



شناسایی مناطق مستعد دارای منابع آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل سلسه مراتبی (مطالعه موردی دشت مشهد)

سید حامد حسینی راد^۱، علی عباسی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

aabbasi@um.ac.ir

خلاصه

رشد جمعیت دنیا و افزایش تقاضا برای منابع آبی، شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی را به جهت برداشت، مدیریت و تغذیه آبخوان بیش از پیش به یک امر ضروری تبدیل کرده است. مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی نیازمند تخمین کمی دقیق دارد که این مهم می‌تواند با به کار بستن اصول علمی و تکنیک‌های مدرن بدست آید. در پژوهش حاضر از یک مفهوم تلفیقی به وسیله سامانه اطلاعات مکانی (GIS)، سنجش از دور (RS) و تحلیل سلسه مراتبی (AHP) برای شناسایی مناطق مستعد آب زیرزمینی استفاده شده است. بدین منظور سه پارامتر مؤثر در وجود آب زیرزمینی در یک منطقه شامل: سنگ‌شناسی، بارندگی، ژئومورفولوژی، شیب، تراکم زهکشی، فاصله تا رودخانه، کاربری/پوشش زمین و تراکم خطواره در محیط GIS بصورت لایه‌های رستری آماده و متناسب با مقیاسه دودویی ساعتی و تشکیل ماتریس مقایسه زوجی به روش AHP، پارامترها وزندهی شدند. در نهایت با اعمال وزن‌ها به هر پارامتر، و با استفاده از تکنیک تلفیق وزن‌دار در GIS، لایه‌ها همپوشانی شده و منطقه مورد مطالعه به پنج ناحیه خیلی خوب (۳۳ درصد)، خوب (۱۷ درصد)، متوسط (۳۷ درصد)، ضعیف (۸ درصد) و خیلی ضعیف (۵ درصد) از جهت پتانسیل آب زیرزمینی طبقه بندی شد.

کلمات کلیدی: سامانه اطلاعات مکانی، سنجش از دور، تحلیل سلسه مراتبی، همپوشانی وزن‌دار، پتانسیل آب زیرزمینی

۱. مقدمه

آب‌های زیرزمینی در طول تاریخ جزء مهمترین منابع برای تأمین مصارف آب شیرین بوده که دستیابی به آن همواره از دغدغه‌های دیرینه بشر می‌باشد. همچنین توزیع ناهمگون زمانی و مکانی بارش در مناطقی مانند ایران بیش از پیش شناسایی و مدیریت منابع آب زیرزمینی را به یک امر حیاتی تبدیل کرده است. از طرفی دیگر شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب‌های زیرزمینی این امکان را میدهد که طرح‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی به شکل بهینه مکانیابی شوند. یکی از راه‌های شناسایی و دستیابی به منابع آب‌های زیرزمینی استفاده از داده‌های حاصل از سنجنده‌های ماهواره‌ای و ترکیب آن با سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌باشد که تاکنون تحقیقات گوناگونی در مورد شناسایی مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی با توجه به داده‌های سنجش از دور و تلفیق آن در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی صورت گرفته است. بخش اعظمی از این تحقیقات در مناطق مختلف هند انجام شده است، زیرا هند بزرگترین مصرف کننده آب‌های زیرزمینی در جهان بوده که سالانه حدود ۲۳۰ کیلومتر مکعب (بیش از یک چهارم مصرف جهانی) از ذخایر آب زیرزمینی را مصرف می‌کند [۱].

سلوام^۱ و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از تکنیک‌های RS، GIS و وزندهی به لایه‌ها با تکنیک فاکتور تأثیر^۲ توانستند داده‌های دریافتی از ماهواره IRS-۱C و توپوшит‌های نقشه برداری هند شامل: سنگ‌شناسی، شیب، کاربری زمین، سنگ‌واره، زهکشی، خاک و بارندگی را با یکدیگر ادغام کرده و به نقشه مناطق مستعد تغذیه آب‌های زیرزمینی در منطقه توتیکورین و تامیل نادو هند دست یابند [۲][۳].

^۱ Selvam

^۲ Influence Factor



الافتاح^۱ و همکاران (۲۰۲۱) توانستند ۹ پارامتر موثر در پتانسیل وجود آب‌های زیرزمینی شامل: سنگ‌شناسی، بارندگی، ژئومورفولوژی، شیب، تراکم زهکشی، خاک، کاربری/پوشش زمین، فاصله از رودخانه و تراکم خطواره در حوضه شط العرب را شناسایی کرده و با امتیاز بندی بوسیله ماتریس مقایسه زوجی در تحلیل سلسه مراتبی^۲ توانستند وزن نرمال شده نهایی لایه‌ها را بدست آورده و با ادغام آنها به نقشه نهایی مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی دست یابند [۴].

محمدنژاد و همکاران (۱۳۹۲) با ترکیب داده‌های سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و فاکتورهای چند تأثیره^۳ به مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی در محدوده شهرستان ارومیه دست یافتند. آنها با استفاده از پارامترهای مؤثر در وجود آب زیرزمینی شامل: تراکم شبکه زهکشی، تراکم خطواره‌ها، توپوگرافی، سنگ‌شناسی، بارش، کاربری اراضی و شیب و با وزن دهی به روش MIF^۴ و استفاده از الگوریتم همپوشانی وزندار به نقشه نهایی پتانسیل آب‌های زیرزمینی دست یافتند. نتایج آن‌ها نشان داد مناطق دارای حداکثر تراکم شبکه زهکشی و رسوبات کواترنری از پتانسیل بالای آب‌های زیرزمینی برخوردارند [۵].

رامین پاپی و همکاران (۱۳۹۷) با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل سلسه مراتبی فازی^۴ توانستند با وزندهی به پارامترهای مؤثر نظیر عمق و تغییرات تراز آب زیرزمینی، بارش، تراکم زهکشی، ارتفاع و شیب زمین، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، خصوصیات زمین شناسی و کاربری اراضی، مناطق مناسب جهت اجرای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی (مانند حوضچه نفوذی، تغذیه بوسیله ساخت ترانشه و چاه‌های تغذیه) را در استان تهران شناسایی کنند که در این میان مشخص شد خصوصیات هیدرولوژیکی مؤثرترین معیار در رسیدن به هدف تحقیق می‌باشد [۶].

چوهری^۵ و همکاران (۲۰۰۹) ادغام تکنیک‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و تصمیم‌گیری چند معیاره^۶ را برای شناسایی مناطق مناسب تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی در منطقه مدینپور غربی واقع در استان بنگال غربی در هند پیشنهاد دادند. آنها برای این پژوهش از تصویر سازی *IRS-ID* و داده‌های متعارف، که شامل لایه‌های اطلاعاتی ژئومورفولوژی، زمین شناسی، تراکم زهکشی، شیب و قابلیت هدایت آکیفر می‌باشد، استفاده کردند که با وزندهی لایه‌ها به روش تحلیل سلسه مراتبی و نرمالسازی اوزان، لایه‌ها را در محیط *GIS* ادغام کرده و به نقشه مناطق مناسب جهت تغذیه مصنوعی دست یافتند [۷].

ملکیان (۱۳۹۱) با پردازش داده‌های ماهواره‌ای به روش ترکیب تصویری، نسبت‌گیری باندی، تحلیل اصلی و فیلترهای مختلف توانست عوامل مؤثر نظیر نوع واحدهای سنگی، رسوبات، خطواره‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها، توپوگرافی زمین، شیب زمین و پوشش گیاهی منطقه را براساس وزن‌های مختلف امتیازدهی کرده و در سامانه اطلاعات جغرافیایی به روش‌های مجموع وزنی و فازی مانند: حاصلضرب جبری، حاصل جمع جبری و گاما تلفیق کند که در نهایت موفق شد بهترین مناطق از جهت پتانسیل منابع آب زیرزمینی در حوزه آبریز بسطام را مشخص کند [۸].

لطیف و همکاران (۱۳۹۲) توانستند از عواملی نظیر: شیب، نفوذپذیری سطحی، ضخامت لایه غیرقابل اشباع آبرفت، کیفیت شیمیایی آب، کاربری اراضی و زمین شناسی (که در دسترس بوده) و همچنین واحدهای شکل زمین (ژئومورفولوژی) و شبکه آبراه‌ها برای نتیجه‌گیری در وزندهی لایه‌ها و بدست آوردن مکان‌های مناسب تغذیه آبخوان در استان گلستان ایران استفاده کنند که در نهایت نتایج نشان داد مناسب‌ترین واحدهای زمین برای تغذیه آبخوان بترتیب عبارتند از: دشت‌های سیلابی، واحدهای دشت و نهشته‌های رودخانه‌ای [۹].

عزیزی و همکاران (۱۳۹۴) توانستند از روش کاماجو^۷ برای رسیدن به مناطق مستعد آب زیرزمینی در دشت بیرجند استفاده کنند. بدین منظور لایه‌های اطلاعاتی نظیر تراکم شبکه زهکشی، تراکم خطواره‌ها، توپوگرافی، سنگ‌شناسی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و شیب منطقه را براساس شاخص وزندار، وزندهی کرده و با ادغام آنها در محیط *GIS*، به نقشه تیپ‌بندی شده کیفی به لحاظ دسترسی به آب‌های زیرزمینی (شامل: خیلی خوب، متوسط، کم و خیلی کم) دست یابند. نتایج نشان داد مناطق دارای حداکثر تراکم شبکه زهکشی و تراکم خطواره‌ها و رسوبات کواترنری و مراتع با شیب و ارتفاع کم، از پتانسیل بالای آب زیرزمینی برخوردارند. در نهایت اطلاعات ۱۷ چاه موجود در منطقه اعتبار نتایج تحقیق را تأیید کرد [۱۰].

^۱ Allafta

^۲ Analytic hierarchy process

^۳ Multi Influence Factor (MIF)

^۴ Fuzzy AHP

^۵ Chowdhury

^۶ Multi-criteria decision making

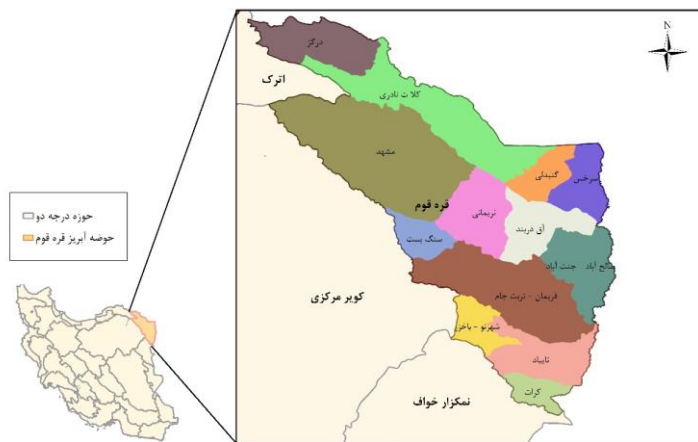
^۷ Kamaju

سراف^۱ و چادهری^۲ (۱۹۹۸) در منطقه‌ای از ویدیشیا^۳ واقع در استان مادها پرادش^۴ در هند با بکار بردن داده‌های *IRS-LISS-IP* و استفاده از *GIS* دو هدف را در پژوهش خود دنبال کردند: اول شناسایی مخزن ناشی شده از منابع آب زیرزمینی در مناطق صخره‌ای و دوم پیشنهاد مناطق مناسب برای مخزن آب‌های سطحی جهت تقویت و تغذیه آب‌های زیرزمینی در مکان‌هایی که آب‌های زیرزمینی وضعیت نامناسبی دارند [۱۱].

با توجه به پژوهش‌های مختلف صورت گرفته در زمینه مکانیابی مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی و همچنین مناطق با پتانسیل مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی، در این پژوهش به بررسی پارامترها و حصول بهترین روش وزندهی به پارامترهای مؤثر برای رسیدن به نقشه مناطق دارای پتانسیل آب‌های زیرزمینی در منطقه مطالعاتی (دشت مشهد در استان خراسان رضوی) خواهیم پرداخت.

۲. منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز مشهد یکی از ۱۳ زیرحوضه قره‌قوم (کشف رود) می‌باشد. مساحت این حوضه ۹۹۰۹/۴ کیلومتر مربع بوده، که ۳۳۵۱ کیلومتر مربع آن را دشت و ۶۵۵۸ کیلومتر مربع دیگر را کوهستان تشکیل می‌دهد [۱۲]. دشت مشهد یکی از مهمترین دشت‌های استان خراسان رضوی در موقعیت طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۵۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳ دقیقه شمالی قرار دارد (شکل ۱). قسمت اعظم دشت مشهد-نیشابور، جزء اقلیم سرد و خشک، قسمتی از دشت مشهد-قوچان، نیمه خشک و سرد و بخش کوچکی از بلندترین ارتفاعات رشته کوه‌های بینالود و هزار مسجد، جزء اقلیم مرطوب سرد قرار می‌گیرد. از مهمترین رودخانه‌های این دشت می‌توان به رودخانه کشف‌رود اشاره نمود که شاخه‌های مهم آن رادکان، طرهبه، جاغرق، دهبار، زشک گلستان و دولت‌آباد می‌باشند. منابع تأمین آب زیرزمینی دشت شامل چشمه، قنات، چاه عمیق و نیمه عمیق است [۱۲].



شکل ۱ موقعیت دشت مشهد در حوضه آبریز قره‌قوم واقع در ایران

۳. مواد و روش‌ها

در این پژوهش ابتدا پارامترهای مؤثر در وجود آب زیرزمینی بررسی شده و سپس به نحوه تولید لایه‌های اطلاعاتی پرداخته و در نهایت نحوه تلفیق آن‌ها با یکدیگر برای رسیدن به مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی شرح داده می‌شود. با بررسی پیشینه تحقیق، اکثر پژوهش‌ها پارامترهای مشترکی را برای رسیدن به نقشه مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی انتخاب کردند. لذا میتوان نتیجه گرفت که عوامل تأثیرگذار تقریباً یکسان می‌باشند ولی درجه اهمیت هر یک از آنها با دیگری متفاوت است. پارامترهای مؤثری که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل دو دسته کلی می‌شوند؛ دسته اول اطلاعات

^۱ Saraf

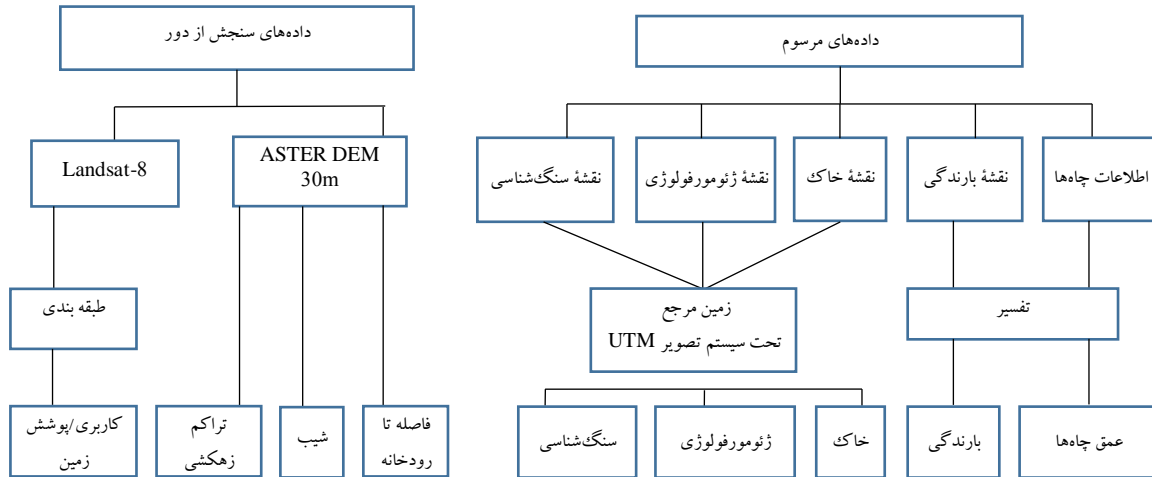
^۲ Choudhury

^۳ Vidishia

^۴ Madhya Pradesh

^۵ Linear Imaging Self-scanning Sensor

حاصل از سنجش از دور و دسته دوم اطلاعات حاصل از داده‌های مرسوم می‌باشد که نهایتاً لایه‌های اطلاعاتی نهایی شامل: سنگ شناسی، خاک، شیب، کاربری و پوشش زمین، تراکم زهکشی، تراکم خطواره، ژئومورفولوژی (ریخت شناسی)، بارندگی و فاصله تا رودخانه از آن‌ها بدست می‌آید (شکل ۲).



شکل ۲ آماده سازی لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز

مدل رقومی زمین و حوضه آبریز: برای مدلسازی منطقه مورد مطالعه باید حوضه آبریز مشخص و تمام داده‌های مورد نیاز برای این محدوده استخراج شود؛ لذا برای این امر ابتدا تصاویر رستری DEM از سنجنده آستر با رزولوشن ۳۰ متر دانلود شده و وارد نرم‌افزار ArcMap گردید. سپس تصاویر مختلف دریافتی موزاییک شده و به سیستم تصویر UTM انتقال یافت. برای جلوگیری از بوجود آمدن حفره‌ها و گودال‌های مصنوعی، از ابزار Fill استفاده شد که در نهایت خروجی آن یک لایه DEM بدون اشکال بوده که ادامه محاسبات رستری بر روی آن انجام شد. با استفاده از ابزار Calculator در ArcMap، خطوط زهکشی بدست آمد و یک نقطه بعنوان خروجی برای حوضه آبریز اختصاص یافت. در نهایت با استفاده از ابزار Watershed در ArcMap و با در نظر گرفتن جهت جریان و نقطه خروج حوضه آبریز به عنوان ورودی، مرز حوضه آبریز مشخص شد. سپس با توجه به مرز حوضه آبریز بدست آمده در محدوده مورد مطالعه، ادامه فرآیند جمع آوری و طبقه‌بندی داده‌ها انجام گرفت.

سنگ شناسی: با توجه به نقش مهمی که سنگ شناسی در پروسه‌های جریان و نفوذ آب به داخل زمین دارد، لذا دارای تأثیر اصلی بر روی وقوع و حرکت آب‌های زیرزمینی می‌باشد [۱۳]. هرچه تخلخل سنگ‌ها بیشتر باشد، میزان نفوذ آب به داخل خاک بیشتر بوده و لذا پتانسیل وجود آب‌های زیرزمینی نیز بالا خواهد بود. طبق دسته‌بندی انجام شده [۴]، دسته‌بندی سنگ‌ها از لحاظ میزان نفوذ آب به داخل آن از کم به زیاد به این ترتیب می‌باشد: تبخیری‌ها، سنگ‌های دگرگونی^۱، سنگ‌های پلوتونیک آذرین^۲، سنگ‌های آتشفشانی آذرین^۳، سنگ‌های رسوبی سیلیسی آواری^۴، سنگ‌های رسوبی مخلوط^۵، سنگ‌های رسوبی کربناته^۶ و رسوبات تجمیع نشده^۷.

خاک: خاک نقش مهمی در میزان نرخ نفوذ آب به داخل آکیرایفا می‌کند [۱۴]. اندازه ذرات، شکل و آرایش قرارگیری و سیستم منافذ ذرات خاک می‌تواند به میزان بالایی روی حرکت عمودی و جانبی آب تأثیر بگذارد [۱۵]. لایه اطلاعاتی خاک برای منطقه مطالعاتی از سایت سازمان غذا و

^۱ Evaporites
^۲ Metamorphic Rocks
^۳ Plutonic Igneous
^۴ Volcanic Igneous
^۵ Siliciclastic Sedimentary Rocks
^۶ Mixed Sedimentary Rocks
^۷ Carbonate Sedimentary Rocks
^۸ Unconsolidated Sediments



کشاورزی ملل متحد^۱ بدست آمد [۱۶]. بطور کلی خاک از سه بخش رس، سیلت و ماسه تشکیل شده است [۱۷] که با توجه به میزان وجود هریک از این موارد، خاک مورد نظر نامگذاری می شود.

شیب: شیب زمین آسایش آب را بطور محلی و منطقه ای به تصویر می کشد که تأثیر قابل توجهی در تغذیه آب های زیرزمینی به آکیفرها دارد [۱۸]. شیب زمین مستقیماً نفوذ آب سطحی را کنترل می کند [۱۹] بدین صورت که نشان می دهد در کدام مناطق روانابها فرصت بیشتری برای جذب به داخل خاک را دارد. طبیعتاً هرچه شیب زمین کمتر باشد سرعت رواناب نیز کمتر بوده و آب فرصت بیشتری برای جذب دارد و بالعکس [۲۰]. لذا شیب پارامتر تأثیر گذاری در پتانسیل یابی آب های زیرزمینی محسوب می شود. پس از آماده سازی مرز حوضه آبریز و لایه رستری که پیش تر توضیح داده شد، برای محاسبه شیب منطقه از ابزار Slope در Surface استفاده می کنیم.

کاربری/پوشش زمین: کاربری زمین/ پوشش زمین بر روی وجود آب زیرزمینی در یک منطقه تأثیر گذار است [۲۱]. زمین هایی که روی آنها ساختمان ساخته شده بعلت نبود یا کمبود سطح نفوذ پذیر، دارای نرخ جذب پایین تری است. در مقابل آن جنگل ها و زمین های زراعی اجازه نفوذ بیشتری به آب می دهند چرا که پوشش های گیاهی می توانند آب را حفظ کرده و نفوذ آب به داخل خاک را تسهیل کنند [۲۲]. از میان چندین شاخص پوشش گیاهی، یکی از پر کاربردترین آنها شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۲ می باشد [۲۳]. برای بدست آوردن این شاخص از تصاویر ماهواره لندست ۸ با پوشش ابری کمتر از ۱۰٪ استفاده شده است [۲۴]. این تصاویر ابتدا در نرم افزار ENVI موزاییک و یکپارچه شده و سپس برای محاسبه NDVI وارد محیط GIS می شود. شاخص NDVI همانطور که گفته شد جهت شناسایی و تعیین میزان پوشش گیاهی یک منطقه کاربرد دارد که برای استخراج آن از باند ۵ (نزدیک مادون قرمز)^۳ و باند ۴ (قرمز)^۴ ماهواره لندست ۸ مطابق رابطه (۱) استفاده می شود.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

که در آن NIR باند مادون قرمز و R باند قرمز می باشد. حاصل این شاخص عددی بین -۱ و +۱ خواهد بود که اعداد کمتر از ۰/۱ نشان دهنده صخره های باریک، ماسه و یا برف؛ اعداد بین ۰/۲ و ۰/۵ نشان دهنده پوشش گیاهی پراکنده مانند بوته زار و علف زار و مقادیر بالای این شاخص (بین ۰/۶ و ۰/۹) نشان دهنده تراکم بالای پوشش گیاهی نظیر جنگل ها و محصولات زراعی (در اوج رشدشان) می باشد [۲۵].

استفاده از شاخص NDVI یک روش طبقه بندی نظارت نشده می باشد که با تطبیق و کنترل آن با نقشه کاربری زمین برای منطقه مورد نظر، لایه اطلاعاتی LULC با دقت مناسب مشخص می شود. در صورت عدم دسترسی به اطلاعات کاربری و پوشش زمین، می توان از روش طبقه بندی نظارت شده استفاده کرد. این روش طبقه بندی دارای دقت بیشتری نسبت به روش طبقه بندی نظارت نشده بوده [۲۶] و برای انجام آن می توان از نرم افزار ERDAS IMAGINE بدین شکل بهره برد که ابتدا یک لایه پولیگونی برای هر محدوده مورد نظر^۵ انتخاب کرده و برای مشخص کردن کلاس مشخص آن کاربری، یک Signature File ساخته شود که در نهایت با پردازش اطلاعات، مناطق مشابه با کلاس بندی صورت گرفته مشخص می شود.

تراکم زهکشی: تراکم زهکشی شاخص خوبی برای پیش بینی نرخ نفوذ و مشخص کردن رابطه بین رواناب سطحی و نفوذ پذیری در یک زمین است [۲۰]. تراکم زهکشی مطابق رابطه (۲) برابر است با مجموع طول تمامی جریان های سطحی از هر رده تقسیم بر مساحت منطقه [۲۷].

$$DD = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{A} \quad (2)$$

که در آن L طول هر جریان سطحی، n تعداد جریان سطحی و A مساحت کل حوضه آبریز می باشد. با داشتن لایه خطی کلیه جریان های سطحی و با استفاده از ابزار Line Density در ArcMap تراکم زهکشی منطقه مطالعاتی بدست آمد. محدوده های با تراکم زهکشی بالا، نرخ تغذیه پایین تری دارند در حالیکه محدوده های با تراکم زهکشی پایین، نرخ تغذیه بالاتری دارند [۲۸].

خطواره: خطواره یک ویژگی خطی است که ویژگی های ساختاری زیرین مانند شکستگی ها، گسل ها، شکاف ها و سطوح ناپوستگی را بیان می کند. خطواره ها (بوسیله قطعاتی که به صورت مستطیلی یا خمیده متوسط چیده شده اند) نشان دهنده ویژگی های خطی ساده و پیچیده سازه ها هستند، و

^۱ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

^۲ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

^۳ Near Infrared (NIR)

^۴ Red

^۵ Area of Interest (AOI)

با آرایش ترکیب‌های مجاور متفاوت هستند و برخی از ویژگی‌های زیرسطحی را منعکس می‌کنند. نواحی با تراکم خطواره بالا نشان دهنده مناطق با نفوذپذیری بالا بوده و از این رو مناطق با پتانسیل بالا برای وجود آب زیرزمینی بحساب می‌آیند [۴]. تراکم زهکشی مطابق رابطه (۳) حاصل تقسیم مجموع خطواره‌ها بر مساحت منطقه می‌باشد.

$$LD = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_i}{A} \quad (3)$$

که در این رابطه L طول هر خطواره، n تعداد خطواره و A مساحت حوضه آبریز می‌باشد. برای بدست آوردن خطواره‌ها در این پژوهش ابتدا تصاویر ماهواره لندست ۸ وارد نرم‌افزار PCI-Geomatica شده و سپس با کمک ابزار Lineament Extraction خطواره‌ها بدست آمد. در نهایت با استفاده از ابزار Line Density در ArcMap تراکم خطواره‌های منطقه مورد مطالعه بدست آمد.

ژئومورفولوژی: واحدهای ژئومورفولوژیکی، ویژگی‌های فیزیکی سطح زمین و سطح نزدیک زیرزمینی، جنبه‌های مهمی را در تحقیقات هیدروژئولوژیکی، ارزیابی توپوگرافی و ترسیم منابع آب زیرزمینی نشان می‌دهند [۲۹]. ویژگی‌های ژئومورفیک زمین چهره‌های مختلف توسط اتفاقات دینامیکی فرآیندهای زمین‌شناسی مختلف از قبیل تغییرات دما، انجماد و ذوب، واکنش‌های شیمیایی، تکان‌های لرزه‌ای و حرکت آب و باد، ساخته می‌شود [۲۸]. فرسایش و فرآیند هوازدگی، تپه‌های برهنه^۳ را ایجاد می‌کند که مانند تپه‌های باقی مانده^۴، تپه‌های سازه‌ای^۵ و برآمدگی‌های خطی^۶، از لحاظ نفوذ آب‌های سطحی ضعیف است. دشت سر^۷ نیز سطح شیبدار ملایمی است که بین سطح تپه و دشت تشکیل شده و پتانسیل آب زیرزمینی ضعیفی دارد در حالی که دره پرشده^۸ به دلیل رسوب مواد انتقال یافته و هوازدگی در مناطق دره‌ای که عموماً توسط خطواره‌ها کنترل می‌شوند ایجاد شده و مانند دشت سنگ‌فرشی^۹ و سطوح آبی^{۱۰} جزء مناطق مناسب برای وجود آب زیرزمینی به حساب می‌آیند [۲۸]. واحدهای ژئومورفیک در این پژوهش از تصاویر مربوطه دیجیتال و زمین‌مرجع شده بدست آمد.

بارندگی: تغذیه آب‌های زیرزمینی توسط عوامل مختلفی کنترل می‌شود که در این میان بارندگی یک نقش کلیدی ایفا می‌کند؛ چراکه منبع اصلی تغذیه آب زیرزمینی می‌باشد [۳۰]. در این پژوهش ابتدا میانگین داده‌های بارندگی در یک بازه ۹ ساله برای ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه مورد مطالعه استخراج و داخل محیط GIS وارد گردید. سپس با روش درونیابی کریجینگ (ابزار Kriging در ArcMap)، لایه بارندگی در منطقه مورد مطالعه بدست آمد.

فاصله تا رودخانه: فاصله تا شبکه‌های هیدروگرافی در مطالعات هیدروژئولوژیکی مهم است زیرا وجود لایه‌های آبرفتی محلی اساساً در نزدیکی مسیر رودخانه‌ها به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک قرار دارد [۳۱]. مناطق نزدیک به رودخانه‌ها برای نفوذ مؤثر به داخل خاک و در نتیجه تغذیه آب‌های زیرزمینی مطلوب هستند. در مقابل، یافتن لایه‌های آبرفتی در نواحی فراتر از فاصله ۶۰۰ متری امری مشکل است [۳۲]. برای بدست آوردن فاصله تا رودخانه ابتدا فایل رستری جریان تجمعی که قبلاً محاسبه شده، با استفاده از ابزار Raster Calculator در فرمول زیر قرار داده شد:

$$Con("FlowACC.tif") > 4000000, 1$$

خروجی این فرمول یک لایه رستری بوده که رودخانه‌های اصلی در محدوده مطالعاتی را مشخص می‌کند [۴]. عدد ۴۰۰۰۰۰۰ یک مقدار تجربی بوده که بر مبنای لایه رستری جریان تجمعی^{۱۱} از پیش ساخته شده، تعیین می‌شود. لذا در نظر گرفتن مقادیر دیگر بر مبنای شرایط منطقه مطالعاتی (بخصوص شیب) می‌تواند صحیح باشد. پس از مشخص شدن رودخانه‌های اصلی، با استفاده از ابزار Raster to Polyline لایه خطی رودخانه اصلی نیز بدست آمد. در نهایت برای طبقه بندی فاصله تا رودخانه‌های اصلی از ابزار Euclidean Distance در ArcMap استفاده شد.

^۱ Landforms

^۲ Seismic shaking

^۳ Denudational hill

^۴ Residual hill

^۵ Structural hill

^۶ Linear ridge

^۷ Pediment

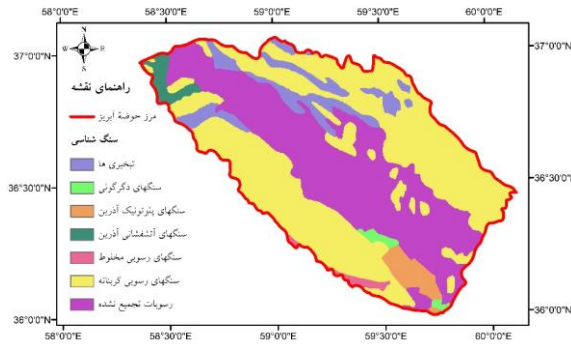
^۸ Valley fill

^۹ Pediplain

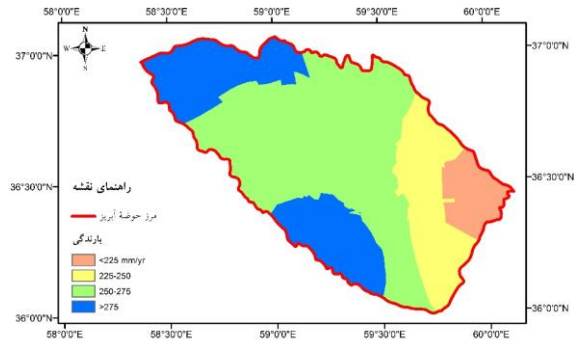
^{۱۰} Water bodies

^{۱۱} Flow Accumulation (in ArcMap)

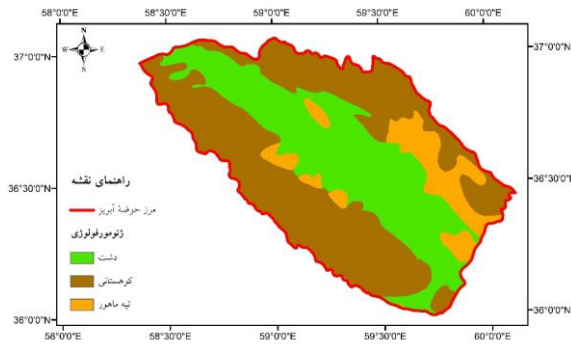
در نهایت لایه‌های اطلاعاتی رستری برای دشت مشهد مطابق شکل ۳ (الف-ط) آماده شده و باید برای رسیدن به مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی، طبق یک روش تلفیقی مناسب لایه‌ها همپوشانی شوند.



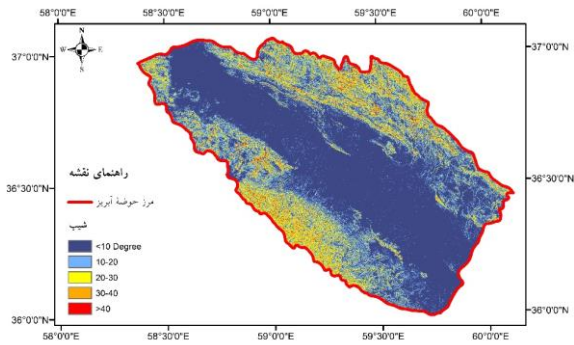
(الف)



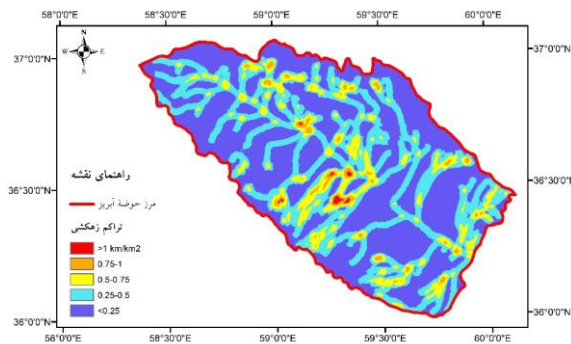
(ب)



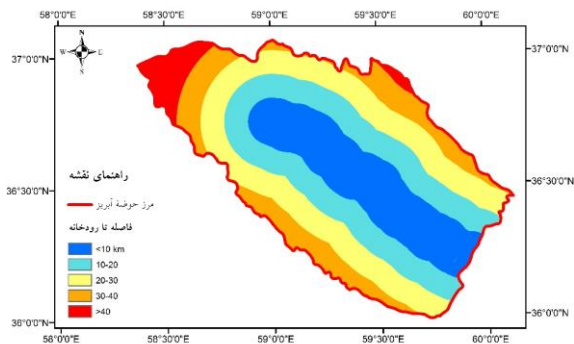
(ج)



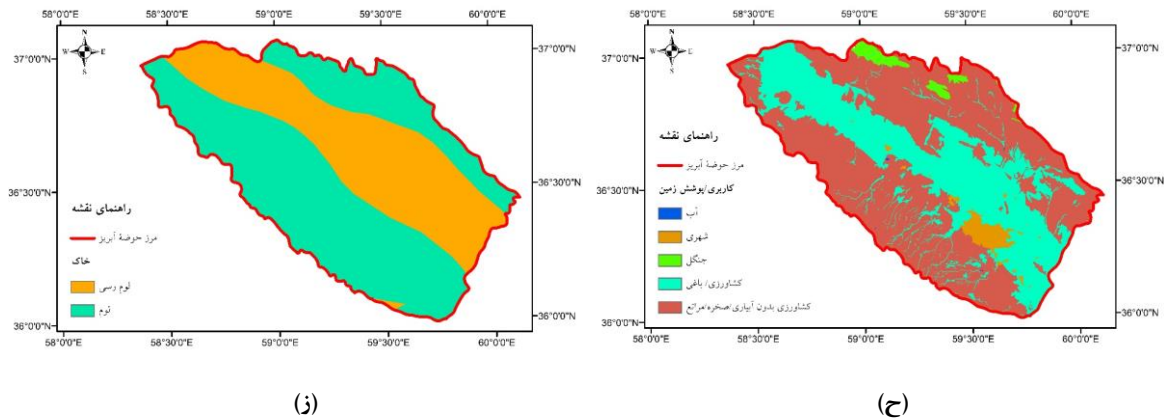
(د)



(ه)

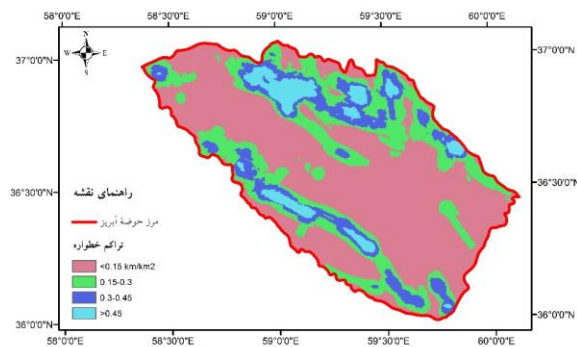


(و)



(ز)

(ح)



(ط)

شکل ۳ لایه های اطلاعاتی دشت مشهد (زیرمجموعه حوضه قره قوم): الف) سنگ شناسی؛ ب) بارندگی؛ ج) ژئومورفولوژی؛ د) شیب؛ ه) تراکم زهکشی؛ و) فاصله تا رودخانه؛ ز) خاک؛ ح) کاربری زمین؛ و ط) تراکم خطواره؛

تحلیل سلسه مراتبی و کاربرد آن در رسیدن به نقشه مناطق مستعد آب های زیرزمینی

در پژوهش پیش رو برای رسیدن به مناطق دارای پتانسیل آب های زیرزمینی از پایگاه داده های RS و GIS استفاده شده است. این داده ها باید توسط یک روش تلفیقی با یکدیگر ادغام شوند که یکی از این روش ها تحلیل سلسه مراتبی (AHP^۱) بوده که استفاده از آن نیازمند شواهد محکم می باشد [۳۳]. در این پژوهش، تکنیک AHP در سه مرحله اجرا شد [۳۴]. بدین صورت که ابتدا پارامترهای تأثیرگذار روی پتانسیل آب های زیرزمینی مشخص شده (شکل ۳)، سپس با استفاده از مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی (طبق جدول ۱) ماتریس مقایسه زوجی ساخته شده و در نهایت وزن های نسبی بدست آمده به هر پارامتر اختصاص داده شده و ماتریس سازگاری تخمین زده شد.

جدول ۱ مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی برای اهمیت پارامترها [۳۵] و [۳۶]

میزان اهمیت	توضیح
۱	اهمیت برابر
۳	اهمیت متوسط
۵	اهمیت قوی
۷	اهمیت خیلی قوی
۹	نهایت اهمیت (ارجحیت)
۲، ۴، ۶ و ۸	اهمیت بینابین دیگر اعداد

^۱ Analytic Hierarchy Process (AHP)

در این پژوهش اهمیت گذاری لایه‌های اطلاعاتی بر مبنای مطالعه پیشینه تحقیق و نظر کارشناسی صورت گرفت ([۳۷]، [۳۸]، [۳۹]، [۴۰] و [۴۱]). مطالعه پیشینه تحقیق نشان داد که پارامترهای مختلف، تأثیر متفاوتی بر روی پتانسیل آب‌های زیرزمینی می‌گذارد. بطور مثال، این بررسی نشان داد که پارامتر سنگ‌شناسی، نقش اصلی را در سیر تکامل و جریان آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کند که بدین خاطر بعنوان اولین لایه اطلاعاتی در اولین سطر و اولین ستون ماتریس مقایسه زوجی در این پژوهش قرار گرفت (جدول ۲).

جدول ۲ ماتریس مقایسه زوجی برای تحلیل سلسه مراتبی بر مبنای مکانیابی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی
***Lt* سنگ شناسی؛ *Rf* بارندگی؛ *Ge* ژئومورفولوژی؛ *Sl* شیب؛ *DD* تراکم زهکشی؛ *DR* فاصله تا رودخانه؛ *So* خاک؛ *LULC* کاربری / پوشش زمین و *LD* تراکم خطواره‌ها**

	<i>Lt</i>	<i>Rf</i>	<i>Ge</i>	<i>Sl</i>	<i>DD</i>	<i>DR</i>	<i>So</i>	<i>LULC</i>	<i>LD</i>	بردار ویژه نرمال (وزن نرمال)
<i>Lt</i>	۱	۲	۳	۳	۳	۲	۲	۴	۴	۲۴/۰۶٪
<i>Rf</i>	۱/۲	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۳	۳-۱/۳	۱۵/۰۵٪
<i>Ge</i>	۱/۳	۱/۳	۱	۱-۳/۷	۱-۳/۷	۲	۳	۳	۳-۱/۳	۱۴/۵۲٪
<i>Sl</i>	۱/۳	۱/۳	۲/۳	۱	۴/۵	۲	۴/۵	۲	۲	۹/۹۶٪
<i>DD</i>	۱/۳	۱/۳	۲/۳	۱-۱/۴	۱	۲	۱/۲	۲	۲	۹/۳۸٪
<i>DR</i>	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱	۳	۳-۱/۳	۲	۹/۰۲٪
<i>So</i>	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱-۱/۴	۲	۳	۱	۱-۱/۹	۱-۱/۴	۷/۹۴٪
<i>LULC</i>	۱/۴	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱/۲	۲/۳	۸/۹	۱	۲	۵/۶۰٪
<i>LD</i>	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۴/۵	۱	۱	۴/۴۷٪
<i>Sum</i>	۴	۷	۷/۹	۱۰/۴	۱۱/۷	۱۲/۵	۱۵	۱۸	۲۰/۹	
<i>Total</i>										۱۰۰٪

تخمین سازگاری ماتریس: مقدار ویژه (λ_{max}) یک رابطه برای واگرایی ماتریس از سازگاری را ارائه می‌کند. به عبارت دیگر یک ماتریس مقایسه زوجی فقط زمانی سازگار بحساب می‌آید که λ_{max} برابر یا بیشتر از تعداد پارامترها باشد (در این پژوهش ۹ پارامتر)؛ در غیر این صورت باید یک ماتریس جدید ساخته و مقادیر اصلاح شود. λ_{max} با ضرب مجموع هر یک از ستون‌های پارامترهای ماتریس مقایسه زوجی (*Sum*) در جدول (۲) در بردار ویژه (ستون ۱۱ در جدول ۲) بدست می‌آید.

جدول ۳ محاسبه مقدار ویژه اصلی (λ_{max})

***Lt* سنگ شناسی؛ *Rf* بارندگی؛ *Ge* ژئومورفولوژی؛ *Sl* شیب؛ *DD* تراکم زهکشی؛ *DR* فاصله تا رودخانه؛ *So* خاک؛ *LULC* کاربری / پوشش زمین و *LD* تراکم خطواره‌ها**

	جمع ستون‌ها	بردار ویژه	رتبه پارامتر
	(۱)	(۲)	(۱) × (۲)
<i>Lt</i>	۴	۰/۲۴	۰/۹۶
<i>Rf</i>	۷	۰/۱۵	۱/۰۵
<i>Ge</i>	۷/۹	۰/۱۵	۱/۱۴
<i>Sl</i>	۱۰/۴	۰/۱۰	۱/۰۴
<i>DD</i>	۱۱/۷	۰/۰۹	۱/۱۰
<i>DR</i>	۱۲/۵	۰/۰۹	۱/۱۳
<i>So</i>	۱۵	۰/۰۸	۱/۱۹



LULC	۱۸	۰/۰۶	۱/۰۱
LD	۲۰/۹	۰/۰۴	۰/۹۳
Sum (λ_{max})			۹/۵۵۸

مقدار ویژه برای ماتریس ۹ در ۹ تشکیل شده، بدست آمد. حال وزن‌های نرمال شده به وسیله محاسبه نسبت سازگاری (CR) برای سازگاری تأیید می‌شود. وزن‌های اختصاص داده شده فقط زمانی سازگار خواهند بود که نسبت سازگاری برابر و یا کمتر از ۱۰٪ باشد؛ در غیر این صورت وزن‌ها باید در جهت کاهش ناسازگاری مجدداً ارزیابی و تخمین زده شود [۳۶]. برای محاسبه نسبت سازگاری ابتدا باید شاخص سازگاری (CI) مطابق رابطه (۴) محاسبه شود.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

که در آن λ_{max} مقدار ویژه و n تعداد پارامترها می‌باشد. بنابراین CI در این پژوهش برابر خواهد بود با:

$$CI = \frac{9.558 - 9}{9 - 1} = 0.0699$$

سپس نسبت سازگاری (CR) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI'} \quad (5)$$

که در آن RI شاخص تصادفی بوده و متناسب با تعداد فاکتورها (n) از جدول ۴ بدست می‌آید. در این پژوهش با توجه به اینکه تعداد پارامترها ۹ عدد می‌باشد، RI برابر ۱/۴۵ خواهد بود. بنابراین CR به شکل زیر محاسبه خواهد شد:

$$CR = \frac{0.0699}{1.45} = 0.048 = 4.8\%$$

جدول ۴ شاخص نسبی (RI) برای مقادیر مختلف n

n	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
RI	۰/۵	۰/۸	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۴	۱/۴

شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب‌های زیرزمینی

شاخص پتانسیل آب‌های زیرزمینی ($GWPI$) یک مقدار بدون واحد بوده که نواحی دارای پتانسیل آب زیرزمینی را در یک منطقه مشخص بیان می‌کند و می‌توان آن را طبق رابطه (۶) محاسبه کرد [۴۱].

$$GWPI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (W_j \times X_i) \quad (6)$$

که در آن W_j وزن نرمال شده پارامتر j ام، X_i وزن دسته i ام هر پارامتر، m تعداد پارامتر و n تعداد دسته بندی یک پارامتر مشخص می‌باشد. برای هر شبکه، شاخص پتانسیل آب‌های زیرزمینی مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$GWPI = Lt_w Lt_r + Rf_w Rf_r + Ge_w Ge_r + Sl_w Sl_r + DD_w DD_r + DR_w DR_r + So_w So_r + LULC_w LULC_r + LD_w LD_r \quad (7)$$

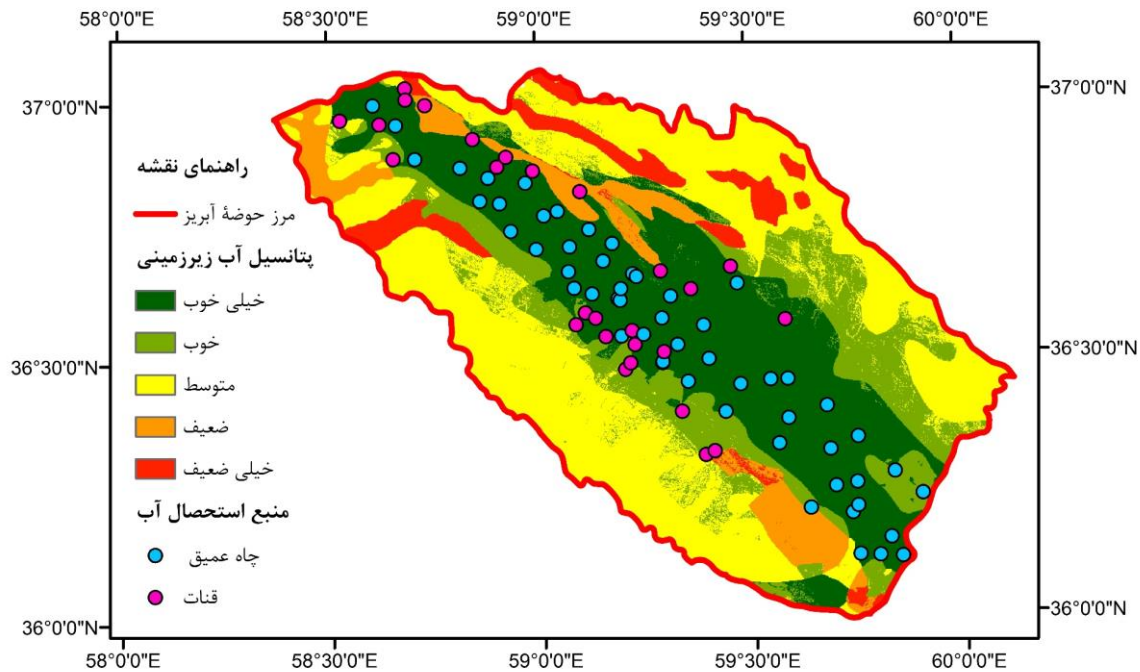
که در آن Lt سنگ شناسی؛ Rf بارندگی؛ Ge ژئومورفولوژی؛ Sl شیب؛ DD تراکم زهکشی؛ DR فاصله تا رودخانه؛ So خاک؛ $LULC$ کاربری/پوشش زمین و LD تراکم خطواره‌ها می‌باشد. علامت w نشان دهنده وزن لایه (ستون ۴ در جدول ۵) و علامت r نشان دهنده رتبه دسته‌بندی هر لایه (ستون ۵ در جدول ۵) می‌باشد.

^۱ Groundwater potential index (GWPI)

جدول ۵ دسته بندی پارامترهای مؤثر در پتانسیل آب‌های زیرزمینی

پارامتر	دسته بندی	پتانسیل آب زیرزمینی	وزن پارامتر	امتیاز دسته
سنگ شناسی	رسوبات تجمیع نشده	خیلی زیاد	۲۴	۲۴
	سنگهای رسوبی کربناته	زیاد		۲۲
	سنگهای رسوبی مخلوط	زیاد		۱۸/۵
	سنگهای رسوبی سیلیسی آواری	متوسط		۱۵
	سنگ‌های آتشفشانی آذرین	کم		۱۱/۵
	سنگ‌های پلوتونیک آذرین	کم		۸
بارندگی (میلیمتر در سال)	سنگ‌های دگرگونی	کم	۱۵	۴/۵
	تبخیری‌ها	خیلی کم		۱
	>۲۲۵	زیاد		۱۲
	۲۵۰-۲۲۵	زیاد		۱۳
	۲۷۵-۲۵۰	خیلی زیاد		۱۴
ژئومورفولوژی	<۲۷۵	خیلی زیاد	۱۴	۱۵
	دشت‌ها	خیلی زیاد		۱۴
	دره‌ها	خیلی زیاد		۱۴
	تپه‌های شنی (شیب کم)	زیاد		۱۰
	تپه‌های موجی	متوسط		۶
	پرنگاه‌ها (با شیب تند)	خیلی کم		۱
شیب (درجه)	<۷	خیلی زیاد	۱۰	۱۰
	۱۴-۷	زیاد		۷
	۲۱-۱۴	متوسط		۵
	۲۸-۲۱	کم		۳
	>۲۸	خیلی کم		۱
تراکم زهکشی (km/km ²)	<۰/۲۵	خیلی زیاد	۹	۹
	۰/۲۵-۰/۵	زیاد		۷
	۰/۵-۰/۷۵	متوسط		۵
	۰/۷۵-۱	کم		۳
	>۱	خیلی کم		۱
فاصله تا رودخانه (km)	<۱۰	خیلی زیاد	۹	۹
	۲۰-۱۰	زیاد		۷
	۳۰-۲۰	متوسط		۵
	۴۰-۳۰	کم		۳
	>۴۰	خیلی کم		۱
خاک	شن	خیلی زیاد	۸	۸
	شن لومی	خیلی زیاد		۷
	لوم شنی	خیلی زیاد		۶
	لوم	زیاد		۵
	لوم رسی	متوسط		۴
	رس شنی	کم		۳
	رس سیلتی	خیلی کم		۲
	رس	خیلی کم		۱
کاربری زمین / پوشش زمین	آب‌های آزاد / زمین باناقی	خیلی زیاد	۶	۶
	کشاورزی با آبیاری	زیاد		۵
	زمین‌های بایر	زیاد		۴
	کشاورزی بدون آبیاری (دیم) / جنگل‌ها	متوسط		۳
	مراغ / علفزار / چمنزار / بوته‌زار	کم		۲
	مناطق شهری / جاده‌ها	خیلی کم		۱
تراکم خطواره (km/km ²)	<۰/۱۵	کم	۴	۱
	۰/۱۵-۰/۳	متوسط		۲
	۰/۳-۰/۴۵	زیاد		۳
	>۰/۴۵	خیلی زیاد		۴

در نهایت نقشه مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی مطابق شکل ۴ بدست آمد. طبق این نقشه ۳۳ درصد منطقه دارای پتانسیل خیلی خوب، ۱۷ درصد منطقه دارای پتانسیل خوب، ۳۷ درصد منطقه دارای پتانسیل متوسط، ۸ درصد منطقه دارای پتانسیل ضعیف و ۵ درصد منطقه دارای پتانسیل خیلی ضعیف از لحاظ وجود آب زیرزمینی قرار گرفت. همچنین همانطور که دیده می شود طبق اطلاعات موقعیت چاه ها و قنات [۴۲]، بخش قابل توجهی از منابع استحصال آب زیرزمینی در ناحیه خیلی خوب از لحاظ پتانسیل آب زیرزمینی قرار گرفت که نشان دهنده صحت بالای نتایج پژوهش در به کار بردن تکنیک های سنجش از دور، GIS و AHP در پتانسیل یابی آب های زیرزمینی می باشد.



شکل ۴ نقشه مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی در دشت مشهد

۴. نتیجه گیری

این پژوهش نشان داد که امروزه با استفاده از ابزار موجود در جمع آوری داده های سنجش از دور و شیوه های تصمیم گیری چند معیاره می توان روش های پتانسیل یابی کم هزینه تری نسبت به روش های سنتی ارائه کرد که از دقت مطلوبی برخوردار بوده و در زمینه های مختلف از قبیل مدیریت منابع آبی و شناسایی مناطق مناسب جهت احداث چاه های برداشتی و تغذیه ای، استفاده کرد. همچنین بواسطه مطالعه گسترده پژوهش های مرتبط انجام شده در خصوص پارامترها و ضرایب پیشنهادی در خصوص مکانیابی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی، فاکتورهای دخیل در وجود آب زیرزمینی به مراتب تکمیل تر و استفاده از آن برای اکثر شرایط اقلیمی و جغرافیایی مختلف فراگیرتر شده است.

۵. مراجع

- [1] A. Groundwater, "Deep Wells and Prudence :," *World Bank Rep.*, ۲۰۱۰, ۱۲۰, ص.
- [2] S. Selvam, N. S. Magesh, S. Chidambaram, M. Rajamanickam, و M. C. Sashikkumar, "A GIS based identification of groundwater recharge potential zones using RS and IF technique: a case study in Ottapidaram taluk, Tuticorin district, Tamil Nadu," *Environ. Earth Sci.*, ۳۷۸۵-، ج ۷، صص ۲۰۱۵، ۳۷۹۹.
- [3] S. Selvam, F. A. Dar, N. S. Magesh, C. Singaraja, S. Venkatramanan, و S. Y. Chung, "Application of remote sensing and GIS for delineating groundwater recharge potential zones of Kovilpatti Municipality, Tamil Nadu using IF technique," *Earth Sci. Informatics*, ۱۳۷-۱۵۰، ج ۹، ش ۲، صص ۲۰۱۶.



- [4] H. Allafta, C. Opp, و S. Patra, "Identification of groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques: A case study of the shatt Al-Arab Basin," *Remote Sens.*, ج ۱, ش ۱, صص ۱-۲۸, ۲۰۲۱.
- [5] و. محمدنژاد آروق, ص. اصغری, و ب. گل محمدزاده, "تهیه نقشه مناطق مستعد آبهای زیرزمینی با استفاده از GIS و MIF مطالعه موردی: شهرستان ارومیه," *پژوهش های ژئومورفولوژی کمی*, ج ۳, صص ۴۵-۵۸, ۱۳۹۲.
- [6] ر. پاپی, س. حمزه, و م. سلیمانی, "مکان یابی مناطق مستعد تغذیه مصنوعی آب های زیرزمینی با روش Fuzzy AHP در استان تهران," *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*, ج ۱۲, ش ۱, صص ۲۸۲-۲۹۷, ۱۳۹۹.
- [7] A. Chowdhury, M. K. Jha, و V. M. Chowdary, "Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques," *Environ. Earth Sci.*, ج ۵۹, ش ۶, صص ۱۲۰۹-۱۲۲۲, ۲۰۱۰.
- [8] ع. ملکیان, ح. آقاچانی, و پ. ضیائیان, "تهیه نقشه پتانسیل مطلوب منابع آب زیر زمینی حوزه آبریز بسطام," *دانشگاه صنعتی شاهرود*, ۱۳۹۱.
- [9] ش. لطیف, س. ع. المدرسی, و ص. آرخی, "پتانسیل یابی مناطق مناسب جهت تغذیه سفره های آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور سیستم اطلاعات جغرافیایی و فنون تصمیم گیری چند معیاره (مطالعه موردی حوضه گرگان رود استان گلستان)," *دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد*, ۱۳۹۲.
- [۱۰] ا. عزیزی, ع. دهاوری, و م. آذری, "شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از داده های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در دشت بیرجند," *زابل*, ۱۳۹۴.
- [11] A. K. Saraf و P. R. Choudhury, "Integrated remote sensing and gis for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites," *Int. J. Remote Sens.*, ج ۱۹, ش ۱۰, صص ۱۸۲۵-۱۸۴۱, ۱۹۹۸.
- [۱۲] م. اکبری, م. جرگه, و ح. مدنی سادات, "بررسی افت سطح آب های زیرزمینی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مطالعه موردی آبخوان دشت مشهد," *پژوهش های حفاظت آب و خاک*, ج ۱۶, ش ۴, صص ۶۵-۶۶, ۱۳۸۸.
- [13] A. D. Tolche, "Groundwater potential mapping using geospatial techniques : a case study of Dhungeta-Ramis sub- basin , Ethiopia," *Geol. Ecol. Landscapes*, ج ۰۰, ش ۰۰, صص ۱-۱۶, ۲۰۲۰.
- [14] S. Anbazhagan, S. M. Ramasamy, و S. Das Gupta, "Remote sensing and GIS for artificial recharge study, runoff estimation and planning in Ayyar basin, Tamil Nadu, India," *Environ. Geol.*, ج ۴۸, ش ۲, صص ۱۵۸-۱۷۰, ۲۰۰۵.
- [15] A. V. Hans Gebhardt, Rüdiger Glaser, Ulrich Radtke, Paul Reuber, *geography Physical Geography and Human Geography*, ویرایش ۳, Springer Berlin Heidelberg, ۲۰۲۰.
- [16] FAO, "THE DIGITAL SOIL MAP OF THE WORLD," *FAO/UNESCO*, 2003.
- [17] "Soil Texture Calculator," *United States Department of Agriculture*. [برخط]. Available at: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167.
- [18] M. Gupta و P. K. Srivastava, "Integrating GIS and remote sensing for identification of groundwater potential zones in the hilly terrain of Pavagarh, Gujarat, India," *Water Int.*, ج ۳۵, ش ۲, صص ۲۳۳-۲۴۵, ۲۰۱۰.
- [19] I. Satapathy و T. H. Syed, "Characterization of groundwater potential and artificial recharge sites in Bokaro District, Jharkhand (India), using remote sensing and GIS-based techniques," *Environ. Earth Sci.*, ج ۷۴, ش ۵, صص ۴۲۳۲-۴۲۱۵, ۲۰۱۵.
- [20] G. Kanagaraj, S. Suganthi, L. Elango, و N. S. Magesh, "Assessment of groundwater potential zones in Vellore district, Tamil Nadu, India using geospatial techniques," *Earth Sci. Informatics*, ج ۱۲, ش ۲, صص ۲۱۱-۲۲۳, ۲۰۱۹.
- [21] M. Park, M. Park, و C. City, "Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US," *Water Resour. Res.*, ج ۳۳, ش ۱, صص ۱۵۷۷-۱۵۹۳, ۲۰۰۵.



- [22] USGS, "Infiltration and the Water Cycle." [برخط]. Available at: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/infiltration-and-water-cycle?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects.
- [23] Remote Sensing Phenology, "NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology," *United States Geological Survey*, ۲۰۱۸. [برخط]. Available at: <https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/ndvi-foundation-remote-sensing-phenology#overview>.
- [24] NASA, "EARTH DATA." [برخط]. Available at: <https://search.earthdata.nasa.gov>.
- [25] Remote Sensing Phenology, "NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology," *United States Geological Survey*, 2018. .
- [26] D. I. Enderle, R. C. Weih Jr, R. C. Jr, D. IMenderle, و R. C. WeihJr, "Integrating Supervised and Unsupervised Classification Methods to Develop a More Accurate Land Cover Classification," *J. Ark. Acad. Sci.*, ۲۰۰۵, ۱۰ ص, ۵۹ ج.
- [27] R. A. Wooding, "A hydraulic model for the catchment-stream problem. III. Comparison with runoff observations," *J. Hydrol.*, ۱۹۶۶, ۳۷-۲۱ صص, ۴ ج.
- [28] S. P. Rajaveni, K. Brindha, و L. Elango, "Geological and geomorphological controls on groundwater occurrence in a hard rock region," *Appl. Water Sci.*, ۲۰۱۷, ۱۳۸۹-۱۳۷۷ صص, ۷ ش, ۳ ج.
- [29] J. Krishnamurthy و G. Srinivas, "Role of geological and geomorphological factors in ground water exploration: A study using irs liss data," *Int. J. Remote Sens.*, ۱۹۹۵, ۲۶۱۸-۲۵۹۵ صص, ۱۶ ش, ۱۴ ج.
- [30] Y. V. K. Reddy و D. S. V. Lakshmi, "Identification of Groundwater Potential Zones Using Gis and Remote Sensing," *Int. J. Pure Appl. Math.*, ۲۰۱۸, ۳۲۱۰-۳۱۹۵ صص, ۱۷ ش, ۱۱۹ ج.
- [31] K. Benjmel, F. Amraoui, S. Boutaleb, M. Ouchchen, A. Tahiri, و A. Touab, "Mapping of groundwater potential zones in crystalline terrain using remote sensing, GIS techniques, and multicriteria data analysis (Case of the ighrem region, Western Anti-Atlas, Morocco)," *Water (Switzerland)*, ۲۰۲۰, ۲ ش, ۱۲ ج.
- [32] D. D. Moghaddam, M. Rezaei, H. R. Pourghasemi, Z. S. Pourtaghie, و B. Pradhan, "Groundwater spring potential mapping using bivariate statistical model and GIS in the Taleghan Watershed, Iran," *Arab. J. Geosci.*, ۲۰۱۵, ۹۲۹-۹۱۳ صص, ۲ ش, ۸ ج.
- [33] P. H. S. Riad, M. Billib, A. A. Hassan, M. A. Salam, و M. N. El Din, "Application of the overlay weighted model and boolean logic to determine the best locations for artificial recharge of groundwater," *J. Urban Environ. Eng.*, ۲۰۱۱, ۶۶-۵۷ صص, ۲ ش, ۵ ج.
- [34] G. B. Lentswe و L. Molwalefhe, "Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, ۲۰۱۹, ۲۰۲۰, ۱۰۰۶۷۴ صص, ۲۸ ش, October ۲۰۱۹.
- [35] T. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, ویرایش ۱۲. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1980.
- [36] T. Saaty, "How to make a decision: The analytic hierarchy process?," *Eur. J. Oper. Res.*, ۲۶-۹ صص, ۱۹۹۰.
- [37] A. Arshad, Z. Zhang, W. Zhang, و A. Dilawar, "Mapping favorable groundwater potential recharge zones using a GIS-based analytical hierarchical process and probability frequency ratio model: A case study from an agro-urban region of Pakistan," *Geosci. Front.*, ۱۸۱۹-۱۸۰۵ صص, ۱۱ ش, ۵ ج, ۲۰۲۰.
- [38] V. Ajay Kumar, N. C. Mondal, و S. Ahmed, "Identification of Groundwater Potential Zones Using RS, GIS and AHP Techniques: A Case Study in a Part of Deccan Volcanic Province (DVP), Maharashtra, India," *J. Indian Soc. Remote Sens.*, ۲۰۲۰, ۵۱۱-۴۹۷ صص, ۳ ش, ۴۸ ج.
- [39] S. A. Naghibi, H. R. Pourghasemi, Z. S. Pourtaghi, و A. Rezaei, "Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran," *Earth Sci. Informatics*, ۲۰۱۵, ۱۸۶-۱۷۱ صص, ۱ ش, ۸ ج.



سیزدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۲۰ و ۲۱ اردیبهشت ۱۴۰۱

دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران



- [40] J. Mallick و نیگران، “Modeling Groundwater Potential Zone in a Semi-Arid Region of Aseer Using Fuzzy-AHP and Geoinformation Techniques,” *Water*, ۲۰۱۹, ۲۶۵۶, ص ۱۲, ج ۱۱, ش ۱۱.
- [41] E. Agarwal, R. Agarwal, R. D. Garg, و P. K. Garg, “Delineation of groundwater potential zone: An AHP/ANP approach,” *J. Earth Syst. Sci.*, ۲۰۱۳, ۸۹۸-۸۸۷, صص ۳, ج ۱۲۲, ش ۳.
- [42] “اطلاعات و آمار منابع استحصال آب زیرزمینی در دشت مشهد,” شرکت مدیریت منابع آب ایران, ۱۳۹۷. [برخط: <http://stu.wrm.ir/>].