

ارزیابی کارایی طرح تغذیه مصنوعی بر بهبود وضعیت آب زیرزمینی با مدل ریاضی (مطالعه موردی دشت فیرورق خوی در استان آذربایجان غربی)

مریم خدایاری^۱، بهزاد حصاری^{۲*}، حجت احمدی^۳، مریم محمدپور^۴

- ۱- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، آذربایجان غربی، ایران.
۲- دانشیار گروه مهندسی آب و پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، آذربایجان غربی، ایران.
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، آذربایجان غربی، ایران.
۴- دکترای منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای، تبریز، آذربایجان شرقی، ایران.
* نویسنده مسئول: b.hessari@urmia.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۴

چکیده

افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی به‌همراه کاهش نزولات جوی، موجب افت تراز آبخوان‌ها شده است. اجرای پروژه تغذیه مصنوعی در جبران کسری و تقویت آبخوان‌ها اهمیت زیادی دارد. بزرگ‌ترین پروژه تغذیه مصنوعی حوضچه‌ای شمال غرب کشور در منطقه فیرورق در دشت خوی در استان آذربایجان غربی اجرا شده است. در این پژوهش جهت بررسی تأثیرات این پروژه مهم در احیاء آبخوان خوی، تغییرات سطح آب زیرزمینی فیرورق با کد دستوری MODFLOW در نرم‌افزار GMS شبیه‌سازی شد. واسنجی مدل در حالت پایدار و ناپایدار به‌ترتیب در مهر و آبان سال ۱۳۹۰ تا شهریور ۱۳۹۱ انجام و صحت‌سنجی آن طی سال آبی ۱۳۹۱-۱۳۹۲ انجام شد. مقادیر شاخص‌های آماری ضریب تبیین و ضریب NRMS جهت ارزیابی مدل برای دوره صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۸۳ درصد به‌دست آمد؛ که بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در این دوره است. همچنین نتایج آنالیز حساسیت نشان داد؛ بیشترین حساسیت مدل به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان بود. جهت نشان دادن تأثیر تغییر شرایط مدیریتی حاکم بر منطقه، ۵ سناریو با اعمال تغییر در میزان حجم آبیگری و افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری در مدل اجرا شد. نتایج سناریوسازی حاکی از تأثیر مثبت تغذیه مصنوعی بر افزایش نسبی سطح آب زیرزمینی در پایین‌دست محل تغذیه در منطقه فیرورق بود. همچنین با افزایش حجم آبیگری، تراز آب زیرزمینی حدود ۰/۵ تا ۱/۰۳ متر افزایش پیدا کرد و عدم وجود تغذیه مصنوعی و افزایش بهره‌برداری بی‌رویه سبب افت ۱/۶۷ تا ۳/۱۳ متری سطح تراز آب زیرزمینی دشت خوی شد.

واژه‌های کلیدی: آبخوان فیرورق، تغذیه مصنوعی، دشت خوی، حوضچه‌های نفوذ، GMS، MODFLOW.

مقدمه

جبران‌ناپذیری برای حفظ اکوسیستم و ادامه حیات بشر دارد. در چنین شرایطی به‌کارگیری استراتژی‌های مؤثر مدیریتی برای حفاظت و صیانت از این منابع ارزشمند لازم و ضروری است. تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین راهکارهای مدیریتی برای حفظ این منابع استراتژیک است (Mandal and Singh, 2004). تغذیه مصنوعی یعنی وارد کردن آب به یک سازند نفوذپذیر، با هدف تغذیه سفره آب

محدودیت دسترسی به منابع آب شیرین جهان و افزایش روزافزون جمعیت، در کنار تغییرات اقلیمی به یک بحران جدی تبدیل شده است. در مواقع کمبود و خشک‌سالی، منابع آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین منبع در تأمین نیازهای آبی به‌شمار می‌رود. برداشت بیش‌ازحد از این منابع مهم و استراتژیک و در نتیجه افت سطح آب آبخوان‌ها، پیامدهای

داد؛ جریان آب زیرزمینی از پایین دست آبخوان به سمت دریاچه ارومیه خارج شده و با کاهش پمپاژ، می توان آب را به طور مستقیم به دریاچه ارومیه منتقل نمود (Janobi et al., 2018). Parhizkar et al., (2015) با بررسی پیش بینی افت سطح آب و بررسی فرونشست زمین در آبخوان دامغان با ترکیب مدل های GMS و GEP^2 به این نتیجه رسیدند؛ فرونشست زمین در اثر افت سطح آب زیرزمینی تشدید شده که نیازمند کاهش پمپاژ و برداشت از آب های زیرزمینی در مناطق پرخطر می باشد. Bekhit, (2015) به بررسی سیستم هیدرولوژیک آبخوان آزاد منطقه رفح در مصر با شبیه سازی جریان آب زیرزمینی این آبخوان با نرم افزار GMS پرداختند و افت سطح ایستابی آبخوان را $1/9$ تا $8/4$ متر بیان کردند. در یک مطالعه قمرنیا و همکاران (۱۴۰۱) شبیه سازی عددی آبخوان دشت بیجار- دیواندره با استفاده از کد MODFLOW و بررسی تأثیرات خشک سالی بر تغییرات کمی آن را انجام دادند. نتایج به این صورت بیان شد؛ در طول دوره شبیه سازی سالانه در حدود $0/5$ متر افت در آبخوان ایجاد شده است. لذا با توجه به افت ایجاد شده، اگر همچنان روند مدیریت کنونی ادامه یابد، در طول چند سال آینده شاهد افت شدید آبخوان و خسارت جبران ناپذیری خواهیم بود. جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۹) با ارزیابی عملکرد روش های عددی در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان بیرجند مبتنی بر روش های تفاضل محدود (FD)، اجزای محدود (FE) و بدون شبکه (Mfree) نشان دادند؛ مطالعه در خصوص روش Mfree ثابت کرد، این روش ضمن داشتن دقت بالاتر نسبت به روش های FD و FE از انعطاف پذیری بسیار بالایی در مواجهه با هندسه های نامنظم و موضوعات ناهمسانگردی و ناهمگنی برخوردار است. قوردویی میلان و همکاران (۱۳۹۸) با شبیه سازی تراز سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان و مقایسه آن با شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندمتغیره به این نتیجه رسیدند؛ هر سه مدل بکار رفته با دقت قابل قبولی قادر به شبیه سازی تراز سطح آب زیرزمینی هستند. از بین این مدل ها، مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان به عنوان مدل برتر انتخاب گردید. در نهایت از مدل های مذکور می توان به عنوان

زیرزمینی و به منظور استفاده مجدد از آن با رژیم و یا کیفیتی متفاوت در منطقه است (Bize et al., 1972). پایش دقیق، ارزیابی و استفاده از مدل سازی عددی و ریاضی یک ابزار کارآمد برای شبیه سازی آب های زیرزمینی و پیش بینی چگونگی تغییرات کمی و کیفی آبخوان ها در جهت مدیریت منابع آب می باشد. طی سال های اخیر، پیشرفت های چشم گیری در توسعه مدل ها به خصوص مدل های عددی و ریاضی صورت گرفته است. یکی از معروف ترین این مدل ها، کد MODFLOW برای شبیه سازی کمی و کد MT3DMS برای شبیه سازی کیفی در نرم افزار سیستم مدل سازی آب های زیرزمینی GMS^1 (مدل سه بعدی تفاضل محدود جریان آب های زیرزمینی) می باشد. این مدل عددی با داشتن قابلیت های بالا و وجود ماژول های مختلف شبیه سازی، ابزاری مناسب جهت مدل سازی جریان در محیط اشباع و تشکیلات آبرفتی می باشد. مطالعات متعددی در ایران و جهان در این زمینه انجام شده و قابلیت های این مدل نشان داده شده است. با توسعه مدل مفهومی و مدل سازی جریان آب زیرزمینی با نرم افزار GMS در منطقه Chhattisgarh هند این نتیجه حاصل شد؛ که هرچه تعداد اجرای مدل و مقدار اطلاعات ورودی واقعی به مدل بیشتر باشد، خطای شبیه سازی کمتر شده و نتایج بهتری به دست می آید (Bohidar and Ahmad, 2022). مدل سازی تغییرات زمانی و مکانی آب زیرزمینی متأثر از آب سطحی با نرم افزار GMS در منطقه شرق تگزاس، به خوبی قابلیت های این مدل در توانایی شبیه سازی چندبعدی با روش های تفاضل محدود و المان محدود و قابلیت لینک شدن با نرم افزارهای مختلف از جمله GIS را نشان داد (Bhattacharjya and Barma, 2009). نتایج شبیه سازی و پیش بینی کیفیت آب زیرزمینی در اثر افت سطح آب ناشی از فعالیت های انسانی با مدل GMS-MODFLOW در منطقه Beijing چین به این صورت حاصل شد؛ که پیش بینی جریان آب زیرزمینی با مدل های عددی یک بنیان علمی اساسی برای جلوگیری و کنترل تخریب منابع طبیعی و حفاظت از منابع آب زیرزمینی را فراهم می کند (Zhao et al., 2021). بررسی تغییرات کمی آب زیرزمینی دشت میاندوآب متأثر از مدیریت بهره برداری با مدل MODFLOW-NW در یک مطالعه نشان

² Genetic Expression Programming

¹ Groundwater Modeling System

آبخوان فیرورق واقع در دشت خوی با مساحت تقریبی ۴۴ کیلومترمربع در شمال استان آذربایجان غربی و در فاصله ۱۵۰ کیلومتری از شهر ارومیه واقع شده است. حوضچه‌های تغذیه مصنوعی خوی در فاصله ۱۲ کیلومتری غرب شهر خوی در نزدیکی روستای قشلاق در حاشیه جاده خوی به چالدران قرار دارد. منطقه فیرورق که در شکل ۱ نشان داده شده است؛ در مختصات جغرافیایی ۵۸' و ۴۴° تا ۴۸' و ۴۴° طول شرقی و ۳۱' و ۳۸° تا ۳۷' و ۳۸° عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع آن از سطح دریا ۱۱۹۴ تا ۱۳۹۹ متر می‌باشد، و بخشی از رودخانه قطور از مرکز این محدوده عبور کرده و به رود مرزی ارس می‌ریزد. پروژه تغذیه مصنوعی خوی در سال ۱۳۸۷ با انتقال آب از رودخانه آند با کانال پسک به طول ۱۶ کیلومتر و عبور از دو حوضچه رسوب‌گیر وارد حوضچه‌های هفت‌گانه تغذیه مصنوعی فیرورق شده و مورد بهره‌برداری واقع گردید. ابعاد حوضچه‌های تغذیه تقریباً به صورت ۱۳۵ متر در ۷۰ متر و به عمق مفید حدود ۳ متر می‌باشد. مقرر بود، هر ساله به میزان تقریبی ۲۰ میلیون مترمکعب تغذیه از این حوضچه‌ها صورت گیرد؛ که عملاً بین ۵ تا ۱۲ و به‌طور متوسط حدود ۱۰ میلیون مترمکعب در سال در طی سال‌های ۷۷ تا ۹۰ انجام شده است.

داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی

تراز سطح آب زیرزمینی و موقعیت چاه‌های پیژومتری از مهم‌ترین ورودی‌های مدل می‌باشند. همچنین مهم‌ترین عوامل ایجاد تنش در آبخوان مقادیر تغذیه و تخلیه می‌باشند (باری و درزی نفت‌چالی، ۱۳۹۶). تعداد چاه‌های مشاهده‌ای در دشت خوی ۷۹ حلقه می‌باشد؛ که پنج حلقه از این چاه‌های پیژومتری در محدوده فیرورق واقع شده است. در محدوده مورد مطالعه ۶۹ حلقه چاه بهره‌برداری (با متوسط دبی ۱۴۱۰/۶۹ مترمکعب در ماه) نیز وجود دارد. از آنجائی که هیچ‌گونه قنات و چشمه‌ای در منطقه وجود ندارد، چاه‌های بهره‌برداری بزرگ‌ترین منبع تخلیه‌کننده‌ی آبخوان می‌باشند. با توجه به الگوی کشت منطقه میزان پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری در ماه‌های مختلف سال متفاوت است. میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری به‌عنوان داده‌های اولیه می‌باشند.

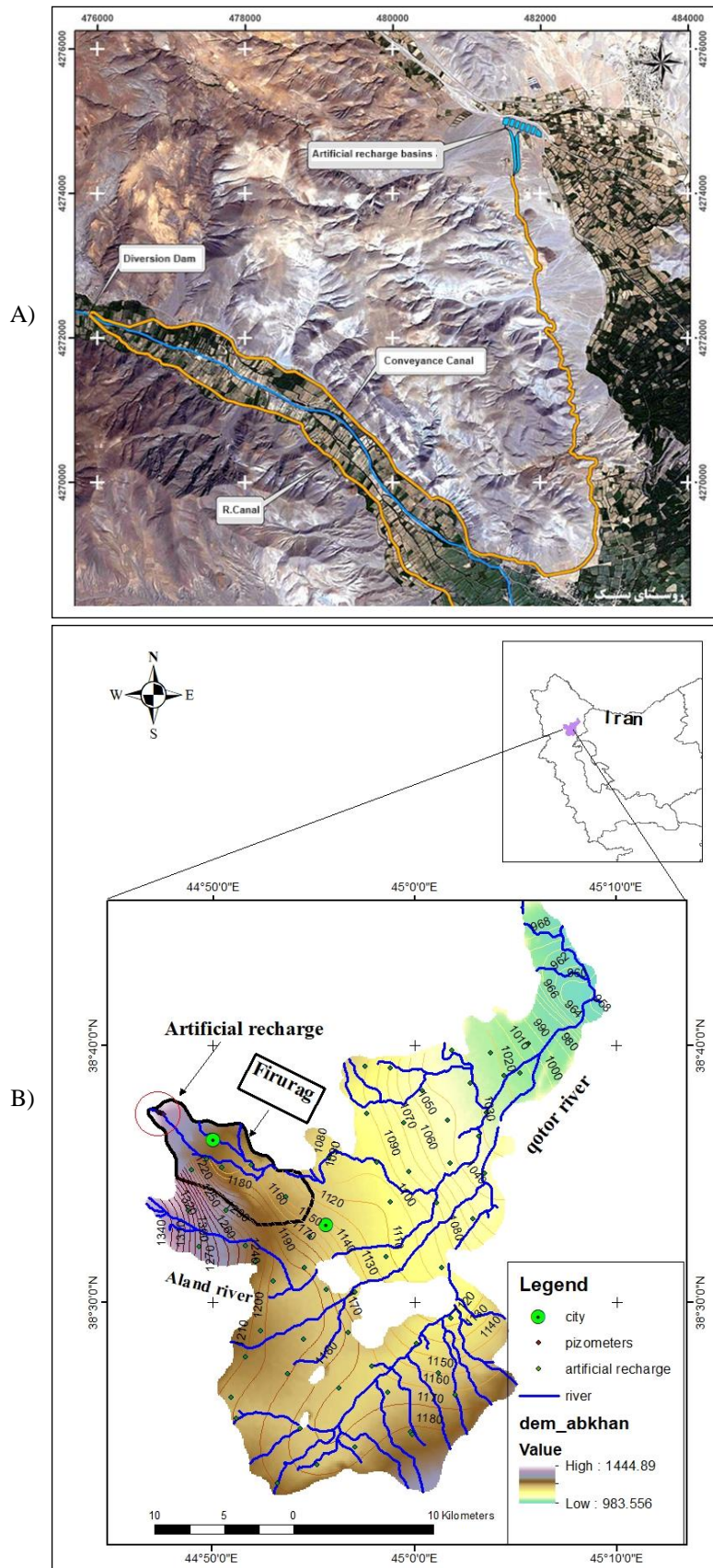
جایگزین مدل‌های عددی در جهت مدیریت و پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی استفاده کرد. نخعی و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی تغییرات کمی و مدل‌سازی کیفی آبخوان ورامین با استفاده از کد MODFLOW در نرم‌افزار GMS به این نتیجه رسیدند؛ اگر وضعیت بهره‌برداری و همچنین ورود آلاینده به آبخوان ادامه داشته باشد، در آینده وضعیت نامناسبی برای استفاده از آب‌های این مناطق جهت مصارف شرب و کشاورزی به‌وجود خواهد آمد. زنگانه و معراجی (۱۳۹۶) نشان دادند؛ مدل‌سازی عددی آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ در روش آبیگری باز از دریاها با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW نشان‌دهنده کارایی روش بوده و مدل چاه‌های نقطه‌ای عملکرد مناسب‌تری نسبت به چاه‌های آبکش بزرگ با فاصله زیادتر در منطقه موردنظر دارد.

در این تحقیق برای اولین بار با استفاده از مدل ریاضی آب زیرزمینی بزرگ‌ترین پروژه تغذیه مصنوعی حوضچه‌ای (مخازن نفوذ عمقی) کشور در شرایط بهره‌برداری با شبیه‌سازی اثر پروژه در پائین‌دست مدل‌سازی و ارزیابی گردید. عمده خلأ موجود در سابقه تحقیق، ارزیابی پروژه‌های تغذیه مصنوعی با مدل‌سازی ریاضی است؛ که این تحقیق سعی در پوشش این خلأ دارد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت خوی با مساحت ۶۶۳ کیلومترمربع در شمال استان آذربایجان غربی واقع شده است. شهر خوی با مختصات جغرافیایی ۵۸' و ۴۴° طول شرقی و ۳۳' و ۳۸° عرض شمالی و ارتفاع متوسط ۱۱۳۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد در این دشت قرار دارد. طول دشت خوی در امتداد ضلع شمالی-جنوبی حدود ۵۰ کیلومتر و در امتداد ضلع شرقی-غربی برابر ۳۰ کیلومتر می‌باشد؛ که از اطراف با کوهستان‌های پیرامون خود احاطه شده است. متوسط بارش سالانه دشت خوی به‌طور میانگین ۳۶۰/۹ میلی‌متر و متوسط دمای مناطق هموار و پست آن ۱۱/۳ درجه سانتی‌گراد و ارتفاعات آن ۷/۱ درجه سانتی-گراد می‌باشد. همچنین میزان تبخیر سالانه در دشت و ارتفاعات خوی به‌ترتیب برابر ۱۳۷۰ و ۱۲۵۵ میلی‌متر گزارش شده است صمدی، (۱۳۹۵).



شکل ۱- الف) تصویر ماهواره‌ای محل تغذیه مصنوعی دشت خوی، ب) موقعیت جغرافیایی محدوده فیروق در دشت خوی و محل پروژه تغذیه مصنوعی.

Figure 1- A) Satellite image of artificial recharge site of Khoy Plain, B) Geographical location of Firaraq area in Khoy Plain and location of artificial recharge project.

معرفی مدل MODFLOW

مدل MODFLOW یکی از معروفترین مدل‌سازهای سه‌بعدی حرکت آب‌های زیرزمینی می‌باشد. این ابزار به‌طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی تراز آب‌های زیرزمینی استفاده شده است. محققان آن را قابل‌اعتمادترین و پرکاربردترین مدل موجود در ارتباط با مدل‌سازی جریان آب‌های زیرزمینی مورد توجه قرار داده‌اند. این مدل توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده توسعه داده شده و به‌صورت رایگان در اختیار کاربران قرار داده شده است (Zanganeh and Me'reji, 2017). کد مادفلو در GMS رفتار آب زیرزمینی را با ساخت شبکه هندسی با استفاده از نقشه‌های رستری و وکتوری، با قابلیت سه-بعدی‌سازی حل عددی جریان را انجام می‌دهد. این مدل سه-بعدی با مدل جریان اشباع به‌صورت تفاضل محدود قادر به تحلیل‌های پایدار و ناپایدار است. مدل‌سازی ریاضی یک آبخوان عبارت است از، حل عددی معادلات ریاضی حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی که به کمک آن‌ها، سیستم واقعی شبیه‌سازی می‌شود. مدل MODFLOW برای حل این معادله از روش تفاضل محدود استفاده می‌کند (McDonald and Harbaugh, 1988).

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

که در آن h سطح آب آبخوان، K ضریب قابلیت انتقال آبخوان، S_s ضریب ذخیره، W مقدار تخلیه و یا تغذیه آبخوان، x و y و z مختصات جغرافیایی و t متغیر زمان می‌باشند. همچنین برای تهیه یک مدل موفق ریاضی با یک ساختار توصیفی درست و مناسب از یک آبخوان لازم است، پارامترهای ورودی به‌درستی به مدل تعریف شوند. در این مطالعه ساخت مدل آب زیرزمینی با مدل MODFLOW-NWT در نرم‌افزار GMS به‌عنوان یک رابط گرافیکی بین کد تفاضل محدود MODFLOW و GIS در پنج گام صورت گرفت.

فرایند مدل‌سازی با مدل MODFLOW در GMS

هدف کلی از مدل‌سازی صورت گرفته در این تحقیق، بررسی گزینه‌های چگونگی به تعادل رساندن بیلان، پیش‌بینی

در محدوده مورد مطالعه تغذیه آبخوان از طریق ریزش‌های جوی، آب برگشتی از کشاورزی، صنعت، شرب و بهداشت، تغذیه از رودخانه و تغذیه مصنوعی صورت می‌گیرد. بر اساس مطالعات، میزان تغذیه از سطح آبخوان تقریباً برابر مجموع ۱۰ تا ۱۵ درصد ریزش‌های جوی، ۱۰ تا ۱۵ درصد آب برگشتی از کشاورزی، ۸۰ درصد آب شرب شهری و ۱۰ درصد صنعت و بهداشت در نظر گرفته شد (قدرتی و برزگری، ۱۳۹۵). ضرایب هیدرودینامیکی شامل هدایت هیدرولیکی (K) و آبدهی ویژه (S_y) با استفاده از لاگ حفاری پیژومترها، جنس لایه‌های آبرفتی، استانداردهای موجود در شرایط محدودیت اطلاعات موجود استخراج شد.

تهیه مدل مفهومی

مدل MODFLOW در نرم‌افزار GMS را معمولاً می‌توان به دو روش شبکه^۳ یا مدل مفهومی^۴ تهیه نمود. در روش شبکه پارامترهای مختلف هر یک از سلول‌ها مستقیماً به آن سلول داده می‌شوند. در واقع در این روش مستقیماً با شبکه سلول‌ها سر و کار داریم و مقادیر تغذیه و تخلیه و دیگر پارامترهای مدل سلول به سلول وارد می‌شوند. این روش برای مدل‌هایی که از پیچیدگی کمتری برخوردارند، مناسب می‌باشد. روش مفهومی که در این تحقیق استفاده گردیده است، شامل استفاده از ابزارهای داخلی موجود در نرم‌افزار GIS در مدول^۵ نقشه برای تهیه مدل مفهومی منطقه‌ای است؛ که قرار است مدل ریاضی آن تهیه گردد. مدل تفهیمی در مدول نقشه با استفاده از نقاط، خطوط و چند وجهی‌ها تعریف می‌شود. پس‌ازاینکه مدل تفهیمی تعریف شد، با ایجاد شبکه مدل کلیه پارامترهای تعریف شده در مدل مفهومی به سلول‌های شبکه نسبت داده می‌شوند. در واقع GMS با این روش کلیه اطلاعات مورد نیاز ذخیره شده در پایگاه اطلاعاتی GIS را با استفاده از مدول نقشه برای تهیه مدل مفهومی جمع‌آوری می‌کند و پس از تهیه مدل تفهیمی، آن را به آرایه‌های مدل^۶ تبدیل می‌کند (شهبوساری و خدائی، ۱۳۸۴).

⁵ Map module
⁶ Model array

³ Grid approach
⁴ Conceptual model approach

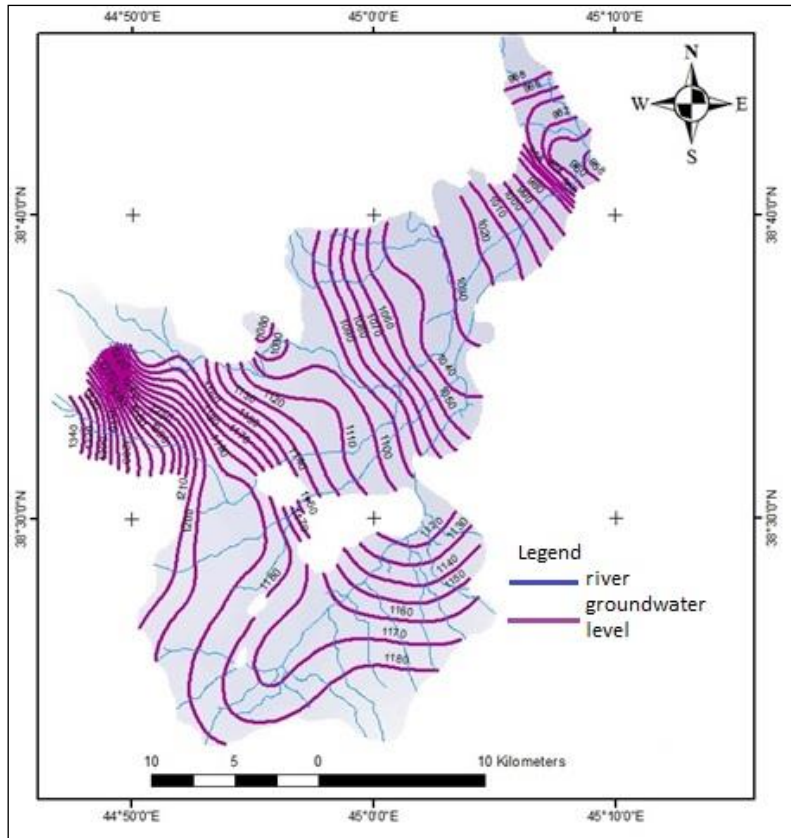
بعد از تهیه مدل مفهومی، طراحی شبکه‌ای مدل و تفکیک‌سازی مکانی و زمانی مدل گام دوم مدل‌سازی است، این مرحله، بعد از تعریف پارامترهای موردنیاز شبیه‌سازی از جمله، وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی، نقشه‌های تراز سطح آب زیرزمینی، نقشه منابع آب و وسعت منطقه مورد مطالعه، در مدل مفهومی انجام می‌شود. به دلیل کوچک بودن محدوده مدل‌سازی اندازه سلولی 100×100 متر انتخاب شد. تعداد سلول‌های شبکه در جهت عمودی ۱۳۱ سلول، در جهت افقی ۹۹ سلول و تعداد کل سلول‌ها در مدل ۱۲۹۶۹ عدد بود؛ که از این تعداد ۵۱۶۶ سلول فعال محسوب شد. شکل ۳ نمایی از شبکه‌بندی منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

در گام سوم، با انتخاب کد یا مدل شبیه‌سازی MODFLOW در نرم‌افزار GMS و انتقال اطلاعات مدل مفهومی به آن، مدل اجرا می‌گردد. بعد از اجرای اولیه مدل، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه و ضریب هدایت بستر رودخانه‌ها به‌عنوان پارامترهای واسنجی به‌مدل معرفی و بدین ترتیب برای شرایط پایدار برای ماه یا ماه‌هایی از سال که تغییرات سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای و دشت ناچیز است، واسنجی می‌شود (Pourseyadi and Kashkuli, 2012; Abareshi et al., 2015; Asadi et al., 2016; Taheri Tizro and Kamali, 2017 و شهبابی‌فرد و همکاران، ۱۳۸۳؛ برزنونی و همکاران، ۱۳۹۰).

در چهارمین گام، پس از واسنجی مدل در شرایط پایدار، مدل برای شرایط ناپایدار آماده شده و واسنجی در شرایط ناپایدار انجام می‌شود. تنها راه ورود به مدل‌سازی حالت ناپایدار، گذر از حالت پایدار با کمترین اختلاف ممکن در مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای می‌باشد. در این گام از نتایج واسنجی اول استفاده و مدل اجرا می‌شود. در شرایط ناپایدار تمامی داده‌های ورودی شامل تخلیه و تغذیه منابع آبی محدوده، میزان تغذیه از سطح، مرزهای ورودی و خروجی، میزان تغذیه از رودخانه به‌علت تغییر در دبی عبوری به‌صورت ماهیانه و لایه ضریب آبدی ویژه در گام‌های زمانی مختلف در دوره شبیه‌سازی وارد مدل می‌گردند. در نهایت در گام پنجم، مدل برای صحت‌سنجی و آنالیز حساسیت در مدل انجام می‌شود.

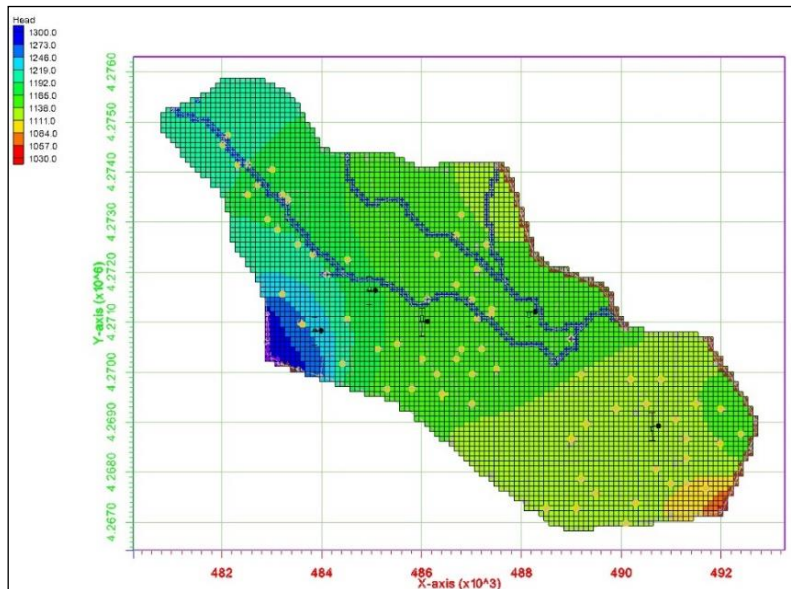
وضعیت آتی آبخوان تحت شرایط مختلف هیدرولوژیک و گزینه‌های مختلف، بررسی صحت و سقم داده‌های مدل مفهومی و پیروی از روش‌های استاندارد مدل‌سازی ریاضی توأم با ارائه کالیبراسیون است. مکانیسم‌ها و شرایط مختلف مؤثر بر سفره‌های آب زیرزمینی، تغییراتی در حجم و کیفیت و سطح آب ذخایر مذکور به‌وجود می‌آورد که جهت برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح و توسعه کامل، می‌بایست تحت کنترل دقیق و پیش‌بینی‌های به‌موقع قرار گیرد. یکی از ارکان مهم در مدل‌سازی، تهیه مدل مفهومی می‌باشد؛ که در واقع پایه و اساس مدل ریاضی می‌باشد. مدل مفهومی در واقع ارائه‌کننده یک تفسیر کاملی از شرایط واقعی محدوده مدل‌سازی می‌باشد. در مدل مفهومی باید منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل‌سازی، زون‌های تغذیه و تبخیر و تعرق و همچنین ساختار فیزیکی آبخوان تشریح شوند، در واقع کلیه عوامل تأثیرگذار و مؤثر بر آبخوان باید در نظر گرفته شوند (Rahimzade et al., 2016). در این پژوهش، ساخت مدل آب زیرزمینی دشت خوی در پنج گام انجام شد. اولین گام توصیف مدل مفهومی است. برای تهیه مدل مفهومی از اطلاعات چاه‌های پیرومتری منطقه، توپوگرافی محل، تراز سطح آب، لایه سنگ کف و بار جریان در مرزهای ورودی و خروجی، عوامل بیلان شامل چاه‌های بهره‌برداری، میزان تغذیه از سطح به آبخوان، توزیع اولیه پارامترهای هیدروژئولوژیک، شامل هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه استفاده شد، سپس شرایط مرزی منطقه، مرز اولیه (منطبق بر مرز آبخوان)، مرز خروجی جریان (با توجه به جهت جریان و خطوط جریان و سطح آب زیرزمینی) تعیین شد. نقشه خطوط جریان و هم‌پتانسیل آب زیرزمینی در دشت خوی در شکل ۲ نشان داده شده است. نهایتاً برای شبیه‌سازی نقاط ورودی و خروجی آب زیرزمینی در مدل، از بسته مرز با بار عمومی با نام اختصاری GHB⁷ استفاده شد. همچنین میزان تغذیه دشت از طریق تغذیه مصنوعی فقط در ماه‌های آبیگری طرح تغذیه مصنوعی (از اواخر آبان ماه تا اواخر فروردین ماه) با استفاده از بسته Recharge در مدل در زمان‌های آبیگری در نظر گرفته شد.

⁷ General head boundary



شکل ۲- نقشه خطوط جریان و هم‌پتانسیل دشت خوی.

Figure 2- Flow lines and iso-potential map of Khoy Plain.



شکل ۳- شبکه‌بندی محدوده فیرورق، محدوده مرزها، موقعیت پیزومترها، چاه‌های مشاهده‌ای و رودخانه‌ها.

Figure 3- Grid cell of the Firoraq area, borders, position of piezometers, observation wells and rivers.

باشد تا کلیه شرایط زمانی و محیطی در نظر گرفته شود (یاری و درزی نفت‌چالی، ۱۳۹۶). واسنجی یعنی حداقل کردن اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده است، و این

واسنجی، صحت‌سنجی و آنالیز حساسیت

برای افزایش دقت مدل، دوره‌های واسنجی و صحت-سنجی باید شامل یک دوره کامل زمانی (تمام فصول سال)

مهرماه ۱۳۹۱ تا شهریورماه ۱۳۹۲ صحت‌سنجی شد. به‌منظور صحت‌سنجی، مدل تهیه‌شده از لحاظ مقایسه مقادیر مشاهده-ای و محاسباتی در این دوره زمانی تطابق داده شد. برای انجام تحلیل حساسیت پس از واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار، حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف موردبررسی قرار گرفت. در این راستا پارامترهای هدایت هیدرولیکی (k) و ضریب ذخیره (Sy) به میزان ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصد، به دو صورت کاهش و افزایشی تغییر داده شد و برای هر یک از این حالات، مدل اجرا گردید.

شاخص‌های آماری برآورد خطای مدل

برای ارزیابی کمی نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی و اعتبارسنجی مدل از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات ($RMSE$) و مقدار میانگین قدر مطلق خطا استفاده شد. میزان MR میانگین اختلاف داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را بیان می‌کند؛ که این میزان از رابطه ۲ محاسبه می‌گردد (Gallardo et al., 2005).

$$MR = \text{AVERAGE} (\sum (x_o - x_i)) \quad (2)$$

مناسب بودن مدل را می‌توان از طریق معیار $NRMS^9$ ، مورد بررسی قرار داد. معیار $NRMS$ از تقسیم ریشه میانگین مربعات خطاها (RMS^{10} یا $RMSE$)، بر حداکثر اختلاف بین بارهای مشاهده‌ای به‌دست می‌آید (رابطه ۳ و ۴)، مقدار قابل‌قبول این پارامتر کمتر از ۱۰ درصد است (Gallardo et al., 2005).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (x_o - x_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$NRMS = \frac{RMS}{(x_o)_{\max} - (x_o)_{\min}} \quad (4)$$

MAE مقدار میانگین قدر مطلق خطا می‌باشد که از رابطه ۵ به‌دست می‌آید.

$$MAE = \frac{\sum |x_o - x_i|}{n} \quad (5)$$

R^2 اندازه‌گیری آماری نزدیک داده‌ها به خط رگرسیون برازش شده می‌باشد. به R^2 ، ضریب تعیین یا ضریب تشخیص نیز گفته می‌شود. ضریب تعیین نشان می‌دهد؛ که چند درصد تغییرات متغیر وابسته به‌وسیله متغیر مستقل تبیین می‌شود. میزان این ضریب از رابطه ۶ به‌دست می‌آید.

کار ممکن است، به‌وسیله اندازه‌گیری دقیق پارامترها و یا به‌وسیله روش‌های بهینه‌سازی انجام شود. معمولاً یک رابطه خاص بین شکل عمومی مدل و سیستم فیزیکی مورد مطالعه از طریق پارامتر-های مدل وجود دارد؛ که این رابطه دقت مقادیر پارامترها را برای نکویی برازش بین خروجی مدل و خروجی ثبت‌شده نشان می‌دهد. هدف از واسنجی، رساندن اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی و مشاهده‌ای به حداکثر ± 1 متر و خطای $RMSE^8$ به کمتر از ۰/۷ می‌باشد (Rezaei et al., 2011). بدین منظور در این مطالعه، شبیه‌سازی انجام شده در مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار واسنجی شد. در مدل پایدار محدوده فیرورق، از ارتفاع مطلق سطح آب پیرومترهای موجود در محدوده فیرورق به‌صورت ماهانه، پارامترهای هدایت هیدرولیکی، مرزهای ورودی و خروجی، شرایط هیدرولیکی رودخانه، مورد واسنجی قرار گرفتند. برای واسنجی مدل از روش مستقیم (آزمون‌وخطا) استفاده شد. تمام این پارامترها در حالت ناپایدار مدل به‌صورت سالانه واسنجی شدند.

یک مدل که با دقت مناسبی واسنجی شده باشد، چنانچه تحت استرس‌های مختلفی غیر از استرس‌های دوره واسنجی قرار گیرد، باید نتایج قابل‌قبولی در مرحله صحت‌سنجی ارائه کند. یعنی بدون تغییر منطقه بندی‌های به‌دست آمده برای مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و تا حدودی درصد نفوذ آب ناشی از بارندگی، مدل باید بتواند، شرایط جدید را شبیه‌سازی کند؛ بنابراین بعد از واسنجی در حالت ناپایدار، باید مدل برای یک دوره زمانی مورد آزمون قرار گیرد؛ تا صحت داده‌های خروجی آن اثبات گردد. اغلب پارامترهایی که در مدل‌سازی آب زیرزمینی به‌کار گرفته می‌شود از جمله: ضریب هدایت هیدرولیکی، تغذیه از سطح، ضریب ذخیره یا آبدهی ویژه، ضخامت آبرفت و غیره دارای عدم قطعیت هستند. شناخت این عدم قطعیت‌ها و به‌کمیت درآوردن بازه تغییرات آن‌ها در مدل‌سازی و کالیبراسیون آن‌ها مؤثر است. مدل ساخته شده و کالیبره شده به پارامتری حساس است که؛ تغییرات کوچک در مقادیر آن، اثر زیادی بر مدل خواهد داشت. این تأثیر با خطای ایجاد شده در مدل سنجیده خواهد شد (Hill and Tiedeman, 2007; Genetti and Corps of Engineers, 1999). بدین منظور مدل به مدت ۱۲ ماه از

¹⁰ Root Mean Square Error

⁸ Root Mean Square Standard

⁹ Normalized Root Mean Squared

(al., 2014). با اجرای سناریوهای موردنظر تحقیق، می‌توان این وضعیت را به صورت کمی مورد بررسی قرار داد.

نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل در حالت پایدار

همان‌طور که گفته شد؛ برای اجرای مدل در حالت پایدار تمامی اطلاعات از جمله میزان تخلیه، تغذیه، تراز آب پیژومترها، شبکه رودخانه‌ای و مرزهای هیدرولیکی در یک دوره زمانی ثابت ۳۰ روز (شروع سال آبی، مهرماه ۹۱-۱۳۹۰) وارد مدل گردید. با در نظر گرفتن سطح زمین به‌عنوان سطح اولیه آب زیرزمینی، مدل به‌صورت پایدار اجرا و سطح آب زیرزمینی در این دوره به‌وسیله مدل تخمین زده شد. نتایج این مرحله در مدل MODFLOW به‌صورت اختلاف در سطح آب پیژومترها نمود پیدا می‌کند. خطای پیژومترها در اولین اجرای مدل در منطقه فیرورق در شکل ۴ نشان داده شده است.

به‌منظور کاهش خطاهای محاسباتی در مقابل داده‌های مشاهده‌ای، بایستی مدل ایجاد شده مورد واسنجی قرار گیرد. برای واسنجی مدل از تغییر پارامتر هدایت هیدرولیکی استفاده شد. تغییرات هدایت هیدرولیکی در منطقه مورد مطالعه ۱۰ تا ۹۰ متر در روز به‌دست آمد. نقشه تغییر هدایت هیدرولیکی در شکل ۵ نشان داده شده است.

وضعیت پیژومترهای موجود از لحاظ خطای مشاهداتی و محاسباتی بعد از واسنجی به فرم شکل ۶ درآمده است.

نتایج واسنجی مدل در حالت ناپایدار

مطابق روش تحقیق، پس از انجام واسنجی در شرایط پایدار، واسنجی حالت ناپایدار مدل در یک دوره یک‌ساله (از مهرماه ۱۳۹۰ تا شهریورماه ۱۳۹۱) با استفاده از اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری انجام شد. همچنین لایه تغذیه مصنوعی نیز به‌دلیل آبیگری در برخی ماه‌های سال به مدل افزوده شد. شکل ۷ (الف تا د) هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای پیژومترها را پس از واسنجی مدل در حالت ناپایدار نشان می‌دهد. نمودارها نشان می‌دهند؛ روند تمام هیدروگراف‌های محاسباتی منطبق با هیدروگراف‌های مشاهده‌ای است و در محدوده قابل قبول واقع شده است.

$$R2 = \frac{(\sum (x_i - \bar{x}_i)(x_o - \bar{x}_o))^2}{(\sum (x_i - \bar{x}_i)^2)(\sum (x_o - \bar{x}_o)^2)} \quad (6)$$

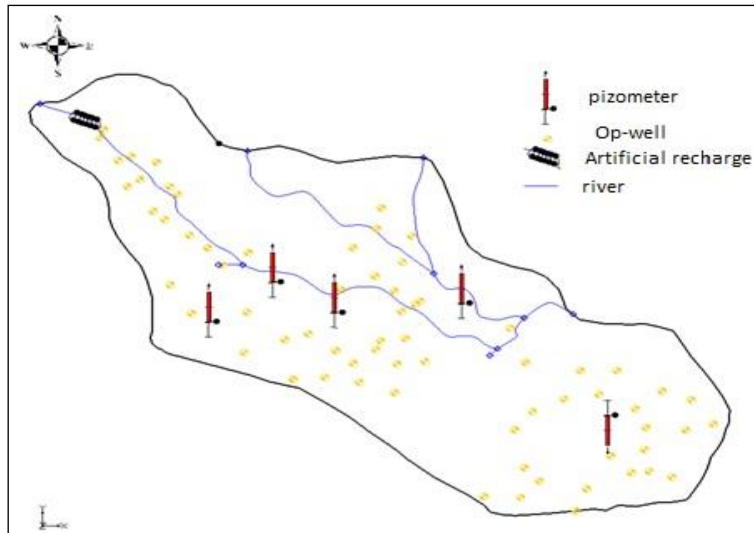
که در آن x_o مقادیر مشاهداتی، x_i مقادیر محاسباتی، \bar{x}_o میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{x}_i میانگین مقادیر محاسباتی و n تعداد داده‌های موجود می‌باشد.

خطای پایین در معادلات بیلان نشانگر کلیدی موفق بودن مدل می‌باشد. خطای بیلان با بالانس جرمی را توسط درصد اختلاف نشان می‌دهند و هرچه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، بیلان ارائه شده توسط مدل مقبول‌تر می‌باشد.

سناریوسازی در مدل

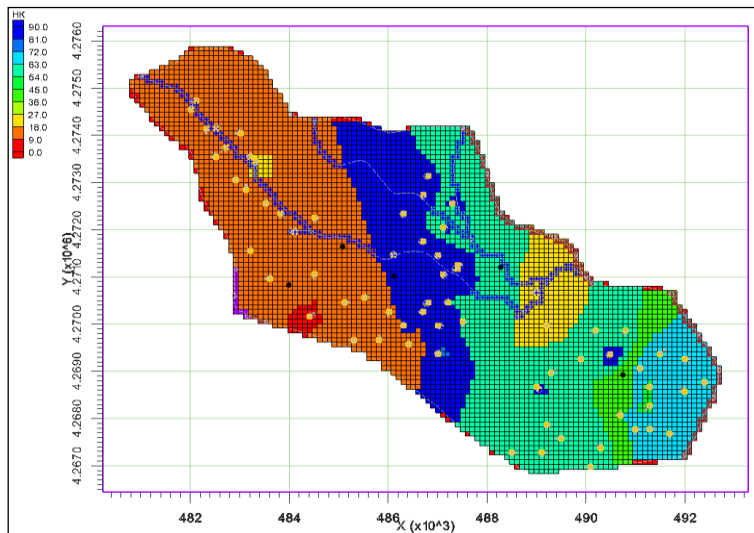
پس از اطمینان از کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان و تخمین مناسب تراز آب زیرزمینی در هر دوره واسنجی و صحت‌سنجی، مدل با اعمال تغییرات دلخواه، قابلیت پیش‌بینی وضعیت آبخوان را خواهد داشت. با اعمال هرگونه تغییری در داده‌های ورودی می‌توان، نتیجه آن را در دوره پیش‌بینی (دوره واسنجی و صحت‌سنجی) مشاهده کرد. این تغییر در داده‌های ورودی یا اصطلاحاً تعریف سناریو باید به‌گونه‌ای اعمال گردند؛ که در واقعیت نیز امکان پیاده‌سازی این‌گونه سناریوها فراهم باشد. سناریوهای اعمال شده در این پژوهش جنبه مدیریتی و اجرایی دارد و در قالب ۵ سناریوی افزایش ۲۰ و ۵۰ درصد آبیگری طرح تغذیه مصنوعی و سناریوی عدم آبیگری آن، همچنین افزایش ۲۰ و ۵۰ درصد میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری مورد بررسی قرار گرفت.

حجم ذخیره آبخوان شامل ذخیره دینامیک و ذخیره استاتیک است. ذخیره استاتیک به ذخیره‌ای اطلاق می‌شود؛ که در طول زمان زمین‌شناسی، در بخش‌های تحتانی آبخوان انباشته گردیده و معمولاً در ارتباط با چرخه هیدرولوژیک نیست. درحالی‌که ذخیره دینامیک آب زیرزمینی به ذخیره‌ای اطلاق می‌شود؛ که در ارتباط با چرخه هیدرولوژیک بوده و حجم آن در حقیقت برابر میزان تغذیه سالانه آب زیرزمینی است، در صورت عدم بهره‌برداری از آبخوان، ذخیره دینامیک به هر شکل ممکن است از آبخوان خارج شود؛ که می‌تواند، به‌صورت خروجی زیرزمینی به دشت‌های مجاور، زهکشی رودخانه‌ها، تبخیر مستقیم در مناطق کم‌عمق و غیره باشد (Karimi et



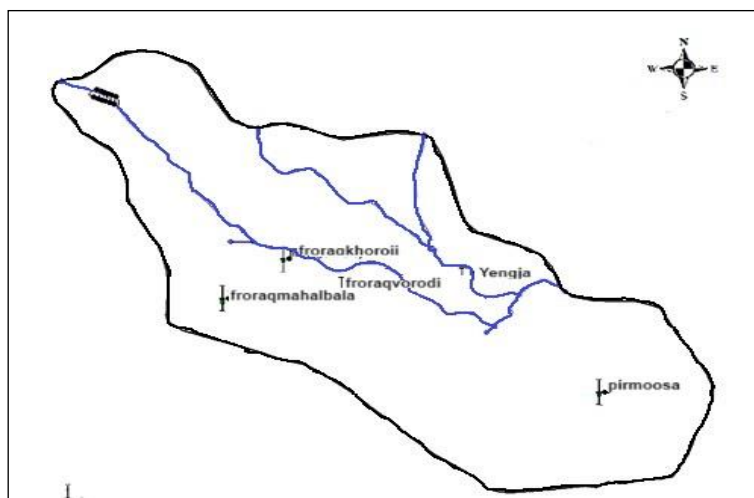
شکل ۴- وضعیت پیزومترها قبل از واسنجی.

Figure 4- The state of piezometers before calibration.



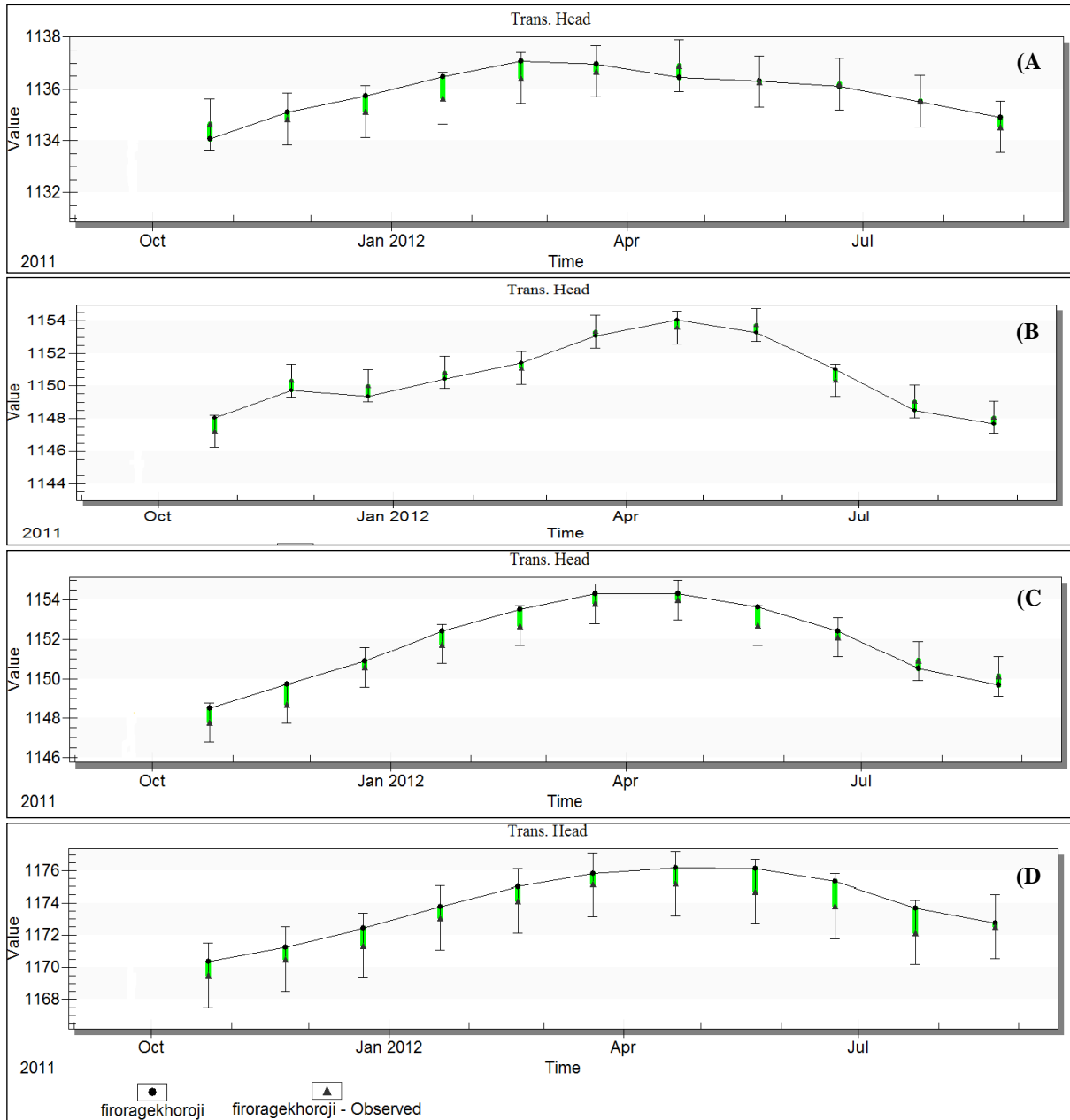
شکل ۵- نقشه هدایت هیدرولیکی محدوده فیورق بعد از واسنجی مدل.

Figure 5- Hydraulic conductivity map of Firorq area after model calibration.



شکل ۶- وضعیت پیزومترها بعد از انجام واسنجی.

Figure 6- The state of piezometers after calibration.



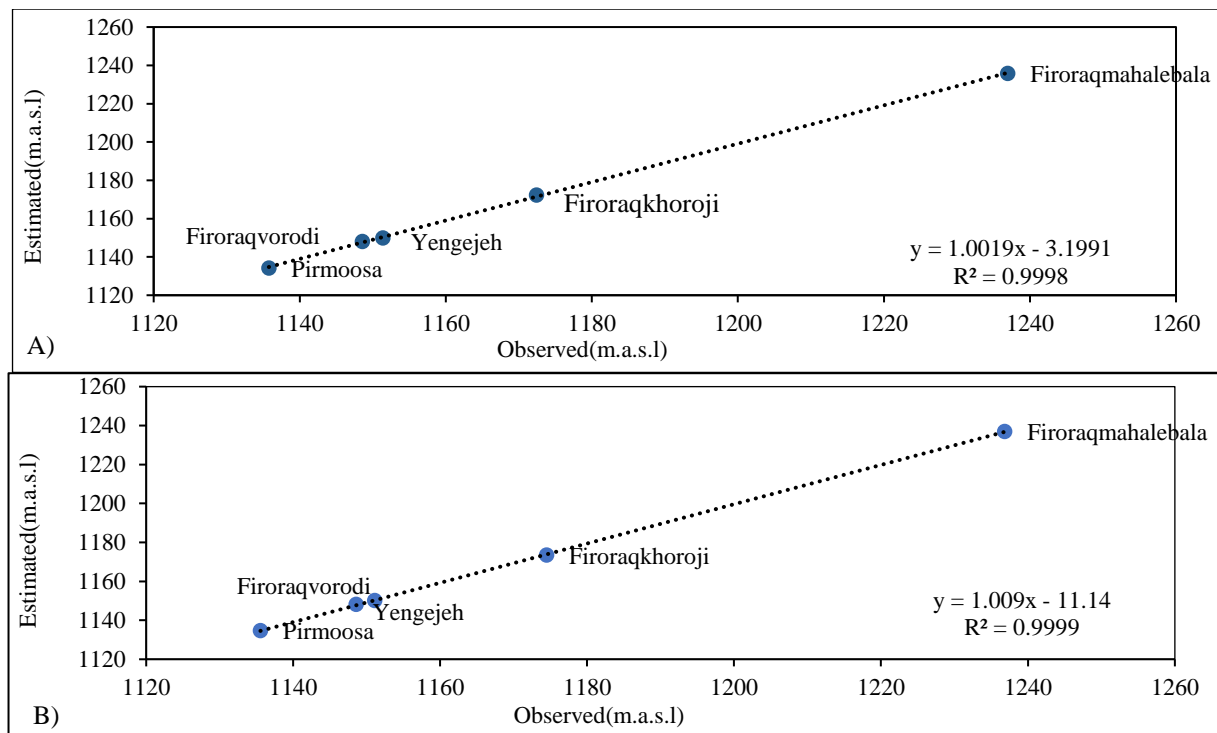
شکل ۷- مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسباتی پیزومترها: الف) پیرموسی پس از واسنجی در شرایط ناپایدار، ب) ینگجه پس از واسنجی در شرایط ناپایدار، ج) فیرورق ورودی پس از واسنجی در شرایط ناپایدار، د) فیرورق خروجی پس از واسنجی در شرایط ناپایدار، (محورهای قائم تراز پیزومتر برحسب واحد متر می‌باشند).

Figure 7- Comparison of observed and calculated piezometer hydrograph, A) Pirmoosa's output graph after calibration in transient conditions, B) Yengeja's output graph after calibration in transient conditions, C) Firoragavorodi's output graph after calibration in transient conditions, D) Firorage khoroji's output graph after calibration in transient conditions, (the vertical axes are the level of the piezometer in units of meters).

گرفت. شکل ۸ میزان همبستگی داده‌های ورودی و محاسباتی را در دو گام اول (مهرماه ۱۳۹۱) و گام آخر (شهریورماه ۱۳۹۲) نشان می‌دهد. تطابق نمودارها نشان می‌دهد؛ نتایج نسبتاً قابل قبولی از مدل‌سازی به‌دست آمده است.

نتایج صحت‌سنجی مدل

مطابق مطالب پیشین، جهت صحت‌سنجی، سطح آب زیرزمینی در منطقه به مدت ۱۲ ماه (از مهرماه ۱۳۹۱ تا انتهای شهریورماه ۱۳۹۲) پیش‌بینی شد، و مقادیر مشاهده شده صحرائی با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل مورد مقایسه قرار



شکل ۸- نمودار پراکنش نقاط داده‌های مشاهداتی و محاسباتی، الف) گام آخر، ب) گام اول.
Figure 8- Scatter chart of observation and calculation data points. A) last step, B) first step.

پیش‌بینی وضعیت آبخوان پس از اعمال سناریوهای موردنظر استفاده نمود. از آنجایی که محدوده مجاز NRMS کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد و مدل شبیه‌سازی شده با NRMS زیر یک درصد دوره صحت‌سنجی را پشت سر گذاشته، می‌توان اذعان داشت؛ که این مدل به خوبی واسنجی شده است.

نتایج سناریوسازی در مدل

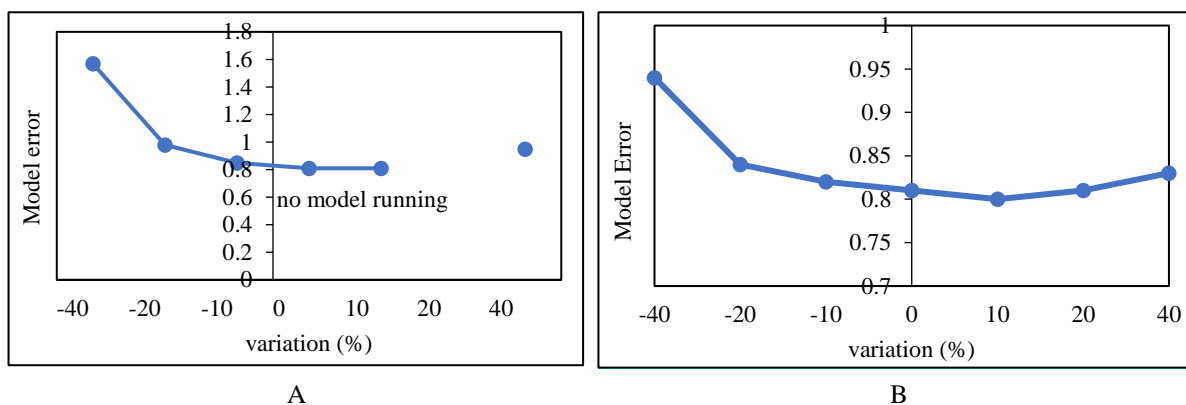
با توجه به اینکه مدل در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار واسنجی و صحت‌سنجی شد، از آن می‌توان برای مدیریت و پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان و همچنین مدیریت طرح‌های موجود استفاده کرد. در سناریوهای (اول تا سوم) تغییر میزان آبیگری تغذیه مصنوعی به منظور مشاهده تغییرات تراز آب زیرزمینی در پایین دست و در محدوده فیورورق، هر سناریو در ۱۱ گام زمانی (از آبان ماه ۱۳۹۰ تا شهریورماه ۱۳۹۱) با افزایش ۲۰ و ۵۰ درصد حجم آبیگری و همچنین شرایط عدم آبیگری در مدل اجرا شد. نتایج این سناریوسازی در شکل ۱۰ الف) ارائه شده است.

نتایج تحلیل حساسیت مدل

شکل ۹ الف و ب) حساسیت مدل به تغییرات هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه را نشان می‌دهد. طبق نتایج آنالیز حساسیت، بیشترین حساسیت مدل آبخوان فیورورق به ترتیب مربوط به هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره بود، به طوری که با کاهش ۴۰ درصد میزان هدایت هیدرولیکی خطای مدل به اندازه ۴۸/۴ درصد و با کاهش ۴۰ درصد ضریب ذخیره آبخوان خطای مدل به اندازه ۱۳/۸۳ درصد افزایش یافت.

نتایج برآورد خطای مدل

نتایج برآورد شاخص‌های آماری مقایسه تراز آب زیرزمینی مشاهداتی با محاسباتی در جدول ۱ ارائه شده است، با توجه به مقادیر مجاز، میزان NRMS حتی در گام‌های پایانی زیر یک درصد بوده و این مقادیر بیانگر دقت بالای مدل‌سازی می‌باشد. همبستگی بالای ایجاد شده در بین مقادیر تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی، بیانگر دقت کافی این مدل بوده و می‌توان از این مدل به جهت قابل اعتماد بودن محاسبات، در



شکل ۹- الف) آنالیز حساسیت مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی، ب) آنالیز حساسیت مدل نسبت به آبدهی ویژه.
Figure 9- A) Analysis of the sensitivity of the model to hydraulic conductivity B) Analysis of the sensitivity of the model to specific yield.

جدول ۱- خلاصه آماری مقایسه مقادیر محاسباتی با مشاهداتی تراز آب زیرزمینی.

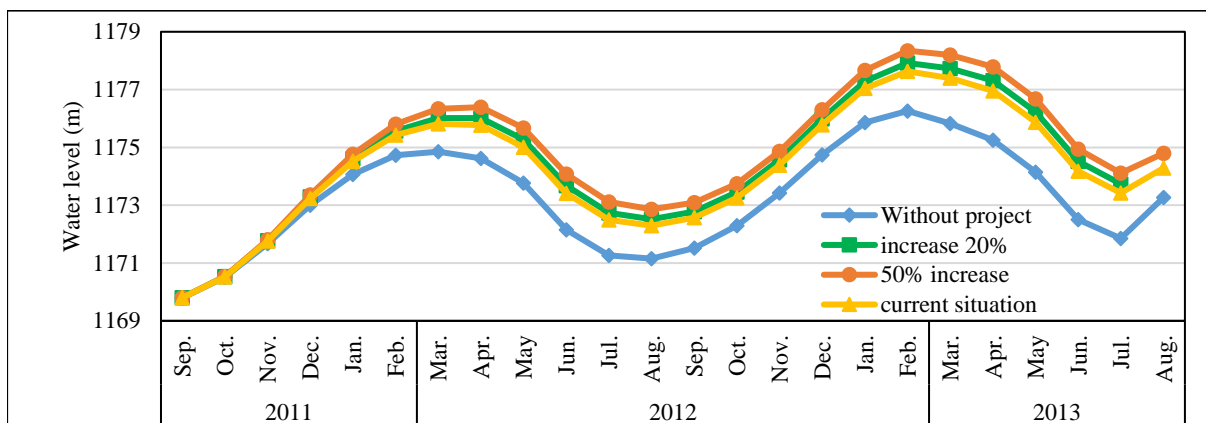
Table 1- Statistical summary of the comparison of calculated values with observations of the groundwater level.

Period	Steady State	Transient									
		Calibration					Validation				
Step	-	Total	Step2	Step4	Step7	Step9	Step12	Step1	Step5	Step8	Step12
RMSE(m)	0.27	0.59	0.30	0.29	0.19	0.36	0.18	0.37	0.46	0.35	0.36
R ²	0.9999	-	0.9998	0.9998	0.9999	0.9997	0.9997	0.9998	0.998	0.9998	1
MR	-0.07	-	-0.35	-0.27	-0.22	-0.34	-0.05	0.61	-0.63	-0.54	0.67
MAE(m)	0.54	0.56	0.61	0.54	0.37	0.61	0.39	0.65	0.82	0.75	0.39
NRMS	0.6	-	0.88	0.88	0.89	0.89	0.88	0.83	0.83	0.84	0.83

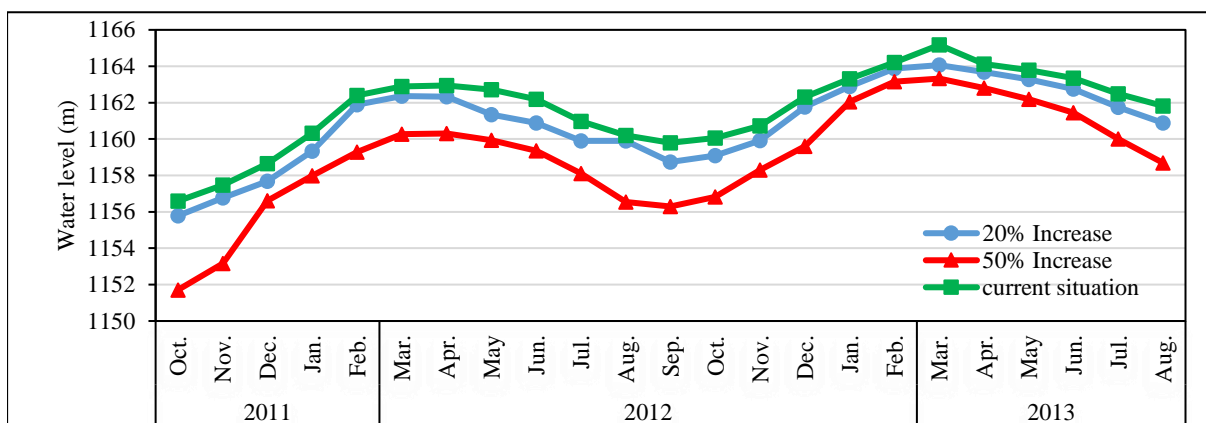
نمودار تغییرات تراز آب زیرزمینی محدوده فیوروق در شکل ۱۰ (الف) نشان می‌دهد؛ با افزایش میزان فعلی آبیگری طرح تغذیه مصنوعی خوی، تراز آب زیرزمینی محدوده فیوروق افزایش می‌یابد؛ اما با عدم آبیگری این طرح، تراز آب زیرزمینی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. با افزایش آبیگری به میزان ۵۰ درصد، متوسط سطح آب زیرزمینی حدود ۱/۰۳ متر نسبت به وضعیت فعلی افزایش نشان داده، همچنین با افزایش آبیگری به میزان ۲۰ درصد، متوسط سطح آب زیرزمینی حدود ۰/۵ متر نسبت به وضعیت فعلی آبخوان افزایش می‌یابد. میزان متوسط سطح آب زیرزمینی در شرایط فعلی ۱۱۶۱/۶۷ متر می‌باشد که این میزان در شرایط عدم آبیگری طرح به ۱۱۶۰ متر افت پیدا می‌کند. این بدین معنی است که؛ عدم وجود تغذیه مصنوعی باعث کاهش ۱/۶۷ متری تراز آب زیرزمینی می‌شود.

سطح آب زیرزمینی، به میزان ۲۰ و ۵۰ درصد افزایش برداشت اعمال شد که نتایج آن در شکل ۱۰ (ب) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ (ب) مشاهده می‌شود، تراز آب زیرزمینی محدوده فیوروق، پس از اعمال سناریوی افزایش برداشت از چاه‌های کشاورزی، با توجه به میزان افزایش در نرخ برداشت، تغییرات قابل‌توجهی از خود نشان داده است. به‌طوری‌که افزایش ۵۰ درصدی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، باعث کاهش ۳/۱۳ متری و افزایش ۲۰ درصدی برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، سبب کاهش ۰/۹ متری تراز آب زیرزمینی می‌شود. همچنین با توجه به کاهش میزان بارندگی در طی سال‌های اخیر و افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی، لازم است میزان برداشت از این منابع کنترل شود. کنترل برداشت می‌تواند، با راهکارهایی همچون نصب کنتورهای هوشمند بر روی چاه‌های بهره‌برداری توسط ارگان‌های مربوطه انجام شود. در این تحقیق مدل‌سازی آبخوان برای هر دو شرایط پایدار و ناپایدار اجرا شد.

همچنین در سناریوهای (چهارم و پنجم) تغییرات میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری به‌منظور مشاهده تغییرات تراز



A



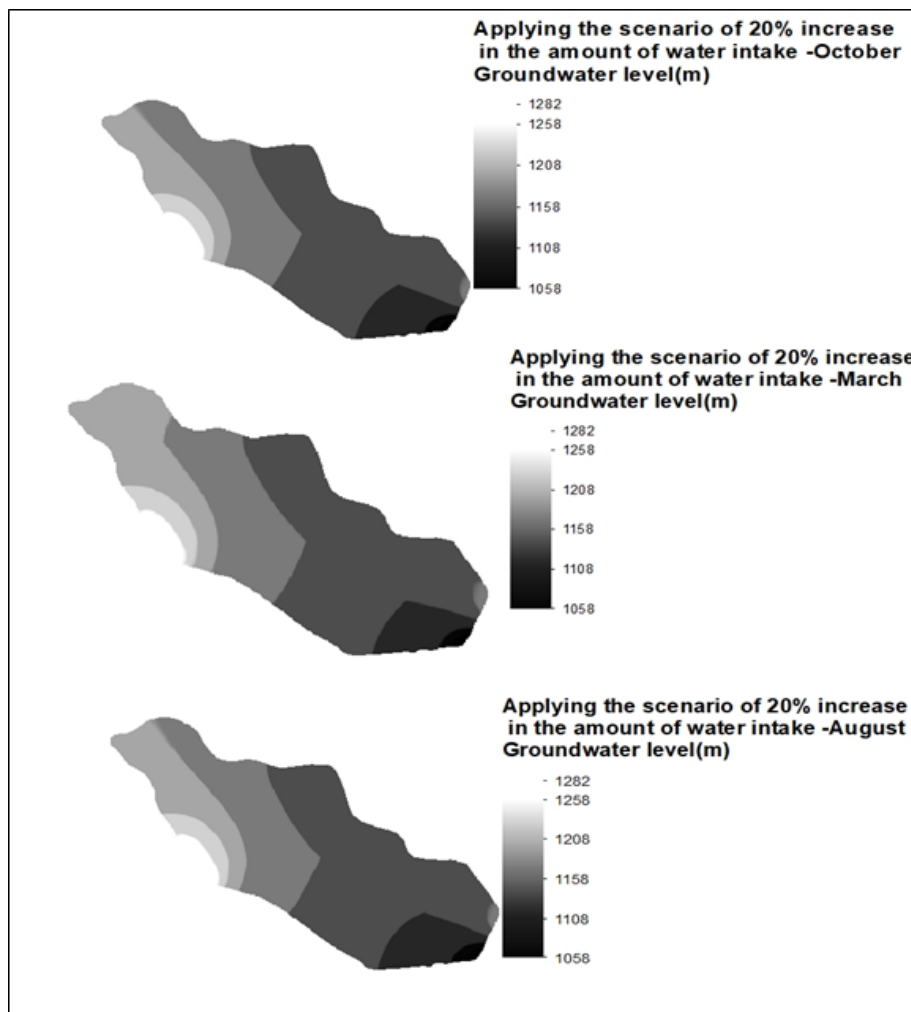
B

شکل ۱۰- تغییرات وضعیت تراز آب زیرزمینی محدوده فیوروق: الف) پس از اعمال سناریوی تغییرات میزان آبیگری طرح تغذیه مصنوعی، ب) پس از اعمال سناریو افزایش برداشت.

Figure 10- Changes in the status of the groundwater level in Firourgh area A) After applying the scenario of changes in the amount of water intake of the artificial recharge project, B) After applying the scenario of increase withdrawal.

همچنین نتایج اعمال سناریوها به صورت نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی در شکل ۱۱ (ج) برای ماه‌های فروردین و شهریور و آبان استخراج شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش تغذیه آبخوان و کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی، سطح آب در آبخوان بالا می‌آید. این امر اثرات مثبتی بر روی آبخوان داشته و می‌تواند، سبب جبران افت سطح ایستایی در آبخوان که به دلیل وقوع خشکسالی‌ها و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در منطقه روی داده است، شود. در اینجا نیز کاهش عمق آب زیرزمینی با افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌بردار کشاورزی ملاحظه شد. این امر ضرورت توجه بر بهره‌بردارهای بی‌رویه و کنترل آن، همچنین اجرای طرح‌های احیاء آبخوان‌ها همچون تغذیه مصنوعی را روشن می‌سازد.

در طول سال شرایط مختلف بارندگی و تغذیه در آبخوان اتفاق می‌افتد که تأثیرگذار در آن است و باعث کاهش و افزایش تراز آب زیرزمینی می‌شود. در زمان‌هایی که آبیگری تغذیه مصنوعی اتفاق می‌افتد، تراز آب زیرزمینی بالا می‌رود. مدل‌سازی در حالت ناپایدار نسبت به حالت پایدار به اطلاعات بیشتری نیاز دارد و نهایتاً می‌توان چنین نتیجه گرفت که؛ مدل‌سازی با وجود اطلاعات کم از منطقه مورد مطالعه در شبیه‌سازی آبخوان موفقیت‌آمیز بود و تأثیر تغییرات تنش‌ها به خوبی نمایش داده شد؛ که با نتایج نویسندگان مختلفی از جمله (Yilmaz (2003)، (Al-Palma and Bently (2007)، (Hassoun and Mohammad (2011)، (1393) و قوردویی میلان و کرمی (1392) سازگار بود.



شکل ۱۱- نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی پس از اعمال سناریوها در ماه‌های مختلف.

Figure 11- The Water level iso-potential map of groundwater after applying the scenarios in different months.

صحت‌سنجی بیانگر انطباق قابل‌قبول داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در دوره صحت‌سنجی است؛ که نشان‌دهنده قابلیت خوب مدل در اجرای سناریوهای مدیریتی و اجرایی می‌باشد. بعد از مرحله صحت‌سنجی، آنالیز حساسیت در مدل انجام شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد؛ بیشترین حساسیت مدل به- ترتیب مربوط به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان می‌باشد. درنهایت برای نشان دادن تأثیر تغییرات در مدل، پنج سناریوی آبیگری تغذیه مصنوعی و افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری اعمال گردید. نتایج اعمال سناریوها نشان داد؛ عدم وجود تغذیه مصنوعی باعث کاهش ۱/۶۷ متری تراز آب زیرزمینی، همچنین افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری باعث کاهش تراز آب زیرزمینی می‌شود؛ بنابراین مطالعه حاضر اجرای طرح تغذیه مصنوعی منطقه فیرورق خوی را به‌طور نسبی مثبت و اثربخش ارزیابی

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر برای ارزیابی بزرگ‌ترین پروژه تغذیه مصنوعی شمال غرب در منطقه فیرورق در شمال غربی دشت خوی در آذربایجان غربی برای اولین بار با استفاده از مدل ریاضی آب زیرزمینی انجام شد. هدف این مطالعه، بررسی اثربخشی اجرای طرح تغذیه مصنوعی در منطقه مورد مطالعه بود. برای انجام این پژوهش از نرم‌افزارهای GIS و GMS استفاده شد. مقدار ضریب تبیین و ضریب NRMS برای دوره صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۹۹ و ۰/۸۳ درصد به‌دست آمد. برای اجرای مدل در حالت پایدار، تمامی اطلاعات در یک دوره زمانی ثابت ۳۰ روز (شروع سال آبی، مهرماه ۹۱-۱۳۹۰) وارد مدل شد. بعد از واسنجی، مدل در حالت ناپایدار برای بازه زمانی آبان ماه ۱۳۹۰ تا شهریور ۱۳۹۱ اجرا و سپس برای بازه زمانی مهرماه ۱۳۹۱ تا شهریور ۱۳۹۲ صحت‌سنجی شد. نتایج

شهرسواری، ع، و خدایی، ک، ۱۳۸۴. تهیه مدل جریان آب زیرزمینی آبخوان دشت بهبهان با استفاده از GIS. نهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم تهران.

صمدی، ج، ۱۳۹۵. مدل‌سازی مکان‌یابی تغذیه مصنوعی آبخوان کاشان با استفاده از روش‌ها آماری، AHP و ملاحظات محیط زیستی آب‌های زیرزمینی، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۲(۱):۸۴-۹۴.

قدرتی، م، برزگری، ف، ۱۳۹۵. مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی (آموزش کاربردی 7.1 GMS)، سیمایی دانش، ایران. ص ۲۷۰.

قوردویی میلان، س، جوادی، س، آریا‌آذر، ن، رازدار، ب، ۱۳۹۸. شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان و مقایسه آن با شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چند متغیره. هیدروژئولوژی، ۵(۱):۱۳۴-۱۱۸.

قوردویی میلان، م، کرمی، غ، ۱۳۹۲. ارزیابی اثرات کمی طرح تغذیه مصنوعی خوی. هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، ۱۷ و ۱۸ شهریور ۱۳۹۲، دانشگاه فردوسی مشهد.

قمرنیا، ه، عنایتی‌حسینی، س، امینی، ع، ۱۴۰۱. شبیه‌سازی عددی آبخوان دشت بیجار دیواندره با استفاده از کد MODFLOW و بررسی تأثیرات خشک‌سالی بر تغییرات کمی آن. محیط‌زیست و مهندسی آب، ۸(۱):۷۳-۵۹.

نخعی، م، محبی تفرشی، ا، محبی تفرشی، غ، ۱۳۹۸. مدل‌سازی و پیش‌نگری تغییرات غلظت TDS در آبخوان ورامین با استفاده از نرم‌افزار GMS، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۳۱(۳):۳۷-۲۵.

یاری، ر، ا، درزی نفت‌چالی، ع، ۱۳۹۶. پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف مدیریتی با استفاده از مدل MODFLOW. مهندسی آبیاری و آب ایران، ۸(۲):۱۰۳-۱۱۵.

Abareshi, F., Meftah Halghi, M., Dehghani, A.A., Kaboli A.R., Rahimian, M., 2015. Management of

کرده و پیشنهاد می‌کند: اولاً این پروژه با تمام ظرفیت پیش‌بینی‌شده در طرح (۲۰ میلیون مترمکعب در سال) بهره‌برداری گردیده و ثانیاً در مناطق بحران‌زده کشور همانند حوضه آبریز دریاچه ارومیه که با افت تراز آب زیرزمینی مواجه هستند، اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی جهت حفظ آبخوان-های منطقه و کشور، مبنای تصمیمات مهم مدیریتی تصمیم‌گیرندگان و سیاست‌گذاران قرار بگیرد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه بوده و بدین‌وسیله از حامیان طرح خصوصاً شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی در به اشتراک‌گذاری داده‌های طرح قدردانی می‌گردد.

منابع

برزنونی، س، اکبرپور، ا، دهقانی، ا، اعتباری، ب، ۱۳۹۰. بهینه‌سازی و واسنجی پارامترهای هیدرودینامیکی مدل آب‌های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بیرجند.

جعفرزاده، ا، خاشعی سیوکی، ع، پوررضا بیلندی، م، ۱۳۹۹. ارزیابی عملکرد روش‌های عددی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند)، هیدروژئولوژی، ۷(۲):۷۵-۶۱.

چیت‌سازان، م، ساعت‌ساز، م، ۱۳۹۳. کاربرد مدل ریاضی در پیش‌بینی وضعیت آبخوان دشت ابهر در شرایط اقلیمی مختلف، دومین همایش منطقه‌ای تغییر اقلیم و گرمایش زمین، ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۳، زنجان.

زنگانه، م، معراجی، س، ح، ۱۳۹۶. مدل‌سازی عددی آبکشی محل اجرای حوضچه پمپاژ در روش آبیگری باز از دریاها با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۲):۴۲۸-۴۱۷.

شهابی‌فرد، ف، لشکری پور، غ، زارع، م، زارع، م، ۱۳۸۳. اثرات برداشت آب از آبخوان ایرانشهر بر روی دبی پایه رودخانه بمپور با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ایران.

- Mandal, N.C. Singh, V.S., 2004. A new approach to delineate the groundwater recharge zone in hard rock terrain. *Current Science*, 87(5): 658-662.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. US Geological Survey.
- Palma, H., Bentley, L.R., 2007. A regional-scale groundwater flow model for the Leon-Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal*, 15, 1457-1472.
- Parhizkar, S., Ajdary, Kh., Kazemi, Gh.A., Emamgholizadeh, S., 2015. Predicting water level drawdown and assessment of land subsidence in Damghan aquifer by combining GMS and GEP models, *Geopiersia*, 5 (1):63-80.
- Pourseyadi, A., Kashkuli, H.A., 2012. Studying of groundwater conditions in Jiroft basin with modflow. *Scientific journal of agriculture, Irrigation Sciences and Engineering*, 35(2): 51-63.
- Rezaei, M., Jom'e Nia, J., Khodaie, K., 2011. Proper locating for artificial nutrition implementation at Hesarouyeh Plain Aquifer Using Mathematical Model and GIS. *Advanced applied geology*, 1(1): 67-79.
- Taheri Tizro, A., Kamali, M., 2017. Groundwater modeling by MODFLOW model in Toyserkan aquifer and evaluation of hydrogeological state under present and future conditions. *Water Resources Engineering*, 31(9): 45-60.
- Genetti Jr, A.J., CORPS OF ENGINEERS WASHINGTON DC., 1999. Groundwater Hydrology. No. USACE-EM-1110-2-1421), Corps of Engineers Washington DC.
- Yilmaz, M., 2003. Control of ground water by underground dams, M. Sc thesis, Dept of Civil Engineering, Middle east technical university, Ankara-Turkey, 80 p.
- Zhao, X., Wang, D., Xu, H., Ding, Z., Shi, Y., Lu, Z., & Cheng, Z., 2021. Simulation and prediction of groundwater pollution based on GMS: a case study in Beijing, China. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 826 (1):012014.
- aquifer of Zarringol plain in Golestan province by using ground water model. *Water and Soil Conservation*, 21(6): 281-291.
- Al-Hassoun, S. A., Mohammad, T.A., 2011. Prediction of water table in an alluvial aquifer using Modflow. *Pertanika Journal of Sciences and Technology*, 19(1), 45-55.
- Asadi, N., Kaki, M., Jamoor, R., 2016. Groundwater level decline and compensating withdrawal plan in Aleshtar plain, Lorestan province, Iran. *Natural environmental hazards*, 5(9), 107-126.
- Bekhit, H.M., 2015. Sustainable groundwater management in coastal aquifer of Sinai using evolutionary algorithms. *Procedia Environmental Sciences*, 25: 19-27.
- Bhattacharjya, R.K., Barma, S.D., 2009. Modeling the effect of stream flow on groundwater flow fields using GMS. *The Association of Hydrologists of India (AHI)*, 22:1-8.
- Bize, J., Bourguet, L., Lemoine, J., 1972. Artificial recharge of groundwater. *PARIS MASSON ET CIE*. 199p.
- Bohidar, A.K., Ahmad, I., 2021. Development of conceptual model and groundwater flow modeling using GMS software: A case study for Dharsiwa Block, Chhattisgarh, India. In *Groundwater Resources Development and Planning in the Semi-Arid Region*, 151-164. Cham: Springer International Publishing.
- Gallardo, A. H., Reyes-Borja, W., Tase, N., 2005. Flow and patterns of nitrate pollution in groundwater: a case study of an agricultural area in Tsukuba City. *Japan. Environmental geology*, 48(7): 908-919.
- Hill, M.C., Tiedeman, C.R., 2007. *Effective Groundwater Model Calibration: With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty*, John Wiley & Sons, 480.
- Janobi, R., Rezaverdinajad, V., Bahmanesh, J., Abbaspour, K., 2018. Investigation of quantitative changes of groundwater in Miandoab plain affected by management of surface and underground water resources utilization using the MODFLOW-NWT mathematical model. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 49(2): 467-481.
- Karimi, H., Naderi, F., Nikseresht, L., 2014. Management of groundwater resources in Mehran plain in Ilam by determining its volume and rate of exploitation. *Two quarterly Journal of Urban Ecology Research*, 4(7): 97-106.