



## ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی

### با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های عامل چندگانه تأثیرگذار و فازی

#### مطالعه موردی: بخشی از حوضه آبخیز کبار - فردو واقع در استان قم

الهام فروتن<sup>۱</sup>

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

\*\*\*\*\*

#### چکیده

در سال‌های اخیر، رشد جمعیت، افزایش سطح اراضی فاریاب و توسعه اقتصادی، موجب افزایش تقاضا برای آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان شده است. در نتیجه، شناسایی مناطق بالقوه‌ی دارای آب زیرزمینی و تعیین مناطق تغذیه آن با استفاده از فناوری‌های دقیق به‌منظور کاهش افت و همچنین برنامه‌ریزی و نظارت بر سیستم منابع آب زیرزمینی ضروری است. در این تحقیق هدف آن است که روش‌های عامل چندگانه تأثیرگذار و فازی برای تعیین پتانسیل آب زیرزمینی در بخشی از حوضه آبخیز کبار - فردو واقع در استان قم مورد مقایسه قرار گیرد. به این منظور، شش عامل شیب، بارندگی سالانه، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی، خاک‌شناسی و کاربری اراضی مد نظر قرار گرفتند و روش‌های فازی و عامل چندگانه تأثیرگذار (MIF) با استفاده از آن‌ها اجرا شده است. در روش عامل چندگانه تأثیرگذار عامل فاصله از آبراه دارای کمترین وزن (۰/۸/۳۳) و عامل زمین‌شناسی دارای بیشترین وزن است (۰/۲۵) و عوامل بارش، شیب، خاک‌شناسی، کاربری اراضی به ترتیب دارای وزن‌های ۰/۲۰/۸۳، ۰/۱۶/۶۷، ۰/۱۶/۶۷ و ۰/۱۲/۵ هستند. سپس نقشه پتانسیل آب زیرزمینی از طریق هم‌پوشانی در ArcGIS تهیه شده و منطقه مورد مطالعه به چهار طبقه پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شده است که به ترتیب ۰/۱۶/۶۹، ۰/۳۲/۰۶ و ۰/۴۳/۰۹ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شود. در روش فازی نیز لایه‌های موضوعی براساس تابع خطی به فازی تبدیل شده و هم‌پوشانی لایه‌ها با استفاده از تابع گاما صورت پذیرفته که در نقشه نهایی طبقات خیلی کم، کم، متوسط و زیاد ۰/۲۵/۶۱، ۰/۱۸/۰۲، ۰/۴۱/۴۰ و ۰/۱۴/۹۷ درصد از منطقه را در برمی‌گیرند. به‌منظور ارزیابی مدل‌ها، از آمار نقاط مشاهداتی استفاده و در نهایت صحت مدل‌های عامل چندگانه تأثیرگذار و فازی به ترتیب ۰/۷۱/۴۲ و ۰/۷۸/۵۷ درصد محاسبه شده که به نظر می‌رسد مقادیر قابل قبولی هستند. نتایج این تحقیق می‌تواند برای اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی در راستای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: عامل چندگانه تأثیرگذار (MIF)، فازی، پهنه‌بندی، آب زیرزمینی، اقلیم خشک و نیمه‌خشک

\*\*\*\*\*

## ۱- مقدمه

دارد که از نظر زمان، پول و منابع پرهزینه بوده و بایستی با مشارکت متخصصان انجام شود (Shao et al., 2020). لذا می‌توان از مدل‌ها برای تأمین هدف استفاده نمود. مدل‌ها نیازمند بررسی عوامل متعددی هستند که بر وجود و حرکت آب‌های زیرزمینی در یک منطقه تأثیر می‌گذارند. لذا در استفاده از مدل‌ها بایستی اطلاعات و ویژگی‌های توصیفی هر یک از موارد را در منطقه کسب نمود. سیستم اطلاعات جغرافیایی قابلیت منحصر به فردی برای اطلاعات مکانی و ویژگی‌های توصیفی و تلفیق آن‌ها دارد که می‌تواند برای تأمین هدف مورد استفاده قرار گیرد (بهرامی و فروتن، ۱۳۹۶).

تحقیقات متعددی با استفاده از مدل‌های مختلف در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی صورت پذیرفته است. یکی از مدل‌هایی که با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی قابلیت اجرا دارد مدل فازی است. از این روش می‌توان برای ارزیابی حساسیت زمین لغزش (زاللی و شاهدی ۱۴۰۰)، پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی (نسرین‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۳) و تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی (Singha et al., 2021) استفاده نمود.

در زمینه تهیه نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی تحقیقات متعددی در خارج از ایران صورت پذیرفته است. از جمله آن‌ها می‌توان به پژوهشی که Shao و همکاران (۲۰۲۰) در کشور چین انجام دادند اشاره نمود. آن‌ها از منطق فازی - تحلیل سلسله مراتبی برای پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی استفاده کردند که نتایج این تحقیق با مشاهدات صحرایی انجام شده تطابق خوبی نشان داده است. در تحقیقی Ahmed و همکاران (۲۰۲۰) از منطق فازی برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در کشور اتیوپی استفاده نمودند. نتایج تحقیق، کارایی منطق فازی را در تهیه نقشه پهنه‌بندی تأیید می‌کند. در تحقیق دیگری Echogdali و همکاران (۲۰۲۲) از منطق فازی برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در جنوب غربی موروکو و به منظور تبدیل مقادیر فاکتورهای مورد نظر در محدوده صفر تا یک استفاده کردند که نتایج قابل قبولی داشته است. همچنین در تحقیقی Hasanuzzaman و همکاران (۲۰۲۲) از مدل‌های تصادفی

آب‌های زیرزمینی به آب‌هایی گفته می‌شود که در لایه‌های آبدار و اشباع زیرزمین تجمع پیدا کرده‌اند. این آب‌ها به‌عنوان یکی از منابع مهم آب در کره زمین شناخته شده‌اند که نقش مهمی در حفظ تعادل اکولوژیکی، ثبات محیطی، رفاه انسان و توسعه اقتصادی ایفا می‌کنند (Arefin, 2020). در سال‌های اخیر، رشد جمعیت، افزایش سطح اراضی فاریاب و توسعه اقتصادی، موجب افزایش تقاضا برای آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان شده است (Nhamo et al., 2020). به‌گونه‌ای که تقریباً ۳۶٪، ۴۲٪ و ۲۷٪ از کل آب‌های زیرزمینی استخراج شده برای مصارف خانگی، کشاورزی و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است (Patra et al., 2018). در مناطق خشک و نیمه خشک که به دلیل بارش کم و تبخیر و تعرق زیاد، آب‌های سطحی دارای مقدار قابل توجهی نیستند زندگی مردم عمدتاً وابسته به آب‌های زیرزمینی است. از این‌رو در این مناطق، افت چشم‌گیر سطح آب‌های زیرزمینی به‌غیر از اثر تغییرات اقلیمی، عمدتاً متأثر از فعالیت‌های انسانی است. در کشور ایران نیز که غالب بخش‌ها دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است، منابع آب زیرزمینی تأمین‌کننده ۶۵ درصد نیاز آبی کشور هستند (Rahmati et al., 2016) و برداشت بی‌رویه از این منابع با ارزش موجب شده که ۳۵۵ دشت از ۶۰۹ دشت کشور جزء دشت‌های ممنوعه اعلام شود (رنجبری و همکاران، ۱۳۹۹). در نتیجه، شناسایی مناطق بالقوه آب زیرزمینی و تعیین مناطق تغذیه با استفاده از فناوری‌های دقیق در راستای برنامه‌ریزی و نظارت بر سیستم پایدار منابع آب زیرزمینی کشور امری ضروری است (Etikala et al., 2019). به این منظور روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند که از متداول‌ترین روش‌ها برای شناسایی و پهنه‌بندی مناطق بالقوه آب‌های زیرزمینی می‌توان به روش‌های حفاری، زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی، ژئوفیزیکی و همچنین بررسی‌های میدانی اشاره نمود. هر یک از این روش‌ها نیاز به نیروی کار گسترده برای فعالیت‌هایی هم‌چون اکتشاف

اولویت‌بندی و ارزیابی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در استان اصفهان را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی انجام دادند و از منحنی ویژگی عملگر نسبی و نقشه پراکنش نقاط چشمه برای بررسی صحت مدل استفاده کردند که نتایج این تحقیق مبین صحت مناسب پنج طبقه ایجاد شده است. رنجبری و همکاران (۱۳۹۹) نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت شمال غرب شاهرود را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی تهیه و نتیجه‌گیری کردند که نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی عمدتاً توسط عوامل بارش، سنگ‌شناسی و تراکم خطواره‌ها کنترل می‌شود. پوراکبری و همکاران (۱۳۹۹) پتانسیل‌یابی منابع آب کارستی شمال شرق خوزستان را با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی انجام دادند که تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی صحت نتایج تحقیق را تأیید نمود. ترابی‌پوده و همکاران (۱۴۰۰) پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی را در منطقه لنجانان اصفهان با استفاده از مدل وزن شواهد انجام دادند که نتایج تحقیق بیان‌گر اعتبار بسیار خوب این مدل به‌منظور تعیین پتانسیل آب زیرزمینی در این منطقه است. جعفرزاده و ویس کرمی (۱۴۰۱) کارایی مدل‌های منفرد و ترکیبی را به‌منظور تعیین مناطق مستعد تغذیه آب‌های زیرزمینی در حوضه آبخیز ماربره واقع در استان لرستان مورد بررسی قرار دادند که نتایج به‌دست آمده نشان داد مدل جنگل تصادفی، نسبت به مدل بیزین و مدل‌های ترکیبی، مدل دقیق‌تری است.

مرور تحقیقات انجام شده بیان‌گر ضرورت بررسی پتانسیل آب زیرزمینی در اقلیم مختلف به‌ویژه مناطق دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور است. لذا در این تحقیق هدف آن است که نقشه مناطق بالقوه آب زیرزمینی در بخشی از حوضه آبخیز کبار-فردو واقع در استان قم با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، روش عامل چندگانه تأثیرگذار که تاکنون در ایران مورد بررسی قرار نگرفته است و همچنین با کاربرد روش فازی تهیه شده و نتایج دو روش فازی و عامل چندگانه تأثیرگذار مورد مقایسه قرار گیرند.

جنگل، نسبت فراوانی و تحلیل سلسله مراتبی برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در هندوستان استفاده کردند. آن‌ها به‌منظور مقایسه مدل‌ها دوازده عامل را مد نظر قرار دادند که بالا بودن دقت تمامی مدل‌ها در نتایج این تحقیق تأیید شده است. در پژوهش انجام شده به‌وسیله Fildes و همکاران (۲۰۲۲) از مدل تحلیل سلسله مراتبی برای تهیه پتانسیل آب زیرزمینی در جنوب استرالیا استفاده و آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مکانی اجرا شده است که نتایج تحقیق آن‌ها بیان‌گر بهبود اعتماد در مکان‌یابی مناطق دارای پتانسیل بالای آب زیرزمینی است. یکی دیگر از مدل‌هایی که در چند سال گذشته در این زمینه در خارج از ایران مورد استفاده قرار گرفته مدل عامل چندگانه تأثیرگذار است. این تکنیک، وزن هر پارامتر را بر اساس رابطه و وابستگی متقابل عوامل تعیین می‌کند. در پژوهش دیگری که به‌وسیله Magesh و همکاران (۲۰۱۲) برای ترسیم مناطق بالقوه آب زیرزمینی در هندوستان انجام شد کارایی این مدل تأیید شده است. همچنین Senapati و Das در سال ۲۰۲۲ از این مدل در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تعیین پهنه بالقوه آب زیرزمینی در هندوستان استفاده کردند که نتایج تحقیق بیان‌گر دقت این روش در ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر بوده است.

در زمینه تحقیقات انجام شده در ایران برای تعیین پتانسیل آب زیرزمینی می‌توان به تحقیق میرزاپور و حقی زاده (۱۳۹۵) در حوضه آبخیز مادیان‌رود در استان لرستان اشاره نمود. آن‌ها از تحلیل شاخص هم‌پوشانی وزنی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی برای شناسایی مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی استفاده کردند که اعتبارسنجی نتایج براساس داده‌های مشاهداتی سطح آب چاه‌ها نشان‌دهنده دقت خوب مدل بوده است. در پژوهش Falah و همکاران (۲۰۱۷) دقت مدل‌های آماری برای ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در استان لرستان مورد بررسی قرار گرفت و دقت چهار مدل مورد استفاده تأیید شد. مرادی‌زاده و شیرانی (۱۳۹۸)

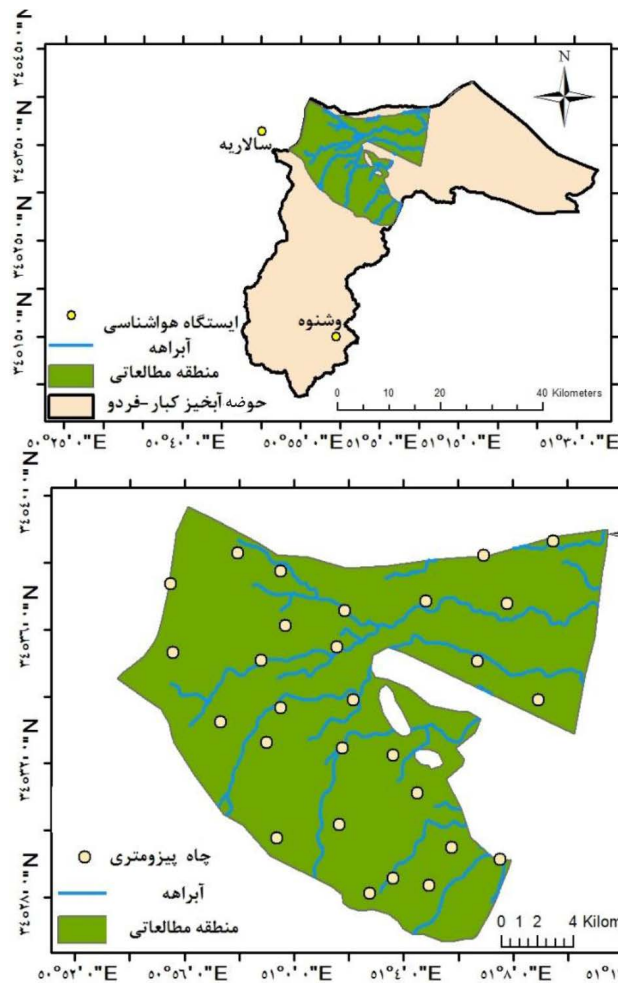
## ۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوضه آبخیز کبار- فردو است که در نیمه شرقی حوضه آبریز دریاچه نمک در استان قم قرار گرفته است. حوضه آبخیز کبار- فردو دربرگیرنده رودخانه‌های دره باغ، فردو و کبار است که در غرب دریاچه نمک واقع است. منطقه مطالعاتی با مساحت ۳۶۰۹۹/۵۵ هکتار در طول جغرافیایی ۵۴° ۵۰' تا ۱۴° ۵۱' و عرض جغرافیایی ۲۸° ۳۴' تا ۴۰° ۳۴' واقع شده است و در آن آبخوانی وجود دارد که کشاورزان از آب آن برای آبیاری استفاده می‌نمایند. به منظور بررسی وضعیت این آبخوان در این محدوده، ۲۸ چاه پیزومتری توسط اداره آب منطقه‌ای قم حفر شده و سطح آب زیرزمینی در آن‌ها به صورت دوره‌ای

مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است (نگاره ۱). در این پژوهش داده‌های ثبت شده چاه‌های پیزومتری مورد استفاده قرار گرفته است. ایستگاه هواشناسی و شنوه تنها ایستگاه موجود در منطقه است که میانگین بارش آن در دوره زمانی ۴۶ ساله (۱۳۹۶-۱۳۵۰) برابر با ۲۵۶ میلی‌متر بوده است.

## ۳- مواد و روش

عوامل متعددی همچون کاربری اراضی، تراکم زهکشی، بافت خاک، عمق خاک، زمین‌شناسی، ارتفاع، شیب، ژئومورفولوژی، بارش، تراکم خطوط‌ها، عمق آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، نرخ تغذیه، فاصله از آبراهه، تراکم آب‌گیرها، شاخص‌های NDVI, TWI و SWI می‌تواند



نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان قم

(OMq)، مارن قرمز و گچی (Mur) و تپه‌های شنی (Qs.d) وجود دارد. سازند قم از نظر سنگ شناسی در محدوده مورد مطالعه مشتمل بر آهک‌های زیستی ریفی است که به صورت توده‌ای تا ضخیم لایه دیده می‌شود. کنگلومرای پلی ژنتیک دارای ذرات با گردش‌دگی خوب و سیمان شدگی اندک بوده و حتی در برخی از نقاط به واسطه سیمان شدگی اندک کاملاً سست بوده و به صورت آبرفت است. مخروط آبرفتی قدیمی متشکل از قطعاتی در اندازه ماسه و سیلت است که در داخل آن مقداری رس نیز دیده می‌شود و جنس قطعات تشکیل دهنده درشت دانه این سازند عموماً از نوع ایگنمبریت، توف، آندزیت، توف ماسه‌سنگی، ماسه‌سنگ آهکی، شیل و آهک است. در مخروط آبرفتی جوان، جنس قطعات تشکیل دهنده مشابه به واحد Qt1 است ولی قطعات درشت دانه آن دارای گردش‌دگی متوسط هستند (اداره منابع طبیعی و آب‌خیزداری استان قم، ۱۳۸۹: ۶).

**خاک‌شناسی.** نفوذپذیری و میزان تغذیه آب زیرزمینی تحت تأثیر ویژگی‌های خاک است (Selvam et al., 2012). میزان نفوذپذیری خاک‌های درشت بافت بیشتر است، در حالی که خاک‌های ریز بافت نفوذپذیری کمی دارند. در این تحقیق، لایه خاک منطقه مورد مطالعه از پایگاه داده فائو تهیه شد. این لایه با استفاده از داده‌های پروفیل خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری و با دقت مکانی اندازه پیکسل ۲۵۰ متر تهیه شده است.

**فاصله از آبراهه.** فاصله از شبکه‌های هیدروگرافی یک عامل مهم در مطالعات هیدروژئولوژیکی است و وجود لایه‌های آبرفتی در نزدیکی مسیر رودخانه‌ها به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک بر تغذیه آب‌های زیرزمینی تأثیر چشم‌گیری دارد (Adeyeye et al., 2018). لذا در این تحقیق فاصله از آبراهه‌ها با استفاده از ابزار Distance تهیه شده و لایه مورد نظر به چهار کلاس ۰-۶۵۹، ۶۵۹-۱۴۸۰، ۱۴۸۰-۲۶۷۵، ۲۶۷۵-۴۹۳۹ و ۴۹۳۹-۲۶۷۵ متر طبقه‌بندی شد.

**کاربری اراضی.** کاربری زمین به دلیل آن‌که نشان‌دهنده تأثیر انسان بر آب‌های زیرزمینی است، یکی از عوامل اصلی

برای پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرند که در تحقیقات پیشین انجام شده در این زمینه، مشخص شد عوامل کاربری اراضی، تراکم زهکشی، بافت خاک، زمین‌شناسی، شیب و بارش بالاترین درصد استفاده و نتایج مطلوب را داشته‌اند (Atwari et al., 2022). لذا در این پژوهش نیز با توجه به تحقیقات گذشته، شرایط منطقه و داده‌های موجود، شش عامل کاربری اراضی، بافت خاک، زمین‌شناسی، شیب، بارش و فاصله از آبراهه برای اجرای مدل‌ها مد نظر قرار گرفته و روش‌های فازی و عامل چندگانه تأثیرگذار با استفاده از آن‌ها اجرا شده است. ویژگی‌های عوامل مورد بررسی به شرح ذیل هستند:

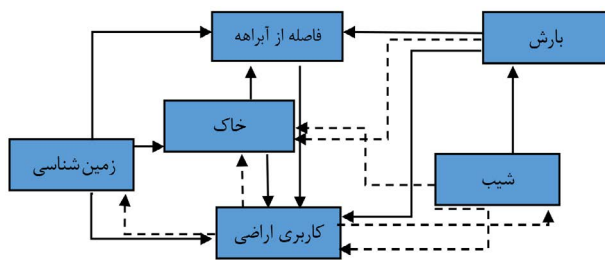
**بارش.** برای انجام این پژوهش، آمار بارش سال‌های ۱۳۵۰ الی ۱۳۹۶ ایستگاه و شنوه که داخل محدوده مطالعاتی است و آمار ایستگاه‌های کوه سفید و همچنین سالاریه که در اطراف محدوده مورد مطالعه قرار دارد مد نظر قرار گرفته و با استفاده از مقدار میانگین بلندمدت بارش و روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) در ابزار Analyst Spatial نقشه پهنه‌بندی بارش تهیه شده و براساس روش Natural break به چهار کلاس ۱۴۰-۱۵۶، ۱۶۸-۱۵۶، ۱۸۲-۱۶۸ و ۲۰۳-۱۸۲ میلی‌متر تقسیم شده است.

**شیب.** شیب به‌طور عمده بر میزان نفوذ، رواناب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد. شیب تندتر به دلیل افزایش رواناب و زمان ناکافی برای نفوذ، باعث تغذیه کمتر آبخوان می‌شود (Selvam et al., 2014) و به همین دلیل شیب عامل مهمی در پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی است. در این تحقیق نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ برای تهیه مدل رقومی ارتفاع و نقشه شیب استفاده شده و نقشه شیب منطقه به چهار کلاس ۰-۱، ۱-۳، ۳-۹، ۹-۲۵ درجه طبقه‌بندی شدند.

**زمین‌شناسی.** سازندهای زمین‌شناسی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند (Acharya and Nag 2013). در منطقه مورد مطالعه مخروط‌های آبرفتی قدیمی (Qt1)، مخروط‌های آبرفتی جوان (Qt2)، کنگلومرای پلی ژنتیک (Plc)، سازند قم

برای این منظور رتبه و وزن هر عامل براساس سهم نسبی آن‌ها مشخص می‌شود (نگاره ۲). در این روش، در روابط بین عوامل، روابط تأثیرگذار به اصلی و فرعی تفکیک می‌شوند. سپس به روابط تأثیرگذار اصلی، عدد یک و به عوامل تأثیرگذار فرعی، عدد نیم وزن‌دهی می‌شود و مجموع وزن‌های هر عامل مؤثر بر زمین‌های مستعد آب زیرزمینی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در نهایت امتیاز نسبی هر عامل با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Magesh et al., 2012).

$$S = \frac{(X + Y)}{\sum(X + Y)} \quad \text{رابطه (۱)}$$



#### نگاره ۲: روابط بین عوامل در مدل عامل چندگانه تأثیرگذار

که در آن S نمره نسبی است، X و Y به ترتیب اثر عوامل اصلی و فرعی هستند. پس از آن، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی با کاربرد تکنیک هم‌پوشانی و با استفاده از وزن محاسبه شده در معادله (۱) و همچنین رابطه (۲) تهیه می‌شود:

که در آن GWP بیان‌گر پتانسیل نگهداشت آب زیرزمینی،  $A_j$  وزن نرمال شده لایه موضوعی  $A_m$ ،  $B_j$  وزن نرمال شده ویژگی  $j$  لایه موضوعی،  $m$  مجموع لایه‌ها و  $n$  مجموع ویژگی‌های هر لایه موضوعی است.

$$GWP = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_i \times B_j) \quad \text{رابطه (۲)}$$

ارزیابی صحت مدل‌ها. صحت به این معناست که مدل تا چه اندازه قادر است خروجی را درست پیش‌بینی کند (کریمی و مسگری ۱۴۰۱). در این تحقیق مقادیر میانگین عمق تا سطح آب زیرزمینی در ۲۸ چاه پیژومتری محاسبه شده و چاه‌های با عمق کمتر و مساوی با ۳۰ متر به عنوان نقاط

کنترل‌کننده تغذیه آب زیرزمینی است. در طبقه‌بندی کاربری اراضی، مناطق ساخته شده (مصنوعی)، مانع نفوذ بارش به زمین می‌شوند و لذا معمولاً با رواناب زیاد مشخص می‌شوند و حال آن‌که مناطق با پوشش گیاهی متراکم و زمین‌های زراعی مکان‌های خوبی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی هستند (Fagbohun 2018). در این تحقیق نقشه کاربری اراضی تهیه شده به وسیله اداره جهاد کشاورزی مد نظر قرار گرفته و به پنج کلاس تقسیم شده است.

روش فازی. فرآیند تخصیص مقادیر عددی مجموعه مورد بررسی، به بازه [۰، ۱] فازی‌سازی نامیده می‌شود. منطق فازی ابزاری ریاضی برای توصیف عدم قطعیت است (Zadeh 1965). مقدار بین صفر و یک، درجه عدم قطعیت مقدار متعلق به مجموعه را نشان می‌دهد (Kainz 2007). به منظور فازی‌سازی چندین نوع تابع عضویت در Arc-GIS تعریف شده است که عبارتند از توابع خطی، گوسی، کوچک، بزرگ و ... با توجه به این‌که در پژوهش Singha و همکاران (۲۰۲۰) تلفیق لایه‌هایی که بر اساس تابع خطی فازی شدند براساس روش هم‌پوشانی گاما دقت مطلوب را در پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی داشته است در این مطالعه از دستور Fuzzy membership در ابزار Spatial Analyst و تابع خطی برای تبدیل لایه‌های موضوعی به مجموعه فازی در محیط Arc-GIS نسخه (۱۰/۲، ۲۰۱۳) استفاده شد. با کاربرد تابع خطی، حداکثر مقدار فازی که عدد یک است به کلاسی که پتانسیل بالایی برای تغذیه آب زیرزمینی دارد و حداقل مقدار فازی که عدد صفر است به کلاسی که کمترین پتانسیل تغذیه آب زیرزمینی را دارد تخصیص می‌یابد. پس از آن در این تحقیق نیز هم‌پوشانی با استفاده از فرمان Fuzzy overlay و روش گاما<sup>۱</sup> با ضریب ۰/۹ انجام شده است.

عامل چندگانه تأثیرگذار. عامل چندگانه تأثیرگذار یک تکنیک نسبتاً آسان و معتبر است (Thapa et al., 2017). این روش با تخصیص وزن مناسب به عوامل مختلف مؤثر می‌تواند پتانسیل آب زیرزمینی منطقه را مشخص نماید.

### فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (۳۳)

ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های... / ۹۷

سطحی کمتر و نفوذ بیشتر آب به زمین می‌شود و بالعکس (Kumari et al., 2022). نگاره (۳-الف) تغییر در مقدار شیب در ناحیه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. قسمت اعظم منطقه مورد مطالعه (۷۸/۵۶ درصد) دارای کلاس شیب ۱-۰ درجه بوده در حالی که ۱۹/۹۷، ۱/۲۹ و ۰/۱۸ درصد منطقه دارای شیب ۱-۳، ۳-۹ و ۹-۲۵ هستند که در مدل‌ها به ترتیب رتبه چهار الی یک برای آن‌ها در نظر گرفته شده است (جدول ۱). بافت خاک تأثیر چشم‌گیری بر نفوذ و آب‌گذری حرکت آب‌های سطحی به سمت آب‌های زیرزمینی دارد. از این‌رو در تحقیق حاضر عامل خاک به‌عنوان یکی از عوامل ورودی به مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. خاک‌هایی که نفوذپذیری بالایی دارند برای تغذیه آب زیرزمینی مناسب‌تر هستند و خاک‌های با نفوذپذیری کم برای این منظور مناسب نیستند. همان‌طور که در نگاره (۳-ب) مشخص است بافت خاک منطقه متشکل از بافت‌های لومی شنی، لومی، لومی رسی و لومی شنی است که به ترتیب ۳/۷۳، ۹۰/۷۲، ۰/۲۳ و ۵/۳۲ درصد مساحت منطقه را پوشش داده و دارای رتبه چهار الی یک هستند (جدول ۱).

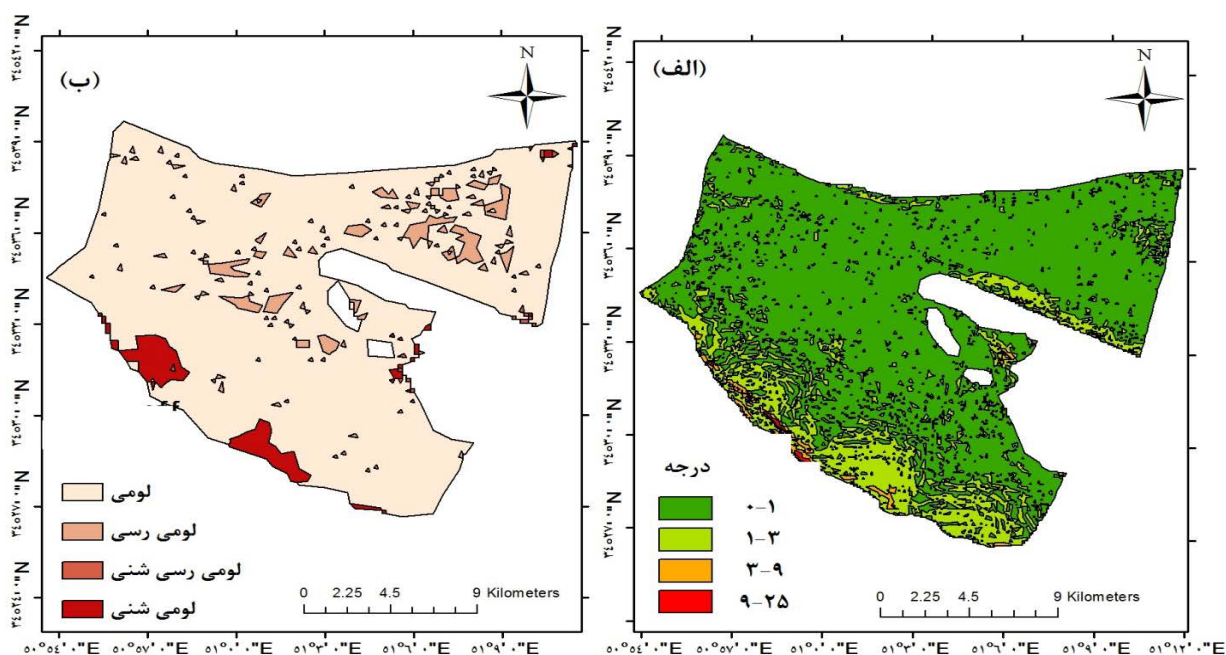
مناسب و چاه‌های با عمق بیش از ۳۰ متر به‌عنوان نقاط نامناسب طبقه‌بندی شدند. سپس تعداد نقاطی که در هر مدل به درستی یا نادرستی در محدوده مناسب و نامناسب قرار گرفتند شمارش شده و سپس شاخص صحت که در رابطه (۳) ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفت (Bui et al., 2020):

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن TP (مثبت واقعی) و TN (منفی واقعی) تعداد نقاطی است که به‌درستی طبقه‌بندی شده است. FP (مثبت اشتباه) و FN (منفی اشتباه) تعداد نقاطی که به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند. شاخص صحت بیان‌گر کارایی مدل در طبقه‌بندی است (Costache and Bui 2020).

### ۴- یافته‌های تحقیق

ارزیابی عوامل مورد بررسی. عامل شیب به‌دلیل تأثیر بر ظرفیت نفوذ خاک، یک پارامتر مناسب برای بررسی تغذیه آب زیرزمینی است. مقدار شیب کمتر، موجب مقدار رواناب



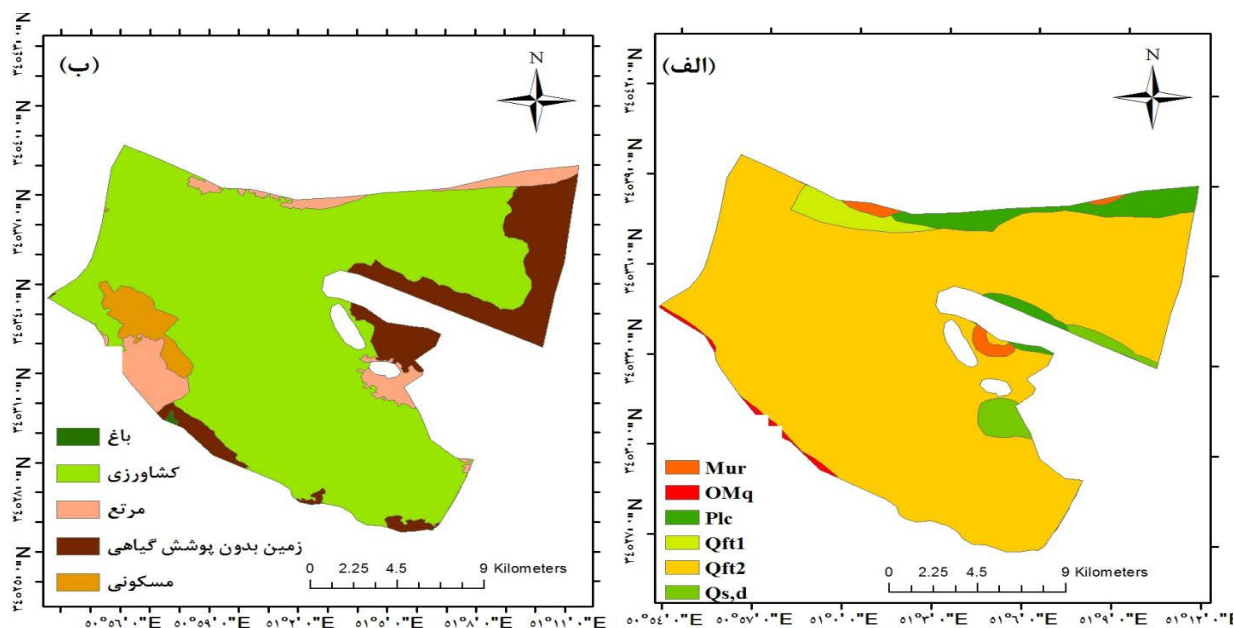
نگاره ۳: نقشه شیب (الف) و خاک‌شناسی (ب) منطقه مورد مطالعه

جدول ۱: طبقات عوامل مورد استفاده در دومدل فازی و عامل چندگانه تأثیرگذار

عامل	رتبه	درصد	عامل	رتبه	درصد	کلاس	کلاس	رتبه	درصد
خاک‌شناسی	۴	۳/۷۳	فاصله از آبراهه (متر)	۴	۳/۷۳	لومی شنی	۰-۶۵۹	۴	۴۶/۳۳
	۳	۹۰/۷۲		۳	۹۰/۷۲	لومی	۶۵۹-۱۴۸۰	۳	۳۴/۱۵
	۲	۰/۲۳		۲	۰/۲۳	لومی رسی شنی	۱۴۸۰-۲۶۷۵	۲	۱۵/۷۲
	۱	۵/۳۲		۱	۵/۳۲	لومی رسی	۲۶۷۵-۴۹۳۹	۱	۳/۸
زمین‌شناسی	۳	۱/۱۰	کاربری/پوشش اراضی	۳	۱/۱۰	Mur	کشاورزی	۴	۷۷/۱۸
	۲	۰/۶۸		۲	۰/۶۸	OMq	باغ	۳	۰/۰۷
	۱	۴/۹		۱	۴/۹	Plc	زمین بدون پوشش گیاهی	۲	۱۳/۳۱
	۳	۲/۲۲		۳	۲/۲۲	Qt1	مرتع	۲	۶/۵
	۴	۸۸/۹۸		۴	۸۸/۹۸	Qt2	منطقه مسکونی	۱	۲/۹۴
شیب (درجه)	۴	۲/۱۲	بارش (میلی‌متر)	۴	۲/۱۲	Qs.d	۱۴۰-۱۵۶	۱	۱۴/۱۵
	۴	۷۸/۵۶		۴	۷۸/۵۶	۰-۱	۱۵۶-۱۶۸	۲	۴۸/۹۲
	۳	۱۹/۹۷		۳	۱۹/۹۷	۱-۳	۱۶۸-۱۸۲	۳	۲۱/۸۴
	۲	۱/۲۹		۲	۱/۲۹	۳-۹	۱۸۲-۲۰۳	۴	۱۵/۰۹
۱	۰/۱۸	۱	۰/۱۸	۹-۲۵					

شنی (Qs.d) و مارن قرمز و گچی (Mur) به ترتیب دارای مساحت‌های ۲/۲۲ و ۲/۱۲ و ۱/۱۰ درصد بوده و کمترین مساحت متعلق به سازند OMq است (۰/۶۸). بررسی نقشه کاربری اراضی، اطلاعات مربوط به طبقه‌های مختلف کاربری اراضی موجود در منطقه مورد مطالعه را ارائه می‌دهد. انواع مختلف کاربری‌های موجود در منطقه مورد مطالعه عبارتند از: کشاورزی، باغ، مرتع، زمین بدون پوشش گیاهی و منطقه مسکونی. همان‌طور که در نگاره (۴-ب) مشخص است بزرگ‌ترین مساحت این منطقه دارای کاربری کشاورزی است (۷۷/۱۸٪) در حالی که کاربری‌های باغ و مرتع به ترتیب ۰/۰۷٪ و ۶/۵٪ مساحت منطقه را در بر گرفته‌اند. زمین بدون پوشش گیاهی و منطقه مسکونی نیز به ترتیب ۱۳/۳۱ و ۲/۹۴ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شود. از بین کاربری‌های ارائه شده، کاربری کشاورزی و مسکونی دارای بیشترین و کمترین رتبه در تغذیه آب‌های زیرزمینی است (جدول ۱).

در هر منطقه، ویژگی سازندها تأثیر به‌سزایی در وقوع و توزیع آب‌های زیرزمینی دارد. سازندهای هر منطقه، سنگ‌های در معرض تخریب، ظرفیت نفوذ خاک، حرکت و ذخیره منابع آب را توصیف می‌کند. از این‌رو مطالعات زمین‌شناسی که شامل بررسی سازندهای منطقه است برای تعیین مکان ذخیره آب‌های زیرزمینی بایستی مورد توجه قرار گیرد. همان‌طور که نقشه زمین‌شناسی نشان می‌دهد (نگاره ۴-الف) سازندهای موجود در منطقه مورد مطالعه عبارتند از: مخروط‌های آبرفتی جوان (Qt2)، تپه‌های شنی (Qs.d)، مخروط‌های آبرفتی قدیمی (Qt1)، مارن قرمز و گچی (Mur)، سازند قم (OMq) و کنگلومرای پلی‌ژنتیک (Plc) که به ترتیب رتبه چهار الی یک را در توانایی بالقوه نگهداشت آب زیرزمینی دارند (جدول ۱). در این مطالعه آبرفت‌های جوان کواترنر دارای بیشترین مساحت هستند (۸۸/۹۸٪) و کنگلومرای پلی‌ژنتیک در رده دوم مساحت قرار دارد (۴/۹٪). مخروط‌های آبرفتی قدیمی (Qt1)، تپه‌های

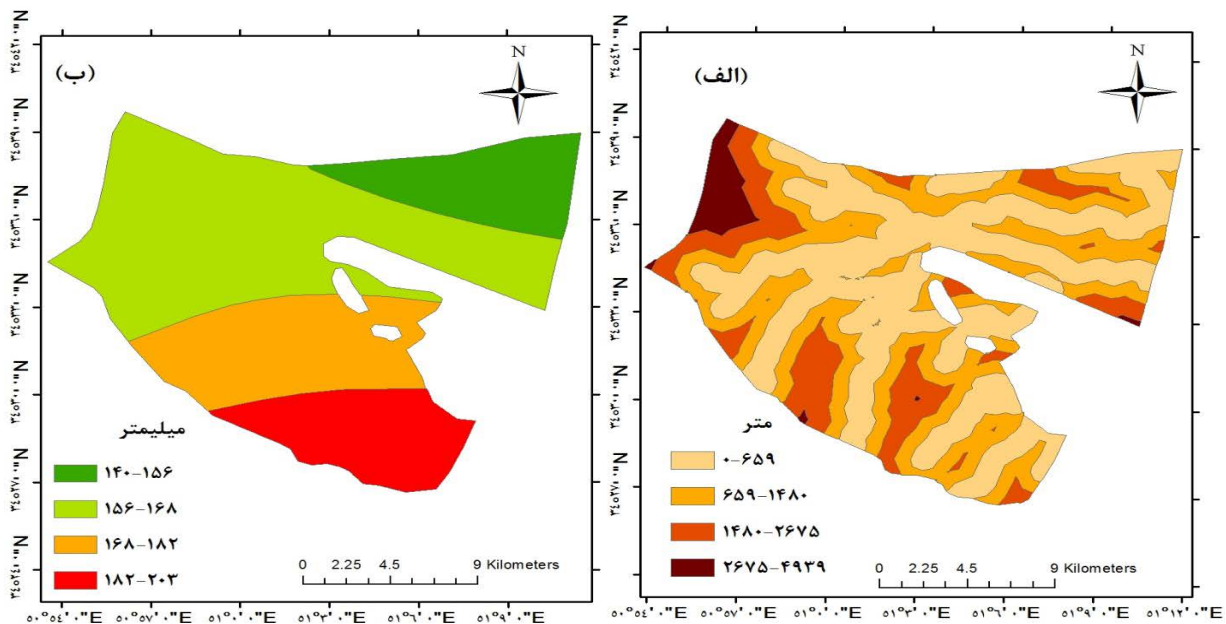


نگاره ۴: نقشه زمین‌شناسی (الف) و کاربری اراضی (ب) منطقه مورد مطالعه

متقابل عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی تعیین شده است (نگاره ۲) که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌شود عامل فاصله از آبراهه دارای کمترین وزن (۰/۸۳۳٪) و عامل زمین‌شناسی دارای بیشترین وزن است (۰/۲۵٪). عوامل بارش، شیب، خاک‌شناسی، کاربری اراضی نیز به ترتیب دارای وزن‌های ۰/۲۰۸۳٪، ۰/۱۶۶۷٪، ۰/۱۶۶۷٪ و ۰/۱۲۵٪ هستند (جدول ۲). سپس نقشه پتانسیل آب زیرزمینی از طریق هم‌پوشانی در ArcGIS 10.2 تهیه شده است. همان‌طور که در نگاره (۶-الف) نشان داده شده، منطقه مورد مطالعه با استفاده از این روش به چهار طبقه پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شده است که به ترتیب ۵/۱۶، ۱۹/۶۹، ۳۲/۰۶ و ۴۳/۰۹ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شوند (جدول ۳). در روش فازی نیز لایه‌های موضوعی بر اساس تابع خطی به فازی تبدیل شدند. سپس هم‌پوشانی لایه‌ها با استفاده از تابع گاما صورت پذیرفته است. نگاره (۶-ب) و جدول ۳ بیان‌گر آن است که طبقات خیلی کم، کم، متوسط و زیاد به ترتیب ۲۵/۶۱، ۱۸/۰۲، ۴۱/۴۰ و ۱۴/۹۷ درصد منطقه را در برمی‌گیرند.

آبراهه‌ها به دلیل اتصال هیدرولیکی بین آن‌ها و آبخوان مجاورشان باعث افزایش سطح آب زیرزمینی می‌شوند. بنابراین فاصله کم از نهرها نشان‌دهنده احتمال زیاد تغذیه آب زیرزمینی است و بالعکس. لذا در نگاره (۵-الف) فاصله از آبراهه به چهار کلاس ۰-۶۵۹، ۶۵۹-۱۴۸۰، ۱۴۸۰-۲۶۷۵ و ۲۶۷۵-۴۹۳۹ متر تقسیم شدند که به ترتیب ۳۴/۱۵، ۳۴/۷۲ و ۳/۸ درصد مساحت منطقه را پوشش می‌دهند (جدول ۱). بارندگی نیز یکی از عوامل مهم در تعیین میزان تغذیه آب زیرزمینی است (Sresto et al., 2021) که نقش کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی و کنترل تغذیه آب زیرزمینی ایفا می‌کند (Chaudhry et al., 2021). در نگاره (۵-ب) نقشه باران منطقه به چهار طبقه تفکیک شده است. طبقات ۱۵۶-۱۴۰، ۱۶۸-۱۵۶، ۱۸۲-۱۶۸ و ۲۰۳-۱۸۲ میلی‌متر به ترتیب ۱۴/۱۵، ۴۸/۹۲، ۲۱/۸۴ و ۱۵/۰۹ درصد مساحت منطقه را شامل می‌شوند که دارای رتبه یک الی چهار در پهنه‌بندی مناطق مستعد برای تغذیه آب زیرزمینی هستند (جدول ۱).

روش‌های عامل چندگانه تأثیرگذار و فازی. در روش عامل چندگانه تأثیرگذار، وزن هر لایه براساس رابطه



نگاره ۵: نقشه فاصله از آبراهه (الف) و بارش (ب) منطقه مورد مطالعه

جدول ۲: وزن‌دهی عوامل براساس روش عامل چندگانه تأثیرگذار

شماره	عامل	عامل با حداقل تأثیر	عامل با حداکثر تأثیر	نرخ‌های نسبی پیشنهادی	امتیاز پیشنهادی برای هر عامل
۱	بارش	۰/۵	۲	۲/۵	۲۰/۸۳
۲	شیب	۱	۱	۲	۱۶/۶۷
۳	فاصله از آبراهه	۰	۱	۱	۸/۳۳
۴	خاک	۰	۲	۲	۱۶/۶۷
۵	کاربری اراضی	۱/۵	۰	۱/۵	۱۲/۵
۶	زمین‌شناسی	۰	۳	۳	۲۵
	جمع			مجموع = ۱۲	

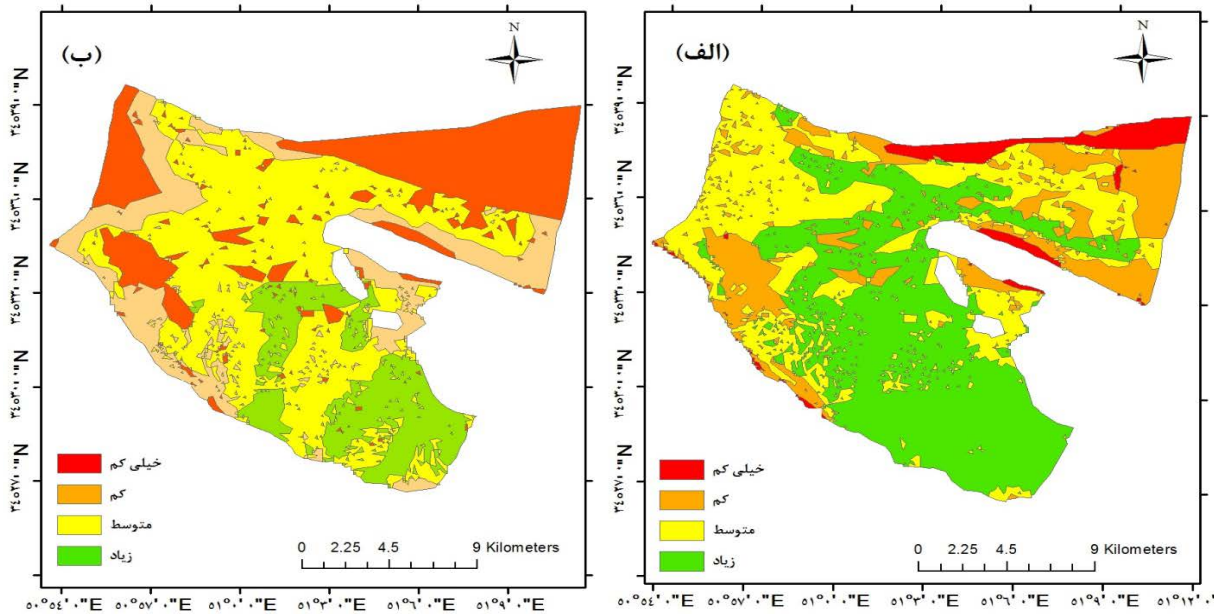
جدول ۳: درصد پتانسیل آب زیرزمینی طبقات دو مدل فازی و عامل چندگانه تأثیرگذار

مدل	درصد طبقه			
	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
عامل چندگانه تأثیرگذار	۵/۱۶	۱۹/۶۹	۳۲/۰۶	۴۳/۰۹
فازی	۲۵/۶۱	۱۸/۰۲	۴۱/۴۰	۱۴/۹۷

ارزیابی صحت مدل‌ها. به منظور محاسبه صحت مدل‌ها، هم‌چنین چاه‌های پیژومتری مشاهداتی نیز براساس طبقات خیلی کم و کم مدل‌های عامل چندگانه تأثیرگذار و فازی به کلاس نامناسب و متعاقباً طبقات متوسط و زیاد مدل‌ها به کلاس مناسب طبقه‌بندی شدند (نگاره ۷ الف و ب). هم‌چنین چاه‌های پیژومتری مشاهداتی نیز براساس عمق تا سطح ایستابی به دو گروه مناسب و نامناسب تقسیم شدند. در این تحقیق ۱۳ چاه در وضعیت مناسب و ۱۵ چاه در وضعیت نامناسب هستند. همان‌طور که در جدول

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)

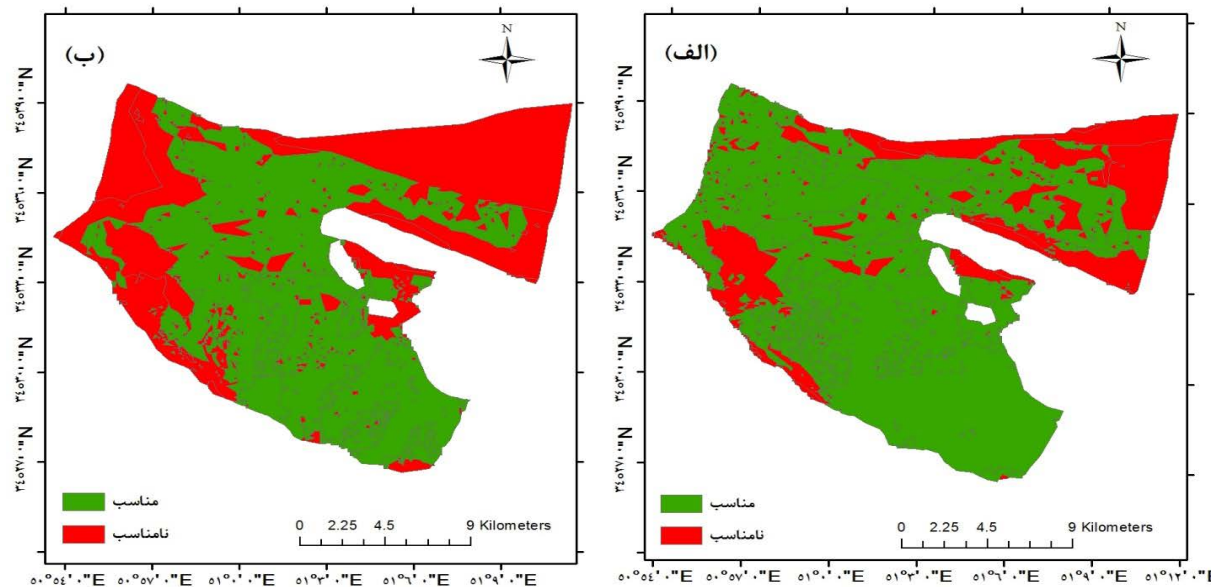
ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های... / ۱۰۱



نگاره ۶: نقشه چهار طبقه پتانسیل آب زیرزمینی براساس دو مدل عامل چندگانه تأثیرگذار (الف) و فازی (ب)

در وضعیت نامناسب طبقه‌بندی شده (TN) و هفت چاه به اشتباه در طبقه مناسب طبقه‌بندی شده‌اند (FN). در مدل فازی نیز ۱۰ چاه پیرومتری از مجموع ۱۳ چاه مشاهداتی به درستی در طبقه مناسب قرار گرفته‌اند (TP) و حال آن‌که ۳ چاه به درستی طبقه‌بندی نشده‌اند (FP). در این مدل از مجموع ۱۵ چاه نامناسب نیز، ۱۲ چاه به درستی در وضعیت

مشخص است در مدل عامل چندگانه تأثیرگذار ۱۲ چاه مشاهداتی از مجموع ۱۳ چاه مشاهداتی که دارای وضعیت مناسب هستند به درستی در طبقه مناسب مدل طبقه‌بندی شده‌اند (TP) و حال آن‌که یک چاه به درستی طبقه‌بندی نشده است (FP). همچنین پانزده چاه دارای وضعیت نامناسب هستند که در این مدل، هشت چاه از آن به درستی



نگاره ۷: نقشه طبقات مناسب و نامناسب پتانسیل آب زیرزمینی براساس دو مدل عامل چندگانه تأثیرگذار (الف) و فازی (ب)

به وسیله Kumari و همکاران در سال ۲۰۲۲ انجام شد عامل زمین شناسی مؤثرترین عامل در بین عوامل مختلف شناخته شد و در پژوهش Fagbohun در سال ۲۰۱۸ نیز زمین شناسی دومین عامل مؤثر در پتانسیل آب زیرزمینی برآورد شد. در پژوهش حاضر، بر اساس این مدل، بیشترین وزن به عامل زمین شناسی و کمترین وزن به فاصله از آبراهه تخصیص داده شده است. همچنین براساس نتایج این مدل، ۷۵/۱۵ درصد منطقه مورد مطالعه در طبقه مناسب قرار گرفته اند در حالی که ۲۴/۸۵ درصد منطقه جزء مناطق نامناسب برآورد شده است. نتایج کاربرد شاخص صحت نیز بیانگر درستی ۷۱/۴۲ درصدی مدل در برآورد نقشه پتانسیل آب زیرزمینی است. Rane و Jayaraj در سال ۲۰۲۲ صحت این مدل را ۸۱/۹۴ درصد برآورد نمودند و Thapa و همکاران نیز صحت این مدل را ۸۳/۰۳ درصد تخمین زدند. لذا می توان بیان نمود که نتایج کاربرد روش عامل چندگانه تأثیرگذار در این تحقیق، تحقیقات مشابه را تأیید می کند. در رویکرد فازی در GIS عوامل با استفاده از ارزشی که به وسیله توابع عضویت فازی مشخص می شود ارزش دهی می شوند. در مطالعه حاضر، تابع خطی برای ایجاد لایه شش عامل کنترل کننده به کار گرفته شد. تابع خطی فازی رابطه خطی بین حداقل و حداکثر ورودی های اختصاص داده شده توسط کاربر را ایجاد می کند. به مقادیری که کمتر از حداقل بودند، مقدار صفر اختصاص داده شد، در حالی که مقادیر بالاتر از حداکثر با مقدار یک مشخص شدند. عملیات هم پوشانی فازی عوامل را می توان با استفاده از پنج عملگر فازی AND، SUM، OR، PRODUCT و گاما انجام داد. در عملگر هم پوشانی AND حداقل مقدار ارزش لایه هایی که روی هم قرار می گیرند در لایه خروجی در نظر گرفته می شود و حال آن که در هم پوشانی OR در لایه خروجی، حداکثر مقدار ارزش لایه هایی که روی هم قرار می گیرند مدنظر قرار می گیرد. هم پوشانی SUM مشابه هم پوشانی OR بوده با این تفاوت که مقادیر بزرگ تر روی مقادیر کوچک تر اثر افزایشی دارد و هم پوشانی PRODUCT همانند هم پوشانی

نامناسب طبقه بندی شده (TN) و سه چاه به اشتباه در طبقه مناسب طبقه بندی شده اند (FN). در نهایت صحت مدل های عامل چندگانه تأثیرگذار و فازی به ترتیب ۷۱/۴۲ و ۷۸/۵۷ درصد محاسبه شده که به نظر می رسد مقادیر قابل قبولی هستند.

جدول ۴: مقایسه طبقه بندی دو مدل فازی و عامل چندگانه تأثیرگذار

مدل	TP	TN	FP	FN	درصد صحت (Accuracy)
عامل چندگانه تأثیرگذار	۱۲	۸	۱	۷	۷۱/۴۲
فازی	۱۰	۱۲	۳	۳	۷۸/۵۷

#### ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در سال های اخیر در بسیاری از مناطق، منابع آب زیرزمینی به دلایل تغییر اقلیم و بهره برداری بیش از حد مجاز به طور مداوم در حال کاهش هستند. لذا تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی جمع آوری بارش و حفظ آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک ضروری است. در این تحقیق که در بخشی از حوضه آبخیز کبار- فردو در استان قم انجام شده، شش عامل شیب، بارش، کاربری اراضی، زمین شناسی، خاک شناسی و فاصله از آبراهه برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته اند. از آنجایی که ارزیابی جداگانه تأثیر هر یک از عوامل بر پتانسیل آب زیرزمینی نمی تواند رابطه های واقعی را به تصویر بکشد، بنابراین لازم است از روشی هم چون روش عامل چندگانه تأثیرگذار استفاده شود که در آن همه عوامل ورودی با در نظر گرفتن تمام تعاملات ممکن بین هر عامل در نظر گرفته شده اند. در این روش از آنجایی که هر عامل درجه تأثیر متفاوتی بر وجود آب های زیرزمینی دارد، از یک رویکرد وزنی استفاده می شود تا همه عوامل به صورت تعاملی در نتیجه نهایی در نظر گرفته شوند. لذا از این مدل در تحقیقات متعددی استفاده شده و عوامل مؤثر بر این مبنا وزن دهی شده اند. به عنوان نمونه در تحقیقی که

### منابع و مآخذ

- ۱- اداره منابع طبیعی و آبخیزداری استان قم. ۱۳۸۹. گزارش زمین‌شناسی حوضه آبخیز پردیسان، قم، ایران. ۱۳۳ص.
- ۲- بهرامی، فروتن؛ حسینعلی، الهام، ۱۳۹۷. روش‌ها و فناوری‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک و ذخایر آب زیرزمینی، چاپ اول، تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی.
- ۳- پوراکبری، کلانتری، مصلح، عقدکی؛ سجاده، نصرالله، آرش، یاسر، ۱۳۹۹. پتانسیل یابی منابع آب کارستی با استفاده از RS.GIS و AHP، مطالعه موردی: تاقدیس‌های لیلی و کی نو در شمال شرق خوزستان. مهندسی منابع آب، دوره ۱۳، شماره ۴۵، صص. ۹۹-۱۱۲.
- ۴- تراپی‌پوده، یونسی، یوسفی، ارشیا، یاراحمدی؛ حسن، حجت‌الله، حسین، آزاده، یزدان، ۱۴۰۰. پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی منطقه لنجانان اصفهان با استفاده از مدل وزن شواهد، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، دوره ۱، شماره ۳، صص ۲۵-۳۷.
- ۵- جعفرزاده، ویس کرمی؛ مریم، ایرج، ۱۴۰۱. ارزیابی کارایی مدل‌های فردی و ترکیبی در شناسایی پهنه‌های مستعد نفوذپذیری (حوضه آبخیز ماریه- استان لرستان)، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، دوره ۲، شماره ۲، صص ۶۹-۸۶.
- ۶- رنجبری، واقعی، بیگدلی؛ محمدرضا، رمضان، 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، علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۱۰، شماره ۱، صص. ۱۵۹-۱۸۱.
- ۷- فتاحی؛ محمدمهدی. ۱۳۸۸. بررسی عوامل مؤثر در تخریب اراضی دشت مسیله قم، پنجمین همایش علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- ۸- قدرتی؛ مهران. ۱۳۹۳. آموزش کاربرد Arc-GIS 10.2 با تأکید بر مسائل مهندسی آب و محیط زیست، چاپ اول، تهران، انتشارات سیمای دانش.

AND بوده با این تفاوت که مقادیر کوچک‌تر اثر کاهشی روی داده‌های بزرگ‌تر دارند. در عمل‌گر هم‌پوشانی گاما وزنی به مقادیر عضویت اختصاص پیدا می‌کند و هم‌پوشانی تحت اثر همین وزن انجام می‌شود (قدرتی ۱۳۹۳). اجرای عمل‌گر گاما در این تحقیق نشان می‌دهد که ۵۶/۳۷٪ منطقه جزء منطقه مناسب برای تغذیه آب زیرزمینی و ۴۳/۶۳ درصد منطقه جزء مناطق نامناسب هستند. همچنین شاخص صحت محاسبه شده (۷۸/۵۷٪) کارایی قابل قبول این مدل را مشخص می‌کند. در تحقیقات انجام شده به وسیله Ahmad و همکاران (۲۰۲۰) و Singha و همکاران (۲۰۲۱) نیز صحت کاربرد روش فازی برای این منظور مورد تأیید قرار گرفته است. لذا نتیجه روش فازی در این تحقیق نیز تحقیقات قبلی را تأیید می‌کند. نتایج دو روش نشان می‌دهد که وضعیت آب زیرزمینی در بخش‌هایی از جنوب و بخش مرکزی منطقه مورد مطالعه مطلوب است ولی بخش‌های شمالی و غرب منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود شرایط نامناسب آب زیرزمینی نیازمند مدیریت صحیح و برنامه‌ریزی برای افزایش سطح آب زیرزمینی هستند. اگرچه نتایج این تحقیق کارایی هر دو مدل در منطقه مطالعاتی را تأیید می‌کند ولی پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی، اجرای مدل‌ها در مناطقی که دارای اقلیم متفاوت از شرایط منطقه مطالعاتی است صورت پذیرد. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی تهیه شده در این منطقه می‌تواند برای مشخص نمودن مکان‌های حساس برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی جمع‌آوری بارش و تغذیه آب زیرزمینی در راستای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

بدین وسیله از شرکت مدیریت منابع آب ایران که آمار مورد نیاز را در اختیار قرار دادند، تشکر و قدردانی می‌شود.

Sustainable Development 10, 100340.

18- Bui DT, Hoang ND, Martínez-Álvarez F, Ngo PTT, Hoa PV, Pham TD, Samui P, Costache R (2020) A novel deep learning neural network approach for predicting flash flood susceptibility: a case study at a high frequency tropical storm area. *Science Total Environment* 701, 134413.

19- Chaudhry, M.A.; Kumar, A.K.; Alam, K. Mapping of groundwater potential zones using the fuzzy analytic hierarchy process and geospatial technique. *Geocarto International* 2021, 36, 2323–2344.

20- Costache R, Bui DT (2020) Identification of areas prone to flash flood phenomena using multiple-criteria decision-making, bivariate statistics, machine learning and their ensembles. *Science Total Environment* 712:136492.

21- Echogdali, F. Z., Boutaleb, S., Kpan, R. B., Ouchchen, M., Bendarma, A., El Ayady, H., & Abioui, M. (2022). Application of fuzzy logic and fractal modeling approach for groundwater potential mapping in semi-arid Akka basin, Southeast Morocco. *Sustainability*, 14(16), 10205.

22- Etikala, B.; Golla, V.; Li, P.; Renati, S. Deciphering groundwater potential zones using MIF technique and GIS: A study from Tirupati area, Chittoor District, Andhra Pradesh, India. *HydroResearch* 2019, 1, 1–7.

23- Fagbohun, B. J. (2018). Integrating GIS and multi-influencing factor technique for delineation of potential groundwater recharge zones in parts of Ilesha schist belt, southwestern Nigeria. *Environmental earth sciences*, 77(3), 69.

24- Falah F, Ghorbani Nejad S, Rahmati O, Daneshfar M, Zeinivand H (2017) Applicability of generalized additive model in groundwater potential modelling and comparison its performance by bivariate statistical methods." *Geocarto international* 32, no. 10 (2017): 1069-1089.

25- Fildes SG, Bruce D, Clark IF, Raimondo T, Keane R, Batelaan O (2022) Integrating spatially explicit sensitivity and uncertainty analysis in a multi-criteria decision analysis-based groundwater potential zone model. *Journal of Hydrology*, 610, 127837.

26- Hasanuzzaman M, Mandal MH, Hasnine M, Shit PK (2022) Groundwater potential mapping using multi-

۹- کریمی، مسگری؛ مینا، محمد سعدی. ۱۴۰۱. استخراج عملکرد محل از محتواهای متنی کاربرتولید با استفاده از روش های یادگیری ماشین، اطلاعات جغرافیایی سپهر، دوره ۳۱، شماره ۱۲۴، صص. ۷-۱۹.

۱۰- مرادی زاده، شیرانی؛ مسیح، کورش. ۱۳۹۸. اولویت بندی و ارزیابی نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی در استان اصفهان، علوم آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۴، صص. ۴۲۷-۴۱۱.

۱۱- میرزاپور، حقی زاده؛ حافظ، علی؛ ۱۳۹۵. پتانسیل یابی آب های زیرزمینی حوضه آبخیز مادیان رود لرستان با استفاده از تجزیه و تحلیل شاخص هم پوشانی وزنی (WIOA)، هیدروژئولوژی، دوره یک، شماره ۲، صص ۸۳-۹۸.

۱۲- نسرین نژاد، رنگزن، کلاتری، صابری؛ نعمت اله، کاظم، نصراله، عظیم. ۱۳۹۳. پهنه بندی پتانسیل سیل خیزی حوضه آبریز باغان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، دوره ۵، شماره ۴، صص ۱۵-۳۴.

13- Acharya, T., & Nag, S. K. (2013). Study of groundwater prospects of the crystalline rocks in Purulia District, West Bengal, India using remote sensing data. *Earth Resources*, 1(2), 54–59.

14- Adeyeye, O.A.; Ikpokonte, E.A.; Arabi, S.A. GIS Based Groundwater Potential Mapping within Dengi Area, North Central Nigeria. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.003>.

15- Ahmad, I., Dar, M.A., Teka, A.H., Teshome, M., Andualem, T.G., Tehsome, A., Shafi, T., 2020. GIS and fuzzy logic techniques-based demarcation of groundwater potential zones: a case study from Jemma River basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, 103860.

16- Alrawi, I., Chen, J., & Othman, A. A. (2022). Groundwater Potential Zone Mapping: Integration of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) and GIS Techniques for the Al-Qalamoun Region in Syria. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(12), 603.

17- Arefin, R., 2020. Groundwater potential zone identification at Plio-Pleistocene elevated tract, Bangladesh: AHP-GIS and remote sensing approach. *Groundwater for*

techniques to evaluate groundwater potential zones of basaltic aquifer systems. *Environment, Development and Sustainability*, 24(2), 2315-2344.

34- Selvam, G., Banukumar, K., Srinivasan, D., Selvakumar, R., & Alaguraja, P. (2012). Identification of ground water potential zone in hard rock terrain—A case study from parts of Manapparai block Tamilnadu using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Advanced Remote Sensing & GIS*, 1(1), 8–18.

35- Senapati, U., & Das, T. K. (2022). GIS-based comparative assessment of groundwater potential zone using MIF and AHP techniques in Cooch Behar district, West Bengal. *Applied Water Science*, 12(3), 43.

36- Shao, Z., Huq, M. E., Cai, B., Altan, O., & Li, Y. (2020). Integrated remote sensing and GIS approach using Fuzzy-AHP to delineate and identify groundwater potential zones in semi-arid Shanxi Province, China. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104868.

37- Singha, S., Das, P., & Singha, S. S. (2021). A fuzzy geospatial approach for delineation of groundwater potential zones in Raipur district, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100529.

38- Sresto, M.A.; Siddika, S.; Haque, N.; Saroar, M. Application of fuzzy analytic hierarchy process and geospatial technology to identify groundwater potential zones in north-west region of Bangladesh. *Environ. Chall.* 2021, 5, 100214.

39- Thapa R, Gupta S, Guin S, Kaur H (2017) Assessment of groundwater potential zones using multi-influencing factor (MIF) and GIS: a case study from Birbhum district, West Bengal. *Applied Water Science*, 7(7): 4117-4131.

40- Zadeh L.A (1965) Fuzzy sets. *Inform Control*. 8: 338–353.

criteria decision, bivariate statistic and machine learning algorithms: evidence from Chota Nagpur Plateau, India. *Applied Water Science*, 12(4), 1-16.

27- Kainz W (2007) Fuzzy logic and GIS. Vienna: University of Vienna.

28- Kumari, S., Poddar, A., Kumar, N., & Shankar, V. (2022). Delineation of groundwater recharge potential zones using the modeling based on remote sensing, GIS and MIF techniques: a study of Hamirpur District, Himachal Pradesh, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 1759-1770.

29- Magesh N.S, Chandrasekar N, Soundranayagam J.P (2012) Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience frontiers*, 3(2):189-196.

30- Nhamo, L., Ebrahim, G. Y., Mabhaudhi, T., Mpandeli, S., Magombeyi, M., Chitakira, M., Magidi, J., Sibanda, M., 2020. An assessment of groundwater use in irrigated agriculture using multi-spectral remote sensing. *Parts A/B/C 115 102810 Physics and Chemistry of the Earth*.

31- Patra, S., Mishra, P., Mahapatra, S.C., 2018. Delineation of groundwater potential zone for sustainable development: a case study from Ganga Alluvial Plain covering Hooghly district of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process. *Journal of Cleaner Production*. 172, 2485–2502.

32- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Melesse, A. M. (2016). Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137, 360-372.

33- Rane NL, Jayaraj GK (2022) Comparison of multi-influence factor, weight of evidence and frequency ratio

---

## COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/)

---



