

## پیش‌بینی ۱۰ ساله سطح آب زیرزمینی به‌منظور تعیین سیاست‌های مناسب برای بهره‌برداری از آبخوان با استفاده از کد منبع باز

حسین یوسفی<sup>۱\*</sup>، سینا زاهدی<sup>۲</sup>، محمدحسین نیک‌سخن<sup>۳</sup>

۱. استادیار گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳. دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۶/۰۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۸/۱۹)

### چکیده

در دهه‌های اخیر با افزایش شهرنشینی و توسعه صنعت در محدوده مطالعاتی کرج، استفاده از منابع آبی برای مصارف شرب و صنعت و کشاورزی افزایش یافته است که با توجه به کاهش نرخ بارندگی و خشک‌سالی‌های اخیر سهم منابع آب زیرزمینی در تأمین نیازهای آبی بسیار زیاد است. در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی سبب کاهش حجم ذخیره سفره آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی کرج و خشک‌شدن بسیاری از قنات‌ها و چشمه‌ها شده است. بنابراین، مطالعه دقیق وضعیت آب‌های زیرزمینی و علل افت و پیامدهای آن و همچنین ارائه راه‌حلی در جهت حفاظت و تعادل‌بخشی آب زیرزمینی این محدوده مطالعاتی امری ضروری است که همگی آنها به تعیین سیاست‌های مناسب برای بهره‌برداری از سفره آب زیرزمینی وابسته است. به همین دلیل با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به‌منظور پیش‌بینی سطح ایستابی محدوده مطالعاتی کرج طی سال‌های آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۳، سه سناریو خوش‌بینانه، بدبینانه و ادامه شرایط فعلی تعیین شد. با تعیین ۱۲۱ گام زمانی، در هر ماه از این ۱۰ سال سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شد. با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی در شهریور ۱۳۹۳ برابر ۱۱۵۸/۹۵۵ متر بود، برای هر سه سناریوی ادامه شرایط فعلی، بدبینانه و خوش‌بینانه، به ترتیب افت‌های ۱۲/۸۳۴، ۱۷/۰۱۹ و ۴/۹۰۶ متر به دست آمد که سطح آب زیرزمینی برای هر سه سناریوی ادامه شرایط فعلی، بدبینانه و خوش‌بینانه به ترتیب برابر ۱۱۴۶/۱۲۱، ۱۱۴۱/۹۳۷ و ۱۱۵۴/۰۴۸ متر محاسبه شد.

**کلیدواژگان:** آب زیرزمینی، پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی، شبیه‌سازی، مادفلو.

## مقدمه

یکی از اهداف بلندمدت مدیریت منابع آب، تعادل برقرار کردن بین تقاضای آب و منابع آب موجود با کمترین هزینه ممکن است. یکی از روش‌های مناسب مدیریت منابع آب که وابستگی زیادی به آب‌های زیرزمینی دارد، استفاده از مدل‌های عددی و نتایج بیلان‌آبی مدل است. عناصر بیلان آب زیرزمینی شامل عوامل تغذیه‌ای نظیر تغذیه زیرزمینی، تغذیه از نزولات جوئی، برگشت آب کشاورزی و شرب و فاضلاب شهری و تغذیه از طریق جریان‌های سطحی است [۱]. مدل ریاضی آب زیرزمینی، شبیه‌سازی یک سیستم هیدروژئولوژیک است که از قوانین فیزیکی و ریاضی کمک می‌گیرد [۲]. مدل‌سازی آب زیرزمینی به‌عنوان نوعی ابزار مدیریتی در جهت فهم رفتار سیستم آبخوان تحت تنش‌های ایدئولوژیک متفاوت به‌طور وسیعی استفاده شده است. ارتباط بین مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز به‌خصوص در حالتی که از نرم‌افزارهای شبیه‌ساز آب زیرزمینی استفاده می‌شود، بسیار مهم و تأثیرگذار است. برای این کار روش‌های متفاوتی چون توابع رگرسیون<sup>۱</sup>، ماتریس پاسخ<sup>۲</sup>، تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>۳</sup> و روش درون‌گذار<sup>۴</sup> وجود دارد [۳]. مدل‌های ریاضی در مدیریت، بهره‌برداری و شبیه‌سازی رفتار آبخوان‌های زیرزمینی کاربردهای فراوانی دارند و با توجه به اینکه تهیه و طراحی این مدل‌ها پیچیدگی‌هایی در وضعیت آمار صحرایی، اطلاعات و داده‌های موجود دارند، الگوریتم‌های ارائه‌شده تا کنون تنها روند کلی مراحل را نشان داده‌اند و یا رویکردهای متفاوتی نسبت به مسئله دارند [۴]. با توجه به پیچیدگی سامانه‌های طبیعی آب زیرزمینی و نبود داده‌ها و اطلاعات کامل از وضعیت آبخوان‌ها، در بسیاری موارد ساده‌انگاری در تهیه مدل ضروری است. در فرایند مدل‌سازی نخستین کاری که باید انجام شود، تعیین هدف از مدل‌سازی است؛ زیرا نوع معادله حاکم و در نتیجه کد کامپیوتری مورد نیاز با توجه به هدف مدل‌سازی تعیین می‌شود. پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان نیز با توجه به طرح‌های مدیریتی مختلف و نیز شناسایی محدودیت‌های مدل و داده‌های مورد نیاز برای تقویت مدل‌های آتی آبخوان از دیگر اهداف شبیه‌سازی هستند [۵]. از جمله مدل‌هایی که قابلیت‌های مناسبی برای

مطالعه آب‌های زیرزمینی دارد، مدل GMS<sup>۵</sup> است که از آن به‌عنوان یک نرم‌افزار تحلیلی استفاده می‌شود. این مدل عمدتاً به‌وسیله روش‌های عددی تفاضل محدود و اجزای محدود شبیه‌سازی کمی و کیفی را انجام می‌دهد. یکی از معایب این نرم‌افزار دسترسی نداشتن به منبع کد آن است که در برخی مباحث مختص به شبیه‌سازی آشکار است.

خرماً<sup>۶</sup> (۲۰۰۷) از مدل‌های MODFLOW<sup>۷</sup> و GVM<sup>۸</sup> برای ایجاد مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آب زیرزمینی در آبخوان کرانه غربی رود اردن استفاده کرد. او شبیه‌سازی را برای حالت پایدار ایجاد و اسنجی کرد. سپس با استفاده از GVM نرخ پمپاژ بهینه از چاه‌های با کاربری کشاورزی را برای کل آبخوان به‌دست آورد [۶]. یعوتی<sup>۹</sup> و همکارانش (۲۰۰۸) با اجرای مدل سه‌بعدی تفاضل محدود جریان آب زیرزمینی به‌وسیله مدل MODFLOW 96 برای آبخوان آزاد دشت بو-آرج در شمال شرقی مراکش، این آبخوان را در شرایط هیدروژئولوژیکی متفاوت بررسی کردند. منطقه مد نظر دو لایه داشت و محققان توانستند با کالیبراسیون در دو مرحله ماندگار با توجه به داده‌های موجود در سال ۱۹۹۰ و غیرماندگار با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶ به واسنجی خودکار توزیع هدایت هیدرولیکی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که سطح ایستابی آبخوان وابسته به نفوذ طبیعی بارندگی و آب برگشتی کشاورزی است [۷]. در تحقیق دیگری ون<sup>۱۰</sup> و همکارانش (۲۰۰۷) از مدل سه‌بعدی FEFLOW حوضه آبریز ژانگی<sup>۱۱</sup> در شرق چین را در شرایط غیرماندگار مدل کردند. سطح پیرومتریک این دشت به‌دلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی دچار افت شایان توجهی شده بود. آنها مدل را برای چهار سال (۱۹۹۷-۲۰۰۰) واسنجی کردند و سپس با دو سناریو سطح آب را برای سی سال (۲۰۰۰-۲۰۳۰) پیش‌بینی کردند [۸]. در نهایت، در تحقیقی کاررا هرناندز و گاسکین<sup>۱۲</sup> با استفاده از مدل منبع باز GRASS<sup>۱۳</sup> یک نمونه ابزار برای مدل‌سازی آب زیرزمینی

5. Groundwater Modelling System

6. Kharmah

7. Modular Finite-Difference Flow Model

8. Groovy EnVironment Manager

9. Yaouoti

10. Wen

11. Zhangye

12. Carrera-Hernandez and Gaskin

13. Geographic Resources Analysis Support System

1. Regression functions

2. Response Matrix

3. Analytic Hierarchy process (AHP)

4. Transition Method

۳۹° تا ۵۰° ۴۵' و ۵۱° ۷۰' تا ۵۰° ۳۵' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۹° تا ۳۵° ۵۵' تا ۳۵° شمالی قرار دارد. از سمت شمال و شرق با آبخوان موضعی کرج و سازند جنوب رشته‌کوه البرز، از سمت غرب با دشت هشتگرد، اشتهارد و بخش سازندی غرب محدوده مطالعاتی ارتباط دارد که جزئی از رشته‌کوه البرز است، از سمت جنوب با دشت شهریار، رباط‌کریم، ارتفاعات شمال ساوه و محدوده مطالعاتی تهران در ارتباط است. این محدوده جزئی از شبکه هیدروژئولوژیک جنوب رشته‌کوه البرز است که خط‌القعر حوضه‌های آب سطحی و زیرزمینی آن در دریاچه نمک قرار دارد.

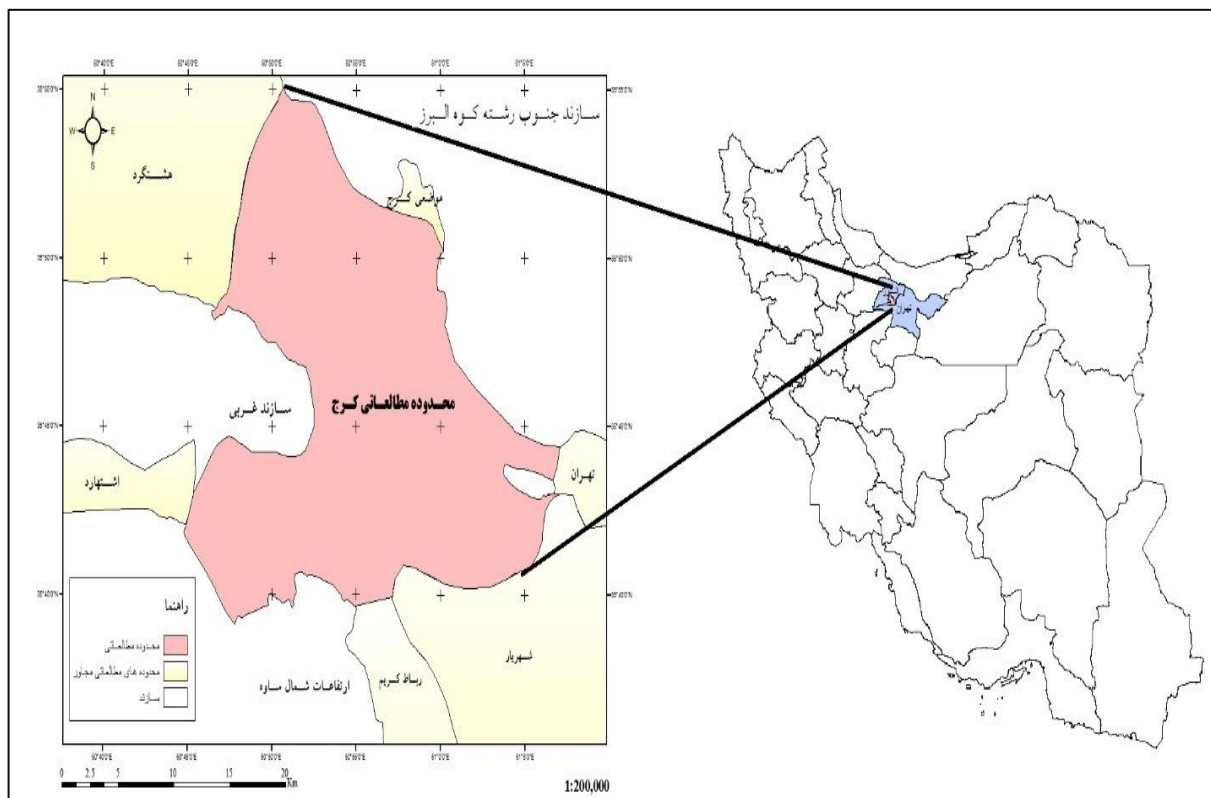
وضعیت سطح ایستابی آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی کرج در هیدروگراف‌های موجود در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

GMTG<sup>۱</sup> تولید کردند و پیش‌بینی وضعیت یک آبخوان فرضی را با موفقیت انجام دادند. این مدل به‌عنوان نخستین مدل‌های کاربردی استفاده هم‌زمان از MODFLOW و GIS<sup>۲</sup> معرفی شد. در تحقیق حاضر به جای استفاده از GIS از نرم‌افزار MATLAB<sup>۳</sup> استفاده شده است [۹].

هدف از انجام این مقاله پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی کرج برای ۱۰ سال است. این پیش‌بینی با توجه به سه سناریوی ادامه شرایط فعلی بهره‌برداری، بدبینانه و خوش‌بینانه است.

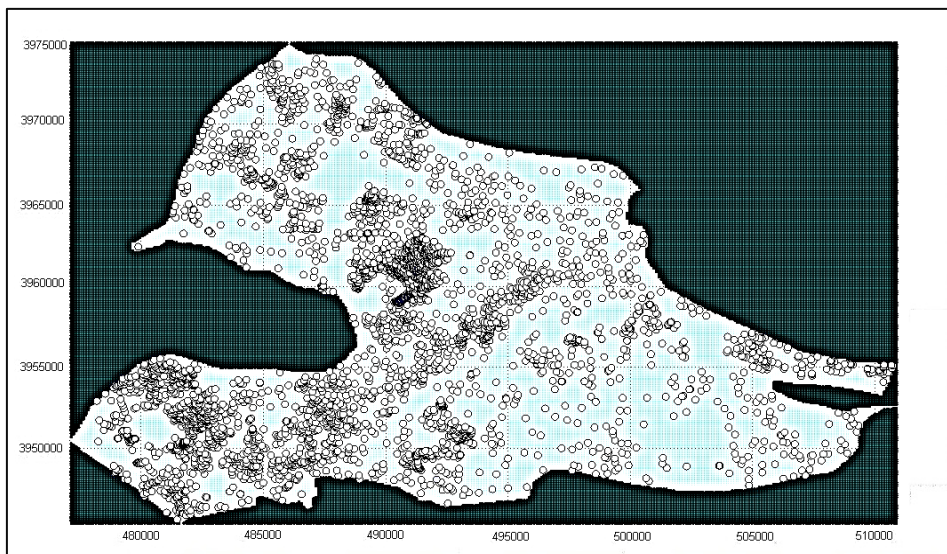
### مشخصات محدوده مطالعاتی

محدوده مطالعاتی کرج جزئی از استان تهران پیشین و استان البرز و تهران فعلی است. مساحت این محدوده ۵۰۷/۹۴ کیلومترمربع است و در بین طول‌های جغرافیایی

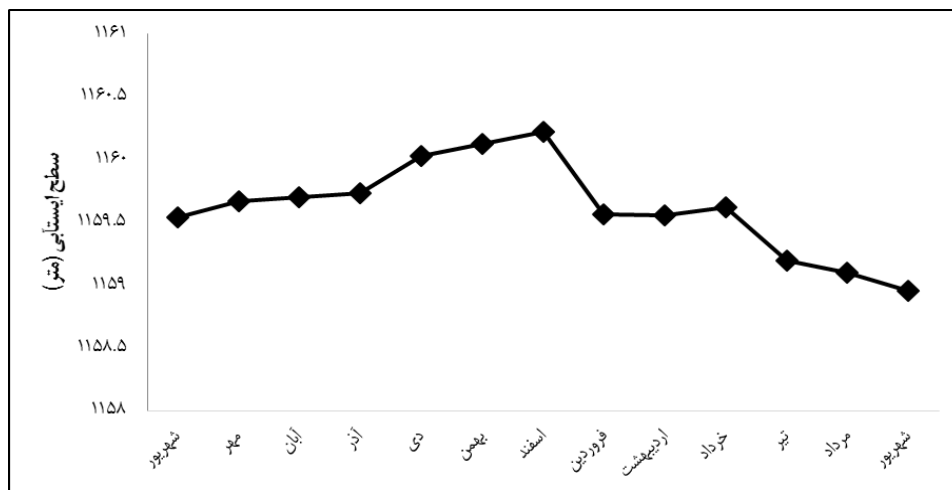


شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی کرج در استان البرز

1. Groundwater Modeling tool for GRASS
2. Geographic Information System
3. Mathematic Laboratory



شکل ۲. تولید موقعیت محدوده مطالعاتی کرج در نرم افزار MATLAB



شکل ۳. وضعیت سطح ایستابی در سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۳



شکل ۴. وضعیت سطح ایستابی از مهر ۱۳۷۰ تا شهریور ۱۳۹۳

## روش کار (مواد و روش‌ها)

## مدل کمی آبخوان

در این مقاله هدف از انجام مدل‌سازی، پیش‌بینی وضعیت آب زیرزمینی کرج به‌مدت ۱۰ سال از آخرین زمان دریافت اطلاعات یعنی تا آخر سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در ۱۲۱ گام زمانی است. پس از تعیین هدف، تهیه مدل مفهومی دومین مرحله در مدل‌سازی است که اغلب به‌صورت نمودار بلوکی یا مقطع عرضی است. برای ایجاد مدل کمی در نرم‌افزار MATLAB از روش مدل مفهومی استفاده شده است. از ابزارهایی نظیر Excel نیز به‌کمک MATLAB آمده و با تولید لایه‌های اطلاعاتی مراحل ساخت مدل تکمیل شده است. مدل مفهومی جریان از شش لایه<sup>۱</sup> ورودی اطلاعات تشکیل شده است که شامل مرز سفره، پیرومترها، تغذیه سطحی، چاه‌های بهره‌برداری، هدایت هیدرولیکی، ضریب آب‌دهی ویژه است که مقادیر تغذیه سطحی، هدایت هیدرولیکی و ضریب آب‌دهی ویژه با استفاده از بهینه‌ساز PEST برای هر یک از حالات ماندگار و غیرماندگار واسنجی شدند. باید این نکته را لحاظ کرد که برای مدل‌سازی حالت ماندگار از اطلاعات مهرماه ۱۳۸۲ و برای حالت غیرماندگار از اطلاعات سال آبی ۱۳۸۲-۱۳۸۳ تا سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۳ استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی کرج از مدل MODFLOW2005-NWT استفاده شده است. شبکه‌بندی دشت از ۳۲۵ سطر<sup>۲</sup> و ۳۷۱ ستون<sup>۳</sup> تشکیل شده است که سطح محاسباتی در ماتریسی با ابعاد ۲۹۷ سطر و ۳۳۸ ستون از سلول‌های مربعی شکل به تعداد ۵۰۸۲۶ عدد سلول<sup>۴</sup> فعال در ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ متر است. باید این نکته را در نظر گرفت که پس از ایجاد شبکه، سلول‌هایی که در خارج از محدوده مطالعاتی قرار دارند، به‌صورت غیرفعال درمی‌آیند.

مدل MODFLOW<sup>۵</sup>

مدل MODFLOW نخستین بار در سال ۱۹۸۴ با عنوان مدل جریان سه‌بعدی تفاضل محدود<sup>۶</sup> توسط انجمن زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا<sup>۷</sup> ارائه شد. سپس در سال ۱۹۸۸

به‌وسیله مک‌دونالد<sup>۸</sup> و هارباخ<sup>۹</sup> این مدل با تغییراتی جزئی نظیر تغییر زبان برنامه‌نویسی<sup>۱۰</sup> Fortran 66 به Fortran 77 به‌عنوان MODFLOW-88 ارائه شد. سپس با فراگیری استفاده از آن و افزودن بسته‌های مختلف شبیه‌سازی به‌وسیله افراد مختلف، مدل MODFLOW کامل‌تر و نسخه‌های جدیدتری ارائه شد [۱۰].

## روش حل معادلات حاکم به جریان در MODFLOW

حرکت سه‌بعدی آب زیرزمینی در محیط متخلخل با رابطه دیفرانسیل جزئی زیر توصیف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

در  $[L/T] = k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$  ضرایب هیدرولیکی در

استاهای  $x, y$  و  $z$  برحسب واحد طول بر زمان

$[L] = h$  سطح آب برحسب واحد طول

$S_s =$  ضریب ذخیره برحسب درصد

$W =$  میزان تخلیه برحسب حجم

$[T] = t$  زمان

رابطه ۱ جریان آب زیرزمینی را در یک محیط غیرهمگن و تحت شرایط ناپایدار در راستای محورهای اصلی نشان می‌دهد. باید در نظر داشت که مشخصات جریان یا شرایط مرزهای یک سیستم آبخوان و مشخصات شرایط سطح اولیه سیستم جریان آب زیرزمینی را به‌صورت ریاضی در نظر می‌گیرد. در جریان پایدار سمت راست رابطه ۱ برابر با صفر خواهد بود.

حل رابطه ۱ تنها در سامانه‌های ساده به کمک روش‌های تحلیلی قابل انجام است. در اغلب موارد از روش‌های عددی برای به‌دست‌آوردن حل تقریبی مدل استفاده می‌شود که روش عددی تفاضل محدود یکی از این روش‌هاست. در این روش سامانه‌های پیوسته به مجموعه نقاط مکان و زمان تقسیم می‌شود و به کمک مشتقات جزئی در هر نقطه اختلاف ارتفاع آب محاسبه می‌شود.

برای به‌کارگیری روش تفاضل محدود در توسعه رابطه جریان آب زیرزمینی لازم است که معادله پیوستگی

8. Macdonald  
9. Harbaugh  
10. Programming  
11. Formula Translation

1. Coverage  
2. Row  
3. Column  
4. Cellular  
5. Modular finite-difference groundwater Flow model  
6. Finite Difference Method  
7. United States Geological Survey (USGS)

درصد کاهش می‌یابد. برای حالت ادامه شرایط فعلی، همه مقادیر ثابت باقی می‌ماند و برای حالت بدبینانه به ازای هر سال ۱/۵ درصد به همه بهره‌بردارهای فعلی افزوده می‌شود که در سال دهم این مقدار به ۱۵ درصد می‌رسد. با توجه به اینکه روند شبیه‌سازی برای ۱۰ سال است در نتیجه این شبیه‌سازی تا سال ۱۴۰۲-۱۴۰۳ ش. یعنی ۱۲۰ ماه و یک روز انجام می‌شود که آخرین سال دارای اطلاعات یعنی ۱۳۹۳ معیار ۱۰ سال تحقیق است. همچنین برای تعیین این سه سناریو، علاوه بر محقق از کمک ۱۰ کارشناس ارشد (و بیشتر) در رشته‌های مرتبط با علوم زمین شامل ۴ نفر متخصص در رشته علوم و مهندسی آب، ۱ نفر متخصص در رشته مهندسی محیط زیست، ۴ نفر متخصص در رشته مهندسی عمران-آب و ۱ نفر متخصص در رشته آبخیزداری بهره برده شد.

### نتایج

پس از تهیه مدل با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، پیش‌بینی ده‌ساله آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی کرج برای هر سه سناریو با استفاده از MODFLOW2005-UPW<sup>۴</sup> انجام شد. همچنین وضعیت صحت‌سنجی مدل نیز با سه معیار میانگین خطا، میانگین خطای مطلق و میانگین مربعات خطا سنجیده شد که نتایج آن به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱. ارزیابی مقدار خطا در شبیه‌سازی

R.M.S.E	M.A.E	M.E
۰/۸	۰/۶۴	۰/۰۸

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده متوجه می‌شویم که به‌طور کلی جهت جریان آب زیرزمینی از شمال به جنوب است که از وضعیت توپوگرافی تبعیت می‌کند و از روند پیش‌بینی ۱۰ ساله برای هر سه حالت سناریویسی، مشخص می‌شود که در صورت ادامه روند هریک از سناریوها نتایج زیر به‌دست می‌آید. این نتایج ما را از کاهش سطح ایستابی با توجه به روند برداشته‌های ما آگاه می‌کنند. این نتایج برای هر سه حالت ادامه شرایط فعلی، بدبینانه و خوش‌بینانه شامل موارد زیر است.

استفاده شود. برای این کار باید تفاضل جریان‌های ورودی و خروجی به یک سلول برابر با نرخ تغییرات در میزان ذخیره آن سلول باشد. در صورتی که فرض کنیم چگالی آب زیرزمینی ثابت است، معادله پیوستگی یا بیلان جریان برای یک سلول به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\sum Q_i = S_s \Delta h \Delta V \quad (2)$$

که در آن:

$$Q_i = \left[ L^3 / t \right] = \text{نرخ جریان به سلول } i \text{ ام}$$

$$S_s = \left[ L^{-1} \right] = \text{ضریب ذخیره}$$

$$\Delta V = \left[ L^3 \right] = \text{حجم سلول}$$

$$\Delta h = \text{تغییرات سطح آب در بازه زمانی } (\Delta t)$$

$\sum Q_i$  معادل حجم آب وارد و ذخیره‌شده در سلول در بازه زمانی  $(\Delta t)$  است که سبب می‌شود سطح آب به‌اندازه  $(\Delta h)$  تغییر کند. ورودی و ذخیره به‌صورت مقدار مثبت و خروجی و تلفات به‌صورت مقدار منفی برای هر سلول در نظر گرفته می‌شود. این معادلات برای هر سلول فعال در شبکه نوشته می‌شود؛ بنابراین مسئله تبدیل به  $n$  معادله  $n$  مجهولی می‌شود که حل آن را امکان‌پذیر می‌سازد [۱۱].

### معیارهای ارزیابی و سنجش مدل

برای ارزیابی و سنجش مدل از معیارهایی نظیر خطای میانگین (M.E)<sup>۱</sup>، خطای میانگین مطلق (M.A.E)<sup>۲</sup> و جذر میانگین مربعات خطا (R.M.S.E)<sup>۳</sup> استفاده شد که روابط زیر را داراست [۱۲].

$$M.E = \frac{\sum_{i=1}^n (h_o - h_i)_i}{n} \quad (3)$$

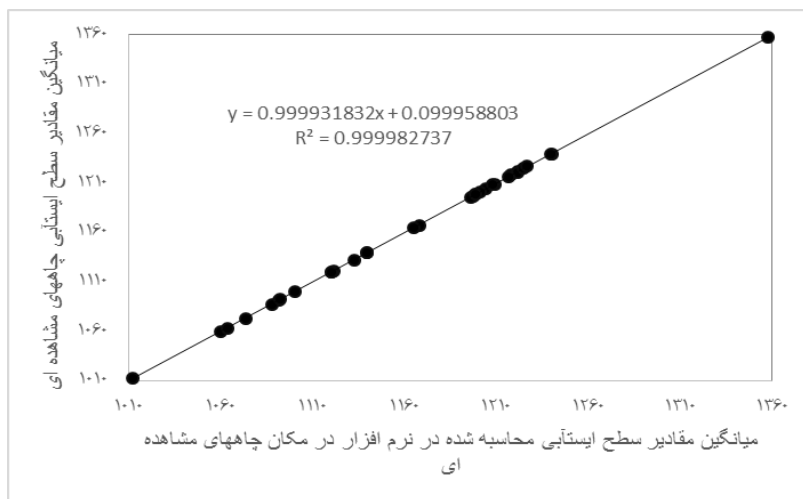
$$M.A.E = \frac{\sum_{i=1}^n |(h_o - h_i)_i|}{n} \quad (4)$$

$$R.M.S.E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_o - h_i)_i^2}{n}} \quad (5)$$

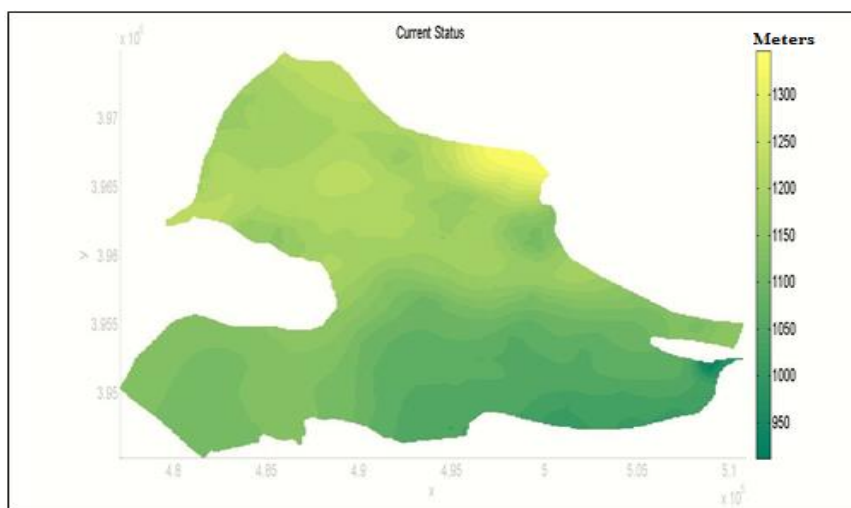
### تعیین سناریوهای پیش‌بینی

برای تعیین سه سناریوی پیش‌بینی، سه حالت خوش‌بینانه، بدبینانه و ادامه شرایط فعلی در نظر گرفته شده است. در حالت خوش‌بینانه مقدار بهره‌برداری شرب ثابت باقی می‌ماند و مقدار بهره‌برداری از سایر چاه‌ها ۱۰

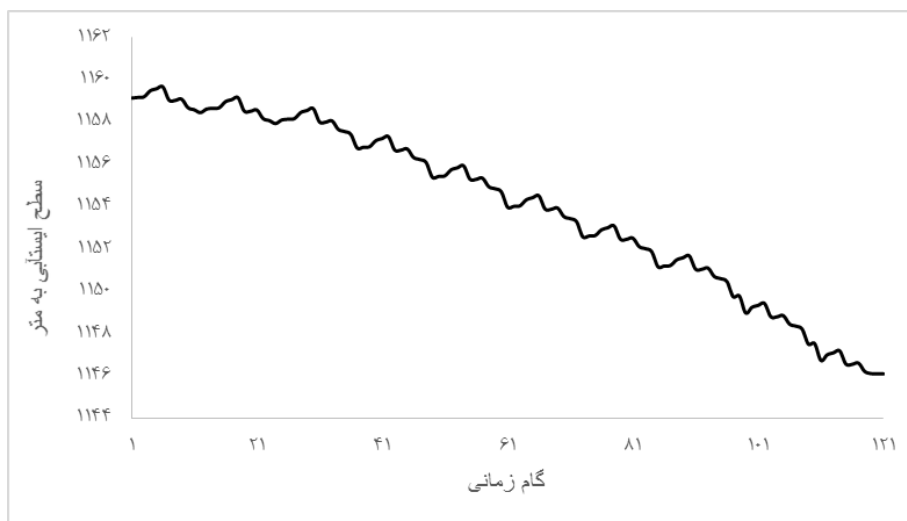
1. Mean Error
2. Mean Absolute Error
3. Root Mean Squared Error



شکل ۵. مقایسه مقادیر چاه‌های مشاهداتی و سطح ایستابی محاسبه‌شده



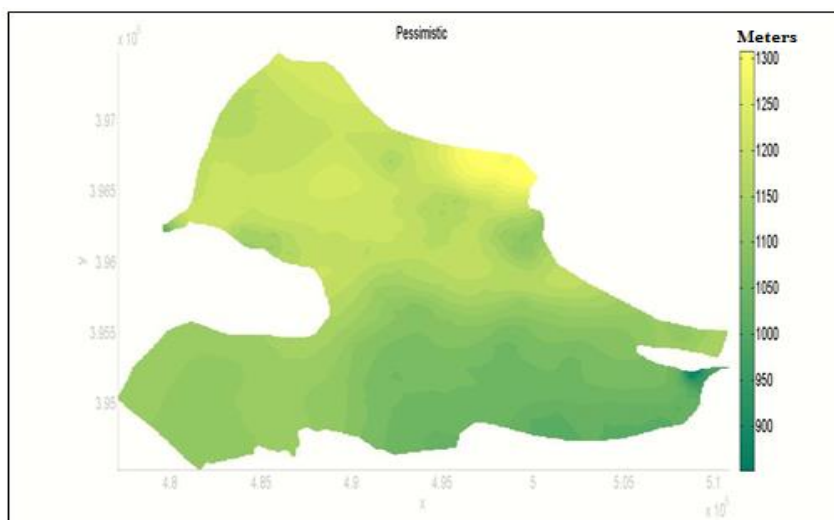
شکل ۶. شبیه‌سازی آب زیرزمینی در صورت ادامه شرایط فعلی بهره‌برداری پس از ۱۰ سال به متر



شکل ۷. وضعیت سطح آب زیرزمینی در صورت ادامه شرایط فعلی بهره‌برداری برای ۱۲۱ گام زمانی

نسبت به حالت فعلی بهره‌برداری سطح آب و پس از ۱۰ سال با افزایش ۱۵ درصدی بهره‌برداری نسبت به حالت فعلی در بعضی مناطق تا حدود ۳۳ متر افت می‌کند. میانگین سطح ایستابی برای آخر شهریور ۱۴۰۳ در همهٔ محدودهٔ مطالعاتی برابر ۱۱۴۱/۹۳۷ متر است که نسبت به شهریور ۱۳۹۳ که برابر ۱۱۵۸/۹۵۵ متر بود که به‌طور میانگین ۱۷/۰۱۹ متر را نشان می‌داد. این روند نشان‌دهندهٔ افت بسیار شدید سطح ایستابی پس از ۱۰ سال است و با توجه به اینکه منطقه یادشده منطقه‌ای تجاری، صنعتی و کشاورزی پرجمعیت است سبب به‌وجود آمدن تنش‌های اقتصادی-اجتماعی می‌شود. بنابراین، حرکت به سمت توسعهٔ این منطقه بدون در نظر گرفتن حدود جمعیت و مصرف بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی سبب آسیب جدی به این منطقه می‌شود.

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ مشخص می‌شود که پس از ۱۰ سال بهره‌برداری به شکل فعلی سطح آب در بعضی مناطق تا حدود ۱۸ متر افت می‌کند. میانگین سطح ایستابی برای آخر شهریور ۱۴۰۳ در همهٔ محدودهٔ مطالعاتی برابر ۱۱۴۶/۱۲۱ متر است که نسبت به شهریور ۱۳۹۳ که برابر ۱۱۵۸/۹۵۵ متر بود که به‌طور میانگین ۱۲/۸۳۴ متر افت سطح ایستابی را نشان می‌داد. این روند نشان‌دهندهٔ افت بسیار شدید سطح ایستابی پس از ۱۰ سال است که با توجه به اینکه منطقه یادشده منطقه‌ای تجاری، صنعتی و کشاورزی پرجمعیت است سبب به‌وجود آمدن تنش‌های اقتصادی-اجتماعی می‌شود. بنابراین، ادامهٔ این روند توصیه نمی‌شود. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ مشخص می‌شود که پس از ۱۰ سال بهره‌برداری با افزایش سالیانهٔ ۱/۵ درصد بهره‌برداری

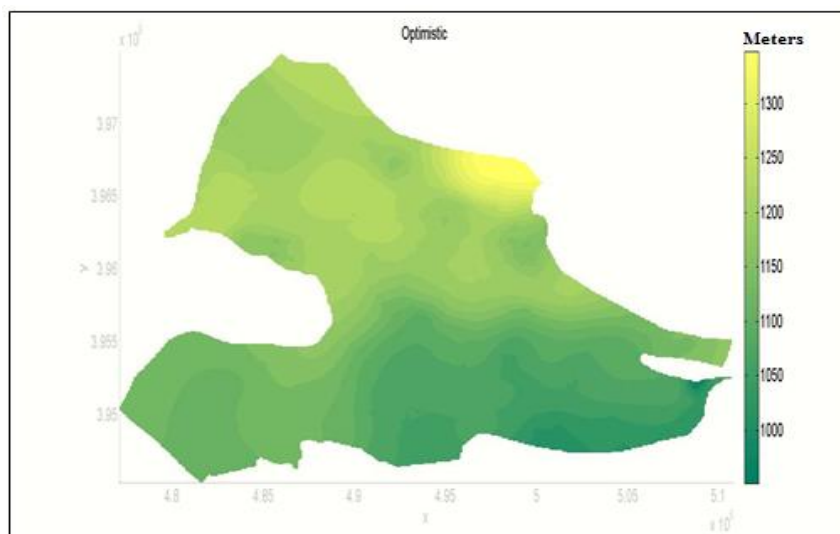


شکل ۸ شبیه‌سازی آب زیرزمینی در صورت افزایش ۱۵ درصدی بهره‌برداری نسبت به شرایط فعلی پس از ۱۰ سال به متر

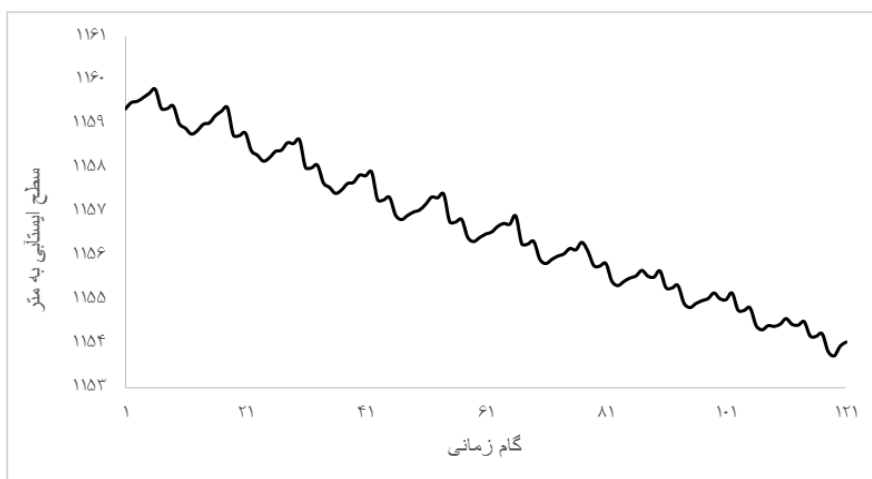


شکل ۹. وضعیت سطح آب زیرزمینی در صورت افزایش سالیانهٔ ۱/۵ درصد بهره‌برداری نسبت به حالت فعلی بهره‌برداری برای ۱۲۱ گام زمانی





شکل ۱۰. شبیه‌سازی آب زیرزمینی در صورت کاهش ۱۰ درصدی بهره‌برداری نسبت به شرایط فعلی پس از ۱۰ سال به متر



شکل ۱۱. وضعیت سطح آب زیرزمینی در صورت کاهش ۱۰ درصدی بهره‌برداری نسبت به حالت فعلی بهره‌برداری برای ۱۲۱ گام زمانی

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق از نوعی مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی استفاده شد که به‌صورت کد منبع‌باز در نرم‌افزار MATLAB تهیه شده بود. استفاده از این مدل علاوه بر کاهش نیاز به نرم‌افزارهای قفل‌شکسته نظیر GIS این امکان را فراهم می‌کند تا با انعطاف بیشتری شبیه‌سازی‌های مختص به آب زیرزمینی انجام بگیرد و کمک مؤثری در جهت ارتقای مدل‌های محلی صورت بپذیرد. مدل یادشده برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی ۱۰ ساله آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی کرج به کار گرفته شد. همچنین برای کمک به پیش‌بینی درست سطح ایستابی از سه سناریوی بهره‌برداری استفاده شد. مدل‌سازی در شرایط غیرماندار و در ۱۲۱ گام زمانی (۱۲۱)

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص می‌شود که پس از ۱۰ سال بهره‌برداری به شکل فعلی سطح آب در بعضی مناطق تا حدود ۱۲ متر افت می‌کند. میانگین سطح ایستابی برای آخر شهریور ۱۴۰۳ در همه محدوده مطالعاتی برابر ۱۱۵۴/۰۴۸ متر است که نسبت به شهریور ۱۳۹۳ که برابر ۱۱۵۸/۹۵۵ متر بود که به‌طور میانگین ۴/۹۰۶ متر را نشان می‌داد. این روند نشان‌دهنده افت نسبتاً شدید سطح ایستابی پس از ۱۰ سال است که با در نظر گرفتن ۱۰ درصد کاهش بهره‌برداری نیز به وقوع پیوسته است. این روند البته نشان می‌دهد با بهره‌برداری کمتر از آب زیرزمینی می‌توان سطح ایستابی را کنترل کرد و مانع افزایش افت در این محدوده مطالعاتی شد.

- [3]. Bear, J., Verruit, A., 1998, Modeling Groundwater Flow and Pollution, D.Reidel publishing company, P.O. Box17, 3300 AA Dordrecht, Holland.
- [4]. Fowe1, T., Nouiri, I., Ibrahim, B., Karambiri H., and Paturel, J. E., 2015, OPTIWAM: An Intelligent Tool for Optimizing Irrigation Water Management in Coupled Reservoir–Groundwater Systems, Water Resources Management, vol. 29, pp. 3841-3861.
- [5]. Van-Camp, M., Radfar, M. and Walraevens, K., 2010, Assessment of groundwater storage depletion by overexploitation using simple indicators in an irrigated closed aquifer basin in Iran , Agricultural Water Management, vol. 97, pp. 1876-1886.
- [6]. Kharmah, R.A.S., 2007, Optimal Management of Groundwater Pumping, The Case of the Eocene Aquifer, Palestine, M.S. thesis, Dept. Env. Eng., An-Najah National Univ., Nablus, Palestine.
- [7]. El-Yaouti, F., El-Mandor, A., Khattach, D. and Kaufmann, O., 2008, Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco), Journal of Hydro-environment Research, vol. 2, pp. 192-209.
- [8]. Wen, X. H., Wu, Y. Q., Lee, L. J. E., Su, J. P. and Wu, J., 2007, Groundwater flow modeling in the Zhangye Basin, Northwestern China, Journal of Environmental Geology, vol. 53, pp. 77-84.
- [9]. Carrera-Hernandez, J. J., Gaskin, S. J., 2006, The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): Open source groundwater flow modeling, Journal of Computers & Geosciences, vol. 32, pp. 339-351.
- [10]. Chiang, W.H and Kinzelbach, W., 2001, 3D groundwater modeling with PMWIN, Springer Science & Business Media.
- [11]. Harbaugh, A.W., 2005, MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular groundwater model: The ground-water flow process. Reston, VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- [12]. Hassan, A. E., 2004, A Methodology for Validating Numerical Ground Water Models, Journal of Groundwater, vol. 42, pp. 347-362.

ماه) از تاریخ اول شهریور ۱۳۹۳ تا اول مهر ۱۴۰۳ انجام گرفت. حل عددی معادله دیفرانسیل جزئی جریان در پکیج UPW و توسط برنامه MODFLOW2005-NWT صورت گرفت که از تحلیلگر نیوتون-رافسون بهره می برد.

در مقاله مد نظر ملاحظه شد که جهت جریان آب زیرزمینی از شمال به جنوب است که از وضعیت توپوگرافی تبعیت می کند. برای سناریوی ادامه شرایط فعلی، میانگین سطح ایستابی برای آخر شهریور ۱۴۰۳ در همه محدوده مطالعاتی برابر ۱۱۴۶/۱۲۱ متر به دست آمد که نسبت به سطح ایستابی در شهریور ۱۳۹۳ که برابر ۱۱۵۸/۹۵۵ متر بود، افت میانگین ۱۲/۸۳۴ متر را نشان می داد. همچنین برای سناریوی بدبینانه، میانگین سطح ایستابی برای آخر شهریور ۱۴۰۳ در همه محدوده مطالعاتی برابر ۱۱۴۱/۹۳۷ متر به دست آمد که نسبت به سطح ایستابی در شهریور ۱۳۹۳ که برابر ۱۱۵۸/۹۵۵ متر بود، افت میانگین ۱۷/۰۱۹ متر را نشان می داد. در نهایت، سناریوی خوش بینانه، میانگین سطح ایستابی برای آخر شهریور ۱۴۰۳ در همه محدوده مطالعاتی برابر ۱۱۵۴/۰۴۸ متر به دست آمد که نسبت به سطح ایستابی در شهریور ۱۳۹۳ که برابر ۱۱۵۸/۹۵۵ متر بود، افت میانگین ۴/۹۰۶ متر را نشان می داد.

از مزایای مدل یادشده می توان به امکان تلفیق آن با برنامه های شبیه سازی در زمینه آب سطحی و الگوریتم های محاسباتی نظیر الگوریتم های بهینه سازی اشاره کرد که پیشنهاد می شود حتماً مورد آزمون قرار بگیرد.

#### منابع

- [1]. Daliakopoulos, I.N., Coulibaly, P. and Tsanis, I.K., 2005, Groundwater level forecasting using artificial neural networks, Journal of Hydrology, vol. 309, pp. 229-240.
- [2]. Kollet, S. J., Maxwell, R. M., 2006, Integrated surface-groundwater flow modeling: A free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model, Journal of Advances in Water Resources, vol. 29, pp. 945-958.