندی شده (ب) در منطقه مورد مطالعه

۳-۴- اختصاص وزن و رتبه به لایه‌های موضوعی

تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP) به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به طور گسترده برای تجزیه و تحلیل مشکلات تصمیم‌گیری فضایی در زمینه مدیریت منابع طبیعی، از جمله مسائل آب زیرزمینی استفاده می‌شود. از این رو، وزن لایه‌های مختلف از طریق تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP) ارزیابی شده است.

طبق روش‌شناسی، در اولین مرحله، یک ماتریس مقایسه زوجی (PCM) با استفاده از مقیاس ساعتی (۱ تا ۹) یا اهمیت نسبی (جدول ۳-۲) تهیه شده است. پس از مقایسه هر لایه بر اساس اهمیت نسبی آن‌ها، یک ماتریس مقایسه زوجی برای نه متغیر ساخته شده است (جدول ۴-۲). مرحله دوم، محاسبه وزن‌های نرمال شده می‌باشد. در این فرایند مجموع مقادیر هر ستون با استفاده از معادله (۴-۱) انجام شده است و در جدول (۴-۲) نیز نشان داده شده است.

$$L_{ij} = \sum_{n=1}^n C_{ij} \quad \text{رابطه (۴-۱)}$$

در این جا، L_{ij} مجموع مقادیر هرستون از ماتریس مقایسه زوجی و C_{ij} متغیر مورد استفاده برای تجزیه و تحلیل است.

جدول ۴-۲. ماتریس مقایسه زوجی از متغیرهای نه‌گانه برای روش تحلیل فرایند سلسله مراتبی

Variable	Lithology	Geology	DD	Slope	DEM	NDVI	LD.	LULC	Rainfall
Lithology	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
Geology	۰,۵۰۰	۱	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
DD*	۰,۳۳۳	۰,۳۳۳	۱	۲	۲	۶	۷	۸	۹
Slope	۰,۲۵۰	۰,۲۵۰	۰,۵۰۰	۱	۲	۵	۸	۷	۹
DEM	۰,۲۰۰	۰,۲۰۰	۰,۵۰۰	۰,۵۰۰	۱	۵	۵	۸	۹
NDVI	۰,۱۶۶	۰,۱۶۶	۰,۱۶۶	۰,۲۰۰	۰,۲۰۰	۱	۲	۵	۷
LD*	۰,۱۴۳	۰,۱۴۳	۰,۱۴۳	۰,۱۶۶	۰,۱۴۳	۰,۳۳۳	۱	۲	۳
LULC*	۰,۱۲۵	۰,۱۲۵	۰,۱۲۵	۰,۱۴۳	۰,۱۲۵	۰,۲۰۰	۰,۵۰۰	۱	۳
Rainfall	۰,۱۱۱	۰,۱۱۱	۰,۱۱۱	۰,۱۱۱	۰,۱۱۱	۰,۱۴۳	۰,۳۳۳	۰,۳۳۳	۱
SUM	۲,۸۲۸	۴,۳۲۸	۸,۵۴۵	۱۲,۱۲۱	۱۵,۵۷۸	۲۹,۶۷۶	۳۸,۸۳۳	۴۷,۳۳۳	۵۹

Note(s): LULC=Land Use and Land Cover, LD= Lineament Density, DD= Drainage Density

جدول ۴-۳. ماتریس مقایسه زوجی نرمال شده از متغیرهای نه‌گانه برای روش تحلیل فرایند سلسله مراتبی

Variable	Lithology	Geology	DD	Slope	DEM	NDVI	LD.	LULC	Rainfall	Total	Nwt
Lithology	۰,۳۵۴	۰,۴۶۲	۰,۳۵۱	۰,۳۳۰	۰,۳۲۱	۰,۲۰۲	۰,۱۸۰	۰,۱۶۹	۰,۱۵۳	۲,۵۲۲	۰,۲۸۷
Geology	۰,۱۷۷	۰,۲۳۱	۰,۳۵۱	۰,۳۳۰	۰,۳۲۱	۰,۲۰۲	۰,۱۸۰	۰,۱۶۹	۰,۱۵۳	۲,۱۱۴	۰,۲۴۹
DD*	۰,۱۱۸	۰,۰۷۷	۰,۱۱۷	۰,۱۶۵	۰,۱۲۸	۰,۲۰۲	۰,۱۸۰	۰,۱۶۹	۰,۱۵۳	۱,۳۰۹	۰,۱۴۶
Slope	۰,۰۸۸	۰,۰۵۸	۰,۰۵۹	۰,۰۸۳	۰,۱۲۸	۰,۱۶۸	۰,۱۵۵	۰,۱۴۸	۰,۱۵۳	۱,۰۳۹	۰,۱۱۴
DEM	۰,۰۷۱	۰,۰۴۶	۰,۰۵۹	۰,۰۴۱	۰,۰۶۴	۰,۱۶۸	۰,۱۸۰	۰,۱۶۹	۰,۱۵۳	۰,۹۵۱	۰,۱
NDVI	۰,۰۵۹	۰,۰۳۹	۰,۰۲۰	۰,۰۱۷	۰,۰۱۳	۰,۰۳۴	۰,۰۷۷	۰,۱۰۶	۰,۱۱۹	۰,۴۸۲	۰,۰۴۶
LD*	۰,۰۵۱	۰,۰۳۳	۰,۰۱۷	۰,۰۱۴	۰,۰۰۹	۰,۰۱۱	۰,۰۲۶	۰,۰۴۲	۰,۰۵۱	۰,۲۵۳	۰,۰۲۵
LULC*	۰,۰۴۴	۰,۰۲۹	۰,۰۱۵	۰,۰۱۲	۰,۰۰۸	۰,۰۰۷	۰,۰۱۳	۰,۰۲۱	۰,۰۵۱	۰,۱۹۹	۰,۰۱۹
Rainfall	۰,۰۳۹	۰,۰۲۶	۰,۰۱۳	۰,۰۰۹	۰,۰۰۷	۰,۰۰۵	۰,۰۰۹	۰,۰۰۷	۰,۰۱۷	۰,۱۳۲	۰,۰۱۳

Note(s): LULC=Land Use and Land Cover, LD= Lineament Density, DD= Drainage Density

متعاقباً، تمام ارزش‌های هر ستون بر مجموع هر ستون تقسیم شده‌اند تا ماتریس نرمال‌شده مقایسه زوجی ایجاد گردد. وزن نرمال‌شده (Nwt) هر متغیر با میانگین‌گیری تمام مقادیر برای هر ردیف از ماتریس نرمال‌شده مقایسه زوجی به دست آمده است (جدول ۴-۳). مجموع وزن‌های نرمال‌شده همیشه یک است.

در طول کاربرد روش تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP)، سطح معنی از ناسازگاری ممکن است ایجاد گردد؛ زیرا از طریق قضاوت‌های ذهنی یا شخصی انجام می‌گردد. برای ارزیابی دقت، نرخ سازگاری (CR) محاسبه شده است. برای این منظور، ابتدا هر ستون از ماتریس مقایسه زوجی در وزن متغیر مربوط به آن ضرب شده است. سپس، از طریق مجموع ردیف‌ها، مقدار مجموع وزنی به دست آمده است. پس از آن، تقسیمی بین مقدار مجموع وزنی و وزن هر متغیر انجام و مقدار (λ) به دست آمده است. بیشینه مقدار ویژه (λ_{max}) از طریق رابطه (۳-۸) محاسبه شده که مقدار آن برابر ۱۰/۱ می‌باشد. پس از آن، مقدار شاخص سازگاری (CI) با استفاده از معادله (۳-۹) به دست آمده که مقدار آن برابر ۰/۱۳ می‌باشد. در نهایت، نسبت سازگاری (CR)، با استفاده از رابطه (۳-۱۰) و با تقسیم شاخص سازگاری بر شاخص سازگاری تصادفی (RI) به دست آمده است. با ملاحظه تعداد ۹ متغیر و با توجه به جدول (۳-۳) مقدار شاخص نسبت یا همان شاخص سازگاری تصادفی برابر ۱/۴۵ است. بنابراین نسبت سازگاری در این مورد برابر ۰/۰۹۴ به دست آمده است. اگر مقدار نسبت سازگاری مساوی یا کوچکتر از ۰/۱۰ باشد، ناسازگاری قابل قبول است. از سوی دیگر، اگر نسبت سازگاری مساوی یا بزرگتر از ۰/۱۰ باشد، قضاوت‌ها بایستی تجدیدنظر گردد. در غیر این صورت، تحلیل فرایند سلسله مراتبی ممکن است نتایج معیوب دهد.

۴-۴- ادغام لایه‌های موضوعی و تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی

بعد از ارزیابی وزن‌ها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، برای استانداردسازی هر لایه موضوعی رستری، مقادیر رتبه‌بندی از ۱ تا ۵ (به ترتیب خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) برای هر کلاس لایه‌های موضوعی اختصاص داده شده و با معیار میانگین هندسی، نرمال گردید. مقادیر رتبه‌بندی بیانگر مناسب بودن کلاس‌ها برای پتانسیل آب زیرزمینی است. برای متغیر زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، رتبه تخصیص داده شده طبق نظر سایر نویسندگان و همچنین ویژگی‌های هیدرولیکی واحدهای زمین‌شناسی انجام گرفته است. وزن نرمال‌شده برای هر لایه موضوعی و رتبه نرمال‌شده برای هر کلاس در جدول (۴-۴) ارائه شده است.

جدول ۴-۴. وزن ها و رتبه های (نرمال شده) اختصاص داده شده به لایه های موضوعی

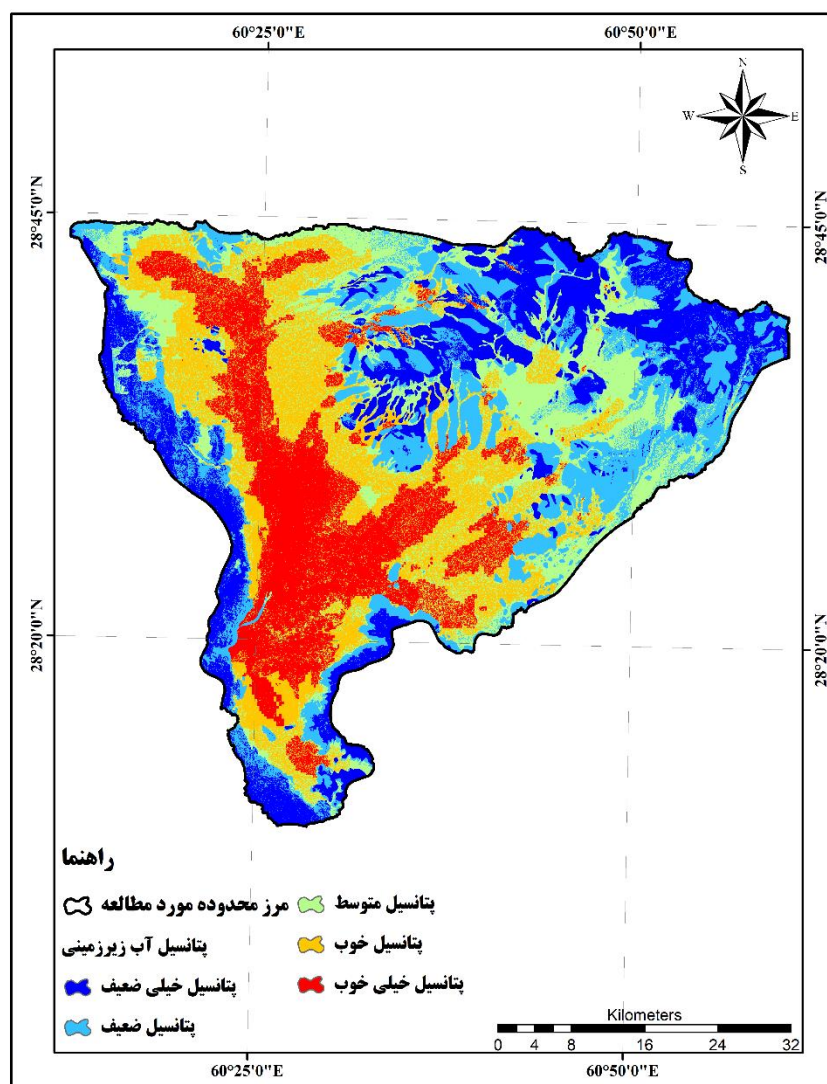
Theme	Normalized Layer Weight	Class	Class Rank	Normalized Class Rank
Lithology	۰,۲۹	Q	۵	۰,۳۳
		PIQ, Qbl, Qa ^۲	۴	۰,۲۷
		Msc, Efls	۳	۰,۲۰
		Es/sh, Qan	۲	۰,۱۳
		Db, gb, gd, Jk, Ple, Pm, Cm, Efv	۱	۰,۰۷
Geology (AGE)	۰,۲۵	Quaternary, Pliocene	۵	۰,۳۳
		Miocene	۴	۰,۲۷
		Eocene	۳	۰,۲۰
		Paleocene	۲	۰,۱۳
		Cretaceous, Oligocene, Permian	۱	۰,۰۷
Drainage Density (km/km ^۲)	۰,۱۵	۰-۲	۵	۰,۳۳
		۲-۴	۴	۰,۲۷
		۴-۶	۳	۰,۲۰
		۶-۸	۲	۰,۱۳
		۸-۱۰	۱	۰,۰۷
Slope Gradient (degree)	۰,۱۱	۰-۳	۵	۰,۳۳
		۳-۵	۴	۰,۲۷
		۵-۸	۳	۰,۲۰
		۸-۱۰	۲	۰,۱۳
		>۱۰	۱	۰,۰۷
DEM (m)	۰,۱۰	۱۲۰۰-۱۲۵۰	۵	۰,۳۳
		۱۲۵۰-۱۳۰۰	۴	۰,۲۷
		۱۳۰۰-۱۴۰۰	۳	۰,۲۰
		۱۴۰۰-۱۶۰۰	۲	۰,۱۳
		>۱۶۰۰	۱	۰,۰۷
NDVI	۰,۰۵	-۰,۱۷-۰,۱۴	۱	۰,۰۷
		۰,۱۴-۰,۱۸	۲	۰,۱۳
		۰,۱۸-۰,۲۷	۳	۰,۲۰
		۰,۲۷-۰,۳۶	۴	۰,۲۷
		۰,۳۶-۰,۴۵	۵	۰,۳۳
Lineament Density (km/km ^۲)	۰,۰۳	۰-۰,۲	۱	۰,۰۷
		۰,۲-۰,۴	۲	۰,۱۳
		۰,۴-۰,۶	۳	۰,۲۰
		۰,۶-۰,۸	۴	۰,۲۷
		۰,۸-۱,۲	۵	۰,۳۳
LU/LC	۰,۰۲	Cultivated land, Fallow land	۵	۰,۳۳
		Bushland, Rich pastures	۴	۰,۲۷
		Moderate pastures, Tree	۳	۰,۲۰
		Poor pasture, Low density forest	۲	۰,۱۳
		Settlement, Outcrop	۱	۰,۰۷
Annual Rainfall (mm)	۰,۰۱	۹۲-۹۵	۱	۰,۰۷
		۹۵-۱۰۰	۲	۰,۱۳
		۱۰۰-۱۱۰	۳	۰,۲۰
		۱۱۰-۱۲۰	۴	۰,۲۷
		۱۲۰-۱۴۰	۵	۰,۳۳

نقشه تحلیل همپوشانی یک ابزار تصمیم گیری برای درک چندمعیاره مسائل پیچیده تلقی می شود. برای تهیه نقشه مناطق پتانسیل آب زیرزمینی از اهمیت نسبی لایه های موضوعی مختلف و طبقات مربوط به آن ها استفاده شده است. رتبه و وزن لایه های موضوعی جداگانه برای رسیدن به نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در جدول (۴-۴) آورده شده است. نقشه منطقه بندی پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شده با این روش در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است.

در این فرایند، تمام نقشه‌های موضوعی با رتبه‌بندی وزنی تخصیص داده شده به آن‌ها به فرمت رستری تبدیل شده و با تجزیه و تحلیل همپوشانی وزنی تولید شده‌اند. هر عامل بالقوه تغذیه و پتانسیل آب زیرزمینی می‌تواند به درجه متفاوتی در فرایند تغذیه آب زیرزمینی کمک کند. تعیین رتبه با حجم فاکتورهای پتانسیل آب زیرزمینی مرتبط است. نه عامل تأثیرگذار در یک دامنه ترسیم شده‌اند، از خیلی کم تا خیلی زیاد که در آن رتبه خیلی زیاد و خیلی کم به ترتیب ۵ و ۱ می‌باشد. در نهایت همه عوامل تأثیرگذار برای به‌دست آوردن نقشه پتانسیل آب زیرزمینی ادغام شده‌اند. ارتباط بین دو فاکتور (عامل) با نرخ ۲ در نظر گرفته شده است، در حالی که به یک ارتباط جزئی نرخ ۱ اختصاص داده شده است. سنگ‌شناسی با هر هشت عامل تأثیرگذار (زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، شیب، مدل رقومی ارتفاع، پوشش گیاهی، تراکم خطواره، کاربری زمین/ پوشش زمین و بارش سالانه) ارتباط عمده‌ای داشته است، بنابراین، رتبه ارزیابی شده برای آن بالاترین مقدار بوده است. فرایند تعیین رتبه برای هر عامل در جدول (۴-۲) نشان داده شده است. مقادیر وزن اختصاص داده شده برای عامل سنگ‌شناسی بالاترین بوده است؛ زیرا مستقیماً با سایر عوامل و فاکتورهای خاک در ارتباط است.

یک ناحیه پلی‌گونی برای ارزیابی رتبه هر عامل جداگانه در پتانسیل آب زیرزمینی، بر اساس نه ویژگی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. وزن و رتبه هر عامل در جدول (۴-۲) نشان داده شده است. در این فرایند تحلیل همپوشانی، آن‌ها وزن هر لایه در رتبه‌های آن ضرب و بل سایر لایه‌ها ادغام می‌شود. شاخص پتانسیل آب زیرزمینی (GWPI) از طریق رابطه (۳-۱۱) محاسبه شده است. مناطق پتانسیل آب زیرزمینی به پنج کلاس براساس تجزیه و تحلیل عوامل نه‌گانه مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی تقسیم شده‌اند (شکل ۴-۱۰). این کلاس‌ها شامل پتانسیل خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف می‌باشند. منطقه با پتانسیل خیلی خوب به دلیل توزیع سنگ‌شناسی، زمین‌شناسی، تراکم زهکشی و شیب با قابلیت نفوذ بالا در مناطق دشتی، مسطح و کم شیب حوضه مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مناطق، تراکم زهکشی پایین، منجر به نفوذ جریان سطحی به سفره آب زیرزمینی می‌گردد. همچنین سنگ‌شناسی و شیب شرایط نفوذ را تسهیل می‌کند. این منطقه در حدود ۲۰ درصد از کل گستره حوضه مورد مطالعه را شامل می‌شود. مناطق شرقی حوضه مورد مطالعه به دلیل تراکم زهکشی بالا در نتیجه عامل ارتفاع و شیب زیاد و لیتولوژی غالب نفوذناپذیر دارای پتانسیل آب زیرزمینی خیلی ضعیف می‌باشد. نوار پیرامونی غربی منطقه مورد مطالعه نیز به دلیل لیتولوژی غلب آمیزه‌های رنگین دارای نفوذپذیر پایین و پتانسیل

آب زیرزمینی خیلی ضعیف برآورد شده است. مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی خیلی خوب (۱۹/۹۸٪)، و خوب (۲۰/۴۵٪) دارای واحدهای زمین‌شناسی نهشته‌های آبرفتی عهدحاضر و گنگلومرا هستند. در این مناطق، واحدهای ژئومورفولوژیکی شامل دشت آبرفتی و دشت مخروط افکنه‌ای به همراه سایر فاکتورهای تأثیرگذار از جمله تراکم زهکشی پایین، شیب و ارتفاع کم، تراکم پوشش گیاهی، کاربری اراضی کشاورزی در شرایط ایده‌آل برای نفوذ آب به زیرزمین و توسعه و تقویت منابع آب زیرزمینی می‌باشد. طور کلی، منطقه مورد مطالعه به پتانسیل خیلی خوب، خوب و متوسط برای آب‌های زیرزمینی مشخص می‌گردد که انتظار برای مدیریت مشترک آب شامل تأمین آب خانگی، نیاز آب محیطی، کشاورزی و صنعت است. تنوع پتانسیل آب زیرزمینی در سراسر حوضه مورد مطالعه در جدول (۴-۵) آورده شده است.



شکل ۴-۱۰. پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

جدول ۴-۵. مناطق پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

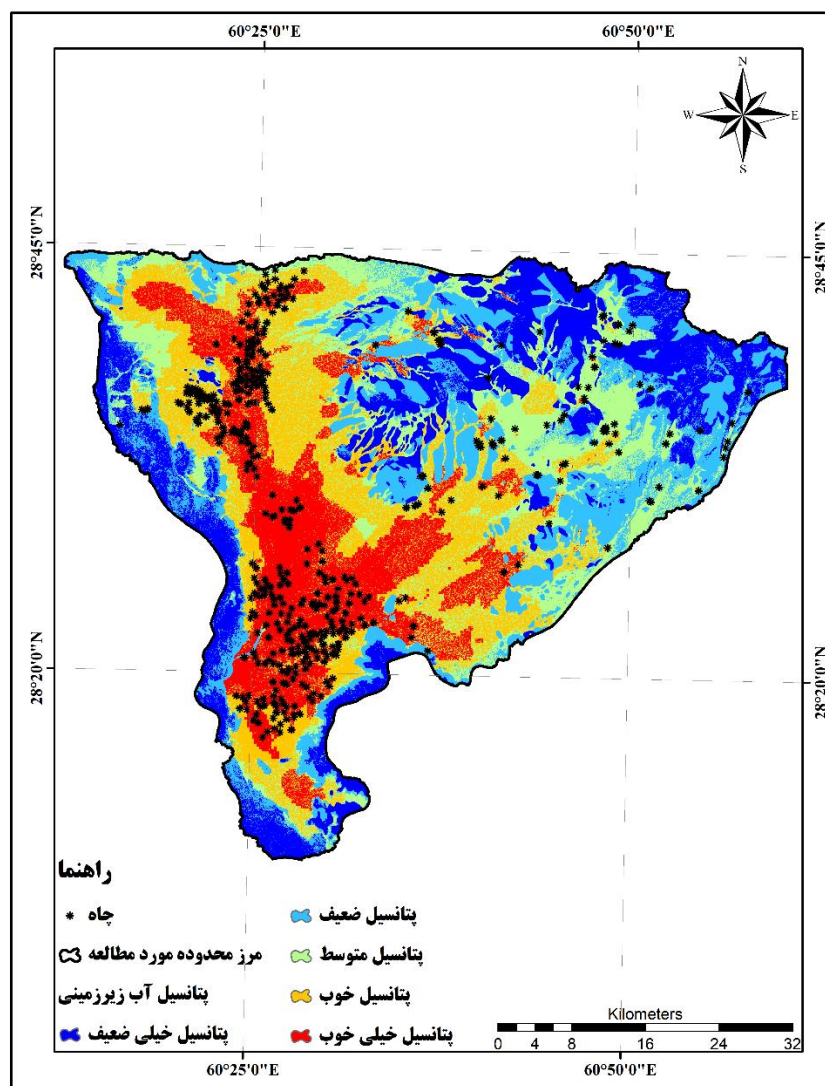
طبقات	مساحت (کیلومترمربع)	مساحت به درصد
خیلی خوب	۵۵۰	۱۹/۹۸
خوب	۵۶۳	۲۰/۴۵
متوسط	۵۵۶	۲۰/۱۹
ضعیف	۵۷۴	۲۰/۸۵
خیلی ضعیف	۵۱۰	۱۸/۵۳
کل	۲۷۵۳	۱۰۰

۴-۵- اعتبارسنجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی

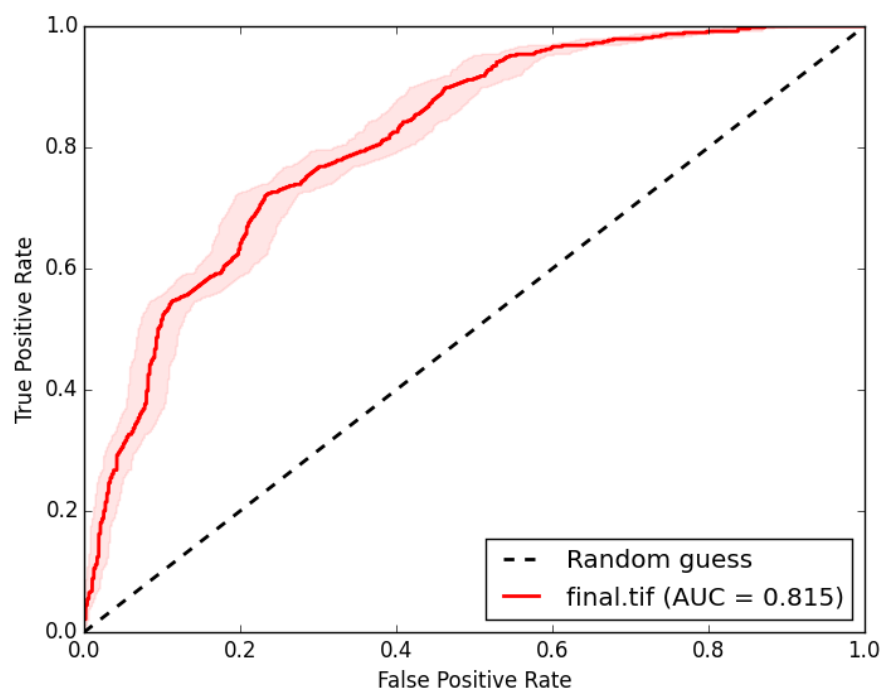
همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، استراتژی اعتبارسنجی دو مرحله‌ای برای ارزیابی عملکرد روش پتانسیل‌یابی مناطق آب زیرزمینی به کار گرفته شده است. در ارزیابی سطح اول، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از نقشه توزیع فضایی چاه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. زیرا وجود چاه‌ها، پایایی نتایج را تأیید می‌کند. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شده با موقعیت‌های چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه مقایسه شده است (شکل ۴-۱۱). نقشه توزیع فضایی چاه‌ها بر روی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی تولید شده قرار گرفته است. چنانچه مناطق بالقوه آب زیرزمینی خیلی خوب با تعداد بیشتر حلقه چاه‌ها با عملکرد (دبی) بیشتر مطابقت داشته باشد، نقشه تولید شده دارای سطح قابل قبول اطمینان می‌باشد؛ زیرا وجود چاه‌های بیشتر با عملکرد بالا نشانه واضحی از در دسترس بودن آب زیرزمینی در منطقه است. الگوی توزیع فضایی چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه با الگوی پتانسیل خیلی خوب و خوب در تطبیق است. از تعداد ۵۲۳ حلقه چاه موجود در منطقه مورد مطالعه، تعداد ۳۰۶ حلقه چاه در منطقه با پتانسیل خیلی خوب و تعداد ۱۱۱ حلقه چاه در منطقه با پتانسیل خوب حفر شده است. توزیع چاه‌ها از نظر عملکرد (دبی) نیز بررسی شده است. تعداد ۳۹۳ حلقه چاه با دبی مشخص در منطقه مورد مطالعه موجود بوده‌اند. کمینه، بیشینه و متوسط دبی در منطقه مورد مطالعه به ترتیب $0/3$ ، 53 و $13/8$ (لیتر بر ثانیه) بوده است. ۳۶ درصد این تعداد حلقه چاه دارای دبی بالاتر از متوسط و ۶۴ درصد دارای دبی پایین‌تر از متوسط بوده‌اند. چاه‌های با دبی بالاتر از متوسط عمدتاً در منطقه با پتانسیل خیلی خوب و چاه‌های با دبی پایین‌تر از متوسط در منطقه با پتانسیل خوب واقع شده‌اند.

در روش منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)، سطح زیرمنحنی (AUC) از $0/5$ تا 1 متغیر بوده و برای ارزیابی دقت مدل استفاده می‌شود. برای اعمال روش مزبور در منطقه مورد مطالعه، یک مجموعه داده مختصر و نماینده با استفاده از پیکسل‌های منتخب از مکان‌های چاه‌ها و تعداد پیکسل‌های بدون چاه به طور تصادفی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. قابلیت پیش‌بینی مناطق پتانسیل آب زیرزمینی با سطح زیر منحنی تعیین می‌گردد (شکل ۴-۱۱). مقدار مساحت زیرمنحنی برای روش‌شناسی مورد استفاده برابر با $0/815$ بوده است. نتایج اعتبارسنجی کمی با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)، تأیید می‌کند که توافق بسیار خوبی ($0/815$ یا $81/5\%$) بین داده‌های موجودی آب زیرزمینی و مناطق بالقوه آب زیرزمینی وجود دارد. این نتایج نشان می‌دهد که روش تجزیه و

تحلیل همپوشانی وزنی، برآوردگر بسیار خوبی از حساسیت چاه‌ها در منطقه مورد مطالعه است. بنابراین، نتایج نقشه‌های پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمده از تکنیک تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP) و تجزیه و تحلیل همپوشانی وزنی به عنوان یک پیش‌بینی بسیار خوب مورد توجه قرار گرفته است. این نشان می‌دهد که یافته‌های حاصل از مطالعه در مقایسه با عملکرد چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه مناسب است.



شکل ۴-۱۱. همپوشانی لایه موقعیت چاه‌ها با لایه پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه



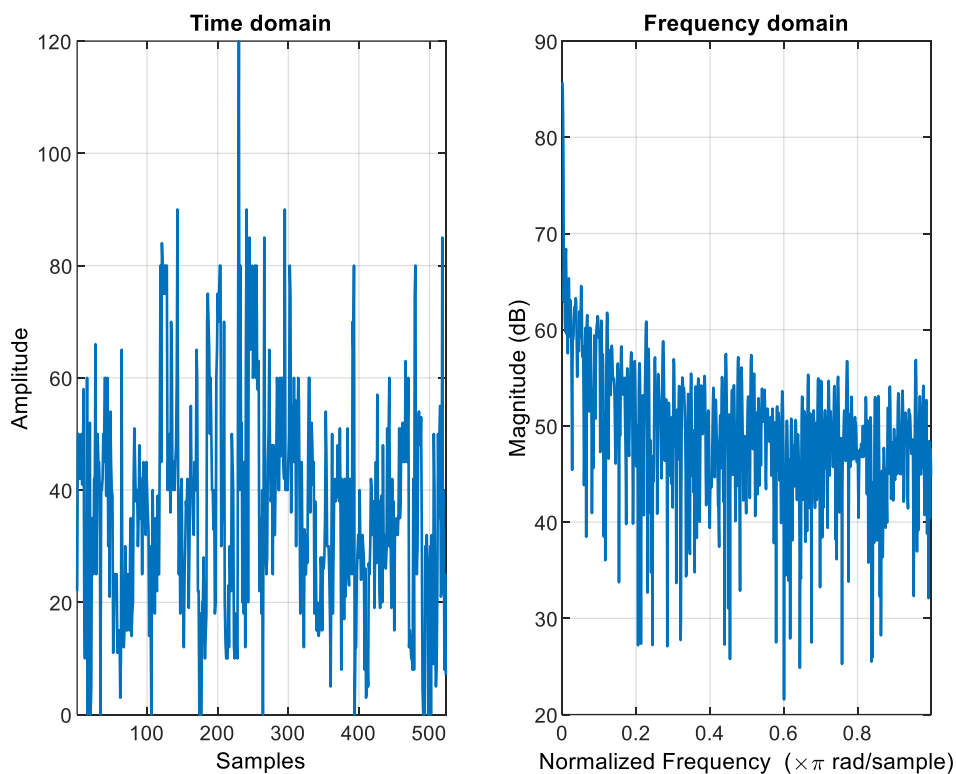
شکل ۴-۱۲. منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) برای اعتبارسنجی نتایج پهنه‌بندی پتانسیل آب‌یرزمینی

۶-۴- بررسی مقایسه‌ای وضعیت آبخوان

در حوضه آبریز دشت گوهرکوه بالغ بر ۵۲۳ حلقه چاه در سال ۱۳۸۸ آمار برداری شده است. میانگین و میانه عمق چاه‌های مزبور در سال ۱۳۸۸، به ترتیب برابر ۳۷ و ۳۶ متر بوده است. آمار دقیقی از تغییرات عمق چاه‌ها در سال ۱۳۹۷ ارائه نشده است؛ ولیکن تعداد چاه‌های مورد بهره‌برداری به ۴۳۱ حلقه چاه کاهش یافته است. بنابراین، بیش از ۱۷٪ درصد از چاه‌های موجود در سال ۱۳۸۸ عمده‌تاً دلیل کاهش آبدهی، از فرایند بهره‌برداری خارج شده‌اند. رقابت بی‌سابقه برای برداشت آب‌های زیرزمینی در سال ۱۳۸۸ از وضعیت تعداد کل چاه‌های حفر شده و همچنین تعداد چاه‌های متروکه مشهود است. این چاه‌ها عمده‌تاً در پهنه دارای پتانسیل خیلی خوب آب زیرزمینی حفر شده‌اند. مساحت این پهنه حدوداً ۵۵۰ کیلومترمربع و قریب به ۲۰٪ درصد از گستره حوضه آبریز دشت را شامل می‌گردد.

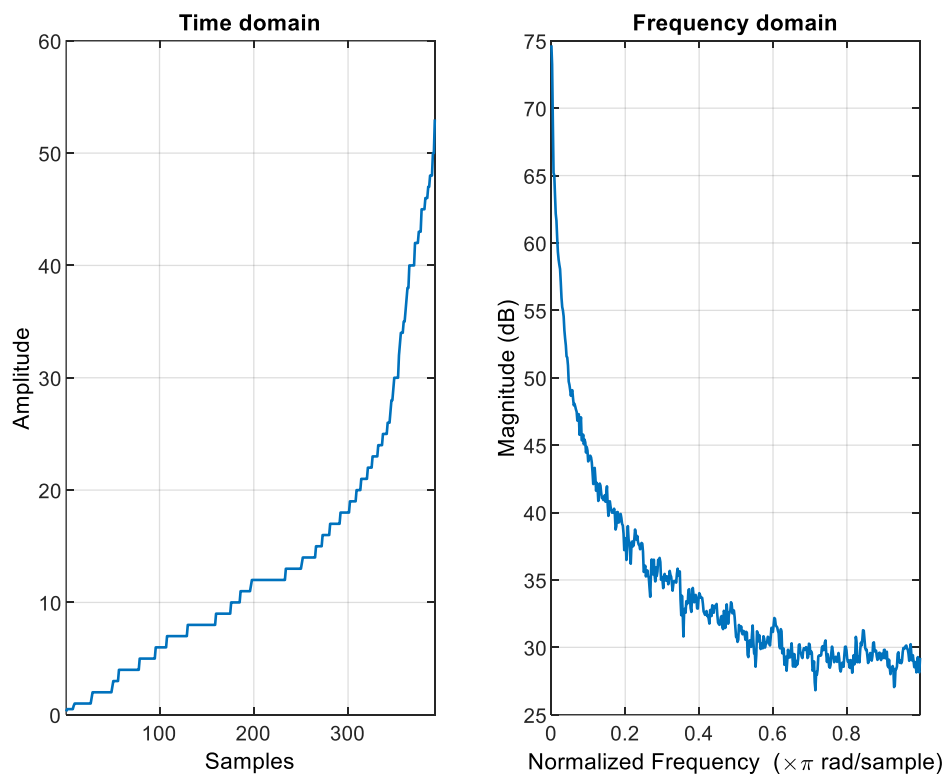
جدول ۶-۴- بررسی مقایسه‌ای وضعیت عمق چاه‌های مورد بهره‌برداری در حوضه آبریز مورد مطالعه

ردیف	دامنه عمق چاه (متر)	حلقه چاه در سال ۱۳۸۸
۱	متروکه	۱۵
۲	$0 < D \leq 10$	۲۷
۳	$10 < D \leq 15$	۳۵
۴	$15 < D \leq 20$	۳۳
۵	$20 < D \leq 25$	۴۹
۶	$25 < D \leq 30$	۵۵
۷	$30 < D \leq 35$	۴۲
۸	$35 < D \leq 40$	۶۸
۹	$40 < D \leq 45$	۵۹
۱۰	$45 < D \leq 50$	۳۶
۱۱	$50 < D \leq 55$	۲۳
۱۲	$55 < D \leq 60$	۲۶
۱۳	$60 < D \leq 70$	۲۱
۱۴	$70 < D \leq 80$	۲۶
۱۵	$80 < D$	۸
	تعداد کل چاه‌ها (حلقه)	۵۲۳



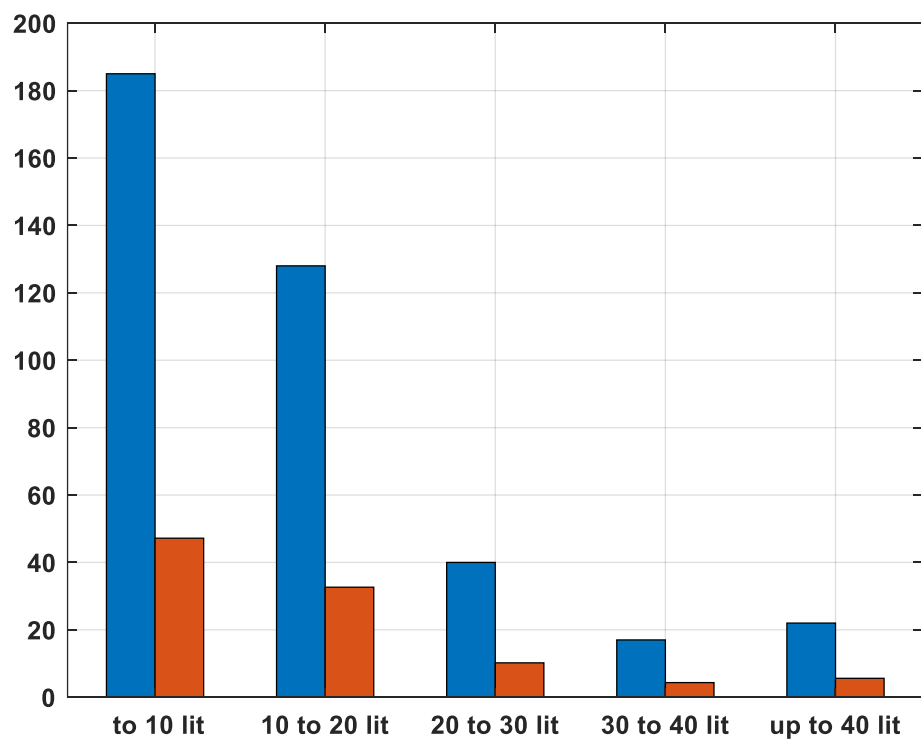
شکل ۴-۱۳. نمودار حوزه زمان و فرکانس از عمق چاه‌های فعال دشت گوهرکوه در سال ۱۳۸۸

در سال ۱۳۸۸، تنها دو حلقه چاه دارای تجهیزات پایش بهره‌برداری از آب (کنتور) بوده‌اند. چاه‌های دارای کنتور آب در سال ۱۳۹۷ نیز فقط ۳ حلقه چاه بوده‌اند. از تعداد ۵۲۳ حلقه چاه موجود در سال ۱۳۸۸، تنها ۳۹۲ چاه دارای دبی اندازه‌گیری شده می‌باشند. میانگین دبی اندازه‌گیری شده این چاه‌ها، ۱۳/۸ لیتر بر ثانیه بوده است. حداقل دبی ۰/۳ و حداکثر آن ۵۳ لیتر بر ثانیه بوده است. میانگین دبی چاه‌های موجود در سال ۱۳۹۷ برابر ۱۱/۷۸ لیتر بر ثانیه بوده است. در سال ۱۳۹۷ تعداد ۴۳۱ حلقه چاه فعال در دشت گوهرکوه با دبی اندازه‌گیری شده موجود هستند. دبی حداقل این چاه‌ها ۰/۲ لیتر بر ثانیه و حداکثر آن ۸۰ لیتر بر ثانیه بوده است. اطلاعات دقیقی از وضعیت تغییرات عمق چاه‌ها در سال ۱۳۹۷ وجود ندارد.

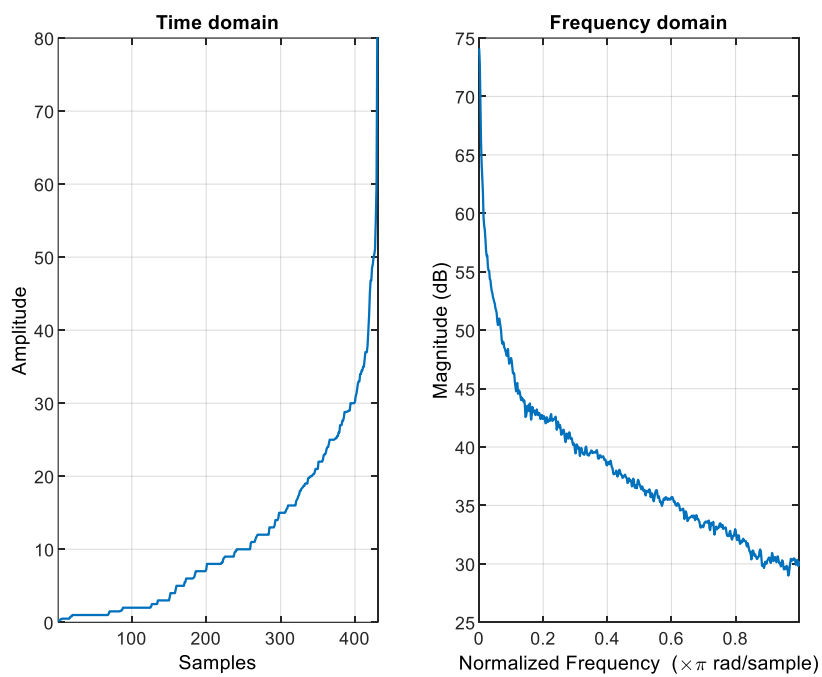


شکل ۴-۱۴. نمودار حوزه زمان و فرکانس از دبی چاه‌های فعال دشت گوهرکوه در سال ۱۳۸۸

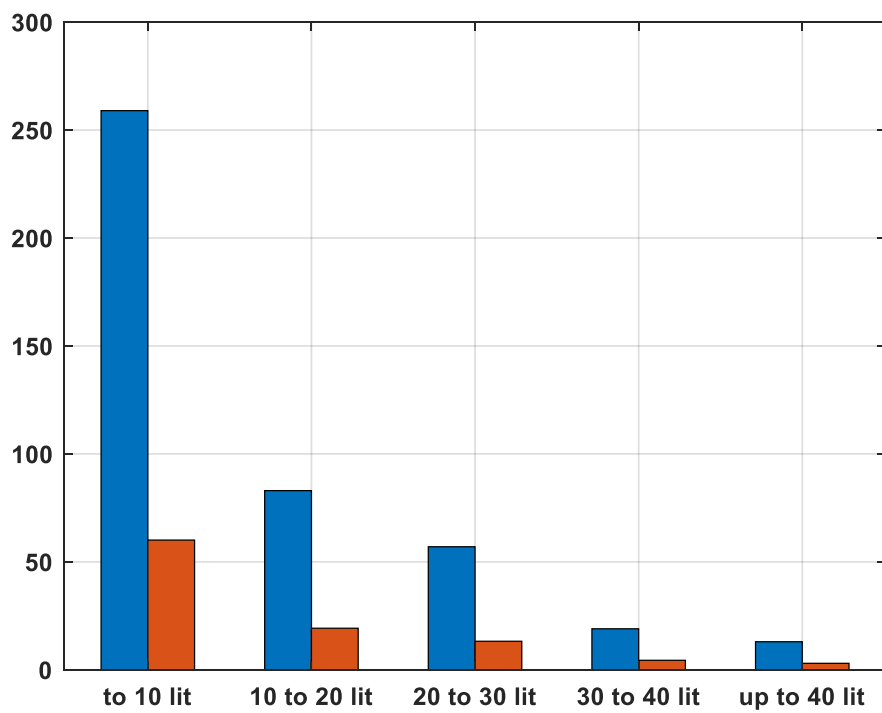
قریب به ۵۰٪ درصد از چاه‌های فعال در سال ۱۳۸۸ دارای دبی کمتر از ۱۰ لیتر بر ثانیه بوده‌اند. ۸۰٪ درصد چاه‌ها دارای دبی کمتر از ۲۰ لیتر، ۹۰٪ تعداد چاه‌ها دارای دبی کمتر از ۳۰ لیتر بر ثانیه بوده و تنها ۱۰٪ دارای دبی بزرگتر از ۳۰ لیتر بر ثانیه بوده که حداکثر به ۵۲ لیتر در ثانیه محدود می‌گردد. در سال ۱۳۹۷ درصد چاه‌های با دبی کمتر از ۱۰ لیتر بر ثانیه به ۶۰٪ درصد افزایش یافته است. سایر درصدها تغییر محسوسی نداشته است. این وضعیت بیانگر آفت سطح آب زیرزمینی بوده و سبب شده است تا دبی چاه‌های کم عمق به شدت کاهش یابد.



شکل ۴-۱۵. نمودار گروه‌های دبی (لیتر بر ثانیه) چاه‌های فعال دشت گوهرکوه در سال ۱۳۸۸

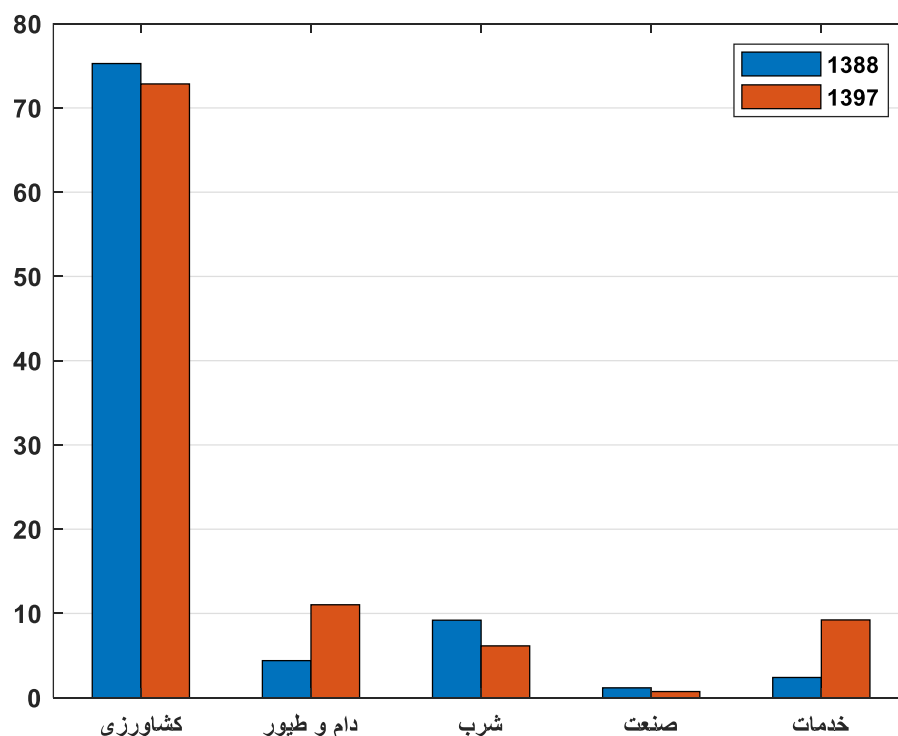


شکل ۴-۱۶. نمودار حوزه زمان و فرکانس از دبی چاه‌های فعال دشت گوهرکوه در سال ۱۳۹۷

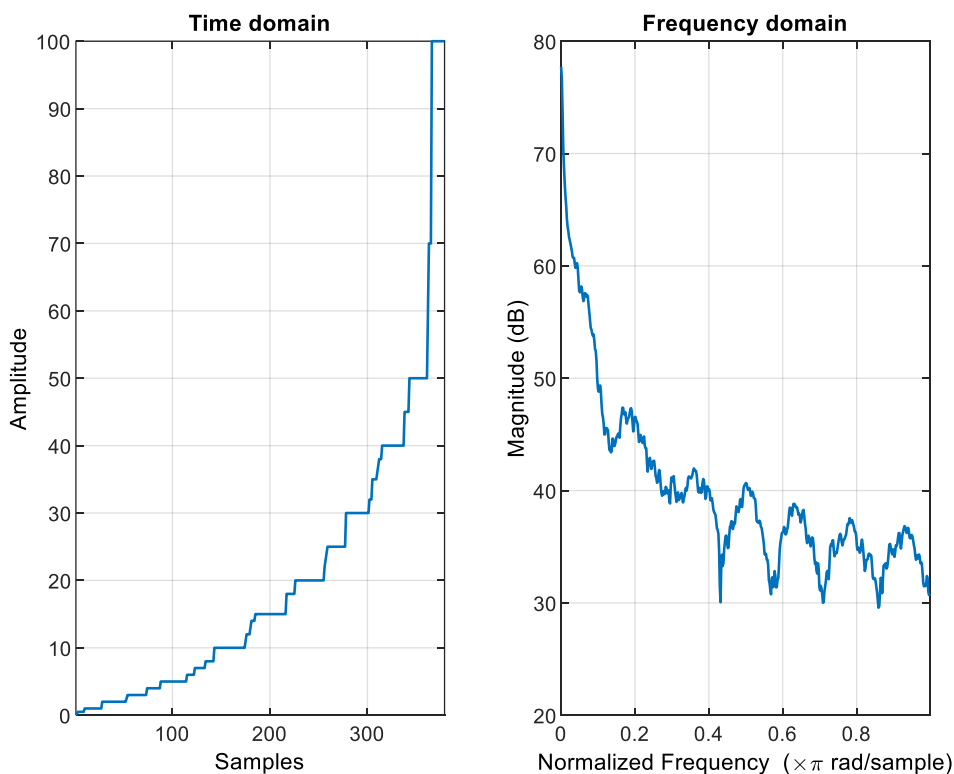


شکل ۴-۱۷. نمودار گروه‌های دبی (لیتر بر ثانیه) چاه‌های فعال دشت گوهرکوه در سال ۱۳۹۷

توزیع آب بین بخش‌های مصرف کننده آب در طی یک دهه گذشته نشان می‌دهد که همواره بخش کشاورزی بیشترین مصرف آب زیرزمینی را به خود اختصاص داده است. هرچند سهم آن در سال ۱۳۹۷ اندکی کاهش یافته است؛ ولیکن همواره بیش از ۷۰٪ درصد آب در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. در مجموع، میزان ۷۷۰۰ هکتار زمین کشاورزی توسط آب زیرزمینی استحصالی در دشت گوهرکوه در سال ۱۳۸۸ کشت و آبیاری شده است. میانگین سطح زیرکشت هر چاه حدود ۲۰ هکتار، بیشنیه و کمینه سطح زیرکشت به ترتیب ۱۰۰ و ۰/۱ هکتار بوده است. بیش از ۵۵٪ درصد از چاه‌های موجود در سال ۱۳۸۸ دارای سطح زیرکشت کمتر از ۱۰ هکتار بوده‌اند. ۲۰٪ دارای سطح زیرکشت ۱۰ تا ۲۰ هکتاری، ۱۰٪ دارای سطح زیرکشت ۲۰ تا ۳۰ هکتاری، و حدود ۱۵٪ دارای سطح زیرکشت بالغ از ۳۰ هکتار بوده‌اند. بنابراین عمده کشاورزان در این محدوده دشت، کشاورزان با سطح مزرعه خُرد می‌باشند. تعداد بسیار محدودی از چاه‌های آب زیرزمینی دارای سطح زیرکشت زیاد بوده‌اند که مجتمع‌های کشت و صنعت را شامل می‌گردد.



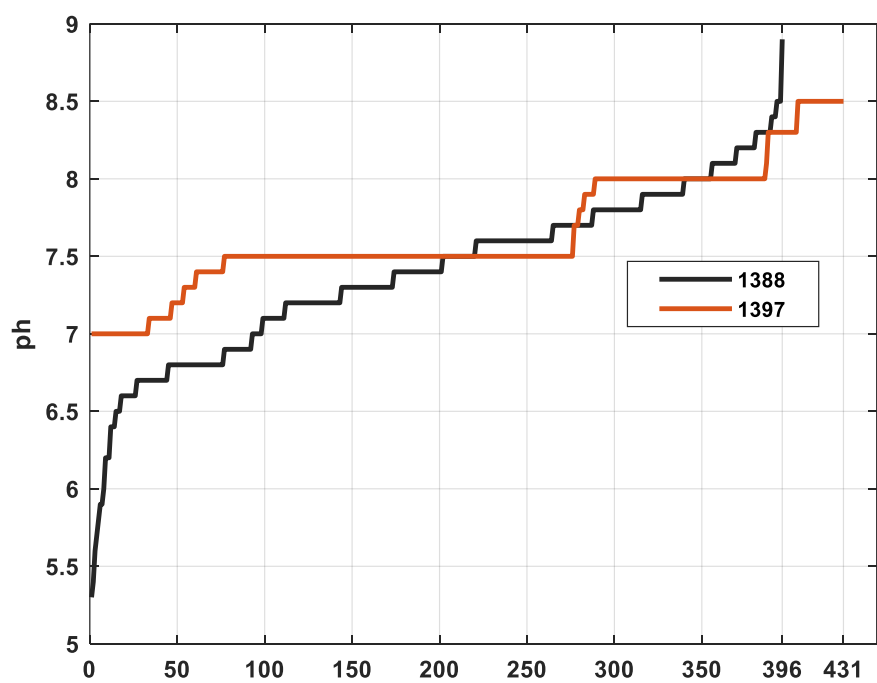
شکل ۴-۱۸. وضعیت مقایسه‌ای تخصیص آب زیرزمینی به بخش‌های مختلف



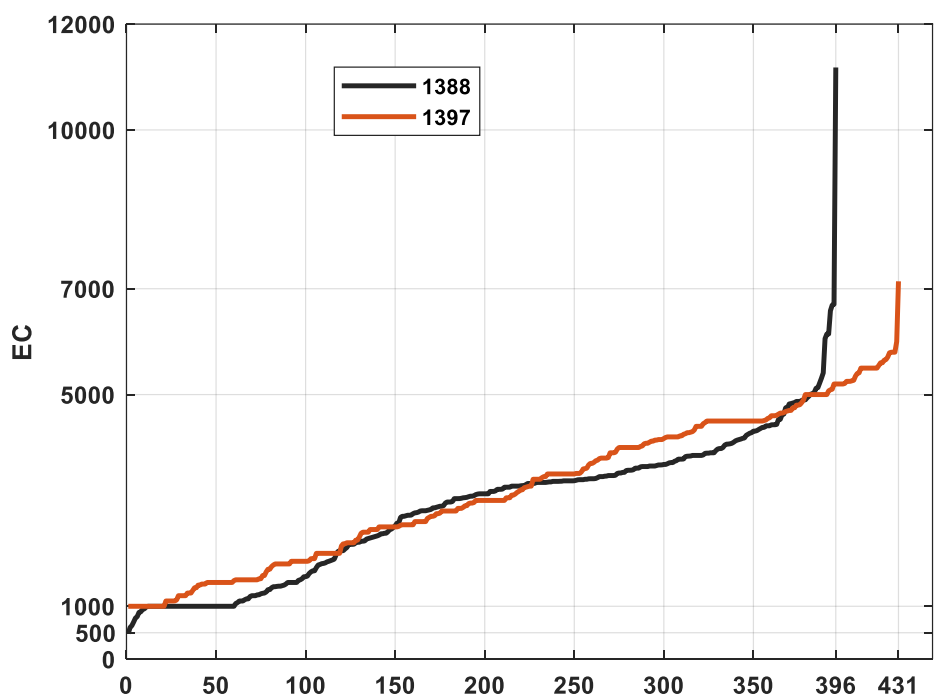
شکل ۴-۱۸. نمودار حوزه زمان و فرکانس از سطح زیرکشت چاه‌های دشت گوهرکوه به هکتار در سال ۱۳۸۸

سطح زیرکشت چاه‌های موجود در سال ۱۳۹۷ به ۱۶۲۷ هکتار کاهش یافته است. به عبارتی حدود ۸۰٪ از سطح زیرکشت کاهش یافته است. میانگین سطح زیرکشت هر حلقه چاه نیز از ۲۰ هکتار در سال ۱۳۸۸ به کمتر از ۴ هکتار در سال ۱۳۹۷ رسیده است. بیشینه سطح زیرکشت در سال ۱۳۹۷ به ۳۰ هکتار رسیده است. در حالی که این مقدار در سال ۱۳۸۸ برابر ۱۰۰ هکتار بوده است. این بیانگر کاهش وضعیت منابع آب زیرزمینی در نتیجه تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بوده است. بیشترین سطح زیرکشت به غلات اختصاص دارد که بالغ بر ۳۸۰ هکتار می‌باشد. غلات، علوفه و پسته کشت غالب در دشت گوهرکوه می‌باشند.

بررسی وضعیت کیفیت آب‌های زیرزمینی از لحاظ شاخص pH در دو سال ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ مقایسه شده است. در حالی که سال ۱۳۸۸ تعداد ۱۲۰ حلقه چاه دارای pH کمتر از ۷ بوده‌اند؛ در سال ۱۳۹۷ هیچ موردی از pH کمتر از ۷ وجود ندارد. شرایط بیانگر افزایش pH آب زیرزمینی در دشت گوهرکوه می‌باشد.



شکل ۴-۱۹. وضعیت مقایسه‌ای pH آب چاه‌های دشت گوهرکوه در سال ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷



شکل ۴-۲۰. وضعیت مقایسه‌ای EC آب چاه‌های دشت گوهرکوه در سال ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷

از لحاظ EC نیز کیفیت آب کاهش یافته است. در حالی که حداقل EC آب چاه‌های موجود در دشت گوهرکوه در سال ۱۳۸۸ برابر ۵۰۰ بوده است؛ این مقدار در سال ۱۳۹۷ به ۱۰۰۰ افزایش یافته است. دامنه EC در سال ۱۳۸۸ از حداقل ۴۸۶ تا حداکثر ۶۷۰۵ بوده است. تنها یک حلقه چاه با EC بسیار بالا در سال ۱۳۸۸ مشاهده شده است که مقدار EC آن برابر ۱۱۱۸۰ بوده است. در سال ۱۳۹۷ دامنه EC از حداقل ۱۰۰۰ تا حداکثر ۷۱۴۰ بوده است.

به طور کلی، وضعیت مقایسه‌ای شرایط آبخوان در دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۸۸ بیانگر شرایط بحرانی آبخوان بوده و کاهش کیفیت و کمیت آب، کاهش سطح زیرکشت، کاهش تعداد چاه‌های فعال و غیره بیانگر آن می‌باشد. بنابراین اقدامات مداخله‌ای در جهت جلوگیری از تشدید وضعیت آبخوان و بهبود آن ضروری می‌باشد. از جمله مهمترین و ضروری‌ترین اقدام مداخله‌ای، تغذیه طبیعی و مصنوعی آبخوان به همراه کنترل هوشمند تخلیه آب زیرزمینی و در قدم بعدی تغییر شیوه کشاورزی می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد بسترهای مناسب تغذیه طبیعی آبخوان شناسایی و مداخلات جهت افزایش نفوذپذیری آب سطحی انجام گیرد. از طرف دیگر احداث سدهای ذخیره‌ای در بالادست آبخوان می‌تواند در بهبود وضعیت آبخوان با افزایش نفوذپذیری و ذخیره آب مورد نیاز کشاورزی مؤثر باشد. شیوه‌های پایش تخلیه آب زیرزمینی توسط چاه‌ها بایستی هوشمند شود و میزان تخلیه آب به خوبی کنترل گردد. تغییر شیوه‌های کشاورزی سنتی، تغییر الگوی کشت، نوع کشت، بهبود شیوه‌های آبیاری، کنترل تبخیر و تعرق، افزایش زهکشی خاک و سایر اقدامات کشاورزی لازم است مطالعه و طرح‌های مناسب با توجه به وضعیت اقلیم، ویژگی‌های خاک و آب توصیه گردد.

فصل پنجم

نتیجه گیری

۵-۱- مقدمه

آب‌های زیرزمینی به عنوان یک منبع مهم برای تأمین نیازهای آبی بخش‌های مختلف از جمله مصرف‌کنندگان عمده آب مانند آبیاری، خانگی و صنایع مطرح شده است. توسعه پایدار منابع آب زیرزمینی نیازمند ارزیابی کمی دقیق بر اساس اصول علمی معتبر است. توسعه شدید آب‌های زیرزمینی در مناطق خاصی از کشور منجر به بهره‌برداری بیش از حد و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی شده است. میزان آب زیرزمینی موجود برای کشور، ۱۳۰ میلیارد متر مکعب برآورد شده است؛ اما در دو دهه گذشته منابع آب تجدیدشونده به کمتر از ۱۰۰ میلیارد مترمکعب کاهش یافته است. ایران در زمره پنج کشور با بالاترین سطح برداشت از منابع آب زیرزمینی قرار گرفته است. در نتیجه این وضعیت، مناطق متعددی از آن با بحران فرونشست مواجه شده است. تا قبل از دهه ۱۳۲۰ بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی توسط سامانه‌های بومی قنات صورت می‌گرفت. در حال حاضر قریب به ۵۰ هزار رشته قنات در کشور ثبت شده است. از سال ۱۳۵۰ به بعد با ورود تکنولوژی حفاری، تعداد چاه‌های ایران به شدت افزایش یافته است. به گونه‌ای که تعداد چاه‌های کشور از ۵۰ هزار حلقه در دهه ۱۳۵۰ به حدود یک میلیون حلقه در دهه ۱۴۰۰ رسیده است. نتایج نشان‌دهنده مصرف بالای آب‌های زیرزمینی در بخش کشاورزی است، بر این اساس حدود ۹۰ درصد از این منابع در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. در نهایت، طی سال‌های اخیر میزان متوسط افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی کشور حدود ۵۰ سانتی‌متر و بیلان منفی سالانه نزدیک به ۵ میلیون مترمکعب در سال بوده است. در این راستا و در شرایط فعلی، بیش از نیمی از مجموع ۶۰۹ محدوده دشت کشور، جز مناطق ممنوعه اعلام شده‌اند. چنانچه این شرایط ادامه یابد، نیاز آب در آینده به اندازه کافی برآورده نخواهد شد. برای کاهش اثرات بحران آب بر زندگی مردم، باید منابع آب را به نحو مطلوبی مدیریت کرد تا به توسعه پایدار دست یافت. در عین حال، بهبود وضعیت استفاده از آب‌های زیرزمینی مستلزم بهبود حکمرانی از طریق سیاست‌ها و قوانین، رویکردهای مدیریتی نوآورانه، افزایش استفاده از فناوری‌ها، بودجه اختصاصی برای شناخت بهتر منابع و افزایش همکاری‌های منطقه‌ای است.

۵-۲- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تکنیک‌های سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره با موفقیت برای ارزیابی پهنه‌های بالقوه آب زیرزمینی در دشت گوهرکوه در گوشه جنوب‌شرقی خشک‌ترین حوضه آبریز ایران

(کوپرلوت) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، یک روش چهار مرحله‌ای استفاده شده که شامل توسعه لایه‌های موضوعی، استخراج وزن‌ها با استفاده از تحلیل فرایند سلسله مراتبی، تحلیل همپوشانی برای یافتن منطقه پتانسیل آب زیرزمینی و اعتبارسنجی و تأیید نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های چاه‌های موجود در منطقه است. برای تهیه لایه‌های موضوعی از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنجش از دور و رقومی‌سازی نقشه‌های موجود با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شده است. تحلیل فرایند سلسله مراتبی برای اختصاص وزن‌های مفید به لایه‌های موضوعی استفاده شده است. تحلیل همپوشانی وزنی برای تلفیق نقشه‌های موضوعی مختلف با وزن‌های متفاوت برای ترسیم پهنه پتانسیل آب زیرزمینی استفاده شده است. پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نه معیار مؤثر شامل لیتولوژی، زمین‌شناسی، تراکم زهکشی، گرایان شیب، مدل رقومی ارتفاع، شاخص پوشش گیاهی، تراکم خطواره، کاربری زمین/پوشش زمین و مقدار بارش سالانه بررسی شده است. معیارها، ابتدا با استفاده از روش تحلیل فرایند سلسله مراتبی (AHP) ارزیابی گردیده و پس از اختصاص وزن، نرمال‌سازی و تعیین رتبه، با شاخص همپوشانی وزنی، همپوشانی گردیده‌اند. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی استخراج شده از طریق روش‌شناسی ذکر شده در بالا، به پنج کلاس پتانسیل خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف طبقه‌بندی شده است. در مجموع نتایج بیانگر عدم توسعه آبخوان غنی در ارتفاعات حوضه آبریز دشت گوهرکوه بوده است. علاوه بر این، منطقه پتانسیل خیلی خوب آب زیرزمینی کمتر از ۲۰ درصد منطقه مورد مطالعه را پوشش داده و توزیع فضایی آن متمرکز به مناطق پست با حداقل تراکم زهکشی و شیب به ویژه در میان نهشته‌های آبرفتی عهدحاضر بوده است. تمرکز فعالیت‌های کشاورزی و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با تراکم چاه‌های بهره‌برداری گویای این واقعیت است. منطقه با پتانسیل خوب و متوسط از توزیع فضایی غیرمتراکمی برخوردار بوده است. این مناطق عمدتاً در حاشیه مناطق با پتانسیل خیلی خوب و در دامنه‌های ارتفاعات قرار گرفته است. وجود سکونت‌گاه‌های پراکنده روستایی با اقتصاد باغداری در دامنه‌های بخش شرقی حوضه آبریز دشت گوهرکوه گویای آن است. سایر مناطق با غلبه گستره در شرق، مرکز و کرانه غربی حوضه آبریز به دلیل رخنمون‌های سنگی نفوذناپذیر، شیب و ارتفاع زیاد، پوشش گیاهی اندک و تراکم زهکشی بالا دارای پتانسیل ضعیف و خیلی ضعیف می‌باشند. نقشه پیش‌بینی شده پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های موقعیت و عملکرد چاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه ارزیابی و اعتبارسنجی گردیده است. توزیع فضایی چاه‌های بهره‌برداری از آب

زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، عمدتاً در محدوده با پتانسیل آب زیرزمینی خیلی خوب حفر شده‌اند. قریب به ۶۰ درصد چاه‌ها در منطقه با پتانسیل خیلی خوب، ۲۰ درصد در منطقه با پتانسیل خوب و مابقی در سایر پهنه‌های پتانسیل آب زیرزمینی حفر شده‌اند. در منطقه مورد مطالعه تعداد ۴۰ حلقه چاه با عمق بیش از ۵۰ متر و دبی بیش از ۲۰ لیتر بر ثانیه وجود دارد که در منطقه با پتانسیل آب زیرزمینی خیلی خوب حفر شده‌اند. از لحاظ سازند این چاه‌ها در آبرفت‌های عهد حاضر با جنس گراول - ماسه، شن - ماسه، شن - ماسه - کنگلومرا حفاری شده‌اند. این چاه‌ها عمدتاً برای مصرف کشاورزی با شیوه آبیاری غرقابی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. اعتبارسنجی کمی نقشه پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی با منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC)، نیز تأیید شده است. این منحنی مقدار ۰/۸۱۵ را نشان داده که نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی ۸۱/۵٪ (خیلی خوب) است.

به طور کلی، این مطالعه نشان می‌دهد که پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه در حد متوسط به بالا است. منطقه با پتانسیل خیلی خوب با گستره در حدود ۲۰ درصد به دشت آبرفتی انتهای حوضه آبریز با لیتولوژی نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر و تراکم زهکشی پایین مطابقت دارد که تحت بهره‌برداری بیش از حد قرار دارد. هیچ سفره غنی از در ارتفاعات به دلیل رخنون‌های سنگی نفوذناپذیر، شیب زیاد، تراکم زهکشی بالا و فقر پوشش گیاهی متراکم شکل نگرفته است. این می‌تواند به سازندهای سنگ‌های آتشفشانی غیرقابل نفوذ نسبت داده شود که شارژ را محدود می‌کنند. این مطالعه می‌تواند به مدیریت مناسب آب‌های زیرزمینی کمک کند. موقعیت مکانی مناطق با پتانسیل خیلی ضعیف، متوسط و خوب و خیلی خوب می‌تواند به توسعه استراتژی‌هایی برای کاهش و جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی و مدیریت مناسب منابع آب زیرزمینی کمک کند. بنابراین مدیریت بهینه سفره‌های زیرزمینی فعلی و مناطق مشابه برای تأمین نیاز آب در منطقه مورد نظر برای آینده و جلوگیری از کاهش بیشتر سفره‌ها و توسعه پایدار ضروری است. مدل مفهومی اتخاذ شده در این پژوهش به خوبی نیازهای پژوهش را تأمین کرده است.

۵-۳- پیشنهادات

با ملاحظه افت شدید سطح آب زیرزمینی در آبخوان گوهرکوه و پیامدهای ناشی از آن و در راستای حفظ و مدیریت پایدار آبخوان گوهرکوه لازم است، اقدامات مدیریت اعمال گردد. این اقدامات شامل محدود نمودن میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی با اقداماتی از قبیل حذف و محدود نمودن کاربری‌های پرمصرف، توسعه سیستم‌های تخصیص و آبیاری متناسب با شرایط اقلیمی جهت کاهش پرت آب و افزایش راندمان، انتخاب الگوی‌های کشت سازگار با شرایط اقلیمی و کم‌آبی و اجرای طرح‌های تغذیه طبیعی و مصنوعی آبخوان اجرا می‌باشد. برخی از پیشنهادات کاربردی در راستای موضوع پژوهش عبارتند از:

۱. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی دشت گوهرکوه با استفاده از سایر مدل‌ها از جمله منطق فازی، آنتروپی شانون، وزن شواهد و رگرسیون لجستیک نیز تهیه و ارزیابی گردد.

۲. حساسیت‌سنجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی به لایه‌های تأثیرگذار مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳. اعتبارسنجی نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با سایر تکنیک‌ها از جمله کیفیت آب زیرزمینی، تراز آب زیرزمینی، ماندگاری آب و مقاومت الکتریکی مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع

- اسدی نلیوان، امید، سعدالدین، امیر، کرمی، غلامحسین، بردی شیخ، واحد (۱۳۹۹) تعیین مناطق با پتانسیل آب‌های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش AHP (مطالعه موردی حوضه رودخانه حبله رود)، مدیریت حوزه آبخیز، ۱۱(۲۱)، ۴۷-۳۶.
- انتظاری، مژگان، غلامی، مجید (۱۳۹۳) پتانسیل‌یابی مناطق مناسب جهت تغذیه آب‌های زیرزمینی در حوضه رومشگان، ژئومورفولوژی کاربردی ایران، ۲(۴)، ۴۳-۳۱.
- آوند، محمدتقی، جانی‌زاده، سعید، فرزین، محسن (۱۳۹۸) تعیین پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های داده‌کاوی و آماری در منطقه یاسوج-سی سخت، مرتع و آبخیزداری (مجله منابع طبیعی ایران)، ۷۲(۳)، ۶۲۳-۶۰۹.
- بهاروند، سیامک، امیری امرایی، وهاب، سوری، سلمان (۱۳۹۹) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و سلسله مراتبی مطالعه موردی حوزه آبریز خرم‌آباد، جغرافیا و توسعه، ۶۰(۳)، ۲۰۰-۱۸۸.
- ترابی‌پوده، حسن، یونسی، حجت‌الله، یوسفی، حسین، آزاده، ارشیا، یاراحمدی، یزدان (۱۴۰۰) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی منطقه لنجان‌ات اصفهان با استفاده از مدل وزن شواهد، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۱(۳)، ۳۷-۲۵.
- جعفرزاده، مریم‌سادات، ویس کرمی، ایرج (۱۴۰۱) ارزیابی کارایی مدل‌های فردی و ترکیبی در شناسایی پهنه‌های مستعد نفوذپذیری (حوزه آبخیز ماربره- استان لرستان)، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۲)، ۸۶-۶۹.
- حیدری آقاگل، مسعود، غلامی، مسعود، رستمی‌بارانی، حمیدرضا (۱۳۹۶) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش منطق فازی (مطالعه موردی: استان خراسان جنوبی)، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۱)، ۲۱۵-۲۱۱.
- خوش‌طینت، سعید، امین‌نژاد، بابک، حسن‌زاده، یوسف، احمدی، حسن (۱۳۹۹) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت سرو: کاربرد مدل آنتروپی شانون و نسبت فراوانی، علوم و مهندسی آبیاری، ۴۳(۲)، ۱۳۷-۱۲۳.
- رحمتی، امید، نظری‌سامانی، علی‌اکبر، مهدوی، محمد (۱۳۹۶) ارزیابی کارایی روش تحلیل سلسله مراتبی در پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قروه- دهگلان)، مرتع و آبخیزداری (مجله منابع طبیعی ایران)، ۷۰(۴)، ۸۶۹-۸۷۹.
- رحیمی، داریوش (۱۳۹۰) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی دشت شهرکرد)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۴۴(۴)، ۱۴۲-۱۲۷.
- رزندی، یوسف، فرخ‌زاده، بهنوش، یوسف‌زاده چابک، معصومه، تیموریان، تیمور (۱۳۹۶) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از الگوریتم حداکثر آنتروپی و سامانه اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: دشت همدان- بهار)، مهندسی آبیاری و آب، ۸(۲۹)، ۱۲۳-۱۱۰.

رزندی، یوسف، ملکian، آرش، خلیفی سیگارودی، فرخزاده، بهنوش (۱۳۹۴) پتانسیل یابی آب زیرزمینی با استفاده از روش ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی (مطالعه موردی دشت قزوین)، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۳۱(۹)، ۵۰-۴۱.

رضایی، محسن، سرگزی، امین (۱۳۸۹) بررسی اثرات اجرای تغذیه مصنوعی بر روی آبخوان دشت گوهرکوه، علوم زمین، ۱۹(۷۶)، ۹۹-۱۰۶.

رضایی مقدم، محمدحسین، رحیم پور، توحید، نخستین روحی، مهسا (۱۳۹۵) پتانسیل منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز منتهی به دشت تبریز)، اکوهیدرولوژی، ۳(۳)، ۳۸۹-۳۷۹.

رضوی ترمه، سیدوحید، شیرانی، کورش، سلطانی ربیع، مسعود (۱۳۹۸) ارزیابی و تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی وزن شاهد و رگرسیون لجستیک (مطالعه موردی: شهرستان نهاوند)، علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۳(۲)، ۴۳-۲۷.

رنجبری، محمدرضا، واقعی، رمضان، بیگدلی، بهناز (۱۳۹۹) تهیه نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، مطالعه موردی: کوهستان شمال غرب شاهرود، علم و فنون نقشه برداری، ۱۰(۱)، ۱۸۱-۱۵۹.

ریاحی، فاطمه، وقار فرد، حسن، دانشکار آراسته، پیمان، کاردان مقدم، حمید (۱۳۹۹) ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی با استفاده از ترکیب روش‌های داده کاوی (منطقه مورد مطالعه: دشت سرخون هرمزگان)، حفاظت منابع آب و خاک، ۹(۳)، ۱۱۹-۱۰۵.

زراعتی، ابراهیم، زین الدینی، سمیرا، پیرزاده، بهاره، هاشمی منفرد، سیدآرمان (۱۴۰۰) تعیین عمق بهینه چاه‌ها در یک حوضه با در نظر گرفتن تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب (مطالعه موردی: حوضه آبریز خاش)، تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱۳(۴)، ۱۷۴-۱۶۰.

زراعی، امیر، زراعی، سیروان، نکوئی اصفهانی، آزاده، کاکاپور، وحید، کنعانی، بهاره (۱۳۹۸) مکان یابی اراضی مناسب برای تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های منطقه‌ای و تصاویر ماهواره‌ای در استان یزد، مطالعات علوم محیط زیست، ۴(۱)، ۱۱۴۱-۱۱۳۰.

سلیمانی ساردو، الهام، یزدانی، محمدرضا، ذوالفقاری، علی اصغر (۱۳۹۵) تعیین مناطق پتانسیل دار تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از روش تلفیقی GIS-AHP (مطالعه موردی شهرستان سمنان)، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۳۳(۱۰-۱)، ۱۰-۱.

شعبانی، مرضیه، رضائی، ابوالفضل، معصومی، زهره (۱۳۹۹) پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز زنجانرود با استفاده از تحلیل‌های مکانی و پی جویی‌های ژئوالکتریک، علوم زمین، ۲۹(۱۱۶)، ۲۹۴-۲۸۷.

شفیعی، نجمه، امیراحمدی، ابوالقاسم، رحمانی، ابوالفضل (۱۳۹۸) پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با مدل آنتروپی شانون حوضه آبریز دشت نورآباد ممسنی، فضای جغرافیایی، ۱۹(۶۶)، ۳۰۴-۲۹۱.

صابری، عظیم، رنگزن، کاظم، مهجوری، رضا، کشاورزی، محمدرضا (۱۳۹۱) پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با تلفیق سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به روش تحلیل سلسله مراتبی در تاکدیس کمستان استان خوزستان، زمین شناسی کاربردی پیشرفته، ۶(۴)، ۲۰-۱۱.

طاهری تیزرو، عبدالله، مشایخی، حسن، زارع، محمد (۱۳۹۱) مکان یابی تغذیه مصنوعی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در دشت ماهی دشت کرمانشاه، پژوهش آب ایران، ۶(۱۱)، ۵۳-۴۷.

عبداللهی، علی اصغر، بالاجه، فرزانه (۱۳۹۸) پهنه بندی پتانسیل سنجی منابع آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان، مهندسی جغرافیایی سرزمین، ۳(۶)، ۱۴۹-۱۳۵.

فرجی سبکیار، حسنعلی، نصیری، حسین، حمزه، محمد، طالبی، سمیه، رفیعی، یوسف (۱۳۹۰) تعیین عرصه های مناسب برای تغذیه مصنوعی بر پایه ی تلفیق روش های ANP و مقایسه زوجی در محیط GIS مطالعه موردی دشت گربایگان فسا، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۲(۴)، ۱۶۶-۱۴۳.

فرخزاده، بهنوش، فولادی، مهرانگیز، یوسفی، مهیار (۱۳۹۸) توسعه روش فازی بهبود یافته در پتانسیل یابی مکان های مناسب تغذیه مصنوعی آب های زیرزمینی، علوم و مهندسی آب خیزداری ایران، ۱۳(۴۴)، ۲۷-۱۷.

فلاح، فاطمه، دانشفر، مانیا، قربانی نژاد، سمیرا (۱۳۹۶) پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی خرم آباد با استفاده از روش شاخص آماری، آب و توسعه پایدار، ۴(۱)، ۹۸-۸۹.

قربانی نژاد، سمیرا، دانش فر، مانیا، رحمتی، امید، فلاح، فاطمه، حق زاده، علی، طهماسبی پور، ناصر (۱۳۹۶) پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی دشت ازنا- الیگودرز با استفاده از متغیرهای محیطی و نسبت فراوانی، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۸(۲)، ۷۸-۶۲.

کثیری، زهرا، حبیب نژاد، محمود، روشن، سیدحسن (۱۳۹۹) پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) با استفاده از فرایند تحلیل شبکه ای (ANP) نمونه پژوهش دشت ناز سازی، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۷۷(۱)، ۱۲۰-۱۰۳.

کریمی، امید، دین پژوه، یعقوب، اسدی، اسماعیل، فاخری فرد، احمد (۱۳۹۹) تعیین مناطق مناسب تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی دشت تسوج با استفاده از مدل های تصمیم گیری چندمعیاره AHP و ANP، پژوهش آب ایران، ۱۴(۲)، ۱۶۹-۱۵۷.

محمودی جم، ساسان، قریشی نجف آبادی، سیدحسین، وفا یی نژاد، علیرضا (۱۳۹۵) تعیین پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از RS و GIS مطالعه موردی منطقه مهران (ایران)، دومین کنفرانس ملی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۲۹ دی ۱۳۹۵، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران.

مفیدفر، مهدی، اصلاح، مهدی، حسن آبادی، علی (۱۳۹۴) مقایسه مدل‌های تصمیم‌گیری تاپسیس و تحلیل سلسله مراتبی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی حوضه دشت یزد- اردکان در محیط GIS، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۱۵۷(۱)، ۱۵۶-۱۴۷.

نفرزادگان، علیرضا، محمدی‌فر، علی‌اکبر، محمدی، فریبرز، کاظمی، محمد (۱۴۰۰) شبیه‌سازی پتانسیل آب‌های زیرزمینی حوضه کهورستان با بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی مدل‌های داده‌کاوی، مدیریت حوزه آبخیز، ۱۲(۲۳)، ۱۴۳-۱۳۰.

نوحانی، ابراهیم، معروفی‌نیا، ادریس، خسروی، خبات (۱۳۹۷) ارزیابی روش نسبت فراوانی در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی دشت الشتر، استان لرستان، آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲(۱)، ۱۲۹-۱۱۹.

هریوندی، عبدالله، نهتانی، محمد، دهمرده قلعه‌نو، محمدرضا، خردنارویی، صابره (۱۳۹۸) تأثیر خشکسالی بر روی هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی دشت گوهرکوه سیستان و بلوچستان، دومین همایش ملی مدیریت منابع طبیعی (آب، سیل و محیط زیست)، ۲۳ آبان، دانشگاه گنبد کاووس. ایران.

یمانی، مجتبی، علی‌زاده، شهناز (۱۳۹۳) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش سلسله مراتبی (AHP) مطالعه موردی حوضه آباده - اقلید، هیدروژئومورفولوژی، ۱(۴)، ۱۴۴-۱۳۱.

یونس، حجت‌الله، ترابی‌پوده، حسن، شاهی‌نژاد، بابک، ارشیا، آزاده (۱۳۹۹) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های وزن شواهد و شاخص آماری در محدوده نجف آباد، ترویج و توسعه آبخیزداری، ۸(۲۹)، ۴۳-۳۶.

رحمتی، امید، نظری‌سامانی، علی‌اکبر، مهدوی، محمد (۱۳۹۴) ارزیابی متغیرهای مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی بر اساس تحلیل حساسیت (بررسی موردی: دشت قروه - دهگلان)، مدیریت بیابان، ۵(۱)، ۱۳-۱.

بیابانی، لیلا، ملکیان، آرش، اکبرپور بناب، بهروز (۱۳۹۹) ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز صوفی‌چای با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، هیدروژئومورفولوژی، ۲۲(۱)، ۶۵-۴۳.

رحیمی، محمد، سلیمانی، کریم (۱۳۹۵) ارزیابی پتانسیل منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور با تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۳۵(۴)، ۳۸-۲۷.

Agarwal, E., Agarwal, R., Garg, R. D., & Garg, P. K. (۲۰۱۳). Delineation of groundwater potential zone: an AHP/ANP approach. *Journal of earth system science*, 122(۳), ۸۸۷-۸۹۸. doi: ۱۰.۱۰۰۷/s1۲۰۴۰-۰۱۳-۰۳۰۹-۸

Shabani, M., Masoumi, Z., & Rezaei, A. (۲۰۲۲). Assessment of groundwater potential using multi-criteria decision analysis and geoelectrical surveying. *Geo-spatial Information Science*, ۱-۱۹. doi: ۱۰.۱۰۸۰/۱۰۰۹۵۰۲۰,۲۰۲۲,۲۰۶۹۰۵۲

Jhariya, D. C., Khan, R., Mondal, K. C., Kumar, T., & Singh, V. K. (۲۰۲۱). Assessment of groundwater potential zone using GIS-based multi-influencing factor (MIF), multi-criteria decision analysis (MCDA) and electrical resistivity survey techniques in Raipur city,

- Chhattisgarh, India. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 70(3), 370-380. doi: 10.2166/aqua.2021.129
- Uc Castillo, J. L., Martínez Cruz, D. A., Ramos Leal, J. A., Tuxpan Vargas, J., Rodríguez Tapia, S. A., & Marín Celestino, A. E. (2022). Delineation of groundwater potential zones (GWPZs) in a semi-arid basin through remote sensing, GIS, and AHP approaches. *Water*, 14(13), 2138. doi: 10.3390/w14132138
- Elewa, H. H., & Qaddah, A. A. (2011). Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modeling. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 613-628. doi: 10.1007/s10042-011-0703-8
- Hussein, A. A., Govindu, V., & Nigusse, A. G. M. (2017). Evaluation of groundwater potential using geospatial techniques. *Applied Water Science*, 7(2), 2437-2461. doi: 10.1007/s13201-016-0433-0
- Ajibade, O. M. (2011). Geological and geophysical evaluation of the Ajana area's groundwater potential, southwestern Nigeria. *Earth Sciences Research Journal*, 15(1), 30-40. doi: 10.10447/esrj
- Arulbalaji, P., Padmalal, D., & Sreelash, K. (2019). GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: a case study from southern Western Ghats, India. *Scientific reports*, 9(1), 1-17. doi: 10.1038/s41598-019-38067-x
- Khan, M. Y. A., ElKashouty, M., Subyani, A. M., Tian, F., & Gusti, W. (2022). GIS and RS intelligence in delineating the groundwater potential zones in Arid Regions: a case study of southern Aseer, southwestern Saudi Arabia. *Applied Water Science*, 12(1), 1-23. doi: 10.1007/s13201-021-01030-w
- Oh, H. J., Kim, Y. S., Choi, J. K., Park, E., & Lee, S. (2011). GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang City, Korea. *Journal of Hydrology*, 399(3-4), 108-117. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.12.027
- Ozdemir, A. (2011). GIS-based groundwater spring potential mapping in the Sultan Mountains (Konya, Turkey) using frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods and their comparison. *Journal of hydrology*, 411(3-4), 290-308.
- Sapkota, S., Pandey, V. P., Bhattarai, U., Panday, S., Shrestha, S. R., & Maharjan, S. B. (2021). Groundwater potential assessment using an integrated AHP-driven geospatial and field exploration approach applied to a hard-rock aquifer Himalayan watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 37, 100914. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100914
- Kabeto, J., Adebale, D., Regasa, M. S., & Leta, M. K. (2022). Groundwater Potential Assessment Using GIS and Remote Sensing Techniques: Case Study of West Arsi Zone, Ethiopia. *Water*, 14(12), 1838. doi: 10.3390/w14121838
- Suganthi, S., Elango, L., & Subramanian, S. K. (2013). Groundwater potential zonation by Remote Sensing and GIS techniques and its relation to the Groundwater level in the Coastal

- part of the Arani and Koratalai River Basin, Southern India. *Earth Sciences Research Journal*, 17(2), 87-90. doi: 10.1088/1755-1307/17/2/023501
- Ndhlovu, G. Z., & Woyessa, Y. E. (2021). Integrated Assessment of Groundwater Potential Using Geospatial Techniques in Southern Africa: A Case Study in the Zambezi River Basin. *Water*, 13(19), 2610. doi: 10.3390/w13192610
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of environmental studies and sciences*, 4(4), 310-328. doi: 10.1007/s13412-014-0182-z
- Kaewdum, N., & Chotpantarat, S. (2021). Mapping Potential Zones for Groundwater Recharge Using a GIS Technique in the Lower Khwae Hanuman Sub-Basin Area, Prachin Buri Province, Thailand. *Front. Earth Sci.* 9:717313. doi: 10.3389/feart.2021.717313
- Masoumi, Z., Mousavi, Z., & Hajeb, Z. (2022). Long-term investigation of subsidence rate and its environmental effects using the InSAR technique and geospatial analyses. *Geocarto International*, 37(24), 7161-7180. doi: 10.1080/10106461.2021.1964616
- Mallick, J., Khan, R. A., Ahmed, M., Alqadhi, S. D., Alsubih, M., Falqi, I., & Hasan, M. A. (2019). Modeling groundwater potential zone in a semi-arid region of Aseer using fuzzy-AHP and geoinformation techniques. *Water*, 11(12), 2606. doi: 10.3390/w11122606
- Akbar, T. A., Hassan, Q. K., Ishaq, S., Batool, M., Butt, H. J., & Jabbar, H. (2019). Investigative spatial distribution and modelling of existing and future urban land changes and its impact on urbanization and economy. *Remote Sensing*, 11(2), 100.



Regional Water Company of Sistan and Baluchestan

Title:

Groundwater Portential Zoning using Weighted Overlay Index Analysis (Case study: Goharkuh Plain, Sistan and Baluchestan Province

Employer:

Regional Water Company of Sistan and Baluchestan

Advisor:

Sistan and Baluchestan University

Research Conductor:

Dr. Hamid Nazaripour

Winter. ۲۰۲۳