

## کاربرد مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای کنترل سطح آب زیرزمینی در پروژه‌های عمرانی بررسی موردی: شبکه مترو تبریز

سمیه جنت رستمی<sup>۱\*</sup>، مجید خلقی<sup>۲</sup> و کورش محمدی<sup>۳</sup>

### چکیده

بالازدگی سطح آب زیرزمینی یکی از شرایط بحرانی در مدیریت سفره‌های آب زیرزمینی به ویژه زمانی که هدف احداث سازه‌ای در محیط متخلخل است. از آنجا که در محدوده مترو شهر تبریز سطح آب زیرزمینی بالاست، بنابراین پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در یک افق زمانی کوتاه مدت، یکی از هدف‌های برنامه‌ریزان آب زیرزمینی در این شهر است. در این پژوهش، از مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی GWM برای کاهش سطح آب زیرزمینی استفاده شد. برای اینکه برنامه مدیریتی، قابل اجرا برای بخش‌های اجرایی و مردم باشد، نواحی اطراف مسیر مترو به ۸ شبکه مدیریتی (۱، ۲، ...، ۸) تقسیم و ۳۷ مکان برای حفاری چاه جدید در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با اضافه برداشت از ۶ شبکه مدیریتی و همچنین با حفاری و برداشت ۱۳ چاه جدید در اطراف مسیر مترو می‌توان سطح آب زیرزمینی را در افق زمانی سه ساله به زیرکف تونل مترو رساند.

**واژه‌های کلیدی:** آب زیرزمینی، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، شهر تبریز، مترو، مدیریت.

**ارجاع:** جنت رستمی س. خلقی م. و محمدی ک. ۱۳۹۴. کاربرد مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای کنترل سطح آب زیرزمینی در پروژه‌های عمرانی بررسی موردی: شبکه مترو تبریز. مجله پژوهش آب ایران. ۱۹: ۱۰۹-۱۱۸.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.

۳- استادیار دانشکده فنی، دانشگاه گولف کانادا.

\* نویسنده مسئول: [janatrostami@guilan.ac.ir](mailto:janatrostami@guilan.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۱۹

## مقدمه

به تازگی مدل‌های ریاضی جریان آب زیرزمینی با روش‌های بهینه‌سازی مختلف برای تعیین خط مشی مدیریت منابع آب و بهترین مجموعه جواب با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها ترکیب شده‌اند (الفلد و همکاران، ۲۰۰۵). هدف‌ها و محدودیت‌ها در مدیریت آب‌های زیرزمینی به صورت یک سری روابط ریاضی فرموله می‌شوند. از روش‌های تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برای حل مسائل مدیریت آب زیرزمینی از قبیل کنترل سطح آب، نشست زمین و غیره استفاده می‌شود.

در مدیریت آب زیرزمینی برای بهینه‌سازی سیستم آبخوان یک منطقه ابتدا باید مدل شبیه‌سازی آبخوان منطقه مورد نظر تهیه شود. دو نگرش در استفاده از مدل ریاضی برای بهینه‌سازی سفره‌های آب‌های زیرزمینی وجود دارد. نگرش اول استفاده از مدل ریاضی است در این نگرش رفتار آبخوان از نظر خطی یا غیرخطی بودن تشخیص داده شده و رابطه بین مقادیر برداشت و افت سطح آب زیرزمینی را به دست می‌آورند. سپس با استفاده از معادله به دست آمده، بهینه‌سازی سیستم آب زیرزمینی را انجام می‌دهند. استفاده از نگرش در مدیریت سفره آب زیرزمینی، به دلیل اینکه در هر بار به ازای هر تغییری باید در مدل شبیه‌سازی اعمال شود و سپس مدل شود، زمان زیادی برای گرفتن نتایج، نیاز دارد و این می‌تواند یکی از عیب‌های این دیدگاه باشد. ولی از طرف دیگر با توجه به اینکه، انتخاب یا رد گزینه‌ها با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه بر عهده شخص تصمیم گیرنده است، این می‌تواند به عنوان امتیاز در نظر گرفته شود. پژوهش‌گران زیادی از جمله آکوادو و همکاران (۱۹۷۴) برای پیش‌بینی تعداد بهینه چاه‌ها، شوارتز (۱۹۷۶) در مدیریت هیدرولیکی آب زیرزمینی، عبدکلاهی و همکاران (۲۰۰۹) در بهینه‌سازی کیفی آب زیرزمینی و جوادیان‌زاده (۱۳۷۷) در تهیه مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی جریان آب زیرزمینی و همچنین علی‌محمدی (۱۳۸۴)، قادری و همکاران (۱۳۸۵) و دشتی (۱۳۸۵) در بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی از این نگرش استفاده کردند. نگرش دوم در بهینه‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی، استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌سازی - بهینه‌سازی است. در این نگرش بعد از کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی و تعیین متغیرهای

تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی، اتصال دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی انجام می‌شود. برتری این روش در این است که در هنگام بهینه‌سازی به ازای هر تغییری در بردار متغیرهای تصمیم، مدل شبیه‌سازی دوباره اجرا می‌شود. بدیهی است که این نگرش نسبت به نگرش قبلی دارای دقت بالاتری است. الفلد و سایر (۱۹۹۰) از این روش برای اصلاح آلودگی آب زیرزمینی استفاده کردند، در این بررسی آن‌ها موقعیت چاه‌ها و سرعت پمپاژ را با حداقل کردن هزینه به دست آوردند. خلقی و همکاران (۱۹۹۶) در مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی، بارلو و همکاران (۲۰۰۳)، برای مدیریت آب زیرزمینی از مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با روش برنامه‌ریزی خطی، قزاق (۱۳۸۶) در مدیریت سفره آب زیرزمینی دشت قزوین با روش برنامه‌ریزی پویا، تامر آیواز و کاراهان (۲۰۰۸) برای تهیه مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آب زیرزمینی با الگوریتم ژنتیک و تامر آیواز (۲۰۰۹)، در تهیه مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی با الگوریتم جستجوی هارمونی از این نگرش استفاده کردند. رجان و همکاران (۲۰۰۹) و سدکی و اوزار (۲۰۱۱) از این نگرش، برای توسعه پایدار مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آب زیرزمینی در آبخوان‌های ساحلی اورپسا در هند و مراکش استفاده کردند، صفوی و همکاران (۲۰۱۰) در بهره‌برداری تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی و همچنین گار و همکاران (۲۰۱۱) برای تهیه مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با روش جستجوی پرندگان از نگرش دوم استفاده کردند. به طور کلی در حل مشکل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در پروژه‌های عمرانی شامل راه، ساختمان، سد، راه آهن، پل، تونل و غیره دو نگرش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری وجود دارد. در دیدگاه سخت‌افزاری با اقدامات سازه‌ای، مسیر جریان آب زیرزمینی را منحرف می‌کنند و در روش نرم‌افزاری برای خشکاندازی سطح آب از پمپاژ استفاده می‌شود. این مسئله به ویژه زمانی که پروژه سازه‌ای به صورت طولی و نه نقطه‌ای، بخش‌های مختلف مناطق شهری را دربرمی‌گیرد بحرانی‌تر می‌شود (خلقی، ۱۳۹۱). استفاده از دیدگاه سخت‌افزاری در مسیر طولانی ضمن بالا بردن هزینه‌ها از نظر ساختار زمین‌شناسی مهندسی به ویژه در مناطق گسل‌دار ممکن است ریسک پروژه بالا رود. در این پژوهش از دیدگاه نرم‌افزاری برای کاهش سطح آب

فرمول‌بندی شد. در ادامه از کد نرم‌افزاری GWM استفاده می‌شود.

الفلد و همکاران (۲۰۰۵)، مدل بهینه‌سازی را تحت عنوان GWM، که براساس کد MODFLOW و با زبان برنامه‌نویسی فرترن نوشته شده، ارائه کردند. این مدل در مدیریت آب زیرزمینی فرمول بندی ماتریس پاسخ خطی را با سه روش خطی<sup>۱</sup>، غیرخطی<sup>۲</sup> و مختلط خطی-دوتایی<sup>۳</sup> دوتایی<sup>۳</sup> به دست می‌آورد. GWM نسخه توسعه‌یافته کد MODCDOFC است که توسط ادفلد و ریفلر (۲۰۰۳) نوشته شده است (MODCFC براساس MODFLOW-96 است که توسط هربرگ و ام سی دونالد در سال ۱۹۹۶ نوشته شده است).

### الف- منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی است که وسعتی در حدود ۱۹۰ کیلومترمربع دارد. این شهر در ۲۵° ۴۶ طول شرقی و ۲° ۳۸ عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد و ارتفاع تقریبی آن از سطح دریا، ۱۳۵۰ متر است. شهر تبریز جزئی از حوضه آبریز رودخانه آجی‌چای است و اقلیم منطقه نیمه‌خشک، سرد با زمستان‌های به نسبت طولانی است. همچنین دمای متوسط سالانه در ایستگاه تبریز ۱۲/۴ سانتی‌گراد و براساس نقشه‌های هم‌باران میزان بارش سالانه در ایستگاه تبریز ۲۵۵ میلی‌متر است. زمین‌شناسی و سیستم ژئومورفولوژی آذربایجان شرقی در منطقه تبریز، نتیجه پیامدهای آخرین مراحل رسوب‌گذاری و فعالیت‌های آذرینی و واپسین حرکات زمین‌ساختی است که مربوط به فاز پایانی آلپی بوده که چهره کنونی منطقه را به وجود آورده‌اند. بررسی هیدروگراف واحد سطح آب در سال (۸۳-۱۳۸۲) در محدوده شهر تبریز نشان می‌دهد سطح آب در دوره مرطوب ۰/۹۴ متر صعود و در دوره خشک ۰/۷۶- متر نزول داشته که در مجموع بیلان سالانه آبخوان ۰/۱۸+ متر است.

در کلان شهر تبریز، با توجه به رشد بی‌سابقه جمعیت، بالا بودن ترافیک، طولانی بودن سفرهای درون شهری، افزایش میزان مصرف سوخت و آلودگی هوا، ضرورت

زیرزمینی در مسیر خط یک متروی شهر تبریز استفاده شده است. در این راستا ابتدا مدل شبیه‌سازی سفره آب زیرزمینی شهر تبریز تهیه و سپس با فرمول‌بندی تابع هدف و محدودیت‌ها، این مدل به الگوریتم بهینه‌سازی متصل شد تا با تعیین بهینه نقاط حفاری چاه جدید و میزان دبی پمپاژ چاه‌های فعلی در منطقه و چاه‌های جدید، سطح آب آبخوان در نقاط لازم کاهش یابد.

### مواد و روش‌ها

معادلات پایه آب زیرزمینی با تلفیق قانون‌های پیوستگی و حرکت سبب تشکیل معادلات ریاضی به فرم دیفرانسیل جزئی رسته دوم می‌شود که در آن بار هیدرولیکی (h) یا سطح آب آبخوان به صورت متغیر وابسته است. معادله حاکم بر جریان در آب‌های زیرزمینی در یک آبخوان در شرایط ناپایدار و غیرهمگن به صورت زیر است (الفلد و همکاران، ۲۰۰۰):

$$T_{xx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T_{yy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + T_{zz} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = S \frac{\partial h}{\partial t} \pm R(x, y, z) \quad (1)$$

که  $T_{xx}$ ،  $T_{yy}$  و  $T_{zz}$  به ترتیب ضریب قابلیت انتقال در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  (مترمربع بر روز)؛  $S$  ضریب ذخیره و  $R(x, y, z)$  جمع جبری مقادیر تغذیه و تخلیه از آبخوان در محدوده اعمال معادله بالا است (متر بر روز). حل ریاضی (تحلیلی) این معادله در شرایط سیستم پیچیده آبخوان ممکن نیست. بنابراین برای رسیدن به جواب واحد در چنین سیستمی، تقریبی از جواب دقیق را پذیرفته و از روش‌های عددی استفاده می‌شود. در این راستا، تلاش پژوهش‌گران بر این بوده که با اصلاح روش عددی قبلی و یا با ابداع روش عددی جدید، مقدار تقریب از جواب دقیق را به حداقل برسانند تا با اطمینان بیشتری از نتایج مدل عددی استفاده شود.

از بین مدل‌های آماده موجود در دنیا، مدلی که بیشترین کاربرد را در زمینه کمیت آب‌های زیرزمینی در کشورهای مختلف دنیا داشته است، مدل شبیه‌سازی MODFLOW است. این مدل معادله حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی را با روش عددی اجزای محدود حل می‌کند. بنابراین، در این بررسی، برای تهیه مدل شبیه‌سازی از کد نرم‌افزاری MODFLOW استفاده می‌شود. سپس برای تهیه مدل بهینه مدیریتی بهره‌برداری آب زیرزمینی در منطقه متروی تبریز، تابع هدف و محدودیت‌های مسئله مورد نظر

1- Linear

2- Nonlinear

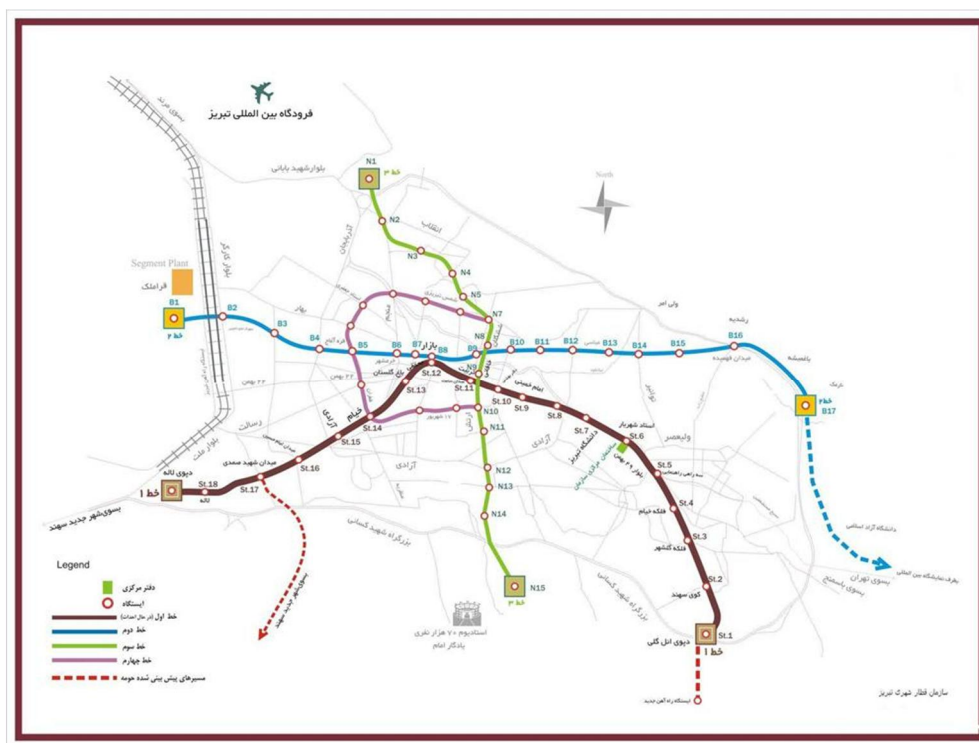
3- Mixed-binary linear

هیدرولیکی مشخص است و مرزهای جنوبی و شمالی در کنار سازندها از نوع مرز با دبی صفر و غیرقابل نفوذ در نظر گرفته شد. در سفره دوم، با توجه به اینکه، مرز ورودی از منطقه میانی سفره اول شروع می‌شود، پس در قسمت شرقی مرز با پتانسیل مشخص انتخاب شد. در قسمت غربی، مرز با پتانسیل مشخص در نظر گرفته شد. مرزهای شمالی و جنوبی سفره دوم که در کنار سازندهای اطراف دشت قرار دارند از نوع غیرقابل نفوذ انتخاب شدند. با بررسی داده‌های موجود در آبخوان شهر تبریز، ماه آبان سال ۱۳۸۲ به‌عنوان ماه مبناء برای واسنجی مدل در حالت پایدار در نظر گرفته شد. پس از واسنجی مدل برای حالت پایدار، سال آبی ۸۳-۱۳۸۲ برای حالت ناپایدار در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی از آبان سال ۱۳۸۲ شروع و تا پایان مهر ۱۳۸۳ ادامه پیدا کرد. بعد از انجام کالیبراسیون، مقادیر ضریب‌های هدایت هیدرولیکی در محدوده منطقه مورد بررسی  $0.5-3.5$  متر بر روز برآورد شد. در ادامه، صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده برای سال ۸۴-۱۳۸۳ انجام و با توجه به نتایج مثبت آن، مدل تهیه شده تأیید شد. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی و کالیبراسیون این منطقه با استفاده از کد MODFLOW و PEST انجام شده است.

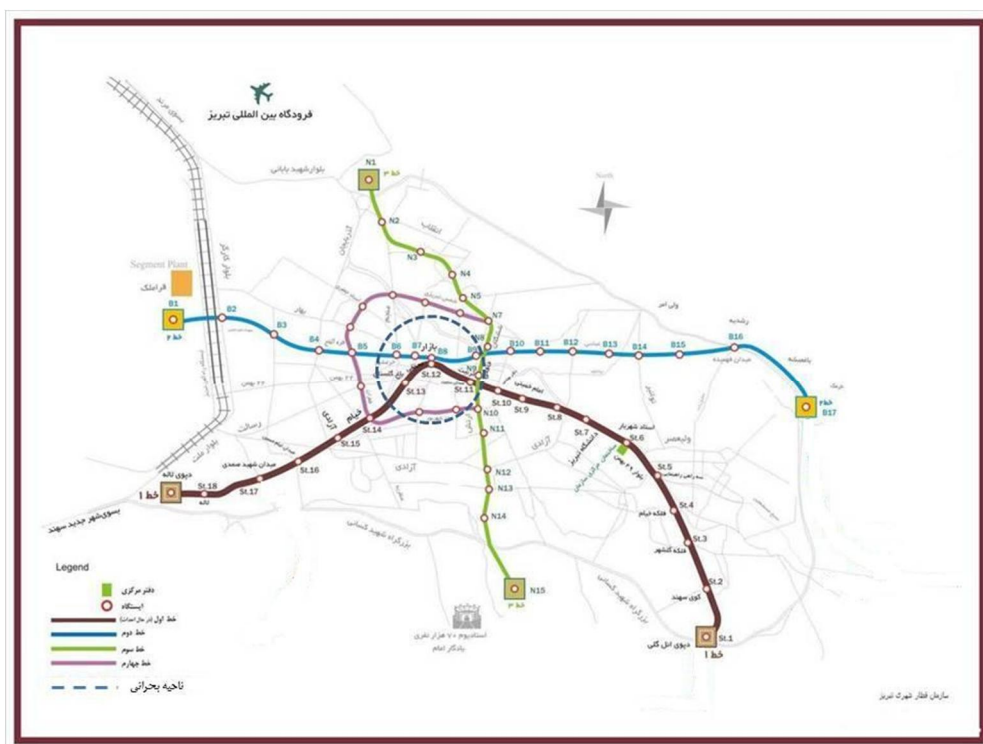
استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی در جهت کاهش مشکلات نامبرده، توسط مسئولان استان مطرح شد. در این راستا شبکه قطار شهری تبریز در ۵ مسیر به طول ۸۰ کیلومتر طراحی و اجرا شد. عملیات اجرایی قطار شهری تبریز از سال ۱۳۸۰ شروع شده است. چهار خط این راه‌آهن داخلی و یک خط آن خارج از حومه است. براساس برنامه‌ریزی انجام شده، مسیر اول به طول ۱۸ کیلومتر از میدان ائل‌گلی تا کوی لاله و مسیر دوم به طول ۲۷ کیلومتر از دانشگاه آزاد اسلامی تا قراملک خواهد بود. خط خارج از حومه (مسیر پنجم) نیز به طول ۲۰ کیلومتر از شهر جدید سهند تا تبریز خواهد بود (شکل ۱).

یکی از مشکلاتی که در مسیر خط یک متروی تبریز وجود داشت این بود که تعدادی از ایستگاه‌های این مسیر در منطقه‌ای از شهر است که سطح آب زیرزمینی در آن بالا بوده (شکل ۲)، بنابراین بخشی از عملیات گودبرداری محل ایستگاهها و نیز اجرای عملیات ساختمانی باید زیر تراز آب زیر زمینی انجام شود.

بررسی‌های پایه شهر تبریز نشان داد که آبخوان آن به‌صورت دو سفره‌ای است که سفره بالایی آزاد و سفره زیری تحت فشار است. در سفره اول آبخوان شهر تبریز، مرز شرقی و غربی آبخوان از نوع مرز با پتانسیل



شکل ۱- نقشه مسیرهای متروی تبریز



شکل ۲- محدوده بحرانی در مسیر خط یک متروی تبریز

شناسایی بهترین راه حل از بین چندین راه حل ممکن به کار می‌رود. تابع هدف با توجه به کاربرد مدل ممکن است حداکثر یا حداقل شود. سومین جزء از مسئله مدیریت مجموعه‌ای از محدودیت‌ها است که شرط‌ها را روی مقادیر به دست آمده با متغیرهای تصمیم اعمال می‌کند. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده یک مسئله مدیریت آب زیرزمینی زمانی به خوبی تعریف شده است که شامل مقادیری از متغیرهای تصمیم باشد به طوری که با آن مقادیر بهینه تابع هدف به دست آید و همچنین تمامی محدودیت‌های تعریف شده روی متغیرهای تصمیم نیز به خوبی ارضا شده باشد. در این بررسی اجزای مدل بهینه‌سازی برای فرمول‌بندی مدیریت سطح آب زیرزمینی در محدوده خط یک متروی تبریز شامل متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌ها است که جزئیات بیشتر این مسئله در ادامه آورده شده است.

متغیر تصمیم مورد استفاده در این پژوهش، متغیرهای تصمیم دوتایی و مقدار جریان است. متغیرهای تصمیم دوتایی برای شناسایی حالت مجموعه‌های مرتبط به متغیرهای مقدار جریان و بیرونی به کار می‌روند. یک و یا چند متغیر تصمیم مقدار جریان و بیرونی و یا ترکیب این متغیرها می‌توانند مرتبط به یک متغیر دوتایی منفرد باشند. متغیرهای دوتایی به صورت  $I_1$  نشان داده می‌شوند

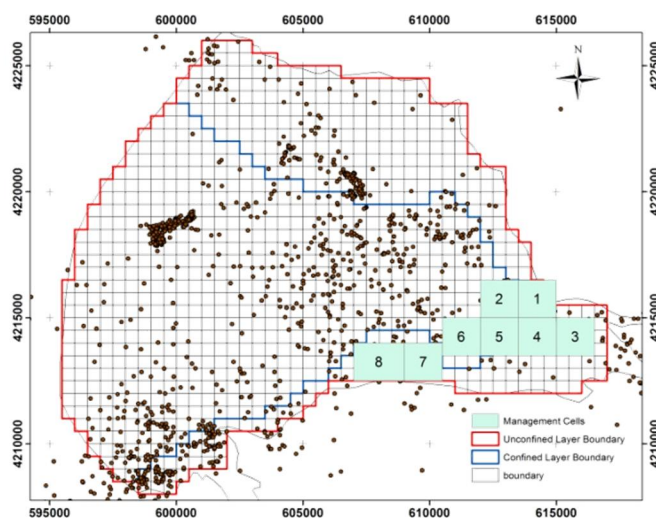
بعد از تهیه مدل شبیه‌سازی منطقه مورد بررسی و کالیبراسیون آن، برای حل مشکل بالادگی آب در منطقه مورد بررسی در تهیه مدل مدیریتی علاوه بر افزایش پمپاژ از چاه‌های موجود، از حفر چاه‌های جدید استفاده شد. برای آگاهی از میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در شهر تبریز، مدل شبیه‌سازی را برای حالت میزان بهره‌برداری فعلی و همچنین افزایش و کاهش درصدی از وضعیت بهره‌برداری فعلی اجرا کرده و با توجه به تغییرات دیده شده نحوه مدیریت و انتخاب تابع هدف مشخص شد.

#### ب- فرمول‌بندی مسائل مدیریت آب‌های زیرزمینی

برای فرمول‌بندی یک مسئله مدیریت آب زیرزمینی، مشخص کردن سه جزء اصلی شامل متغیرهای تصمیم، تابع هدف و مجموعه‌ای از محدودیت‌ها لازم است. مجموعه این اجزا با یکدیگر یک مدل ریاضی از فرآیند تصمیم‌گیری و یا طراحی را تعریف می‌کند. متغیرهای تصمیم مسئله مدیریت، کنترل‌ها یا تصمیم‌های قابل اندازه‌گیری مثل مقادیر برداشت از مجموعه‌ای از چاه‌ها هستند که با مدل تعیین می‌شوند. مقادیر تعیین شده با مدل برای این متغیرهای تصمیم، حل مسئله را تعریف می‌کنند. تابع هدف مسئله که بر حسب یک و یا چند متغیر تصمیم بیان می‌شود، معیاری از عملکرد فرآیند طراحی است و برای

دوره‌های تنش مربوط به آن‌ها از طریق متغیرهای تصمیم مقدار جریان و بیرونی مرتبط با آن‌ها شناخته می‌شود. بعد از تهیه مدل شبیه‌سازی منطقه مورد بررسی و کالیبراسیون آن، برای اینکه برنامه مدیریتی بتواند قابل اجرا برای بخش‌های اجرایی و مردم باشد شبکه‌های مدیریتی به مراتب بزرگ‌تر از سلول‌های مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین نواحی اطراف مسیر مترو به هشت شبکه مدیریتی تقسیم شد (شکل ۳).

(که  $I$  نشان دهنده  $I$  امین متغیر دوتایی است) و مقادیر صفر و یک را شامل می‌شوند ( $I_l = 0, 1$ ). در صورتی که  $I_l$  برابر یک باشد حداقل یکی از متغیرهای تصمیم مقدار جریان و یا بیرونی مرتبط با متغیر دوتایی فعال است (به معنی آن که مکان مورد نظر ساخته شده و یا در حال بهره‌برداری است)، و در صورتی که  $I_l$  برابر صفر باشد تمامی متغیرهای مقدار جریان و بیرونی مرتبط به آن غیرفعال هستند. متغیرهای دوتایی به صورت مستقیم مرتبط با یک دوره تنش مشخص در مدل نبوده و



شکل ۳- شبکه‌های مدیریتی در مسیر مترو

تابع هدف در این پژوهش حداقل کردن مجموع هزینه بهره‌برداری از چاه‌های فعلی و احداث چاه‌های جدید و بهره‌برداری از آن مطابق معادله (۲) است.

$$\text{Min } Z = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \beta_m Q_{m,t} + \sum_{l=1}^L \kappa_l I_l \quad (2)$$

$(T = 1, 2, \dots, T)$   
 $(l = I_{\min}, \dots, I_{\max})$   
 $(m = 1, 2, \dots, M)$

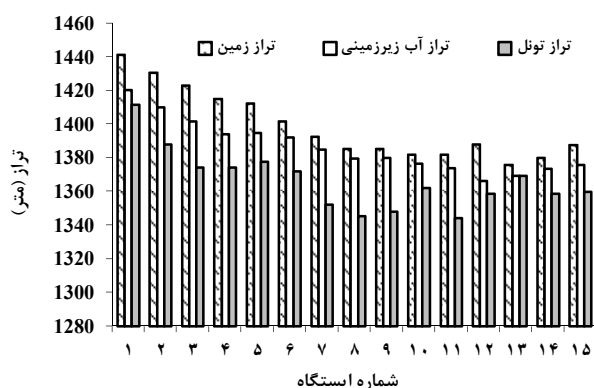
که  $I_l$  متغیر تصمیم دوتایی و  $l$  شماره متغیر تصمیم دوتایی (شماره چاه‌های حفر شده جدید)،  $m$  مجموع متغیرهای تصمیم جریان که از مجموع تعداد چاه‌های حفر شده و فعلی به دست می‌آید،  $\kappa_l$  هزینه احداث چاه جدید،  $\beta_m$  هزینه پمپاژ،  $I_{\min}$  و  $I_{\max}$  حداقل و حداکثر تعداد چاه‌های حفر شده جدید،  $t$  زمان برحسب ماه،

برای تعیین متغیرهای تصمیم میزان برداشت از چاه‌های موجود در هر یک از شبکه‌های مدیریتی در هر ماه از سال به‌عنوان متغیر تصمیم مقدار جریان است. برای افزایش ضمانت اجرایی مدل، در هر شبکه مدیریتی نسبت برداشت از هر یک از چاه‌های موجود به میزان کل برداشت از آن شبکه، مشابه با شرایط موجود در نظر گرفته شده است. در نتیجه در حالت بهینه، مقدار برداشت از چاه‌های موجود در یک شبکه مدیریتی به یک نسبت افزایش و یا کاهش خواهد یافت. در مسیر خط مترو ۳۷ چاه پیشنهادی به‌عنوان متغیر باینری (متغیر تصمیم) معرفی شد. با توجه به افق زمانی سه ساله، تعداد متغیرهای تصمیم جریان از حاصل ضرب تعداد متغیر دوتایی در دوره زمانی ماهانه به دست می‌آید.

گزینه به‌عنوان نقاط کنترل هستند. اما از آنجا که در محدوده بررسی نحوه توزیع چاه‌ها به‌صورت یکنواخت نبوده، نقاط هر ایستگاه مترو، به‌عنوان نقاط کنترل در نظر گرفته شده‌اند.

### نتایج و بحث

در این پژوهش تلاش شد برای حل مشکل بالا بودن سطح آب زیرزمینی از روش نرم‌افزاری برای کاهش سطح آب زیرزمینی در مسیر خط یک متروی شهر تبریز استفاده شود. در راستای انجام این کار، ابتدا مدل شبیه‌سازی سفره آب زیرزمینی شهر تبریز تهیه شد و سپس برای بهینه‌سازی نقاط حفاری چاه جدید و میزان دبی پمپاژ چاه‌های فعلی و جدید از کد GWM استفاده شود. نمودار حاصل از مقادیر تراز سطح زمین، تراز سطح ایستابی (ماه آبان) و تراز کف تونل را در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، هدف در این پژوهش رساندن تراز سطح آب زیرزمینی به تراز کف تونل است.



شکل ۴- تراز کف تونل، آب زیرزمینی و سطح زمین در مسیر خط یک متروی تبریز

برای رسیدن به این هدف، ابتدا مدل شبیه‌سازی منطقه مورد نظر که مسیر خط یک متروی شهر تبریز بوده، با استفاده از مدل MODFLOW تهیه شد، بعد از انجام کالیبراسیون، صحت‌سنجی و تأیید مدل، مدل بهینه‌سازی این مسئله با استفاده از کد کامپیوتری GWM تهیه شد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در مدیریت سطح ایستابی برای پایین آوردن سطح آب زیرزمینی در متروی شهر تبریز تلاش بر این بود که مقادیر پمپاژ از چاه‌های موجود تا حد ممکن افزایش داده شود و در صورت

مقدار برداشت از چاه شماره  $m$  و در زمان  $t$  است. محدودیت‌های متغیرهای تصمیم: محدودیت‌ها یا قیود در این مسئله، شامل محدودیت‌های متغیرهای تصمیم است، که حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم برای چاه‌های موجود ۱۰۰ و ۵۰۰ درصد برداشت فعلی، برای چاه‌های جدید ۵ تا ۱۰ لیتر بر ثانیه در نظر گرفته شد. محدودیت بعدی، محدودیت‌های ارتفاع هیدرولیکی است که ارتفاع هیدرولیکی مجاز در یک مکان و دوره تنش مشخص، تراز کف تونل مترو در نظر گرفته شد، محدودیت آخر هم محدودیت‌های جمع خطی (محدودیت تعداد کل چاه‌های فعال) است که تعداد حداقل و حداکثر تعداد چاه‌های فعال، ۱۰ و ۲۵ حلقه چاه در نظر گرفته می‌شود. این محدودیت‌ها را می‌توان به شکل کلی زیر نوشت:

$$\sum_{l=1}^L I_l \leq N^U \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^L I_l \geq N^L \quad (4)$$

$$Q_{m,t}^l \leq Q_{m,t} \leq Q_{m,t}^u \quad (5)$$

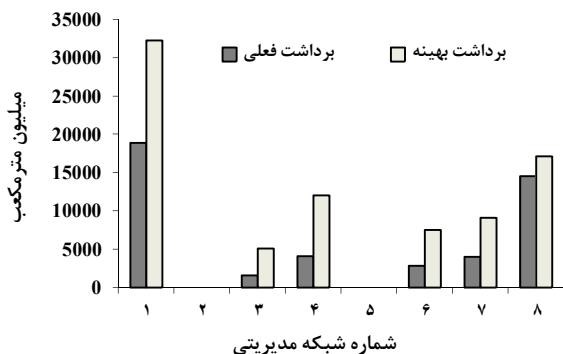
که در آن  $N^L$  و  $N^U$  حدود بالا و پایین تعداد کل چاه‌های فعال،  $Q_{m,t}^l$  و  $Q_{m,t}^u$  حدود بالا و پایین چاه‌های تحت بهره‌برداری است. محدودیت بعدی، محدودیت ارتفاع هیدرولیکی است که به‌صورت مقدار مطلق حد پایین ارتفاع هیدرولیکی در یک مکان و دوره تنش مشخص  $(h_{i,j,k,t}^l)$  تعریف می‌شود:

$$h_{i,j,k,t} \leq h_{i,j,k,t}^l \quad (6)$$

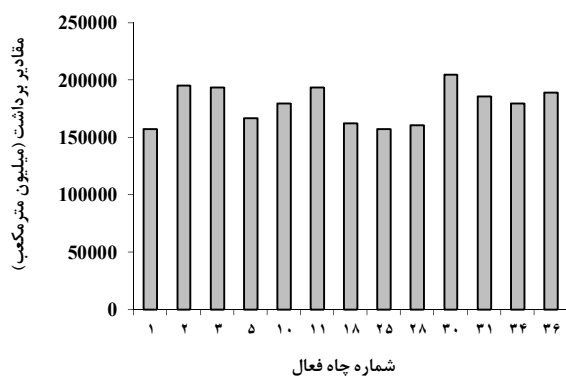
### ج- روش حل مسئله مدیریت آب زیرزمینی

برای تعیین روش حل مسئله مدیریت آب زیرزمینی، در شرایطی که محدوده آبخوان وسیع و سیستم مورد بررسی پیچیده باشد با توجه به اینکه گزینه‌های مختلفی شامل تعداد زیادی از دوره‌های تنش در افق زمانی بلندمدت تحلیل و بررسی می‌شود، هزینه‌های محاسباتی مدل‌سازی، قابل توجه خواهد بود. در این راستا با توجه به پژوهش‌های انجام شده توسط پالیدو و الفلد (۲۰۰۸)، می‌توان از خطی‌سازی رابطه تنش و عکس‌العمل آبخوان برای ساده‌سازی رفتار سیستم آبخوان استفاده کرد. به این ترتیب در این پژوهش برای تهیه مدل بهینه‌سازی از روش برنامه‌ریزی خطی استفاده شد. چاه‌های مشاهده‌ای بهترین

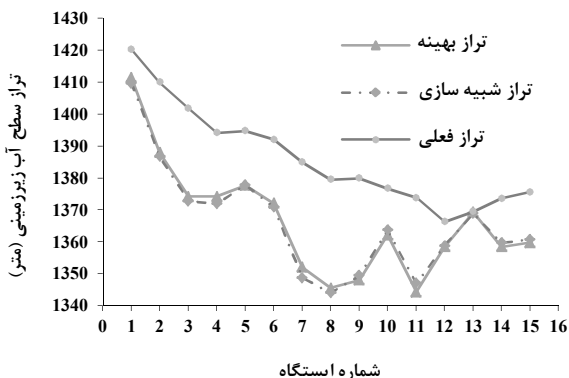
مدل بهینه‌سازی با افت حاصل از شبیه‌سازی نتایج بهینه‌سازی مقایسه شد (شکل ۷). مقایسه این افت‌ها در این شکل نشان می‌دهد تفاوت کمی بین مقادیر شبیه‌سازی شده برداشت بهینه با مقادیر بهینه حاصل از مدل GWM وجود دارد که این را می‌توان به فرض برهم پوشانی خطی مقادیر افت ناشی از برداشت چاه‌های موجود و جدید در شبکه‌های مدیریتی مربوط دانست.



شکل ۵- مقادیر برداشت بهینه و فعلی در شبکه‌های مدیریتی



شکل ۶- مقادیر برداشت چاه‌های فعال شده در ایستگاه‌های مترو



شکل ۷- مقایسه تراز بهینه و شبیه‌سازی مقادیر بهینه در پایان دوره زمانی سه ساله

نرسیدن به هدف موردنظر، یک سری چاه جدید حفر شود. نتایج اولیه حاصل از مدل مدیریتی با توجه به هدف‌های موردنظر در این پژوهش نشان داد که افزایش برداشت از چاه‌های موجود در اطراف مسیر مترو با توجه به تراکم نسبتاً کمتری نسبت به سایر نواحی دشت تبریز، به تنهایی نمی‌تواند سطح آب زیرزمینی را تا آنجا که مدنظر است پایین آوردن بنابراین یک سری چاه‌های جدید باید حفر شود. اجراهای مکرر مدل شبیه‌سازی منطقه برای تعیین حد پایین و بالای تعداد چاه‌های جدید و همچنین در نظر گرفتن محدودیت مالی برای حفر چاه جدید و عوض کردن پمپ برای برداشت بیشتر نشان داد که مطلوبست حد بالا و پایین تعداد چاه‌های جدید ۱۰ و ۲۵ حلقه باشد. در ادامه نتایج حاصل از اجرای مدل با توجه به موارد ذکر شده، ارائه می‌شود.

بعد از تعیین متغیرهای تصمیم، نوع تابع هدف و تعریف محدودیت‌های مسئله مدیریت آب زیرزمینی مورد بررسی، داده‌های ورودی مدل GWM براساس فرمت این مدل وارد شد و سپس مدل بهینه‌سازی اجرا می‌شود. نتایج حاصل از مدل نشان داد در شبکه‌های مدیریتی شماره ۲ و ۵ افزایش برداشتی از چاه‌های موجود در شبکه نسبت به حالت فعلی انجام نشده است این می‌تواند به دلیل اختلاف کم سطح ایستابی با تراز کف تونل مترو باشد. اما برای رسیدن به هدف این بررسی چاه‌های موجود در شبکه‌های مدیریتی شماره ۱، ۳، ۴، ۶، ۷ و ۸ هرکدام با افزایش برداشت ۱/۷۱، ۳/۲۳، ۲/۹۶، ۲/۶۳، ۳/۲۸ و ۱/۱۸ برابر نسبت به حالت فعلی داشته است. علاوه بر این با حفاری ۱۳ چاه جدید از بین ۳۷ چاه پیشنهاد شده در اطراف مسیر مترو هدف مورد نظر در این بررسی تأمین می‌شود. نتایج به دست آمده و همچنین مقادیر برداشت سالانه از چاه‌های جدید حفر شده در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده است.

از آنجا که مدل GWM برای حل مسائل بهینه‌سازی از الگوریتم سیمپلکس استفاده می‌کند بنابراین در صورتی که مسئله مورد نظر غیرخطی باشد از روش خطی‌سازی از الگوریتم سیمپلکس بهره می‌گیرد. در این بررسی به دلیل اینکه رابطه تنش و عکس‌العمل آبخوان خطی فرض می‌شود بدون انجام فرآیند خطی‌سازی از الگوریتم سیمپلکس استفاده می‌شود. در ادامه برای اطمینان از فرض خطی در نظر گرفتن آبخوان، افت به دست آمده از



## نتیجه‌گیری

در بیشتر پروژه‌های عمرانی زمانی که هدف احداث تونل یا هر نوع سازه‌ای دیگر در زیرزمین باشد و در حفر آن به لایه آبدار برخورد شود کنترل سطح ایستابی دارای اهمیت بالایی است و همواره مدنظر مهندسان طرح و مشاوران بوده است. بررسی مطالعات پایه، اجرای مدل ریاضی آبخوان دشت تبریز و بررسی مناطقی که در مسیر خط یک متروی شهری تبریز قرار گرفته، نشان داد که سطح آب زیرزمینی در این مناطق بالاست به طوری که در حفاری تونل با مشکل روبرو شدند. با توجه به اینکه برای حل مشکل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در پروژه‌های عمرانی دو نگرش سخت افزاری (اقدامات سازه‌ای) و نرم‌افزاری (پمپاژ) وجود دارد. استفاده از دیدگاه سخت‌افزاری در مسیر طولانی ضمن بالا بردن هزینه‌ها از نظر ساختار زمین شناسی، از آنجا که منطقه مورد بررسی زلزله‌خیز است، ریسک پروژه بالا رود و امکان تخریب سازه در اثر وقوع زلزله وجود دارد. بنابراین در انجام این بررسی از دیدگاه نرم‌افزاری برای کاهش سطح آب زیرزمینی در مسیر خط یک متروی شهر تبریز استفاده شده است و تلاش شد با حفر چاه‌های جدید و افزایش پمپاژ از چاه‌های موجود سطح آب زیرزمینی در افق زمانی سه ساله، حداقل تا کف تونل متروی شهر تبریز پایین آورده شود. برای رسیدن به این هدف از مدل MODFLOW جهت شبیه‌سازی و تهیه مدل ریاضی آبخوان دشت تبریز و کد GWM برای بهینه‌سازی و مدیریت سطح ایستابی استفاده شد. با توجه به خطی در نظر گرفتن رفتار سیستم در مدل GWM به دلیل حجیم بودن فرآیند خطی‌سازی در حل مدل بهینه‌سازی غیرخطی، برای حل مدل مدیریتی مورد استفاده در این بررسی، روش برنامه‌ریزی خطی انتخاب شد. نتایج به دست آمده در منطقه مورد بررسی نشان داد که در مرحله مدیریت منطقه می‌توان در افق زمانی سه ساله با اضافه برداشت از ۶ شبکه از ۸ شبکه مدیریتی تعریف شده و همچنین با حفاری و برداشت ۱۳ چاه جدید در اطراف مسیر مترو سطح آب زیرزمینی را حداقل به کف تونل مترو رساند. همچنین مقایسه مقادیر افت در شرایط بهینه حاصل از مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی نتایج بهینه‌سازی نشان از این است که می‌توان با قبول کردن درصد کم خطا نتیجه گرفت که رفتار آبخوان خطی است.

## منابع

1. جوادیان زاده م. م. ۱۳۷۷. تهیه مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آب‌های زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. محیط زیست. دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. ۱۳۲ ص.
2. خلقی م. ۱۳۹۱. مدیریت آب‌های زیرزمینی، کتابچه کارگاه سه روزه آموزشی- تخصصی مدل‌های ریاضی در مدیریت آب‌های زیرزمینی (از تئوری تا کاربرد). خرداد ۱۳۹۱. ۱۳۹ ص.
3. دشتی س. ۱۳۸۵. مدیریت بهره‌برداری تلفیقی از سیستم چندهدفه منابع آب سطحی و زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. مهندسی منابع آب. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران. ۱۴۵ ص.
4. قادری ک. اسلامی ح. ر. موسوی س. ج. ۱۳۸۵. بهره‌برداری بهینه تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت تهران- شهریار. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. ۳ و ۴ بهمن ماه. اصفهان.
5. قزاق الف. ۱۳۸۶. بهره‌برداری بهینه از آب‌های زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. مهندسی منابع آب. دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران. ۱۳۹ ص.
6. علیمحمدی س. ۱۳۸۴. طراحی و بهره‌برداری بهینه تلفیقی از سیستم آب‌های سطحی و زیرزمینی- رویکرد ذخیره سیکلی. پایان‌نامه دکترا. دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. ۲۲۰ ص.
7. Ahlfeld D. P. and Mulligan A. E. 2000. Optimal Management of Flow in Groundwater Systems. Published by Academic Press. 185 p.
8. Ahlfeld D. P. Barlow P. M. and Mulligan A. E. 2005. GWM-A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000). U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1072. 124 p.
9. Ahlfeld D.P. and Riefler G. 2003. Documentation for MODOFC—A program for solving optimal flow control problems based on MODFLOW simulation, version 2.3: Amherst. MA. University of Massachusetts. Department of Civil and Environmental Engineering. 48 p.
10. Ahlfeld D. P. and Sawyer C. S. 1990. Well location in capture zone design using simulation and optimization techniques. Ground Water. 28(4):507-512.
11. Aquado E. and Remson I. 1974. Groundwater hydraulics in aquifer management. Journal of

- the Hydraulics Division – ASCE. 100(1):103-118.
12. Abdeh-Kolahchi A. Satish M. G. Ketata C. and Islam M. R. 2009. Sensitivity analysis of genetic algorithm parameters in groundwater monitoring network optimization for petroleum contaminant detection. *Advances in Sustainable Petroleum Engineering and Science*. 1(3):305-318.
  13. Barlow P. M. Ahlfeld D. P. Dickerman D. C. 2003. Conjunctive-Management Models for Sustained Yield of Stream-Aquifer Systems. *Journal Water Resources Planning and Management*. 129(1):35-48.
  14. Gaur S. Chahar B. R. and Grailot D. 2011. Analytic elements method and particle swarm optimization based simulation-optimization model for groundwater management. *Journal of Hydrology*. 402(3-4):217-227.
  15. Kholghi M. Razazck M. and Treichel W. 1996. Modelisation et gestion quantitative des systemes hydrauliques nappe- riviere par l'approche matrice des reponses unitaires. *Hydrolgeologie*. 4:11-20.
  16. Pulido- Velazquez D. Ahlfeld D. Andrew J. and Sahuquillo A. 2008. Reducing the computational cost of unconfined groundwater flow in conjunctive-use models at basin scale assuming linear behaviour: The case of Adra-Campo de Dalías. *Journal of Hydrology*. 353(1-2):159-174.
  17. Rejani R. Jha M. K. and Panda S. N. 2009. Simulation-Optimization Modelling for Sustainable Groundwater Management in a Coastal Basin of Orissa, India. *Water Resources Management*. 23(2):235-263.
  18. Safavi H. R. Darzi F. and Mariño M. A. 2010. Simulation-Optimization Modeling of Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater. *Water Resources Management*. 24(10):1965-1988
  19. Schwarz J. 1976. Linear models for groundwater management. *Journal of Hydrology*. 28(2-4):377-392.
  20. Sedki A. and Ouazar D. 2011. Simulation-Optimization Modeling for Sustainable Groundwater Development: A Moroccan Coastal Aquifer Case Study. *Water Resources Management*. 25(11):2855-2875.
  21. Tamer Ayvaz M. and Karahan H. 2008. A Simulation/Optimization Model for the Identification of Unknown Groundwater Well Locations and Pumping Rates. *Journal of Hydrology*. 357(1-2):76-92.
  22. Tamer Ayvaz M. 2009. Application of Harmony Search algorithm to the solution of groundwater management models. *Advances in Water Resources*. 32 (6):916-924.