

مکان‌یابی مناطق مستعد تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی با روش Fuzzy AHP در استان تهران

رامین پای‌^۱، سعید حمزه*^۲ و مسعود سلیمانی^۳

^۱ کارشناس ارشد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، ^۲ استادیار، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران و ^۳ کارشناس ارشد سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۳۰

چکیده

در چند دهه گذشته وقوع تغییرات اقلیم و به تبع آن، کاهش نزولات جوی و نیز افزایش جمعیت در مناطق مختلف کشور باعث افزایش تقاضای آب برای مصارف گوناگون نظیر آشامیدن، کشاورزی، صنعتی و غیره شده که این مهم سبب روی آوردن به بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و افت شدید آن شده است. تکنیک تغذیه مصنوعی به عنوان روشی برای جبران کسری حجم آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد. مکان‌یابی مناطق مناسب قبل از انجام عملیات تغذیه مصنوعی می‌تواند سبب بهبود بازده طرح و نتیجه‌بخش بودن آن شود. با نظر به معضلات موجود در ارتباط با کاهش منابع آب زیرزمینی در استان تهران، به‌دلیل افزایش روزافزون جمعیت و گسترش صنعت و کشاورزی، این مطالعه به شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در استان تهران پرداخته است. سامانه اطلاعات جغرافیایی می‌تواند در تعیین مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی با دقت بیشتر و زمان کمتر نتایج بهتری ارائه دهد. بدین منظور، در پژوهش حاضر از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش Fuzzy AHP برای وزن‌دهی و تلفیق معیارهای موثر در تغذیه مصنوعی نظیر عمق و تغییرات تراز آب زیرزمینی، بارش، تراکم زهکشی، ارتفاع و شیب زمین، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، خصوصیات زمین‌شناسی و کاربری اراضی استفاده شده است. پس از بررسی نظرات کارشناسان پیرامون مقایسه دودویی معیارها و تعیین ارجحیت آن‌ها نسبت به یکدیگر مطابق با روش AHP، خصوصیات هیدرولوژیکی به‌عنوان موثرترین معیار در رابطه با هدف پژوهش شناسایی شدند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که ۶/۲ درصد از مساحت کل منطقه برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی بسیار مناسب و ۱۵/۷۵ درصد مناسب است. مناطق بسیار مناسب عمدتاً در قسمت‌های شرقی استان قرار گرفته‌اند که دارای سازندهای زمین‌شناسی مناسب، فاصله کم تا رودخانه، کاربری غالب مرتعی و کشاورزی هستند و همچنین، سطح عمق آب زیرزمینی در آن‌ها بسیار پایین بوده و روند نزولی داشته است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، تحلیل سلسله مراتبی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، منابع آب، مناطق خشک و نیمه‌خشک

زیرزمینی از آن‌جا ناشی می‌شود که این منابع ۹۹

مقدمه

درصد از کل آب‌های شیرین قابل استفاده در جهان را

لزوم شناخت و بهره‌برداری بهینه از آب‌های

اطلاعات جغرافیایی به دلیل دارا بودن قابلیت‌هایی نظیر مدیریت و تجزیه و تحلیل داده‌های مکانی و غیرمکانی (توصیفی) از منابع مختلف می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد پشتیبان مدیران و تصمیم‌گیران ذی‌ربط قرار گیرد. در این راستا، تا کنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه تعیین مکان‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها در سطح جهانی و منطقه‌ای با رویکردهای گوناگون صورت گرفته است. در مطالعه‌ای Saraf و Choudhury (۱۹۹۸) با استفاده از فناوری سنجش از دور از طریق استخراج لایه‌های مختلفی نظیر کاربری اراضی، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی و تلفیق آن‌ها با سایر لایه‌های اطلاعاتی مانند شیب، مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌های زیرزمینی در ناحیه مادیا واقع در نواحی مرکزی هند را تعیین کردند.

Ramalingam و Santhakumar (۲۰۰۲) با استفاده از تکنیک‌های GIS و سنجش از دور و با در نظر گرفتن معیارهای ژئوفیزیکی (زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، خاک، شیب، کاربری اراضی، شدت رواناب و عمق آب زیرزمینی) به بررسی مناطق مناسب تغذیه مصنوعی پرداختند که در نهایت با توجه به شرایط زمین و پهنه‌بندی مطلوب، سازه‌های مناسب تغذیه مصنوعی مانند حوضچه نفوذی، تغذیه به‌وسیله ساخت ترانشه و چاه‌های تغذیه توصیه شد.

Shankar Ravi و Mohan (۲۰۰۵) با به‌کارگیری تکنیک‌های سنجش از دور و GIS و استفاده از لایه‌های اطلاعاتی شامل شیب، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، تراکم زهکشی و کاربری اراضی مکان مناسبی را برای پخش سیلاب شناسایی کردند و با برآزش مدل‌های ریاضی به این نتیجه رسیدند که مدل منطق فازی بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد. در پژوهشی دیگر، Chenini و همکاران (۲۰۰۹) برای نشان دادن توانایی GIS در پهنه‌بندی تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی مناطق خشک در حوضه ماکناسی تونس مرکزی، پهنه‌بندی را با تجزیه و تحلیل داده‌های بارندگی، رواناب حوضه، زمین‌شناسی سطحی و شرایط آبخوان انجام دادند که پیرو نتایج حاصل، شرایط هیدرودینامیکی آبخوان و در دسترس بودن منابع آب سطحی به‌عنوان

تشکیل می‌دهند (Mahdavi و همکاران، ۲۰۰۴). وقوع خشکسالی‌های متوالی در چند سال اخیر و کمبود شدید منابع آب سطحی، علاوه بر کاهش نفوذ از آب‌های سطحی به آبخوان‌ها، موجب افزایش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی نیز شده که در نهایت سبب افت سطح آب در آبخوان‌ها شده است. با افزایش جمعیت، تقاضا برای منابع آب قابل اطمینان افزایش یافته است. مناطقی که منابع آب زیرزمینی منبع تأمین آب اصلی است و میزان برداشت از این منابع بیش از تغذیه آن‌هاست، دارای وضعیتی بحرانی هستند (Kalantari و همکاران، ۲۰۱۰). چنین بهره‌برداری‌های بی‌ضابطه از منابع آب زیرزمینی می‌تواند موجبات وارد آمدن صدمات و تغییرات جبران‌ناپذیری به محیط زیست را فراهم کند. این مهم خصوصاً در دشت ورامین استان تهران به شکل شدیدی نمایان شده است. در این رابطه، جمع‌آوری آب‌های سطحی، تغذیه آب‌های زیرزمینی و تنظیم بهره‌برداری صحیح از آب، جزء مهمترین راهکارها در زمینه مدیریت منابع آب به‌شمار می‌روند (Ghahari و همکاران، ۲۰۰۷). تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی با استفاده از آب سطحی برای نفوذ در خاک و حرکت به سمت پایین از طریق ناحیه غیراشباع به سمت آبخوان صورت می‌گیرد (Bouwer، ۲۰۰۲). به‌طور کلی، تکنیک‌های گوناگونی برای تغذیه آب‌های زیرزمینی توسعه داده شده است که از میان آن‌ها می‌توان به روش تغذیه مستقیم سطحی، تغذیه مستقیم زیرسطحی و تغذیه غیرمستقیم اشاره کرد (Oakford، ۱۹۸۵). روش تغذیه مستقیم سطحی، یکی از کم هزینه‌ترین، ساده‌ترین و گسترده‌ترین تکنیک‌هایی است که برای تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها به‌کار گرفته می‌شود. تکنیک تغذیه مستقیم سطحی، که پخش سطحی سیلاب را شامل می‌شود، برای اراضی مسطح و وسیع و خاک‌هایی با نفوذپذیری بسیار بالا مفید است (O'Hare و همکاران، ۱۹۸۶). با توجه به هزینه‌بر و زمان‌بر بودن اجرای طرح تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، لزوم به‌کارگیری روش‌های نوین در خصوص تعیین مکان‌های مناسب قبل از عملیات اجرایی برای حصول نتایج بهتر و صرفه‌جویی در هزینه و زمان شدیداً احساس می‌شود. فناوری‌های نوین مانند سامانه

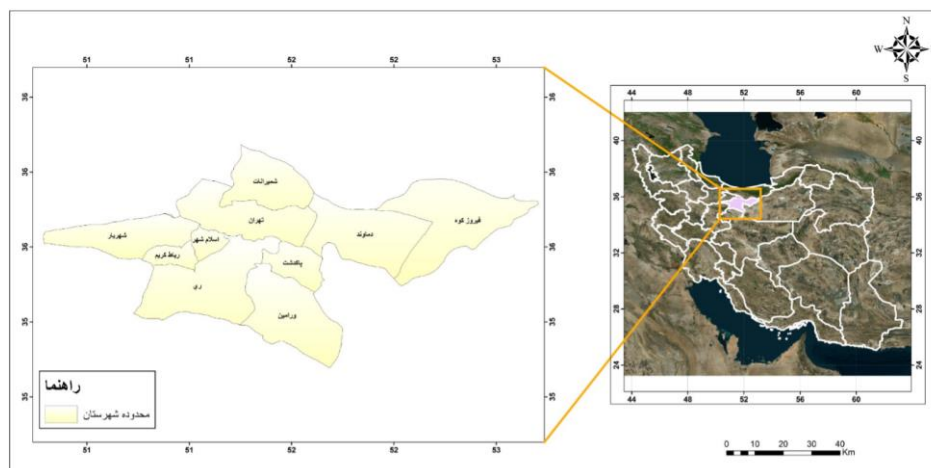
استفاده شود. روش‌های مختلف و پارامترهای بسیاری برای مکان‌یابی عرصه‌ها و بسترهای تغذیه مصنوعی وجود دارد. بر اساس نظر Dey و Ramacharan (۲۰۰۸) در هر روشی، باید اطلاعات حاصل از مطالعات مختلف به صورت تلفیقی و در کنار هم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته، منطقه مناسب تعیین شود. بدین منظور، در این پژوهش، پس از مرور مطالعات پیشین، کتب مرجع و نظر متخصصان ذی‌ربط، با در نظر گرفتن ۱۰ پارامتر موثر در تغذیه مصنوعی شامل عمق و تغییرات تراز آب زیرزمینی، بارش، تراکم زهکشی، ارتفاع و شیب زمین، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، انواع سازندهای زمین‌شناسی و کاربری اراضی با استفاده از تلفیق GIS و روش Fuzzy AHP پهنه‌بندی مناطق مستعد برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی از طریق رویکرد پخش سیلاب در سطح استان تهران انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش: استان تهران بین طول‌های جغرافیایی ۵۰ و ۵۳ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ و ۳۶/۵ درجه شمالی واقع شده است. این منطقه در جنوب رشته کوه البرز واقع شده است. محدوده مطالعاتی شامل شهرهای بزرگی مانند تهران پایتخت ایران است (شکل ۱). عمق آب زیرزمینی در مناطق کوهستانی و دشت‌ها بسیار متغیر است. میانگین بارندگی سالانه منطقه ۲۴۰ میلی‌متر است که در ارتفاعات شمالی و مناطق شرقی بارندگی بیشتر و دشت‌های جنوبی و غربی سهم کمتری از بارش را به خود اختصاص می‌دهند. ارتفاع منطقه متغیر و بین ۷۴۵ تا ۴۳۲۳ متر است که از شمال به جنوب کاهش می‌یابد. شیب منطقه در مناطق شمالی و شمال شرقی استان تا ۷۶ درجه می‌رسد، در حالی که دشت‌های جنوب تهران تقریباً مسطح هستند. گسل‌های این منطقه عموماً روند شرقی غربی دارند و در دامنه‌ها بیشتر هستند.

محدودیت‌های اصلی برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی شناسایی شدند. Sargaonkar و همکاران (۲۰۱۰)، به ارزیابی هیدرولوژیکی زیرحوضه رودخانه کان‌هان واقع در هند بر پایه GIS برای تعیین مکان‌های مناسب تغذیه مصنوعی پرداختند. مطابق با یافته‌های آن‌ها مشخص شد که حدود ۳۴ درصد از منطقه مورد مطالعه برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی مناسب، ۴۱ درصد نسبتاً مناسب و همچنین، بخش شمالی منطقه برای تغذیه مصنوعی مناسب نیست. Feyzi و همکاران (۲۰۱۶)، به پهنه‌بندی اراضی مستعد پخش سیلاب با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی و GIS در جنوب دشت کاشان پرداخته‌اند. پیرو نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها لایه کاربری اراضی به‌عنوان اولویت اول در مکان‌یابی پخش سیلاب شناسایی شده و پارامترهای حجم رواناب، نفوذپذیری، شیب، عمق لایه هودار، ضریب انتقال و کیفیت آبرفت به ترتیب در اولویت‌های دوم تا هفتم قرار گرفتند.

برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی در استان تهران و خصوصاً در دشت‌های جنوب استان مانند دشت ورامین سبب پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی طی سالیان اخیر شده است. این امر به تدریج وقوع مشکلات زیست‌محیطی از قبیل فرونشست زمین را در منطقه به دنبال داشته است. طرح‌های تغذیه مصنوعی برای مقابله با این بحران نیازمند مکان‌یابی دقیق برای حصول نتایج بهتر هستند. مطالعاتی که تا کنون در خصوص مکان‌یابی طرح‌های تغذیه مصنوعی در ایران صورت گرفته، در سطح محلی و دشت‌های کوچک است. با توجه به حیاتی بودن مسئله لازم است، مکان‌یابی‌های کمینه در سطح استانی و حوزه‌های آبخیز بزرگ انجام شود و در نهایت با تلفیق نقشه‌های مستخرج از مطالعات مربوط به تعیین مکان‌های بهینه تغذیه مصنوعی به تفکیک استان یا حوزه آبخیز در سطح کل کشور، نقشه‌های کشوری تولید و در تصمیم‌گیری‌های گسترده ملی برای مدیریت این معضل مهم از آن‌ها



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه استان تهران

- **تغییرات تراز آب زیرزمینی:** از آنجا که عمق آب زیرزمینی به تنهایی نمی‌تواند نشانگر کمبود آب زیرزمینی در یک منطقه باشد، لذا، عامل تغییرات تراز آب که می‌تواند گواه برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی باشد، نیز در نظر گرفته شد. به همین منظور، از داده‌های تراز آب ۱۴۴ چاه مشاهده‌ای که در سال ۸۲ و ۹۴ به وسیله سازمان مدیریت منابع آب ایران برداشت شده، استفاده شد و اختلاف آن‌ها اندازه‌گیری شد و در نهایت با روش IDW درون‌یابی و پهنه‌بندی صورت گرفت (شکل ۲-۲).

- **ضریب تراکم زهکشی:** این پارامتر به‌طور غیر مستقیم ارتباط معکوسی با میزان نفوذپذیری خاک سطحی زیرحوضه‌ها دارد. در واقع هر چه تراکم آبراهه‌ها بیشتر باشد، میزان نفوذپذیری کمتر خواهد بود و بالعکس (Krishnamurty, ۱۹۹۶). در این پژوهش، به دلیل عدم وجود و دسترسی به داده‌های قابل اعتماد مربوط به نفوذپذیری خاک استان، از این پارامتر به‌عنوان جایگزین مطابق با توضیحات زیر استفاده شد. تراکم زهکشی عبارت از طول کل جریان-ها و رودخانه‌ها در حوضه زهکشی تقسیم بر کل مساحت حوضه زهکشی است (Chowdhury و همکاران، ۲۰۱۱) و از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود.

$$\mu = \frac{\sum L_i}{A} \quad (1)$$

که در آن، L_i برابر با طول کل رودخانه‌های حوضه و A مساحت کل حوضه زهکشی می‌باشد. در ادامه حوضه‌های استان به زیرحوضه‌ها تقسیم شدند و

روش پژوهش: در این پژوهش، برای مکان‌یابی و پهنه‌بندی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آب-های زیرزمینی از طریق تکنیک پخش سیلاب با استفاده از روش Fuzzy AHP در سطح کل استان تهران، اصلی‌ترین معیارهای موثر که عبارتند از خصوصیات هیدرولوژیکی شامل عمق و تغییرات تراز آب زیرزمینی، تراکم زهکشی و فاصله از رودخانه، خصوصیات اقلیمی شامل میانگین بارش تجمعی سالیانه، ویژگی‌های توپوگرافی شامل ارتفاع و شیب زمین، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی شامل انواع سازندهای زمین‌شناسی و فاصله از گسل و کاربری اراضی منطقه تعیین و در نظر گرفته شدند. در ادامه برای انجام تجزیه و تحلیل بر روی هر کدامیک از معیارهای مورد بررسی، می‌بایستی از آن‌ها لایه اطلاعاتی تولید شود که این فرایند به شرح زیر صورت گرفت.

- **عمق آب زیرزمینی:** بدین‌منظور، داده‌های مربوط به عمق آب استان تهران که از طریق ۲۳۸ چاه مشاهداتی در فروردین سال ۹۴ به وسیله سازمان مدیریت منابع آب ایران برداشت شده است، تهیه شد. سپس با استفاده از مختصات مکانی هر چاهک مشاهداتی، از آن‌ها لایه نقطه‌ای تولید شد. در نهایت با فرض این‌که عمق آب زیرزمینی در مناطقی که مجهول است، بیشترین شباهت را به نزدیک‌ترین نقاط برداشت شده (چاهک‌های مشاهداتی-نقاط معلوم) دارد، بنابراین، از روش درون‌یابی IDW برای تولید نقشه پهنه‌بندی استفاده شد (شکل ۲-۱).

استان‌های سمنان، مازندران، البرز، قم و مرکزی به- عنوان داده‌های کمکی برای دستیابی به نتایج دقیق- تر استفاده شد (جدول ۱). بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ در نظر گرفته شد و میانگین بارش تجمعی سالانه این ۱۱ سال برای تهیه نقشه بارش استفاده شد. با توجه به این‌که روند تغییرات بارش تدریجی است و همچنین، بر اساس ماهیت آماری داده‌های بارش در این مطالعه که نشان‌دهنده همبستگی متوسط و انحراف معیار پائین هستند، روش‌های مختلف درون‌یابی مورد بررسی قرار گرفتند و در نهایت از روش کریجینگ استفاده شد که بهترین نتیجه را به‌دنبال داشت (شکل ۲-۳).

سپس، برای هر زیرحوضه طول آبراهه‌ها و مساحت هر زیرحوضه محاسبه شد. در نهایت برای محاسبه ضریب تراکم زهکشی زیرحوضه‌ها معادله (۱) به کار گرفته شد (شکل ۲-۴).

- **فاصله از رودخانه:** طبیعتاً برای اجرای یک طرح تغذیه مصنوعی نیاز به منبع آب سطحی است. در - دسترس‌ترین منابع آب سطحی، رودخانه‌ها هستند. بدین‌منظور، لایه اطلاعاتی مربوط به کل رودخانه‌های موجود در سطح استان تهیه شد (شکل ۲-۸).

- **بارندگی:** در این پژوهش، برای تولید نقشه‌های پهنه‌بندی بارش از داده‌های مربوط به ۲۰ ایستگاه سینوپتیکی شامل ۱۲ ایستگاه واقع در داخل استان تهران و هشت ایستگاه خارج از استان واقع در

جدول ۱- لیست ایستگاه‌های سینوپتیکی استفاده شده

شماره	نام ایستگاه	استان
۱	آبعلی	تهران
۲	تهران-مهرآباد	تهران
۳	چینگر	تهران
۴	دماوند	تهران
۵	دوشان تپه	تهران
۶	ژئوفیزیک	تهران
۷	تهران-شمال (شمیران)	تهران
۸	شهریار	تهران
۹	فرودگاه امام خمینی	تهران
۱۰	فیروزکوه	تهران
۱۱	فیروزکوه-آلودگی	تهران
۱۲	ورامین	تهران
۱۳	قم	قم
۱۴	کرج	البرز
۱۵	ساوه	مرکزی
۱۶	سمنان	سمنان
۱۷	گرمسار	سمنان
۱۸	آلاشت	مازندران
۱۹	بلده	مازندران
۲۰	سیاه بیشه	مازندران

هر منطقه در ارتباط با میزان نفوذپذیری عمیق در آن منطقه است. از آنجا که پارامترهای سطحی خاک نمی‌توانند، نمایانگر نفوذ عمقی آب به لایه‌های زیرین باشند، لذا، در راستای انجام این پژوهش بررسی خصوصیات سازندهای زمین‌شناسی منطقه نیز ضروری

- **ارتفاع و شیب زمین:** برای تولید نقشه‌های ارتفاع و شیب منطقه از DEM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر ماهواره ASTER استفاده شد (شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶).

- **سازندهای زمین‌شناسی:** ویژگی‌های زمین‌شناسی

معیارها و زیرمعیارها، ضریب اهمیت گزینه‌ها با توجه به ارجحیت هر یک از گزینه‌ها در ارتباط با هر یک از زیرمعیارها، مورد قضاوت و داوری قرار می‌گیرد (Arbameri و همکاران، ۲۰۱۴). در این حالت، قضاوت‌ها بر مبنای مقایسه زوجی و بر اساس مقیاس نه کمیته ساعتی صورت پذیرفته، نتیجه در ماتریس مقایسه زوجی معیارها، یا گزینه‌ها ثبت می‌شود. سپس، از طریق نرمال کردن میانگین هندسی ردیف‌های این ماتریس‌ها، ضرایب اهمیت مورد نظر به دست می‌آید و در نهایت بردار نرمال وزن آن‌ها از طریق رابطه‌های (۳) تا (۶) محاسبه می‌شود (Yan و همکاران، ۲۰۱۲).

$$M_i = \prod_j^n a_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$\bar{W} = \sqrt[n]{M_i} \quad (4)$$

$$\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n]^T \quad (5)$$

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j} \quad (6)$$

که در آن، M_i حاصل ضرب سطرهای ماتریس، \bar{W} میانگین هندسی و W_i بیانگر وزن نرمال شده است. تشکیل ماتریس مقایسه زوجی معیارها که ورودی آن همان وزن‌های تعیین شده و خروجی آن وزن‌های نسبی مربوط به معیارها است (Malczewski, ۱۹۹۹). با این حال، باید به تفاوتی عمده در این مقایسه‌ها اشاره شود. مقایسه گزینه‌های مختلف، نسبت به زیرمعیارها و یا معیارها و مقایسه معیارها با یکدیگر، نسبت به هدف مطالعه صورت می‌پذیرد (Bertolini و Braghia, ۲۰۰۶). در این مرحله، از تلفیق ضرایب اهمیت مزبور امتیاز نهایی هر یک از گزینه‌ها تعیین خواهد شد. برای این کار، از اصل ترکیب سلسله مراتبی ساعتی که منجر به یک بردار اولویت با در نظر گرفتن همه قضاوت‌ها در تمامی سطوح سلسله مراتبی می‌شود استفاده خواهد شد (Moreno, ۲۰۰۵). به عبارت ساده‌تر از ضرب هر یک از پارامترها (معیارها) در زیرمعیار مربوط به آن و از ضرب عدد به دست آمده در امتیاز گزینه مربوطه، امتیاز نهایی هر یک از گزینه‌ها به دست می‌آید (رابطه ۷).

$$V_{ij} = j \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^m W_k W_i (g_{ij}) \quad (7)$$

که در آن، V_{ij} امتیاز نهایی گزینه، W_k ضریب اهمیت معیار، W_i ضریب اهمیت زیرمعیار و g_{ij} امتیاز گزینه در ارتباط با زیرمعیار است. یکی از مزیت‌های

به نظر می‌رسد. بدین منظور، نقشه زمین‌شناسی استان تهران از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد (شکل ۳).

- **فاصله از گسل:** گسل‌ها به دلیل دسترسی به شکستگی‌های پوسته زمین، برای تغذیه مصنوعی مناسب هستند. لذا، نقشه گسل‌های استان تهران از سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد (شکل ۲-۷).

- **کاربری اراضی:** این پارامتر یکی از عوامل کلیدی در انتخاب محل اجرای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی است (شکل ۴).

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP): این فرایند یک سامانه طراحی شده برای تصمیم‌گیری چند - معیاره است. این روش، امکان فرموله کردن مسئله را به صورت سلسله مراتبی فراهم و همچنین، امکان در نظر گرفتن عوامل مختلف کمی و کیفی را در حل مسائل دارد (Saaty, ۱۹۸۰). اولین مرحله در این الگوریتم، ایجاد درخت‌واره سلسله مراتبی است. مدل AHP دارای سطوح سلسله مراتبی است. بالاترین سطح، بیان‌کننده هدف تصمیم‌گیری، سطوح میانی معیار و زیرمعیارهای تصمیم‌گیری و سطح آخر گزینه‌ها هستند. بعد از ایجاد ساختار سلسله مراتبی، اولویت عناصر در هر سطح تعیین می‌شود (Raid و همکاران، ۲۰۱۱). ماتریس مقایسه‌ای طبق ماتریس رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Galankashi و همکاران، ۲۰۱۶).

$$A = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \dots & \frac{W_1}{W_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{W_n}{W_1} & \dots & \frac{W_n}{W_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن، A ماتریس مقایسه زوجی و a_{ij} شدت برتری معیار i بر معیار j است. برای محاسبه ضریب اهمیت چند روش وجود دارد که شامل، روش کمینه مربعات، روش کمینه مربعات لگاریتمی، روش بردار ویژه و روش متداول در رسیدن به وزن پارامترها از یک ماتریس مقایسه زوجی است، در این روش، معیارها و زیرمعیارها دو به دو با یکدیگر مقایسه می‌شوند و درجه اهمیت هر معیار، نسبت به دیگری مشخص می‌شود (Malczewski, ۲۰۰۶). روش کار به این ترتیب است که به هر مقایسه دودویی، یک عدد از ۱ تا ۹ نسبت داده می‌شود. بعد از تعیین ضرایب اهمیت

زوجی معیارها و زیرمعیارها بنا به نظر کارشناسان مذکور، از برآیند نظرات ۱۵ متخصص برای تعیین میزان ارجحیت نسبی معیارها و زیرمعیارها نسبت به یکدیگر استفاده شد. سپس، با استفاده از نرم افزار Expert Choice ساختار سلسله مراتبی تشکیل و اوزان نهایی معیارها و زیرمعیارها با کمترین نرخ ناسازگاری محاسبه شد. در ادامه، بر اساس کتب مرجع و مقالات علمی کلیه پارامترها (لایه‌های اطلاعاتی) ارزش‌گذاری، طبقه‌بندی و فازی‌سازی شدند. در نهایت، از طریق روش هم‌پوشانی فازی نقشه پهنه‌بندی مکان‌های مناسب تغذیه مصنوعی در استان تهران استخراج شد. مراحل کلی انجام پژوهش حاضر در اینفوگرافی شکل ۵ خلاصه شده است.

نتایج و بحث

طبقه‌بندی معیارها: بعد از تهیه لایه اطلاعاتی از هر معیار و سپس، محاسبه وزن آن‌ها از طریق روش AHP، لازم است که با توجه به آستانه‌های علمی هر لایه طبقه‌بندی و سپس، طبقات آن متناسب با تأثیری که در هدف پژوهش دارند، ارزش‌گذاری شوند.

- طبقه‌بندی لایه عمق آب زیرزمینی: هر چه عمق آب زیرزمینی در منطقه‌ای پایین‌تر باشد، به دلیل نفوذ عمقی‌تر آب سطحی و گرادیان عمودی بیشتر، برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی مناسب‌تر است. بر همین اساس، در فرایند طبقه‌بندی، این لایه به پنج طبقه تقسیم شد (جدول ۳) که بیشترین ارزش وزنی به طبقه پنج و کمترین ارزش به طبقه یک اختصاص یافت. در شکل ۱-۶، این طبقات مشخص شده‌اند که رنگ سبز نشان‌دهنده طبقات با ارزش بالاتر و رنگ قرمز نشانگر طبقات با ارزش پایین‌تر است.

این فرایند، امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌ها برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارها است که قبل از آن می‌بایست بردار ضریب ویژه محاسبه شود (رابطه ۸ و ۹).

$$W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T \quad (8)$$

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (9)$$

که در آن، W بردار وزن نرمال و λ_{max} بردار مقادیر ویژه است. مکانیزمی که برای بررسی سازگاری در قضاوت‌ها در نظر گرفته شده، محاسبه ضریبی به نام ضریب ناسازگاری است که از تقسیم شاخص ناسازگاری به شاخص تصادفی بودن حاصل می‌شود (معادله ۱۰).

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (10)$$

که در آن، $C.R.$ ضریب ناسازگاری، $C.I.$ شاخص ناسازگاری و $R.I.$ شاخص تصادفی بودن است که $C.I.$ از طریق معادله (۱۱) و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (11)$$

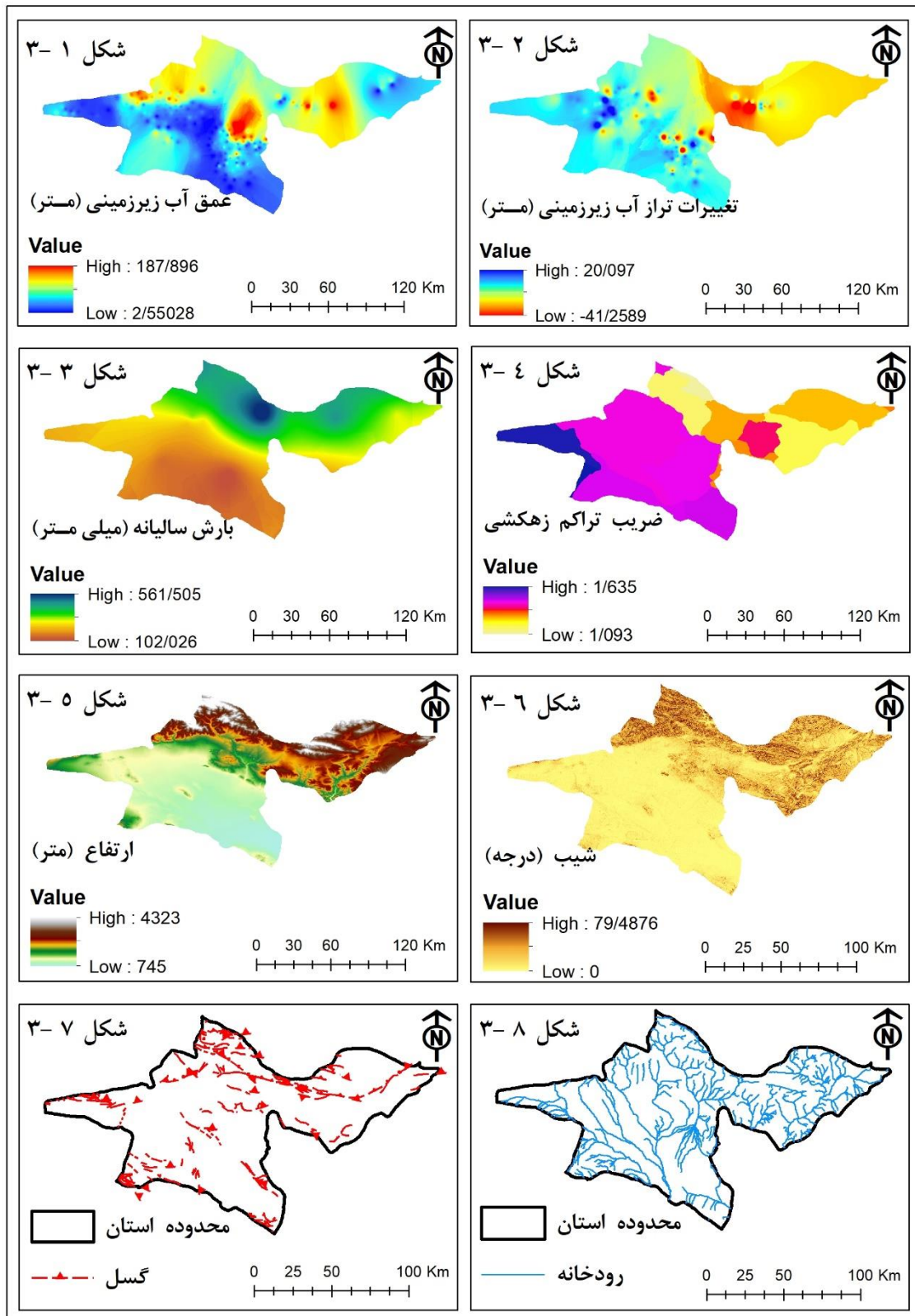
و در نهایت $R.I.$ مطابق با جدول ۲ به دست می‌آید (Kaganski و همکاران، ۲۰۱۸).

چنانچه ضریب ناسازگاری کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری در قضاوت‌ها مورد قبول است وگرنه باید در قضاوت‌ها تجدید نظر صورت گیرد (Saaty، ۱۹۸۰).

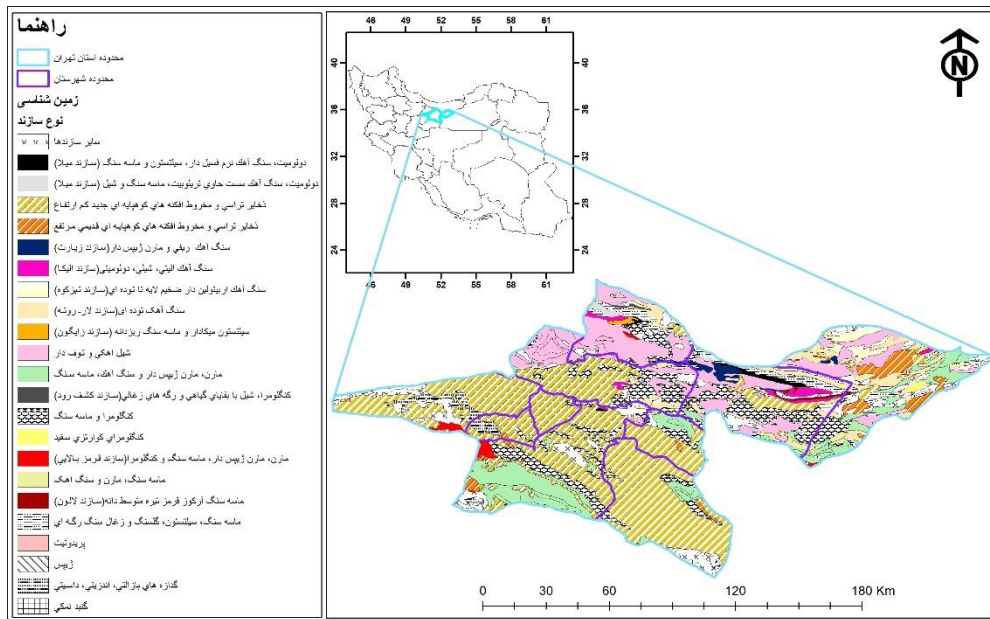
پس از تهیه، تولید و آماده‌سازی لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS سپس، با به‌کارگیری روش Fuzzy AHP بر اساس توضیحات و استانداردهای فوق، پرسش‌نامه طراحی شد. تعداد ۱۵ نسخه از پرسش‌نامه به متخصصان و صاحب‌نظران در زمینه آبخیزداری، مهندسی آب، ژئومورفولوژی و سنجش از دور ارائه شد. سپس، از طریق پرسش‌نامه و مقایسه

جدول ۲ - شاخص تصادفی بودن (R.I.)

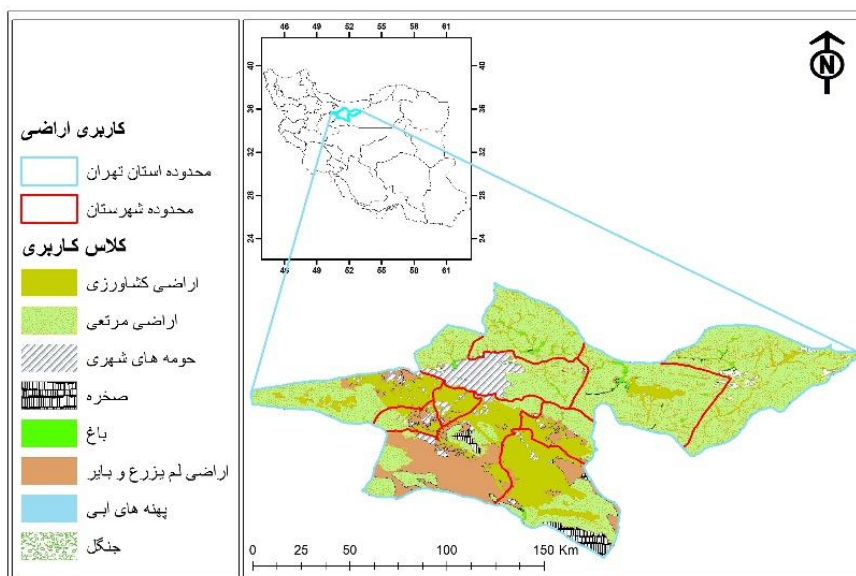
n	۳	۴	۵	۶
R.I.	۰/۵۱	۰/۸۹	۱/۱۲	۱/۲۵
n	۷	۸	۹	۱۰
R.I.	۱/۳۵	۱/۴۲	۱/۴۶	۱/۴۹



شکل ۲- نقشه‌های مربوط به معیارهای موثر در مکان‌یابی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در استان تهران



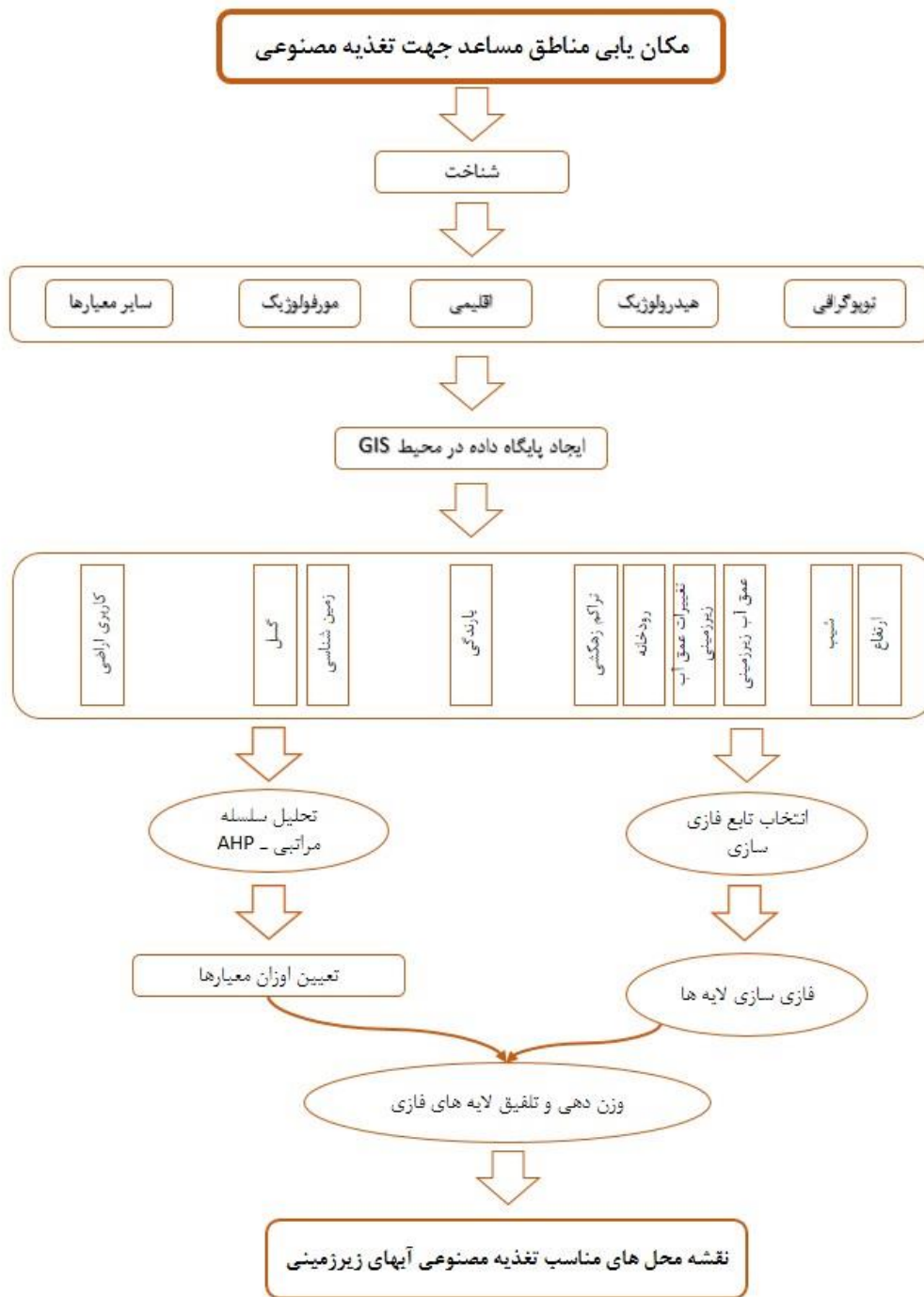
شکل ۳- نقشه سازندهای زمین‌شناسی استان تهران



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی استان تهران

- طبقه‌بندی لایه تغییرات تراز آب زیرزمینی: لایه تغییرات عمق آب زیرزمینی نیز به پنج طبقه تقسیم شد (جدول ۴). این تغییرات در طول ۱۲ سال رخ داده که طبقات منفی نشانگر افت سطح آب‌های زیرزمینی در طی بازه مذکور است. در نتیجه در این مناطق بیلان آب منفی بوده، میزان برداشت از میزان تغذیه آب زیرزمینی بیشتر است. لذا، برای تغذیه

مصنوعی و جبران کسری آب زیرزمینی انتخاب مناطق دارای بیلان منفی شدید بهتر است. به همین طریق، بیشترین ارزش را طبقه پنج و کمترین ارزش را طبقه یک به خود اختصاص می‌دهد. در شکل ۲-۶، این طبقات مشخص شده‌اند که رنگ سبز نشان‌دهنده طبقات با ارزش بالاتر و رنگ قرمز نشانگر طبقات با ارزش پایین‌تر می‌باشد.



شکل ۵- اینفوگرافی روند پژوهش

جدول ۳- طبقه‌بندی نقشه عمق آب زیرزمینی

عمق آب زیرزمینی (متر)	ارزش وزنی
< ۳۵	۱
۳۵ تا ۶۰	۲
۶۰ تا ۹۰	۳
۹۰ تا ۱۲۰	۴
> ۱۲۰	۵

جدول ۴- طبقه‌بندی نقشه تغییرات عمق آب زیرزمینی

ارزش وزنی	تغییرات تراز آب (متر)
۱	< ۵
۲	۵ تا ۶
۳	۶ تا ۱۵
۴	۱۵ تا ۲۵
۵	> ۲۵

طبقه‌بندی ارزش بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند. در شکل ۸-۶، این طبقات مشخص شده‌اند که رنگ سبز نشان‌دهنده طبقات با ارزش بالاتر و رنگ قرمز نشانگر طبقات با ارزش پایین‌تر است.

- **طبقه‌بندی لایه بارندگی:** مطابق با هدف پژوهش، نقشه بارش نیز به پنج طبقه تقسیم شد (جدول ۵) و بیشترین ارزش وزنی به طبقه پنج با کمترین بارندگی اختصاص یافت. در شکل ۳-۶، این طبقات مشخص شده‌اند.

- **طبقه‌بندی لایه ارتفاع:** عملیات تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی هر چه از منطقه بالادست‌تر صورت گیرد، می‌تواند سبب شود که منطقه وسیع‌تری را تحت پوشش و تغذیه قرار دهد. در نتیجه، مناطق مرتفع‌تر برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی مناسب‌تر هستند. بر این اساس، لایه ارتفاع نیز به پنج طبقه تقسیم شد (جدول ۶). مناطق بالادست برای تغذیه مناسب‌تر هستند، بنابراین، ارزش بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند. به همین دلیل، بیشترین ارزش را طبقه پنج و کمترین ارزش را طبقه یک به خود اختصاص می‌دهد. در شکل ۵-۶، این طبقات مشخص شده‌اند که رنگ سبز نشان‌دهنده طبقات با ارزش بالاتر و رنگ قرمز نشانگر طبقات با ارزش پایین‌تر است.

- **طبقه‌بندی لایه ضریب تراکم زهکشی:** نمایه تراکم زهکشی به‌طور غیرمستقیم ارتباط معکوسی با میزان نفوذپذیری زیرحوضه دارد. به‌طوری که هرچه نفوذپذیری کمتر باشد، طول آبراهه‌ها در آن زیرحوضه بیشتر می‌شود و در نتیجه مقدار عددی تراکم زهکشی بالاتری را به خود اختصاص می‌دهد. بر این اساس، تراکم زهکشی می‌تواند یک شاخص غیرمستقیم از مناسب بودن یک منطقه برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی باشد (Krishnamurty, ۱۹۹۶). بر این اساس، لایه تراکم زهکشی به پنج طبقه تقسیم شد. طبقات با مقدار بالاتر ارزش کمتری را به خود اختصاص می‌دهند، زیرا تراکم زهکشی بالاتر به معنای نفوذپذیری کمتر منطقه است. در شکل ۴-۶، این طبقات مشخص شده‌اند.

- **طبقه‌بندی لایه فاصله از رودخانه:** در دسترس‌ترین منابع آب سطحی، رودخانه‌ها هستند. بدیهی است که هر چه فاصله از رودخانه کمتر باشد، استفاده و انتقال آب به طرح تغذیه مصنوعی ساده‌تر و کم هزینه‌تر است. لذا، بدین‌منظور از دستور Distance در محیط نرم‌افزار ArcGIS برای تعیین فاصله هر نقطه تا نزدیک‌ترین رودخانه استفاده شد. سپس، نقشه حاصل به نه طبقه تقسیم شد. فواصل نزدیک‌تر به سبب دسترسی به آب سطحی برای تغذیه مصنوعی طبیعتاً مناسب‌تر هستند و بنابراین، در فرایند

جدول ۵- طبقه‌بندی نقشه میانگین بارش تجمعی سالیانه

ارزش وزنی	بارندگی (میلی‌متر)
۱	< ۴۳۰
۲	۴۳۰ تا ۴۳۵
۳	۴۳۵ تا ۲۷۰
۴	۲۷۰ تا ۱۹۵
۵	> ۱۹۵

جدول ۶- طبقه‌بندی نقشه ارتفاع

ارزش وزنی	ارتفاع (متر)
۱	< ۱۲۵۰
۲	۱۲۵۰ تا ۱۸۰۰
۳	۱۸۰۰ تا ۲۳۰۰
۴	۲۳۰۰ تا ۲۹۰۰
۵	> ۲۹۰۰

شیب ملایم این فرصت را به آب می‌دهد که تماس بیشتری با خاک داشته باشد و در نتیجه امکان نفوذ افزایش می‌یابد. برای نفوذ لازم است زمین غرقابی شود تا آب به مرور نفوذ کند، زیرا نفوذ آب به لایه‌های زیرین نسبت به حرکت آب در سطح زمین بسیار زمان‌بر است. قاعدتا در شیب‌های تند زمین نمی‌تواند غرقابی شود. بر اساس موارد فوق، لایه شیب مطابق با جدول ۷ و شکل ۶-۶ به پنج طبقه تقسیم شد.

- طبقه‌بندی لایه شیب زمین: با نظر به این‌که در پژوهش حاضر، مکان‌یابی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی به روش پخش سیلاب مد نظر است، در نتیجه، شیب‌های بسیار ملایم مناسب طرح هستند. معمولاً شیب‌های بین صفر تا دو درجه بسیار ایده‌آل هستند، ولی با این وجود بسیاری از محققان قبلی در این زمینه شیب‌های کمتر از پنج درجه را بسیار مطلوب در نظر گرفته‌اند (Krishnamurty, ۱۹۹۶).

جدول ۷- طبقه‌بندی نقشه شیب زمین

ارزش وزنی	شیب (درجه)
۱	> ۳۰
۲	۲۰ تا ۳۰
۳	۱۲ تا ۲۰
۴	۵ تا ۱۲
۵	۰ تا ۵

میزان اهمیت و ارزش وزنی هر طبقه محاسبه و به مساحت مربوط به آن در نقشه نسبت داده شد که بر این اساس طبقه یک بیشترین ارزش وزنی و طبقه پنج کمترین ارزش را به خود اختصاص می‌دهد. در شکل ۱۰-۶، این طبقات قابل مشاهده هستند.

- طبقه‌بندی لایه فاصله از گسل: برای تعیین فاصله هر نقطه تا نزدیک‌ترین گسل از دستور Distance در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. سپس، نقشه حاصل به نه طبقه تقسیم شد. فواصل نزدیک‌تر به گسل سبب دسترسی به شکستگی‌های پوخته زمین برای تغذیه مصنوعی مناسب‌تر هستند و بنابراین، ارزش وزنی بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند. در شکل ۷-۶، این طبقات مشخص شده‌اند که رنگ سبز نشان‌دهنده طبقات با ارزش بالاتر و رنگ قرمز نشانگر طبقات با ارزش پایین‌تر است.

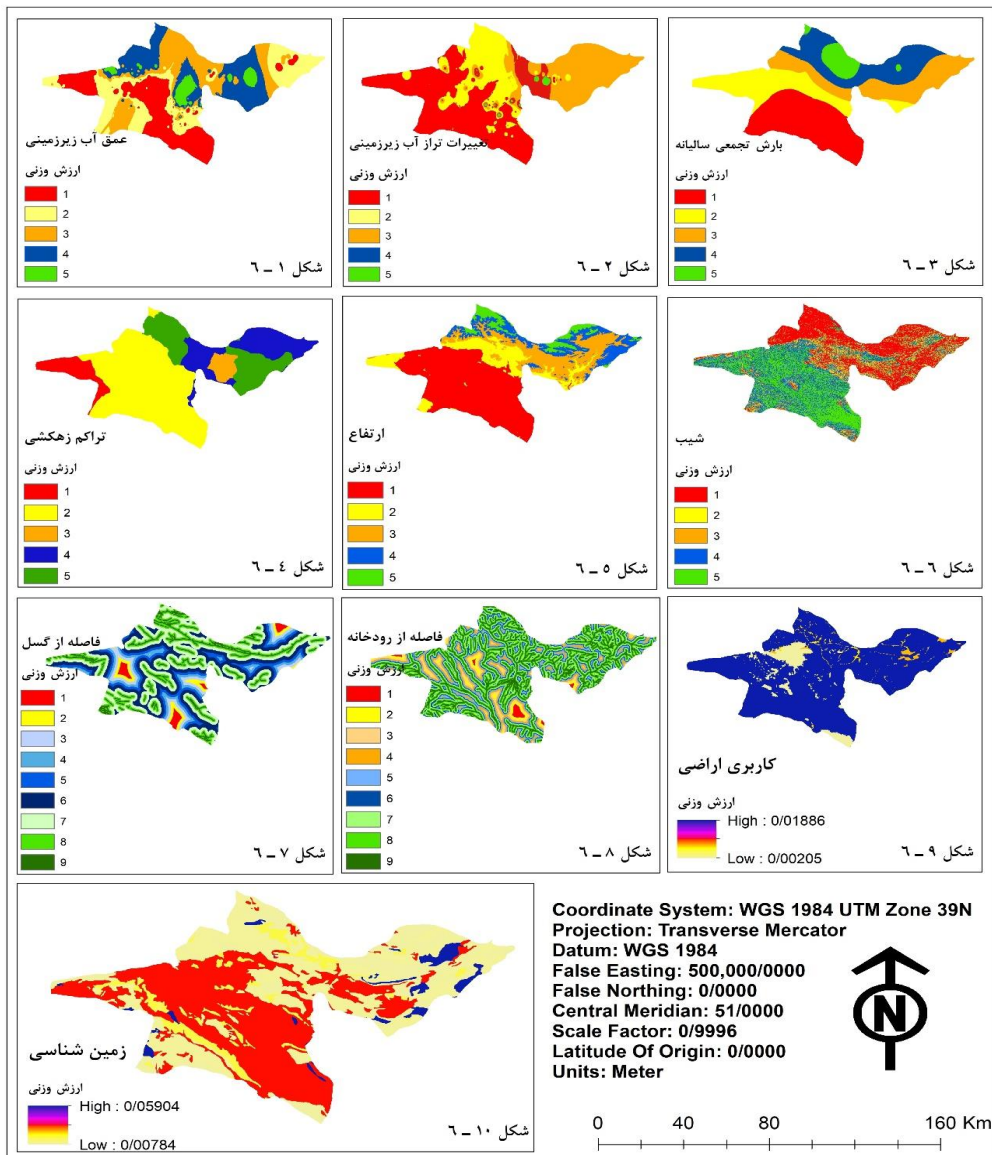
- طبقه‌بندی لایه زمین‌شناسی: با توجه به تنوع بسیار زیاد طبقات زمین‌شناسی منطقه، آن‌ها به پنج دسته با در نظر گرفتن میزان نفوذپذیری تقسیم شدند (جدول ۸). ذخایر تراسی و مخروط افکنه‌های کوهپایه‌ای مرتفع و رسوبات ماسه‌ای سست، بهترین مناطق برای اجرای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی هستند و در عوض مناطق نفوذناپذیر و یا نمکی مانند سنگ‌های دوران کامبرین و کرتاسه و سنگ‌های رسی و انواع سنگ آگلومرا و گنبد‌های نمکی بسیار نامناسب‌اند. تغذیه مصنوعی در مناطق نمکی کیفیت آب‌های زیرزمینی را متاثر می‌سازد و سبب شورشیدن منابع آب زیرزمینی می‌شود. بدین‌منظور، مطابق با جدول ۸، این لایه اطلاعاتی به پنج طبقه تقسیم شد و سپس، با توجه به این‌که این لایه به صورت کیفی است، از طریق مقایسات زوجی طبقات در روش AHP

جدول ۸ - طبقه‌بندی نقشه زمین‌شناسی

نفوذپذیری	توصیف	طبقه
بسیار مناسب	ماسه‌سنگ ریزدانه و درشت‌دانه و ...	۱
مناسب	کنگلومرای پلی‌متال و ماسه‌سنگ و ...	۲
متوسط	کنگلومرای پلی‌ژنیک، ژیبس، گدازه‌های داسیتی و ...	۳
نامناسب	دولومیت، شیل توف‌دار، شیل آهکی و توف و ...	۴
بسیار نامناسب	اگلومرای، سنگ آهک رسی و ...	۵

شد. مطابق با هدف از نقطه نظر نوع کاربری اراضی حومه‌های شهری، پهنه‌های آبی و صخره‌ها بسیار نامناسب‌اند. بهترین مناطق اراضی مرتعی و کشاورزی و اراضی بایر هستند و در مرحله بعد جنگل‌ها و باغ‌ها مناسب‌اند (شکل ۹-۶).

- طبقه‌بندی لایه کاربری اراضی: با توجه به توصیفی و کیفی بودن لایه کاربری اراضی، برای طبقه‌بندی این لایه نیز از طریق مقایسه دودویی زیرطبقات بر اساس روش AHP، ارزش وزنی هر زیرطبقه محاسبه و به مساحت مربوطه در نقشه اختصاص داده



شکل ۶- طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری لایه‌های اطلاعاتی مربوط به معیارهای موثر در مکان‌یابی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در استان تهران

سلسله مراتبی، از طریق روش میانگین هندسی ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارها محاسبه شد. سپس، از طریق ضرب‌های متوالی ضرایب اهمیت در سطوح سلسله مراتبی، اوزان نهایی به‌دست آمد (جدول ۹). همچنین، برای بررسی سازگاری در قضاوت‌ها برای تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارها، نرخ ناسازگاری نیز محاسبه شد که این نرخ برای تمامی پارامترها کمتر از دو درصد بود که قابل قبول است.

تحلیل سلسله مراتبی فازی: در این مرحله، مطابق با روش AHP برای معیارها و زیرمعیارهای مورد بررسی، ساختار سلسله مراتبی تشکیل شد. سپس، بر اساس هدف، پرسش‌نامه‌ای طراحی و تنظیم شد و همان‌طور که پیشتر ذکر شد، بر اساس برآیند نظر کارشناسان مربوطه از طریق مقایسات زوجی و روش بردار ویژه، درجه اهمیت (اوزان نسبی) هر معیار نسبت به دیگری مشخص شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice پس از تشکیل ساختار

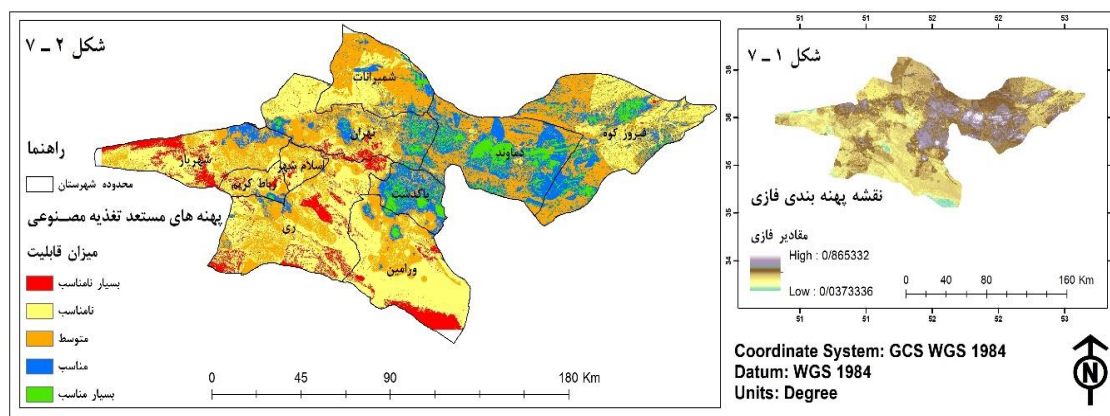
جدول ۹- وزن‌های AHP محاسبه شده برای معیارها و زیرمعیارها

وزن زیرمعیار	زیر معیار	معیار اصلی
۰/۲۰۰۴۱	عمق آب زیرزمینی	خصوصیات هیدرولوژیکی
۰/۲۰۰۴۱	اختلاف تراز آب ۸۲ تا ۹۴	خصوصیات هیدرولوژیکی
۰/۰۲۲۰۵	رودخانه	خصوصیات هیدرولوژیکی
۰/۰۶۶۶۴	تراکم زهکشی	خصوصیات هیدرولوژیکی
۰/۲۰۵۶۸	شیب	خصوصیات توپوگرافی
۰/۰۳۴۳۲	ارتفاع	خصوصیات توپوگرافی
۰/۱۲۰۷۵	زمین شناسی	خصوصیات مورفولوژیکی
۰/۰۱۷۲۵	گسل	خصوصیات مورفولوژیکی
۰/۰۵	بارش	خصوصیات اقلیمی
۰/۰۸۲	—	کاربری اراضی

شدند.

هم‌پوشانی لایه‌های فازی: در مرحله نهایی، عملیات هم‌پوشانی لایه‌های فازی‌سازی شده صورت گرفت. واضح است که اگر در منطقه‌ای تمامی شرایط در حالت ایده‌آل باشند، پس از تلفیق لایه‌های فازی، ارزش عددی یک به‌دست خواهد آمد، ولی در عمل به‌علت تعداد زیاد لایه‌ها و هم‌پوشانی آن‌ها چنین شرایطی رخ نمی‌دهد. پس از اعمال هم‌پوشانی فازی در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نقشه فازی به‌دست آمده به پنج طبقه بسیار مناسب، مناسب، متوسط، نامناسب و بسیار نامناسب طبقه‌بندی شد. در نقشه هم‌پوشانی نهایی بالاترین مقدار عضویت فازی ۰/۸۴ و کمترین مقدار ۰/۰۳ برآورد شد. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۶ به‌عنوان مناطق بسیار مناسب در نظر گرفته شدند و مقادیر بین ۰/۵ تا ۰/۶ جزء مناطق مناسب در نظر گرفته شدند (شکل ۷).

پس از تعیین وزن‌ها، تمامی لایه‌های اطلاعاتی که در مرحله قبل طبقه‌بندی شدند، فازی‌سازی می‌شوند. روش فازی شدن هر پدیده ممکن است، متفاوت با پدیده‌ای دیگر باشد و بر این اساس نیز روش‌های گوناگونی برای فازی‌سازی پدیده‌های مختلف توسعه داده شده است. در این پژوهش، کلیه لایه‌های اطلاعاتی از طریق روش فازی‌سازی خطی، فازی شدند ولی دو لایه فاصله از گسل و فاصله از رودخانه به‌وسیله تابع فازی‌سازی small فازی شدند، زیرا عملکرد تابع فازی‌سازی خطی به‌خوبی نمایانگر مقدار عضویت فاصله از گسل و رودخانه نیست. پس از فازی کردن تمام لایه‌های اطلاعاتی، سپس، هر لایه در وزن AHP به‌دست آمده برای معیار مرتبط با آن ضرب می‌شود. لایه‌های کاربری اراضی و زمین‌شناسی نیز همان‌طور که توضیح داده شد، به‌دلیل این‌که دارای ماهیت توصیفی بودند، پس از اعمال وزن نرمال‌سازی



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی مناطق مناسب برای طرح تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی از طریق رویکرد پخش سیلاب در استان تهران (۱): نقشه پهنه‌بندی فازی و ۲: نقشه پهنه‌بندی غیرفازی و طبقه‌بندی شده

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر با استفاده از ۱۰ پارامتر موثر نشان می‌دهد که حدود ۶/۲ درصد از مساحت کل منطقه برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی بسیار مناسب و حدود ۱۵/۷۵ درصد مناسب است. پهنه‌های بسیار مناسب شناسایی شده، مساحتی معادل ۸۴۱/۸۶ کیلومتر مربع دارند. مناطق بسیار مناسب عمدتاً در قسمت‌های شرقی استان، محدوده شهرستان‌های پاکدشت، دماوند و فیروزکوه قرار گرفته‌اند و با توجه به نقشه زمین‌شناسی استان شکل ۳ و همچنین، نقشه پهنه‌بندی نهایی شکل ۷، این مناطق دارای سازندهای زمین‌شناسی نفوذپذیر و مناسب نظیر ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جدید و کم ارتفاع و نیز قدیمی و مرتفع، کنگلومرا و ماسه‌سنگ برای اجرای طرح هستند. شایان ذکر است که مناطق یاد شده، دارای ارتفاع متوسط تا زیاد، شیب نسبتاً ملایم، فاصله کم تا رودخانه، کاربری غالب مرتعی و کشاورزی هستند و همچنین، سطح عمق آب زیرزمینی در آن‌ها بسیار پایین بوده، روند نزولی داشته است. تغییرات تراز آب

چاه‌های مشاهداتی در بازه زمانی سال‌های ۸۲ تا ۹۴ نشان‌دهنده بیلان آب منفی در این مناطق است. شهرستان‌های پاکدشت و دماوند دارای بیشترین مساحت به‌لحاظ پهنه‌های مناسب برای اجرای طرح هستند. دو شهرستان مذکور در بالادست دشتهایی از قبیل ورامین قرار دارند و به‌همین علت در صورت اجرای طرح در این پهنه‌ها، می‌تواند تاثیر مثبتی در وضعیت آبخوان‌های دشت‌های پایین‌دست نیز داشته باشد. به‌جز شمال شرق شهرستان شهریار و قسمت‌هایی از اراضی واقع در جنوب و جنوب شرق شهرستان رباط‌کریم، در سایر مناطق به دلایل مختلفی نظیر کاربری اراضی ناکارآمد، شیب زیاد، سازند زمین‌شناسی نفوذناپذیر و سایر عوامل منفی سبب شده‌اند که این مناطق برای اجرای طرح تغذیه مصنوعی نامناسب باشند. در بررسی مناطق مناسب و بسیار مناسب طبق روش AHP مشخص شد که چهار عامل عمق آب زیرزمینی و تغییرات آن، خصوصیات زمین‌شناسی و شیب تاثیر بیشتری در انتخاب مناطق مساعد برای تغذیه مصنوعی دارند.

منابع مورد استفاده

1. Arabameri, A.R., Z. Ameripoor, S. Kazemi Mohsenabadi and M.R. Biglari. 2014. Zoning Mashhad Watershed for artificial recharge of underground aquifers using TOPSIS model and GIS technique. Global Journal, 14: 44-53 (in Persian).
2. Bertolini, M. and M. Braghia. 2006. Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract. International Journal of Project Management, 24: 422-430.
3. Bizh, Zh., L. Burge and Iomanzh. 1980. The groundwater artificial recharging. Translation by J. Heidarpour. Amirkabir University Press, Tehran, 256 pages.
4. Bouwer, H. 2002. Artificial recharge of groundwater. Hydrogeology Journal, 10: 121-142.

5. Chenini, I., A. Ben Mammou and M. May. 2009. Groundwater recharge zone mapping using GIS based. *Water Resources Management Journal*, 24: 921-939.
6. Chowdhury, A., J. Madan, V.M. Chowdary. 2010. Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Sciences*, 59: 1209-1222.
7. Dey, P.K. and E.K. Ramacharan. 2008. Analytic hierarchy process helps select site for limestone quarry expansion in Barbados. *Journal of Environmental Management*, 88: 1384-1395.
8. Feyzi, Z., A. Keshtkar, A. Malekian and H. Ghasemieh. 2016. Fuzzy AHP application for flood spreading site selection, case study: South of Kashan Plain. *Journal of Water and Soil Science*, 20: 129-141 (in Persian).
9. Galankashi, M.R., S.A. Helmi and P. Hashemzahi. 2016. Supplier selection in automobile industry: a mixed balanced scorecard-fuzzy AHP approach. *Alexandria Engineering Journal*, 55: 93-100.
10. Ghahari, Gh. and M. Pakparvar. 2007. Survey on effects of extraction and distribution flood on Grebaygan groundwater. *Range and Desert Research Journal*, 3: 390-368 (in Persian).
11. Kaganski, S., J. Majak and K. Karjust. 2018. Fuzzy AHP as a tool for prioritization of key performance indicators. *Procedia CIRP*, 72(2018): 1227-1232.
12. Kalantari, N., K. Rangzan, S. Thigale and M. Rahimi. 2010. Site selection and cost-benefit analysis for artificial recharge in the Baghmalek Plain, Khuzestan Province, southwest Iran. *Hydrogeology Journal*, 18: 761-773 (in Persian).
13. Krishnamurthy, J., N.V. Kkumar, V. Jayaraman and M. Manivel. 1996. An approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and geographic information system. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 1867-1884.
14. Mahdavi, R., J. Abedi-e-Kopani, M. Rezai and M. Abdoulhosaini. 2004. Locating appropriate sites for artificial recharge of ground water resources. *Water Resources and Soil Conference*, 23-24 April, Shiraz University (in Persian).
15. Malczewski, J. 1999. *GIS and multicriteria decision analysis*. USA, John Wiley and Sons, 408 pages.
16. Malczewski, J. 2006. *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. *Journal of Geographical Information Science*, USA, John Wiley and Sons, 368 pages.
17. Moreno-Jimenez, J.M. 2005. A spreadsheet module for consistent consensus building in AHP-group decision making. *Group Decision and Negotiation*, 14: 89-108.
18. O'Hare, M.P., D.M. Fairchild, P.A. Hajali and L.W. Canter. 1986. *Artificial recharge of groundwater*. Suffolk County, 419 pages.
19. Oakford, E.T. 1985. *Artificial recharge: methods, hydraulics and monitoring*. Butterworth, 767 pages.
20. Ramalingam, M. and A. Santhakumar. 2002. Case study on artificial recharge using remote sensing and GIS. *GIS Development Journal*, 3: 85-97.
21. RaviShankar, M.N. and G. Mohan. 2005. A GIS based hydrogeomorphic approach for identification of site specific artificial-recharge techniques in the Deccan volcanic province. *Journal of Earth System Science*, 114: 505-514.
22. Riad, P.H.S., M. Billib, A.A. Hassan, M.A. Salam and M. Nouredin. 2011. Application of the overlay weighted model and Boolean logic to determine the best locations for artificial recharge of groundwater. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 5: 57-66.
23. Saaty, T.L. 1980. *The analytical hierarchy process*. McGraw Hill, 350 pages.
24. Saraf, A.K. and P.R. Choudhury. 1998. Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 2595-2616.
25. Sargaonkar, A., B. Rathi and A. Baile. 2010. Identifying potential sites for artificial groundwater recharge in sub-watershed of River Kanhan, India. *Environmental Earth Sciences*, 62: 1099-1108.
26. Yan, Zh., X. Wang and Y. Fu. 2012. Study on early warning model of coal mining engineering with fuzzy AHP. *Systems Engineering Procedia*, 5: 113-118.