

## پتانسیل‌سنجی منابع آب زیرزمینی با رویکردی ترکیبی به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و سیستم اطلاعات مکانی (مطالعه موردی: دشت مهران، ایلام)

ساسان محمودی جم<sup>۱</sup>، سیدحسین قریشی نجف‌آبادی<sup>۲</sup>، علی‌رضا وفایی‌نژاد<sup>۳\*</sup>، علی مریدی<sup>۴</sup>، صفا خزایی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

۲، ۳ و ۴. استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

۵. استادیار دانشکده و پژوهشکده پدافند غیرعامل، دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۵/۰۵)

### چکیده

یکی از مسائل مهم در زمینه مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی، شناسایی پتانسیل این منابع به‌منظور برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری صحیح درباره بهره‌برداری از آنهاست. هدف این پژوهش، پتانسیل‌سنجی منابع آب زیرزمینی با رویکردی ترکیبی به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و سیستم اطلاعات مکانی (GIS) در دشت مهران است. به این منظور و برای شناسایی پتانسیل منابع آب زیرزمینی در این منطقه، ۱۳ فاکتور مختلف تأثیرگذار بر میزان نفوذ آب در داخل زمین و تشکیل منابع آب زیرزمینی شامل شیب، ارتفاع، تراکم زهکشی، تراکم خطواره، نقشه T، نقشه K، نقشه Recharge، نقشه کاربری زمین، نقشه سنگ‌شناسی، نقشه Sy، نقشه عمق آب زیرزمینی، نقشه تراکم چاه و نقشه هم‌کلر، شناسایی و نقشه آنها تهیه و طبقه‌بندی شد. سپس، با استفاده از الگوریتم PSO، هر یک از نقشه‌ها وزن‌دهی و پس از آن با استفاده از روش همپوشانی وزن‌دار در محیط GIS با یکدیگر ترکیب شدند و در انتها، دو نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی، یک بار در حالتی که معادله بهینه‌سازی برابر با نقشه تراکم چاه قرار گرفت (PSO\_chah) و بار دیگر برای حالتی که معادله بهینه‌سازی برابر نقشه آینده ویژه قرار گرفت (PSO\_Sy)، به دست آمد. در این زمینه، نقشه PSO\_chah، ۲/۵۶ درصد از منطقه و نقشه PSO\_Sy، ۲/۴۰ درصد از منطقه را به‌عنوان مناطق با پتانسیل بسیار زیاد از نظر منابع آب زیرزمینی مشخص کردند.

**کلیدواژگان:** آب زیرزمینی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، پتانسیل‌سنجی، سامانه اطلاعات مکانی.

## مقدمه

یکی از تنگناهای اساسی دنیای امروز، کافی نبودن آب برای مصارف گوناگون اعم از شرب، صنعت، کشاورزی و محیط‌های طبیعی است [۱]. کشور ایران از جمله کشورهایی است که همواره با پدیده خشکسالی و کم‌آبی مواجه است به طوری که بحران آب و خاک نزدیک به ۹۰ درصد پهنه آن را تهدید می‌کند. بقا و رفاه انسان به مدیریت کارآمد منابع طبیعی بستگی دارد [۲]. با توجه به بحرانی بودن وضعیت آب در کشور استفاده از آب‌های سطحی و سیلاب‌ها و همچنین به‌کارگیری انواع تکنیک‌های موجود در این زمینه، یک امر حیاتی و اجتناب‌ناپذیر است.

طی چند دهه اخیر، جامعه علمی بین‌المللی علاقه زیادی به مدیریت منابع آب نشان داده است و در نتیجه، بسیاری از دانشمندان، از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی استفاده کرده‌اند. این تکنیک‌ها با استخراج و تجزیه و تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی، مورفولوژی سطح و ویژگی‌های آبی حوضه، برای ارزیابی کیفی منابع آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شوند [۳].

هدف اصلی این تحقیق، بررسی کاربرد GIS در حل مسئله بهینه‌سازی به‌منظور شناسایی و کنترل منابع آب زیرزمینی است. به بیان دیگر، هدف اصلی این تحقیق، تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی (GWPZ<sup>1</sup>) منطقه با استفاده از یک مفهوم پایه و پیاده‌سازی مراحل آماده‌سازی و تلفیق داده‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تهیه نقشه نهایی است. طی این مراحل پتانسیل آب‌های زیرزمینی توسط فاکتورهای ارزیابی می‌شود که میزان نفوذ<sup>۲</sup> بارش در داخل خاک و یا به بیان دیگر، تغذیه آب‌های زیرزمینی را مشخص می‌کند.

به این منظور استفاده از روش بهینه‌سازی در کنار استفاده از GIS، می‌تواند موجب تقویت عملکرد پروژه‌های مربوط به پتانسیل‌سنجی شود. بر این اساس، مقاله حاضر با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و GIS، پتانسیل‌سنجی آب زیرزمینی منطقه مهران-ایلام را مد نظر قرار داده که نتایج آن می‌تواند در شناسایی منابع آب زیرزمینی منطقه و استفاده بهینه از آن تأثیرگذار باشد.

در این مقاله، بر پایه شناسایی عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی و استفاده از ۱۳ فاکتور برای دستیابی به معادله بهینه‌سازی، با تأکید بر بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، به پتانسیل منابع آب زیرزمینی منطقه توجه شده است. به‌منظور تحقق این هدف، از الگوریتم ازدحام ذرات، عوامل مؤثر بر پتانسیل آب زیرزمینی و پیاده‌سازی آنها در بستر GIS استفاده شده است. این امر دست‌یابی به بهترین مکان‌ها از نظر بیشترین پتانسیل آب زیرزمینی را برای منطقه مطالعه‌شده محقق ساخته است.

## پیشینه تحقیق

تعداد مقالات منتشرشده در زمینه برنامه‌های کاربردی مربوط به مسائل هیدروئولوژی، از جمله RS و GIS، می‌تواند توانایی این ابزارها را در نقشه‌برداری اکتشاف آب‌های زیرزمینی اثبات کنند. در این میان می‌توان به مطالعات Tweed و همکارانش (۲۰۰۷) اشاره کرد که در آن توضیح داده شده است که چگونه از داده‌های به‌دست‌آمده از RS و GIS می‌توان برای تخمین مناطق شارژ و دشارژ و تعامل آب‌های سطحی و زیرزمینی استفاده کرد [۴]. انتخابی و مقدم (۲۰۰۷) با استفاده از GIS تخمینی از تغذیه آب زیرزمینی با توجه به مشاهدات رطوبت خاک، ارائه کردند [۵].

ترکیب RS و GIS از طریق تعیین خطواره‌ها اهمیت بسیار زیادی در هیدروئولوژی هارد راک دارد که می‌تواند شکستگی سنگ‌هایی را که به یک ناحیه آب‌های زیرزمینی محدودند، شناسایی کند [۶]. GIS علاوه بر کمک در زمینه کشف نواحی بالقوه برای اکتشاف آب زیرزمینی، می‌تواند به برآورد کل منابع آب زیرزمینی در مناطق دارای چندین ناحیه گوناگون و انتخاب مکان‌های مناسب برای حفاری و تغذیه مصنوعی کمک کند. ترکیب RS و GIS ابزاری مفید برای مناطقی است که در آن پوشش دقیقی از نقشه‌های زمین‌شناسی و نقشه‌های هیدروئولوژیکی وجود ندارد و وسعت داده‌ها کافی نیست [۷].

ادغام و روی هم‌گذاری داده‌ها با GIS اجازه می‌دهد تا داده‌های مکانی به‌دست‌آمده از چند منبع اطلاعاتی مختلف به صورت یکجا با یکدیگر پردازش شوند. استفاده از GIS برای نقشه‌برداری پتانسیل آب زیرزمینی، قدرت

1. Groundwater Potential Zone  
2. Infiltration

یکی از قوت‌های این تحقیق نیز استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی و ترکیب آن با GIS است که علاوه بر کم‌هزینه‌بودن (در مقایسه با پروژه‌های میدانی)، دقت زیادی دارد و محدوده‌های وسیعی را پوشش می‌دهد. با توجه به اینکه تا به حال از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسئله پتانسیل سنجی منابع آب زیرزمینی استفاده نشده است، این مطالعه نخستین تحقیق در این زمینه به‌شمار می‌آید. مزیت دیگر این پژوهش، استفاده هم‌زمان از داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های زمینی است که سبب می‌شود مطالعه مد نظر با استفاده از بیشترین داده‌های موجود و مد نظر صورت گیرد و نتیجه آن تا حد امکان به واقعیت نزدیک باشد.

#### منطقه مطالعه شده

منطقه مهران در قسمت غربی ایران، بین  $2^{\circ}33'$  تا  $8^{\circ}33'$  عرض شمالی و  $46^{\circ}03'$  تا  $46^{\circ}23'$  طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). وسعت آن حدود ۲۲۶ کیلومتر مربع را پوشش داده است. ارتفاع این منطقه نسبت به سطح دریا، از ۹۱ متر تا ۲۷۱ متر متغیر است و میانگین آن ۱۰۵ متر است. شرایط آب و هوایی این منطقه به‌صورت نیمه‌خشک است و طیف وسیعی از منطقه با این شرایط تعریف شده است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۲). زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده در پهنه ساختاری زاگرس واقع است.

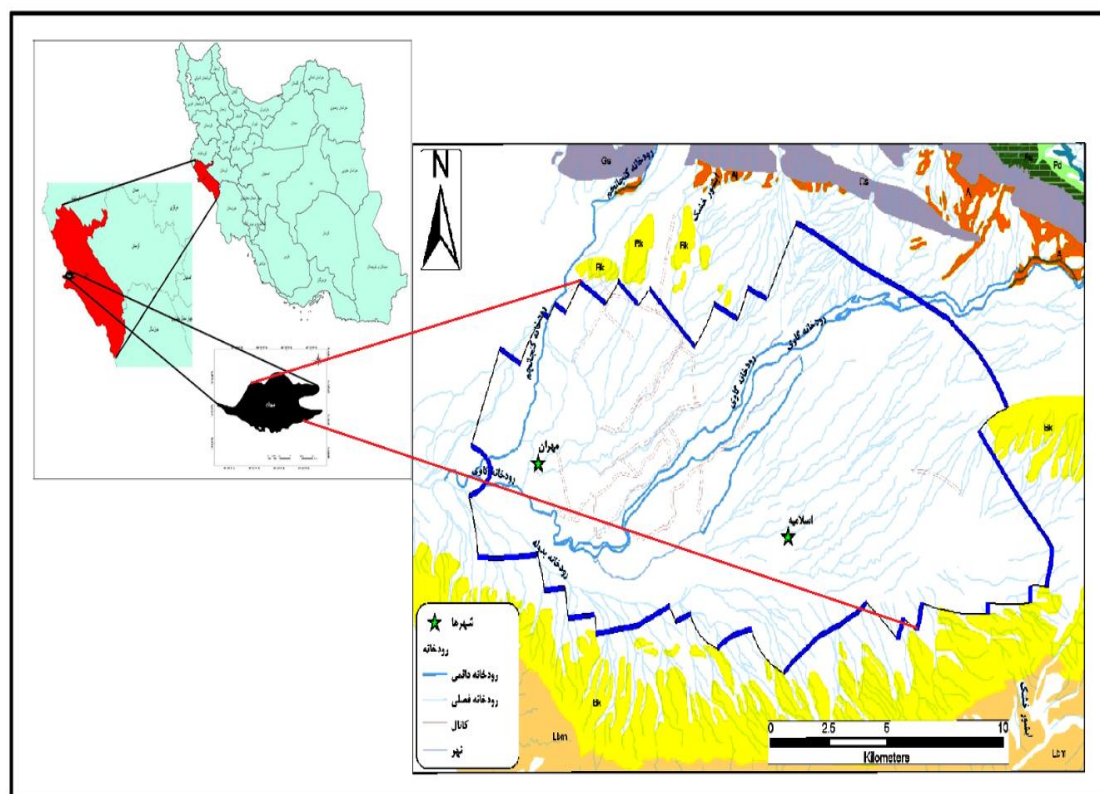
همچنین آبخوان منطقه مهران توسط نفوذ بارش و جریان‌های نشتی به سیستم آب‌های زیرزمینی و قنات‌ها شارژ می‌شود. بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در این منطقه، شامل عمیق، نیمه‌عمیق و چشمه است. بدیهی است که جهت جریان آب زیرزمینی به‌طور کلی از شرق آبخوان به طرف غرب آن و شیب عمومی توپوگرافی از شرق به غرب است. ارزیابی آب‌های زیرزمینی این منطقه برای استفاده از آن برای آب آشامیدنی مورد نیاز و همچنین آب مورد نیاز برای تجهیزات استفاده‌شده برای خروج آب زیرزمینی به‌منظور آبیاری، بسیار مهم است چرا که زندگی مردم در این منطقه به کشاورزی دیم و زراعت آبیاری بسیار وابسته است.

ذخیره‌کردن و دستکاری و تجزیه و تحلیل داده‌ها در فرمت‌ها و مقیاس‌های مختلف را به ما می‌دهد [۸]. در سال‌های اخیر، محققان از بسیاری از تکنیک‌های مختلف برای تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی یا انتخاب مکان مناسب برای گمانه‌زنی برای دستیابی به آب آشامیدنی استفاده کرده‌اند. Srivastava و Gupta (۲۰۱۰) با استفاده از RS و GIS مناطق بالقوه آب زیرزمینی را شناسایی کردند [۹].

Al Saud (۲۰۱۰) روشی را پیشنهاد کرد که در آن با استفاده از GIS و در نظر گرفتن عوامل بارش، سنگ‌شناسی، شکستگی سنگ، شیب، زهکشی و پوشش زمین، می‌توان به نقشه پتانسیل آب زیرزمینی دست یافت [۱۰]. Elewa و Qaddah (۲۰۱۱) یک روش توسعه‌یافته برای نقشه‌برداری پتانسیل آب زیرزمینی در شبه‌جزیره سینا (مصر) با استفاده از GIS و استفاده از هشت پارامتر بارش، شارژ خالص آب‌های زیرزمینی، سنگ‌شناسی، نفوذپذیری، تراکم خطواره، شیب، تراکم زهکشی و عمق را به آب‌های زیرزمینی ارائه دادند [۱۱]. Konkul و همکارانش (۲۰۱۴) با اعمال روشی مشابه به نقشه‌برداری پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه Huay Sai (تایلند) پرداختند [۱۲].

به‌منظور استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات نیز مطالعات زیادی صورت گرفته است که از جمله آنها می‌توان به تحقیقات محمدجواد نعیم و محمدعلی نوری اشاره کرد که در تحقیق خود بیان کردند که روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک، دچار محدودیت‌هایی شامل توقف در نقاط بهینه موضعی و ناتوانی در به‌کارگیری انواع متغیرهاست و برای رفع این محدودیت‌ها می‌توان از روش‌های ابتکاری مانند الگوریتم بهینه‌سازی ذرات استفاده کرد [۱۳].

در کشورهای دیگر نیز برای نمونه بینگ‌چون و همکارانش در پی یافتن ابزار و شیوه‌های کارآمد برای مدیریت منابع آب در حوضه‌های رودخانه بودند و توانستند یک پایگاه رایانه‌ای کاربردی برای تصمیم‌گیرندگان فراهم آورند [۱۴]. همچنین یاوگو و همکارانش بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، دستگاه‌های خودپرداز را مکان‌یابی کردند [۱۵]. پژوهش یادشده نشان‌دهنده توانایی این الگوریتم برای حل مسائل مربوط به پتانسیل سنجی و مکان‌یابی است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده (مهران) با توجه به نقشه ایران

GIS تهیه شدند. به طور کلی، تأثیر شیب در توانایی ماندن آب به اندازه کافی روی سطح زمین است تا بتواند در زمین نفوذ کند و معمولاً شیب‌های تند نشان‌دهنده سرعت زیاد آب است. بنابراین، مشاهده شده است که در حوزه‌های با شیب زیاد، تغذیه آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. در مقابل، شیب‌های نسبتاً ملایم، پتانسیل نفوذ آب را به داخل زمین افزایش می‌دهند.

طبقات ارتفاع از دیگر فاکتورهای مؤثر در پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی است که کارکرد مهمی در ضریب رواناب و نفوذپذیری و میزان آنها دارد. این فاکتور در گرادیان هیدرولیکی و جهت حرکت آب زیرزمینی و محل تشکیل آبخوان کارکرد مؤثر دارد. به بیانی، در ارتفاع زیاد نفوذ آب به درون زمین کمتر و رواناب بیشتر است. بنابراین، افزایش ارتفاع، تأثیر معکوس بر پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی دارد.

خطواره یکی از ویژگی‌های خطی در چشم‌اندازی بزرگ است که یک ساختار زیرین زمین‌شناسی مانند گسل را بیان می‌کند. عوامل ساختمانی و تکتونیکی نظیر

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای پتانسیل‌سنجی منابع آب زیرزمینی، ابتدا با بررسی عوامل مؤثر بر نفوذ آب و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی، عوامل مؤثر در پتانسیل‌سنجی منابع آب زیرزمینی شناسایی شد. در نتیجه، در این پژوهش ۱۳ متغیر از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر پتانسیل‌سنجی منابع آب زیرزمینی شامل لایه‌های میزان شیب، ارتفاع، تراکم زهکشی، تراکم خطواره، نقشه T، نقشه k، نقشه Recharge، نقشه کاربری زمین، نقشه سنگ‌شناسی، نقشه Sy، نقشه عمق آب زیرزمینی، نقشه تراکم چاه و نقشه هم‌کلر استفاده شد. برای یافتن مناطق آبی با پتانسیل‌های مختلف از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شد.

## تهیه لایه‌های اطلاعاتی

به منظور هدف تحقیق، برای تهیه نقشه شیب و ارتفاع، از نقشه‌های توپوگرافی موجود یا داده‌های مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM<sup>1</sup>) استفاده شد. هر یک از نقشه‌ها در محیط

1. Digital Elevation Model

رواناب و نفوذ آب به داخل خاک، و تأثیر بر جریان عمومی و افقی آب در سطح زمین است. به‌طور مثال، در مناطق شهری که بیشتر سطح زمین، پوشیده از مصالح نفوذناپذیر است، نفوذ آب به داخل زمین بسیار کمتر از مناطق جنگلی و دارای پوشش گیاهی است. نواحی جنگلی و کشاورزی نسبت به نواحی بیابانی شرایط تغذیه‌بتری را برای سفره‌های آب زیرزمینی فراهم می‌کنند.

تا اینجا همه فاکتورهایی که بررسی شدند، بر نفوذ آب داخل زمین و تغذیه منابع آب زیرزمینی مؤثرند، اما این تنها راه ممکن برای شناسایی منابع آب زیرزمینی نیست و تجمع آب ناشی از جریان‌های زیرزمینی افقی نیز می‌تواند موجب شکل‌گیری منابع آب زیرزمینی شود. بر این اساس نقشه‌های دیگری از جمله نقشه هدایت هیدرولیکی خاک (K)، نقشه ضریب انتقال (T)، نقشه آبدهی ویژه (Sy) و نقشه تغذیه آب زیرزمینی (Recharge) به‌عنوان داده‌های ورودی برای مسئله پتانسیل‌سنجی آب زیرزمینی استفاده شد. از آنجا که این نقشه‌ها به‌صورت عکس بود، عملیات رقمی‌سازی و دیجیتایز کردن تصاویر در محیط GIS صورت گرفت.

ضریب انتقال یا قابلیت انتقال یک لایه آبدار عبارت است از مقدار آبی که از یک واحد سطح مقطع لایه آبدار، تحت شیب هیدرولیکی واحد، عبور می‌کند. چنانچه ضریب هدایت هیدرولیکی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان  $k$  و ضخامت لایه  $b$  باشد، ضریب انتقال عبارت است از  $T = kb$ . باید توجه داشت که در مفهوم ضریب انتقال، فرض می‌شود که حرکت آب در آکیفر، همیشه به‌صورت افقی است. در تحقیق حاضر، برای امتیازبندی مناطق در نقشه  $T$ ، به این صورت عمل شد که هرچه مقدار پارامتر  $T$  بیشتر، امتیاز اختصاص داده‌شده به آن منطقه بیشتر در نظر گرفته شد و به‌عکس.

با توجه به معادله دارسی  $(V = k \frac{dh}{dl})$ ، جریان آب زیرزمینی از یک نقطه به نقطه دیگر به دلیل وجود اختلاف بار هیدرولیکی بین دو نقطه صورت می‌گیرد که  $(\frac{dh}{dl})$  شیب هیدرولیکی در طول مسیر جریان (dl) و  $k$  ضریب ثابتی است که به نوع، اندازه و شکل ذرات تشکیل‌دهنده مواد رسوبی و طرز قرارگرفتن آنها نسبت به یکدیگر

درزه‌ها و گسل‌ها به‌عنوان ضعف‌های واحدهای زمین‌شناسی به‌شمار می‌روند که به‌اصطلاح به آنها خطواره می‌گویند و راهی برای عبور آسان آب و محلی برای تجمع آب به‌صورت مخازن زیرزمینی است. تراکم شکستگی معیاری برای خردشدگی سازند است. افزایش تراکم درزه و گسل‌ها به‌طور کلی کارکرد مؤثری در نفوذ و انتقال آب زیرزمینی دارد. برای تهیه نقشه تراکم خطواره نیز مانند نقشه تراکم زهکشی از دستور Line Density در محیط GIS استفاده شد.

به‌منظور تهیه نقشه چگالی زهکشی منطقه، باید از نقشه شبکه آبراه‌های منطقه استفاده شود. تراکم زهکشی برابر است با طول کل رودخانه‌ها در حوزه زهکشی، تقسیم بر مساحت حوزه زهکشی. مطالعات نشان می‌دهند نوع شبکه زهکشی هر منطقه توسط لیتولوژی واحدهای زمین‌شناسی، توپوگرافی و ساختارهای تکتونیکی و زمین‌شناسی منطقه کنترل می‌شود. بر این اساس آبراه‌ها کارکرد انتقال رواناب را داشته و با نفوذپذیری زمین رابطه عکس دارند.

یکی از عواملی که می‌تواند تأثیر مستقیم بر میزان نفوذپذیری زمین و تغذیه منابع آب زیرزمینی داشته باشد، زمین‌شناسی منطقه است. این عامل، یکی از عوامل مهم در پتانسیل آب زیرزمینی و نفوذ آب به داخل زمین است. با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه مورد نیاز استخراج و به‌دلیل آنکه در منطقه مطالعه شده در این تحقیق فقط چهار نوع سازند وجود داشت، نقشه در چهار کلاس مختلف، از نظر میزان نفوذپذیری، کلاس‌بندی شد.

برای محاسبه میزان نفوذپذیری هر یک از سازندها، لازم است که محدوده سازند مد نظر و نیز میزان کل آب‌های ورودی و خروجی از آن مشخص و سپس اختلاف آب ورودی و خروجی از آن بر مساحت آن سازند تقسیم شود. پس از این کار یک ضریب به‌عنوان ضریب نفوذپذیری سازند مد نظر به‌دست می‌آید که با توجه به آن سازندهای منطقه مطالعه شده از نظر میزان نفوذپذیری کلاس‌بندی شده‌اند. در این تحقیق برای محاسبه ضریب نفوذپذیری هر یک از سازندها از داده‌های موجود در شرکت مدیریت منابع آب ایران استفاده شد.

بر اساس مطالعات انجام‌شده، اهمیت کاربری اراضی در بررسی منابع آب زیرزمینی، ناشی از تأثیر آن بر کنترل

برای آنکه بتوان شرایط کیفی آب را نیز در فاکتورهای مؤثر بر پتانسیل منابع آب زیرزمینی دخالت داد، می‌توان از فاکتورهای کیفیت آب مانند TDS، میزان نیترات موجود در آب و میزان کلر موجود در آب استفاده کرد که در این تحقیق به‌دلیل در اختیار داشتن نقشه هم‌کلر آب زیرزمینی منطقه (برحسب میلی‌گرم در لیتر)، از این مورد استفاده شد.

عمق آب زیرزمینی، از سطح زمین تا تراز سطح آب زیرزمینی تعریف شده و تعیین‌کننده هزینه مصرف آب و برداشت آن است. برای به‌دست‌آوردن نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی منطقه از داده‌های عمق آب زیرزمینی مربوط به منطقه مهران استفاده شد. به‌طور کلی، هرچه سطح آب عمیق‌تر باشد، هزینه استخراج آب زیرزمینی بیشتر است. پس از تهیه نقشه رقمی هم‌عمق آب زیرزمینی، با توجه به عمق آب در نواحی مختلف، نقشه مد نظر از ۱۰ تا ۹۰ امتیازبندی شد.

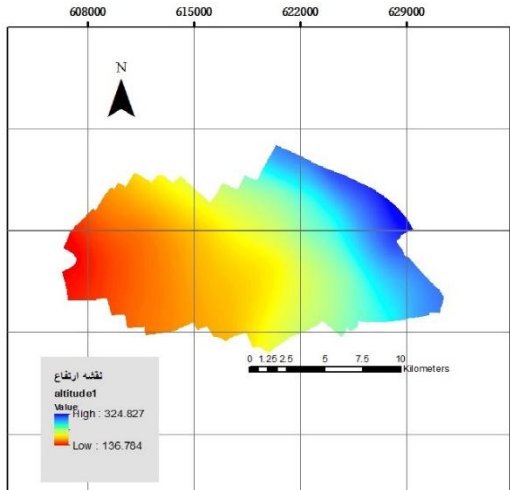
برای به‌دست‌آوردن نقشه تراکم چاه‌های منطقه از داده‌های مربوط به موقعیت چاه‌های مشاهداتی موجود در منطقه استفاده شد. برای این کار ابتدا منطقه مطالعه شده به پلیگون‌های هم‌اندازه تقسیم و سپس تعداد چاه‌های موجود در هر قسمت بر مساحت همان قسمت تقسیم شد. شایان‌یادآوری است در این تحقیق، از نقشه ۱:۲۵۰۰۰ مدل رقمی ارتفاعی منطقه (DEM) و همچنین نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده شد که یکسان نبودن این مقیاس‌ها، به‌دلیل نبود نقشه زمین‌شناسی با مقیاس بزرگ‌تر بود. به همین دلیل در این تحقیق این بی‌دقتی نادیده گرفته شد. همچنین برای رقمی‌کردن تصاویر و ایجاد شیب فایل ۱، اندازه پیکسل ۲ ها ۲۰ متر در نظر گرفته شد تا روی هم‌گذاری و اعمال معادله بهینه‌سازی روی نقشه‌ها به‌خوبی صورت پذیرد.

لایه‌های استفاده‌شده در این پژوهش در شکل‌های ۲ تا ۱۴ آورده شده است.

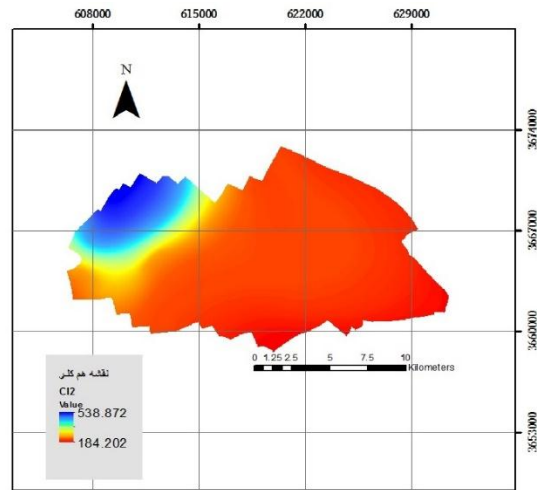
بستگی دارد و به نام ضریب نفوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی خاک معروف است. به‌طور کلی، هدایت هیدرولیکی، نوعی ویژگی در خاک‌هاست که سهولت جریان آب را در فضاهای خالی و شکاف‌ها نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر، برای امتیازبندی مناطق در نقشه هدایت هیدرولیکی، به این صورت عمل شد که هرچه ضریب  $k$  بیشتر، امتیاز اختصاص داده‌شده به آن منطقه بیشتر در نظر گرفته شد و به‌عکس.

تغذیه آب‌های زیرزمینی (Groudwater Recharge) و یا زهکشی عمیق یا نفوذ عمقی آب، فرایندی است که در آن، آب از سطح زمین، رو به پایین و به سمت آب‌های زیرزمینی حرکت می‌کند. تغذیه آب‌های زیرزمینی در مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی فرایند مهمی است، چراکه در درازمدت، میزان حجم آب جمع‌شده در سفره آب، باید کمتر یا مساوی حجم آب شارژشده باشد. بنابراین، هرچه میزان این پارامتر بیشتر باشد، میزان آب نفوذی به داخل زمین به نسبت آب خروجی از آن بیشتر و احتمال وجود آب زیرزمینی در آن منطقه بیشتر است. در تحقیق حاضر، برای امتیازبندی مناطق در نقشه Recharge، به این صورت عمل شد که هرچه پارامتر تغذیه بیشتر، امتیاز اختصاص داده‌شده به آن منطقه بیشتر در نظر گرفته شد و به‌عکس.

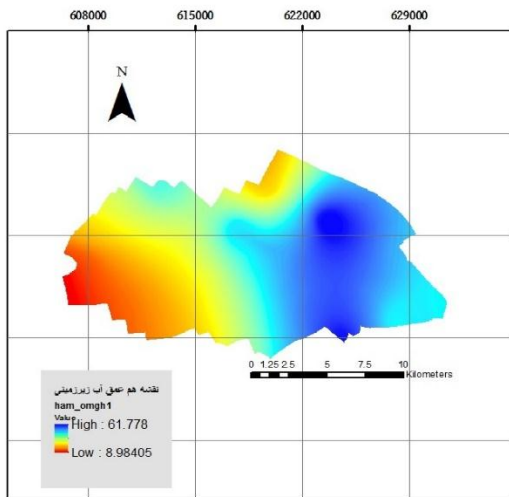
پارامتر آبدهی ویژه یا  $Sy$  یکی از پارامترهای اساسی هیدروژئولوژیکی در آبخوان‌های آزاد است. برآورد این پارامتر، در کنار اطلاعات پایه زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی کارکردی اساسی در تکمیل مطالعات هیدروژئولوژیکی آبخوان دارد که با معادله  $Sy = A \left( \frac{dv}{dh} \right)$  محاسبه می‌شود. با توجه به معادله یادشده، آبدهی ویژه برابر است با نسبت حجم آبی که بر اثر نیروی ثقل قابل جابه‌جا شدن است به حجم کل و با توجه به تخلخل خاک، هرچه تخلخل بیشتر و دانه‌بندی درشت‌تر باشد، ضریب  $Sy$  بیشتر و آب زیرزمینی به میزان بیشتری در خاک نفوذ می‌کند و در تحقیق حاضر، برای امتیازبندی مناطق در نقشه  $Sy$ ، به این صورت عمل شد که هرچه  $Sy$  بیشتر، امتیاز اختصاص داده‌شده به آن منطقه بیشتر در نظر گرفته شد و به‌عکس.



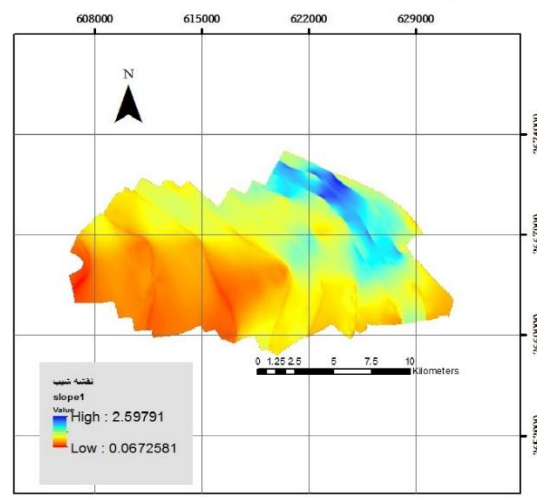
شکل ۳. نقشه ارتفاع زمین



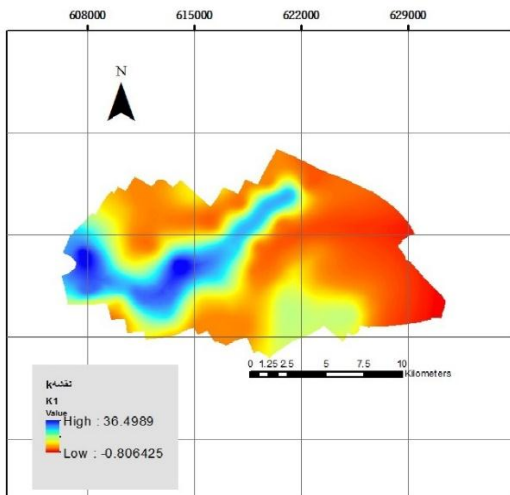
شکل ۲. نقشه هم‌کلی شکل



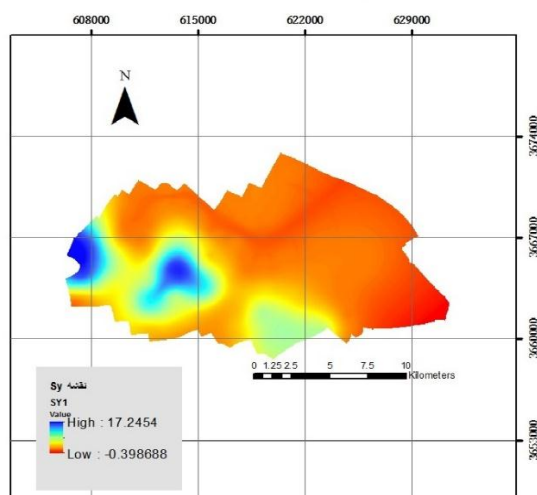
شکل ۵. نقشه عمق آب زیرزمینی



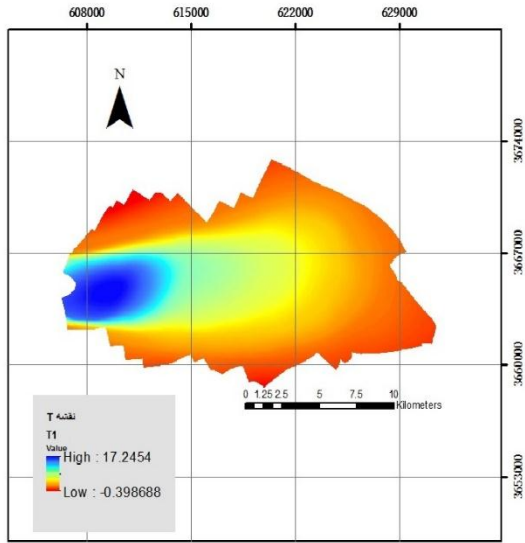
شکل ۴. نقشه درصد شیب شکل



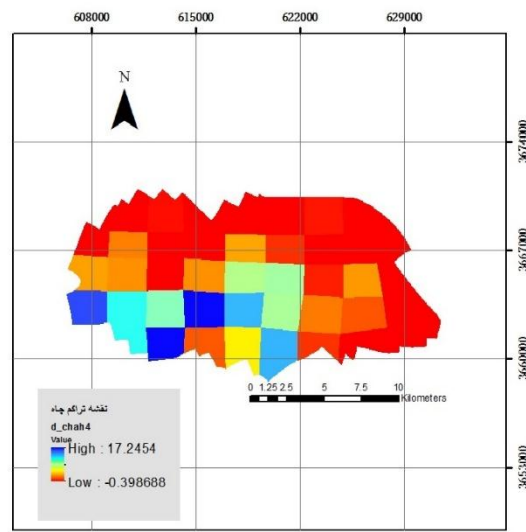
شکل ۷. نقشه k



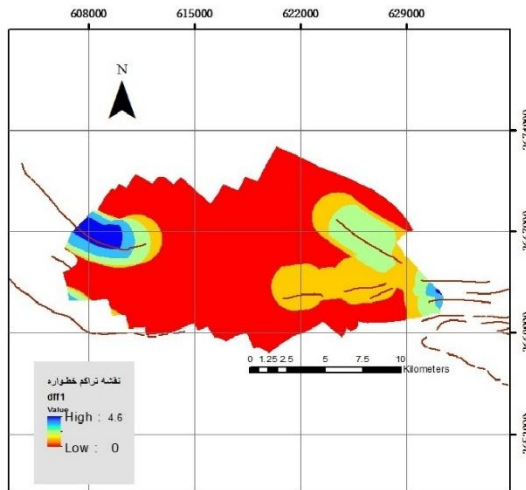
شکل ۶. نقشه Sy شکل



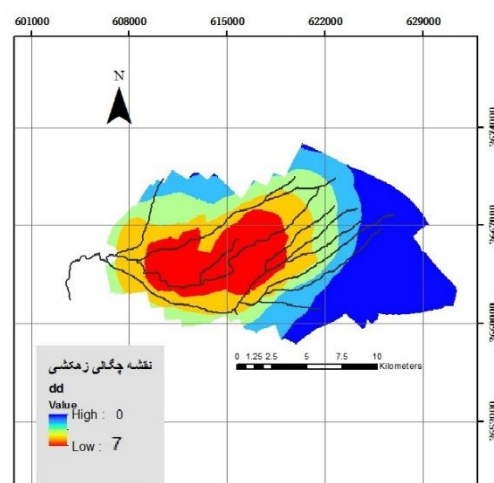
شکل ۹. نقشه T



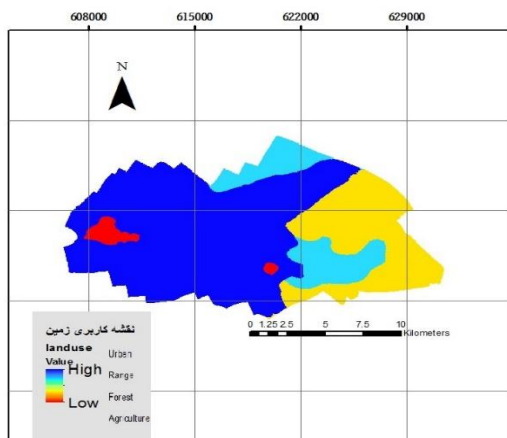
شکل ۸. نقشه تراکم چاه



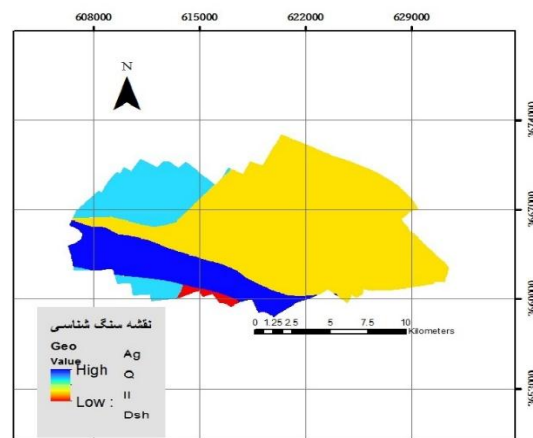
شکل ۱۱. نقشه تراکم خطواره



شکل ۱۰. نقشه تراکم زهکشی

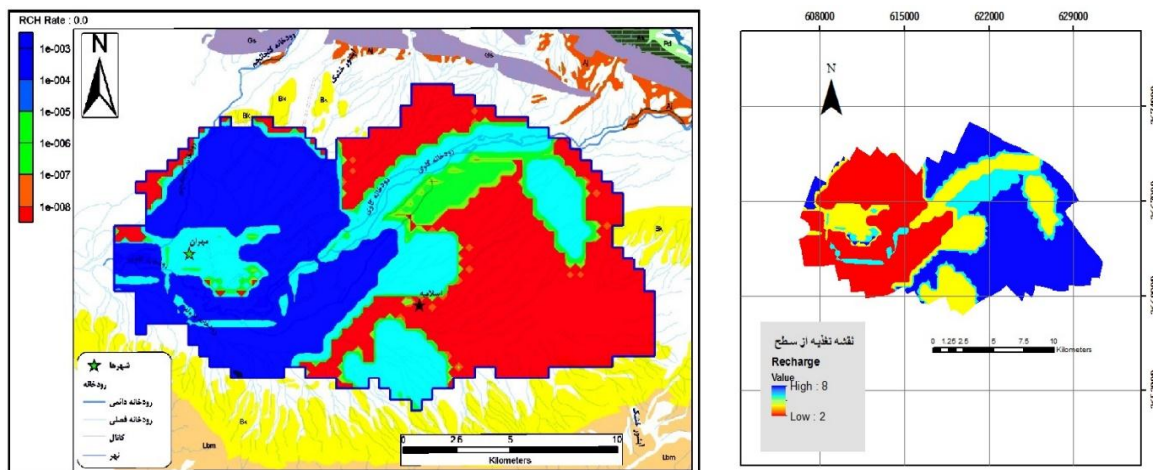


شکل ۱۳. نقشه کاربری زمین



شکل ۱۲. نقشه سنگ‌شناسی





شکل ۱۴. نقشه Recharge

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱</sup>

PSO یک تکنیک بهینه‌سازی است که بر پایه جمعیتی از پاسخ‌های اولیه عمل می‌کند. این تکنیک اولین بار توسط راسل ابرهارت<sup>۲</sup> (مهندس برق) و جیمز کندی<sup>۳</sup> (روانشناس) در سال ۱۹۹۵ بر اساس رفتار اجتماعی پرندگان و ماهی‌ها طراحی شد [۱۶]. ابتدا این الگوریتم به منظور کشف الگوهای حاکم بر پرواز هم‌زمان پرندگان و تغییر ناگهانی مسیر آنها و تغییر شکل بهینه دسته، به کار گرفته شد. سناریوی زیر را در نظر بگیرید: یک گروه از پرندگان وجود دارند که به طور تصادفی در یک محدوده دنبال غذا می‌گردند. پرندگان نمی‌دانند که در چه مکانی غذا وجود دارد. بنابراین، بهترین استراتژی برای پیدا کردن غذا چیست؟ استراتژی کارآمد، پیروی از پرندای است که به غذا نزدیک است [۱۷]. PSO از این سناریو می‌آموزد و در مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌کند. در PSO هر جواب فقط، شبیه یک پرند در فضای جست و جو است که ذره<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. همه ذرات مقداری هزینه دارند که به وسیله تابع هزینه برای بهینه‌سازی ارزیابی می‌شوند، و همچنین ذرات سرعت دارند که به پرواز پرندگان جهت می‌دهند. ذرات در فضای جست و جوی مسئله با پیروی از بهترین راه حل تا کنون پرواز می‌کنند [۱۷].

حرکت خود در فضای مسئله ادامه می‌دهد؛ به این شکل که گروهی از ذرات PSO، در آغاز کار به صورت تصادفی به وجود می‌آیند و با به روز کردن نسل‌ها برای یافتن راه حل بهینه تلاش می‌کنند. در هر گام، هر ذره با استفاده از دو مقدار برتر به روز می‌شود. اولین مورد، بهترین موقعیتی است که تا کنون یک ذره موفق به رسیدن به آن شده است. این مقدار با نام pbest توسط الگوریتم استفاده می‌شود. بیشترین مقدار دیگر، بهترین موقعیتی است که تا کنون توسط جمعیت ذرات به دست آمده است. این موقعیت با gbest نمایش داده می‌شود.

در واقع سرعت ذره در هر گام از دو قسمت تشکیل می‌شود. قسمت اول سرعت فعلی ذره و قسمت دوم، مربوط به دنبال کردن بهترین تجربه شخصی و تجربه گروه است. الگوریتم حرکت دسته جمعی ذرات با ترکیب این دو قسمت سعی می‌کند که به نوعی تعادل را بین جست‌وجوها ایجاد کند. در این الگوریتم برای به روزرسانی سرعت از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۸].

$$V[t+1] = V[t] + c_1 * rand(t) * (pbest[t] - position[t]) + c_2 * rand(t) * (gbest[t] - position[t]) \tag{1}$$

الگوریتم PSO سه مزیت عمده دارد. اول آنکه این الگوریتم را می‌توان به عنوان یک روش تکاملی با چگونگی شناسایی از طریق مجاورت راه حل‌ها (ذرات) در میان جمعیت (ازدحام) و به کار بردن اطلاعات نسلی به دست آمده، به کار برد. دوم آنکه این روش متفاوت از دیگر روش‌های

هر ذره یک سرعت دارد که هدایت حرکت را به عهده دارد. هر ذره، با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به

1. Particle Swarm Optimization (PSO)  
 2. Russell Eberhart  
 3. James Kennedy  
 4. Partic

در این تحقیق برای به دست آوردن ضرایب نقشه‌ها از الگوریتم PSO استفاده شد. برای انجام این کار ابتدا یک معادله بهینه‌سازی تعریف و قیده‌های آن مشخص شد و سپس در محیط MATLAB به حل معادله یادشده و تعیین ضرایب نقشه‌ها پرداخته شد. در آخر با استفاده از این ضرایب به روی هم‌گذاری نقشه‌ها و تهیه نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی در محیط GIS پرداخته شد. در شکل ۱۵ روند اجرای پروژه نشان داده شده است.

تکاملی است که هیچ عملگر تکاملی از جمله هم‌گذاری و جهش ندارند. سوم آنکه در این روش، سازگاری مدل با تعداد کمتری از پارامترها قابل حصول است و از این نظر استفاده از آن راحت‌تر از دیگر مدل‌هاست. با توجه به این دلایل، در این پروژه، از الگوریتم PSO برای حل مسئله پتانسیل‌سنجی آب زیرزمینی استفاده شد. بر این اساس، پس از تهیه همه نقشه‌های مورد نیاز برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی، لازم است که نقشه‌ها با استفاده از ضرایب مناسب، روی هم‌گذاری شوند.



شکل ۱۵. روند نمای مراحل انجام تحقیق

### تعریف معادله بهینه‌سازی

نقشه ارتفاع؛  $C_{10}$ : نقشه هم‌کله؛  $C_{11}$ : نقشه کاربری زمین؛  
 $C_{12}$ : نقشه چگالی چاه یا Sy

تعیین وزن‌ها بر اساس نقشه Sy (حالت  $C_{12} = S_y$ )  
 در این حالت  $C_{12}$  برابر با Sy است و معادله بهینه‌سازی که توسط محیط MATLAB و با روش PSO حل شد به صورت معادله ۴ است. در معادله ۴، مقدار Z با استفاده از PSO مینیمم شد.

$$Z = X_1C_1 + X_2C_2 + X_3C_3 + X_4C_4 + X_5C_5 + X_6C_6 + X_7C_7 + X_8C_8 + X_9C_9 + X_{10}C_{10} + X_{11}C_{11} - S_y \quad (4)$$

پس از اجرای الگوریتم در محیط MATLAB با توجه به شرایط قسمت قبل، نتایج به صورت زیر به دست آمد و مقدار C ها (ضرایب نقشه‌ها بر حسب درصد) محاسبه شد.

تعیین وزن‌ها بر اساس نقشه تراکم چاه ( $C_{12} = d\_chah$ )  
 در این حالت  $C_{12}$  برابر با d\_chah است و معادله بهینه‌سازی که در محیط MATLAB و با روش PSO حل شد به صورت زیر است. در معادله ۵، مقدار Z با استفاده از PSO مینیمم شد.

$$Z = X_1C_1 + X_2C_2 + X_3C_3 + X_4C_4 + X_5C_5 + X_6C_6 + X_7C_7 + X_8C_8 + X_9C_9 + X_{10}C_{10} + X_{11}C_{11} - d\_chah \quad (5)$$

الگوریتم PSO یک الگوریتم بهینه‌سازی است که می‌توان از آن برای ماکزیمم یا مینیمم کردن یک معادله استفاده کرد. در این تحقیق سعی شد تا با توجه به شرایط موجود در مسئله مکان‌یابی و قیده‌های موجود در آن، معادله‌ای تعریف شود که بتوان آن را با استفاده از الگوریتم PSO مینیمم کرد. در این تحقیق معادله‌ای که تعریف شد به شکل زیر است:

$$Z = X_1C_1 + X_2C_2 + X_3C_3 + X_4C_4 + X_5C_5 + X_6C_6 + X_7C_7 + X_8C_8 + X_9C_9 + X_{10}C_{10} + X_{11}C_{11} - C_{12} \quad (2)$$

هدف این تحقیق مینیمم کردن فرمول یادشده و به دست آوردن C ها است که این کار قرار است توسط الگوریتم PSO انجام شود. شکل ریاضی فرمول یادشده چنین است:

$$Min Z = \sum_{i=1}^{11} X_i C_i - C_{12} \quad (3)$$

که در آن C ها نقشه‌ها و X ها ضرایب ما هستند که هدف ما از طرح این مسئله یافتن X ها است.

$C_1$ : نقشه T؛  $C_2$ : نقشه شیب؛  $C_3$ : نقشه Recharge؛  
 $C_4$ : نقشه هم‌عمق؛  $C_5$ : نقشه K؛  $C_6$ : نقشه سنگ‌شناسی؛  
 $C_7$ : نقشه چگالی خطواره؛  $C_8$ : نقشه چگالی زهکشی؛  $C_9$ :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13.66719163...	2.780960681...	11.35326310...	6.689041993...	10.61964231...	12.00000003...	5.937491509...	3.466234752...	8.890319058...	14.22997367...	10.36588123...	

شکل ۱۶. نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم PSO در محیط MATLAB برای حالت  $C_{12} = S_y$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10.39721066...	3.269894851...	11.18269705...	6.227435570...	13.06259848...	15.09957023...	2.897152254...	3.078949711...	9.049793037...	14.63433484...	11.10036329...	

شکل ۱۷. نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم PSO در محیط MATLAB برای حالت  $C_{12} = d\_chah$

تهیه نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی از روی هم‌گذاری نقشه‌ها در محیط GIS و اعمال این ضرایب استفاده شد. در این مرحله برای هر دو حالت قبل ( $C_{12}$  برابر با Sy و  $D\_chah$ )، نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی به دست آمد.

### بحث درباره ضرایب

ضرایب هر یک از نقشه‌ها پس از حل مسئله پتانسیل سنجی توسط الگوریتم PSO در جدول ۱ قابل مشاهده است.

### نتایج

پس از محاسبه ضرایب نقشه‌ها توسط الگوریتم PSO، برای

ترم‌های معادله ۷ دقیقاً همانند قسمت قبل هستند. نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی برای هر دو حالت یادشده در شکل ۱۸ آورده شده است.

هر دو نقشه مکان‌های یکسانی را از نظر میزان پتانسیل آب زیرزمینی نشان داده‌اند، اما اختلاف بین مکان‌های بسیار مناسب تا بسیار نامناسب در نقشه PSO\_Sy در مقایسه با PSO\_chah بسیار واضح‌تر بیان شده است. این تفاوت نیز ناشی از ترم  $C_{12}$  در معادله ۲ است.

در شکل ۱۹، نمودار درصد فراوانی بر حسب امتیاز برای هر دو حالت PSO\_Sy و PSO\_chah نشان داده شده است. اگر در این نمودار، امتیاز ۱۰ تا ۲۷/۵ را منطقه بسیار نامناسب، امتیاز ۳۰ تا ۴۷/۵ را منطقه نامناسب، امتیاز ۵۰ تا ۶۷/۵ را منطقه مناسب، و امتیاز ۷۰ تا ۸۷/۵ را منطقه بسیار مناسب در نظر گرفته شود، نتایج هر حالت و اختلاف آنها در جدول ۲ آمده است.

همچنین در شکل ۲۰، مکان‌های بسیار مناسب از نظر پتانسیل آب زیرزمینی پیشنهادشده توسط الگوریتم PSO نشان داده شده‌اند.

بر اساس نقشه Sy (حالت  $C_{12} = S_y$ )

برای این کار با استفاده از فرمول ۶، روی هم‌گذاری نقشه‌ها انجام شد.

$$N = 13/67 C_1 + 2/78 C_2 + 11/35 C_3 + 6/69 C_4 + 10/62 C_5 + 12 C_6 + 5/94 C_7 + 3/47 C_8 + 8/89 C_9 + 14/23 C_{10} + 10/27 C_{11} \quad (6)$$

که در آن N نقشه نهایی پتانسیل سنجی آب زیرزمینی،  $C_1$  نقشه T،  $C_2$  نقشه شیب،  $C_3$  نقشه Recharge،  $C_4$  نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی،  $C_5$  نقشه K،  $C_6$  نقشه سنگ‌شناسی، و  $C_7$  نقشه چگالی خطواره،  $C_8$  نقشه چگالی زهکشی،  $C_9$  نقشه ارتفاع،  $C_{10}$  نقشه هم‌کلر،  $C_{11}$  نقشه کاربری زمین است.

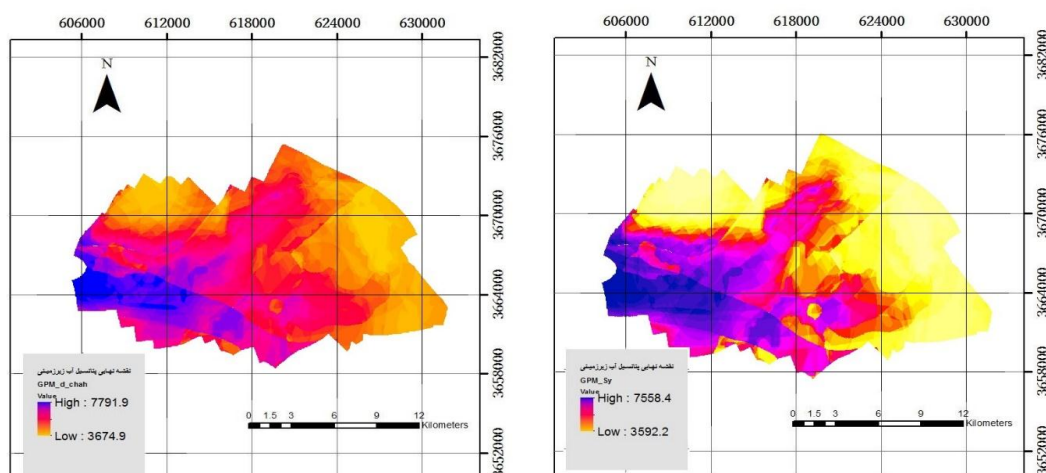
بر اساس نقشه تراکم چاه ( $C_{12} = d\_chah$ )

در این حالت، معادله همپوشانی به صورت معادله ۷ است.

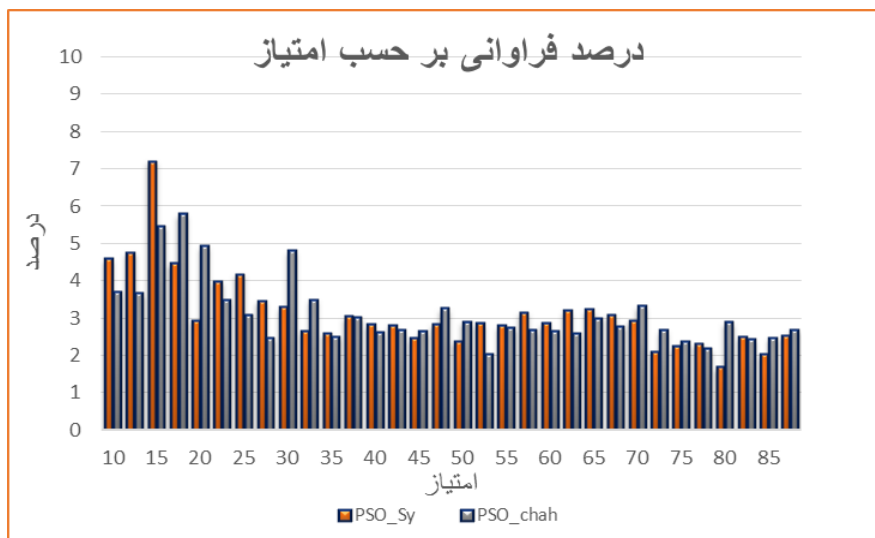
$$N = 10/40 C_1 + 3/27 C_2 + 11/18 C_3 + 6/23 C_4 + 13/06 C_5 + 15/10 C_6 + 2/90 C_7 + 3/08 C_8 + 9/051 C_9 + 14/63 C_{10} + 11/10 C_{11} \quad (7)$$

جدول ۱. مقایسه ضرایب به دست آمده برای هر یک از نقشه‌ها از حل الگوریتم PSO

هم‌عمق آب زیرزمینی	Recharge	هم‌کلر	k	T	کاربری زمین	سنگ‌شناسی	ارتفاع	شیب	تراکم زهکشی	تراکم خطواره	درصد حاصل از
۶/۶۹	۱۱/۳۵	۱۴/۲۳	۱۰/۶۲	۱۳/۶۷	۱۰/۳۷	۱۲	۸/۸۹	۲/۷۸	۳/۴۷	۵/۹۴	درصد حاصل از PSO_Sy
۶/۲۳	۱۱/۱۸	۱۴/۶۳	۱۳/۰۶	۱۰/۴۰	۱۱/۱۰	۱۵/۱۰	۹/۰۵	۳/۲۷	۳/۰۸	۲/۹۰	درصد حاصل از PSO_chah



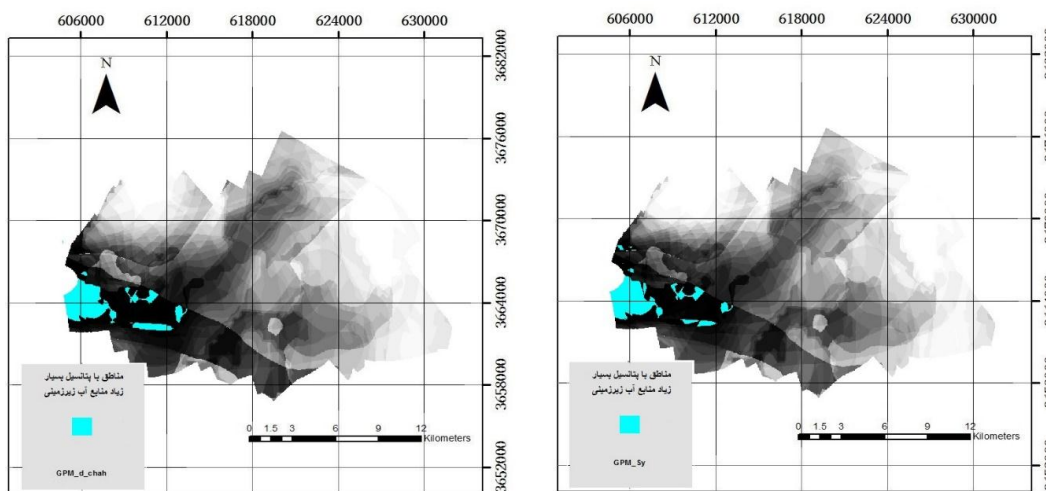
شکل ۱۸. نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی برای دو حالت PSO\_Sy و PSO\_chah



شکل ۱۹. نمودار درصد فراوانی مناطق بر حسب امتیاز برای هر دو حالت PSO\_Sy و PSO\_chah

جدول ۲. درصد مکان‌های مشخص شده توسط الگوریتم PSO

	بسیار نامناسب	نامناسب	مناسب	بسیار مناسب
PSO_chah	درصد ۳۵/۵۶	درصد ۲۲/۵۲	درصد ۲۳/۵۷	درصد ۱۸/۳۵
PSO_Sy	درصد ۳۲/۵۸	درصد ۲۵/۰۳	درصد ۲۱/۳۶	درصد ۲۱/۰۳



شکل ۲۰. مکان‌های با پتانسیل بسیار زیاد آب زیرزمینی برای هر دو حالت PSO\_Sy و PSO\_chah

### نتیجه‌گیری

مسئله پتانسیل‌سنجی جزء مسائل پیچیده است که حل مستقیم آنها به روش دقیق کلاسیک بسیار زمان‌بر است. همچنین روش‌های دقیق در حل مسائل با ابعاد کوچک کاربرد دارند، اما برخلاف روش‌های دقیق، الگوریتم‌های فراابتکاری توانایی حل مسائل پیچیده را داشته و

شکل ۲۰ نشان می‌دهد مکان‌های با پتانسیل آب زیرزمینی بسیار زیاد، پیشنهادی توسط دو حالت الگوریتم PSO با یکدیگر اختلاف دارند. در روش استفاده از الگوریتم PSO، در حالت PSO\_chah، ۲/۵۶ درصد از کل منطقه و در حالت PSO\_Sy، ۲/۴۰ درصد از کل منطقه به‌عنوان مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی بسیار زیاد مشخص شده است.

- the Aghchay dam). Journal of Echo Hydrology. 2014, 123-132. (In Persian).
- [2]. Vafaeinejad A.R, Cropping pattern optimization by using TOPSIS method and genetic algorithm based on GIS capabilities (case study: Land of the plain, Isfahan). Journal of Echo Hydrology. 2016, 69-82. (In Persian).
- [3]. Chenini I, Ben Mammou A. Groundwater recharge study in arid region: An approach using GIS techniques and numerical modeling. Computers & Geosciences. 2010, 801-817.
- [4]. Tweed S.O, Leblanc M, Webb J.A, Lubczynski M.W. Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments. SE Australia. Hydrogeol. 2007, 75-96.
- [5]. Entekhabi D, Moghaddam M. Mapping recharge from space: roadmap to meeting the grand challenge. Hydrogeol. 2007, 105-116.
- [6]. Das D. Satellite remote sensing in subsurface water targeting. In: Proceeding ACSM-ASPRS Annual Convention. 1990, 99-103.
- [7]. Hoffmann J, Sander P. Remote sensing and GIS in hydrogeology. Hydrogeol. 2007, 1-3.
- [8]. Rahman A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. Appl. Geograph. 2008, 32-53.
- [9]. Gupta M, and Srivastava P.K. Integrating GIS and remote sensing for identification of groundwater potential zones in the hilly terrain of Pavagarh, Gujarat, India. Water Int. 2010, 233-245.
- [10]. Saud M.A.I. Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques. Hydrogeol. 2010, 1481-1495.
- [11]. Elewa H.H. Qaddah A.A. Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modeling. Hydrogeol. 2011, 613-628.
- [12]. Konkul J. Rojborwornwittaya W. Chotpantararat S. Hydrogeologic characteristics and groundwater potentiality mapping using potential surface analysis in the Huay Sai area, Phetchaburi Province, Thailand. Geosci. 2014, 89-103.
- [13]. Mon'em M.J, Noori M.A. Application of PSO optimization algorithm in distribution and optimized delivery of water in irrigation networks. Journal of Irrigation and Drainage of Iran. 2010, 82-73. (In Persian).

جواب‌های خوبی را در یک زمان معقول تولید می‌کنند. بنابراین، استفاده از روش‌های فراابتکاری مانند الگوریتم PSO معقول به نظر می‌رسد.

همچنین GIS یک ابزار قدرتمند برای تجزیه و تحلیل مکانی است و نیز یک سکوی برای یکپارچه‌سازی لایه‌های مختلف اطلاعات ارائه و اجازه دست‌کاری اطلاعات مکانی به روش‌های مختلف را می‌دهد. در نتیجه مقاله حاضر تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی ذرات و سیستم اطلاعات مکانی را مد نظر قرار داد. برای این کار با استفاده از GIS لایه‌ها آماده و پردازش‌های لازم روی آنها انجام داده شد.

پس از تهیه این لایه‌ها، با استفاده از الگوریتم PSO، هر یک از نقشه‌ها وزن‌دهی و سپس با استفاده از روش همپوشانی وزن‌دار در محیط GIS با یکدیگر ترکیب شد و نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی به‌دست آمد. در آخر ۲ نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی، یک بار در حالتی که معادله بهینه‌سازی برابر با نقشه تراکم چاه قرار گرفت (PSO\_chah) و بار دیگر برای حالتی که معادله بهینه‌سازی برابر نقشه آبدی ویژه قرار گرفت (PSO\_Sy)، به‌دست آمد. همچنین نتایج نشان داد نقشه PSO\_chah، ۲/۵۶ درصد از منطقه و نقشه PSO\_Sy، ۲/۴۰ درصد از منطقه را به‌عنوان مناطق با پتانسیل بسیار زیاد از نظر منابع آب زیرزمینی مشخص کردند.

پس از حل معادلات بهینه‌سازی (معادلات ۴ و ۵) با استفاده از الگوریتم PSO این نتیجه به‌دست آمد که نقشه‌های شیب، تراکم خطواره و تراکم زهکشی در هر دو حالت حل مسئله پتانسیل‌سنجی به روش PSO، کمترین ضرایب را به خود اختصاص دادند. برای حالت PSO\_chah این ضرایب به‌ترتیب برابر ۳/۲۷، ۲/۹۰ و ۳/۰۸ و برای حالت PSO\_Sy برابر ۲/۷۸، ۵/۹۴ و ۳/۴۷ به‌دست آمد که این بدان معناست که تأثیر نقشه‌های یادشده روی نقشه نهایی پتانسیل آب زیرزمینی در مقایسه با دیگر نقشه‌ها به‌مراتب کمتر است.

## منابع

- [1]. Vafaeinejad A.R, yousof zadeh J, yousofi H, mohammadi varzaneh N. Management of water distribution in irrigation networks and Allocation of cropping pattern with the help of geographic information systems and linear programming (case study: land downstream of

- [14]. Ying chun, Ge, XinLi, Chunlin Huang, Zhuotong Nan. A Decision Support System for irrigation water allocation along the middle reaches of the Heihe River Basin. Northwest China. *Environmental Modelling & Software*. 2013, 182-192.
- [15]. Li Y, Sun H, Zhang C, Li G. Sites Selection of ATMs Based on Particle Swarm Optimization. *International Conference on Information Technology and Computer Science*. 2009, 526-530
- [16]. Haupt RL, Haupt SE. *Practical Genetic Algorithms*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [17]. Engelbrecht, Andries P. *Computational intelligence: an introduction*. wiley, 2007.
- [18]. Mohammadi varzaneh N, Vafaeinejad A.R, The allocation of water in irrigation networks with the help of decision support system based on Geographic Information System (GIS) and particle swarm algorithm (PSO) (case study: Agricultural land of Ghortan). *Journal of Echo Hydrology*. 2015, 39-49. (In Persian).