

مقاله علمی-پژوهشی

آنالیز حساسیت و بررسی تغییر نوع سیستم آبیاری بر آبخوان دشت قزوین با استفاده از نرم افزار GMS

مهنوش جناب^۱، هادی رضوانی اعتدالی^{۲*}، پیمان دانش کار آراسته^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵

چکیده

کاهش میزان بارندگی، افزایش خشکسالی و توسعه کشاورزی در سال‌های اخیر منجر به افزایش مصرف آب زیرزمینی و افت روزافزون سطح ایستابی شده است. در این مطالعه با استفاده از نسخه ۱۰ نرم افزار GMS، وضعیت آبخوان دشت قزوین در دو حالت پایدار برای مهر ۱۳۹۷ و ناپایدار از مهر ۱۳۹۷ تا شهریور ۱۳۹۸ مدل‌سازی گردید. آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه انجام شده و پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل این پارامترها تعیین گردید. آنالیز حساسیت مدل نسبت به این دو پارامتر نشان می‌دهد که مدل حساسیت بیش‌تری نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی در مقایسه با تغییرات آبدهی ویژه دارد. ریشه میانگین مربعات خطا در حالت پایدار و ناپایدار به ترتیب ۰/۸۴ و ۱/۰۶ متر، میانگین خطای مطلق به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۷۵ متر و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به ترتیب ۰/۰۰۰۷ و ۰/۰۰۰۹ به دست آمد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی مدل دارد. مقدار متوسط هدایت هیدرولیکی در محدوده آبخوان ۱۴/۰۶ متر بر روز و آبدهی ویژه ۰/۰۶۴ تخمین زده شد. سپس سطح آب زیرزمینی در ۶ سناریوی تغییر سیستم‌های آبیاری (حفظ وضعیت موجود، افزایش سطح آبیاری تحت فشار، تغییر سیستم‌ها به سطحی، تغییر سیستم‌ها به بارانی، تغییر سیستم‌ها به قطره‌ای و آبیاری با راندمان ۱۰۰ درصد) شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد با فرض ثابت بودن برداشت آب زیرزمینی و عدم وجود پدیده فرونشست، در سناریوی آبیاری سطحی، سطح آب زیرزمینی در بالاترین حالت خود با آب برگشتی ۳۰ درصد و در شرایط آبیاری قطره‌ای در پایین‌ترین حالت خود با میزان آب برگشتی ۳/۶ درصد قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: آب برگشتی، آبدهی ویژه، مدل‌سازی، هدایت هیدرولیکی

مقدمه

پارامترهای مربوط به آن، نیاز به مدل‌های پیچیده‌ای می‌باشد. بنابراین یکی از مهم‌ترین رویکردها در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب به دست آوردن مدل مناسبی برای پیش‌بینی رفتار منابع آب، تحت تأثیر متغیرهای مؤثر بر آن می‌باشد (ضیایی و انصاری، ۱۳۹۹).

جریان آب زیرزمینی در مطالعات مربوط به سیستم‌های آب زیرزمینی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های آب زیرزمینی برای محاسبه مقدار و جهت حرکت آب زیرزمینی از طریق آبخوان و محدود کردن واحدها در زیر سطح استفاده می‌شود. در این محاسبات به شبیه‌سازی اشاره می‌شود. شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی به درک کامل از خصوصیات آبی و زمین‌شناسی منطقه نیاز دارد. شبیه‌سازی عددی ناحیه غیراشباع بیشتر در مناطق خشک و نیمه‌خشک در جایی که عموماً ناحیه غیراشباع ضخامت بیشتری دارد اهمیت بیشتری دارد. این روش‌ها معمولاً با حل عددی معادله ریچاردز، برآوردی از میزان تغذیه را در اختیار می‌دهد که صحت نتایج آن وابستگی زیادی به دقت پارامترهای برآورد شده برای منحنی نگهداشت و نیز هدایت هیدرولیکی غیراشباع دارد. برآورد این پارامترها

لزوم شناخت و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی از آنجا ناشی می‌گردد که این منابع قسمت اعظم آب‌های شیرین قابل استفاده را تشکیل می‌دهند. کاهش میزان بارندگی، افزایش خشکسالی و توسعه کشاورزی در سال‌های اخیر منجر به افزایش مصرف آب زیرزمینی و افت روزافزون سطح ایستابی شده است. با پیش‌بینی دقیق نوسانات سطح آب زیرزمینی و شناخت رفتار آب زیرزمینی می‌توان از آن در برنامه‌ریزی تأمین آب قابل اعتماد و نیز مدیریت جامع و پایدار منابع آب استفاده کرد. برای پیش‌بینی وضعیت منابع آب (سطح آب زیرزمینی) به علت پیچیده بودن ماهیت آن و عدم قطعیت در

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب گرایش آبیاری و زهکشی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(*) ایمیل نویسنده مسئول: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

DOR: 20.1001.1.20087942.1401.16.6.9.6

در حوضه رودخانه ماهش هند انجام شده است. واسنجی مدل در سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ حاکی از آن بوده که آبخوان در تعادل است (Khadri and Pande, 2016). اماک و همکاران یک مدل سه بعدی برای آبخوان فوقانی و میانی در منطقه هیل کانتی در جنوب تگزاس با هدف شناسایی سیستم هیدروژئولوژی و کمک به تخمین میزان آب و نوسانات سطح آب نسبت به پمپاژ و پتانسیل خشکسالی در آینده با استفاده از مدل MODFLOW 96 تهیه نمودند. در این تحقیق واسنجی در حالت ماندگار برای شرایط ۱۹۹۵ و در حالت غیرماندگار برای شرایط سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷ انجام شده است. با استفاده از این مدل مقادیر هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره برای آبخوان واسنجی شده است. سطح آب در مدل بیشترین حساسیت را به تغذیه، هدایت هیدرولیکی افقی لایه میانی و لایه فوقانی نشان داده است (Emace et al., 2000). پناهی و همکاران (۱۳۹۷) نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت زنجان را با استفاده از GIS شبیه‌سازی نمودند. آنها نتایج واسنجی نرم افزار را در حالت پایدار که در سپتامبر ۲۰۰۲ بوده و در حالت ناپایدار برای فواصل سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ معقول گزارش نمودند. طبق محاسبات تراز آب توسط نرم افزار مذکور، جریان آب زیرزمینی با شیب غالب منطقه مطابقت داشته است. قمری قلعه و همکاران (۱۳۹۷) پس از واسنجی مدل GIS رفتار آبخوان دشت مهران را در استان ایلام با استفاده از این مدل پیش بینی نمودند. ابارشی و همکاران (۱۳۹۲) به منظور تعیین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان دشت زرینگل، از نرم افزار ۷.۱ GIS استفاده کردند. آنها واسنجی مدل در حالت ماندگار را برای یک ماه و حالت غیر ماندگار را به مدت ۵ سال با تنش‌های فصلی انجام دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت زرینگل از ۱۲/۸ تا ۱۷۸/۱ متر در روز و آبدهی ویژه آبخوان از ۰/۰۷ تا ۰/۰۹ متغیر است. نخعی و همکاران (۱۳۹۳) جهت بهره‌برداری مدیریت بهینه از آبخوان دشت ساحلی ارومیه و تعیین نرخ بهینه پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری، مدل آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی مورد نظر را با استفاده از نرم افزار ۲.۴ MODFLOW Visual تهیه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار هدایت هیدرولیکی برای آبخوان مورد مطالعه بین ۱ تا ۱۰ متر در روز و مقدار آبدهی ویژه ۱ تا ۱۰ درصد می‌باشد. عابدی کوهپایی و گلابچیان (۱۳۹۴) به منظور برآورد ضرایب هیدرودینامیک منابع آب زیرزمینی زیرحوضه کوهپایه-سگری از مدل MODFLOW استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که هدایت هیدرولیکی آبخوان از ۱۵/۲۶ تا ۱۹/۸۷ متر در روز و آبدهی ویژه آبخوان از ۰/۰۱۰۷ تا ۰/۱۸۶ متغیر است.

کتاجی و همکاران (۱۳۹۷) برای بررسی اثرات مدیریت آب سبز در احیای آبخوان نمدان در استان فارس، این آبخوان را با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی کردند. براساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، هدایت هیدرولیکی آبخوان نمدان از ۱ تا ۲۵ متر در

با روش‌های معمول (اندازه‌گیری آزمایشگاهی و یا حل معکوس) در مقیاس‌های بزرگ به دلیل تغییرپذیری زیاد بافت خاک گاه بسیار دشوار و گاه (به دلیل افزایش هزینه‌ها) غیرممکن است. همچنین در برخی موارد، حرکت آب به طور جانبی نیز انجام می‌شود و به سطح ایستایی نمی‌رسد، در حالی که در مقیاس‌های بزرگ غالباً از معادله یک بعدی استفاده شده و حرکت جانبی در نظر گرفته نمی‌شود. دقت پیش بینی‌های مدل به کالیبراسیون موفق و تصدیق مدل در تعیین جهت جریان آب زیرزمینی بستگی دارد. استفاده از مدل‌های آب زیرزمینی بسیار سودمند است (ضیایی و انصاری، ۱۳۹۹). GIS یکی از مدل‌های کاربردی شبیه‌سازی جریان در آبخوان‌هاست که بر پایه‌ی کد MODFLOW به منزله‌ی یک مدل تفاضل محدود سه‌بعدی برای تشریح و پیش‌بینی رفتار جریان در منابع آب زیرزمینی به کار می‌رود. مدل MODFLOW شبیه‌ساز سه بعدی جریان آب زیرزمینی از طریق روش عددی تفاضلات محدود بوده و قادر است که جریان آب زیرزمینی را تحت شرایط پیچیده هیدرولیکی و با فرایندهای گوناگون هیدرولوژیکی شبیه‌سازی نماید (Li and Zhou, 2011). این مدل سه بعدی که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) تهیه شده و اولین نسخه‌ی آن در سال ۱۹۸۴ میلادی ارائه شده است از روش تفاضل‌های محدود برای حل معادلات حاکم استفاده می‌کند (Harbaugh and McDonald, 1988). در شرایط فعلی، مدل MODFLOW و مجموعه برنامه‌های مرتبط با آن، در راستای شبیه‌سازی جریان و انتقال املاح در آبخوان آزاد و تحت فشار، برآورد پارامترهای هیدرودینامیک محیط‌های متخلخل اشباع و مدیریت آبخوان‌ها قابل کاربرد است. یکی از مزایای تهیه مدل آب زیرزمینی، تعیین پارامترهای کمتر شناخته شده آبخوان از روی سایر اطلاعات موجود است. از جمله، پارامترهایی مثل هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه که اطلاعات آنها اغلب به صورت بسیار محدود و یا ناقص در دسترس است.

گوربین و لوبزینسکی با استفاده از کد عددی MODFLOW منطقه سوئدنیکا واقع در کشور لهستان را که چندین آبخوان دارد، بررسی و در دو حالت واسنجی نمودند. آنها در حالت اول مدل را به صورت پایدار و بدون در نظر گرفتن مقدار برداشت از چاه‌ها و در حالت دوم به صورت پایدار و با در نظر گرفتن مقدار برداشت آب از چاه‌ها واسنجی نمودند. به دلیل پیچیدگی مدل از روش سعی و خطا برای واسنجی استفاده شده است. مقایسه میان دو مدل نشان داده که برداشت از چاه‌ها از ۵۳۰۰۰ به ۱۸۰۰۰۰ متر مکعب در روز افزایش یافته و نفوذ آب از رودخانه به آب‌های زیرزمینی افزایش یافته و مقدار زهکشی رودخانه نیز کاهش یافته است (Gurwin and Lubczynski, 2005).

مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی برای اندازه‌گیری و کالیبراسیون حالت پایدار با استفاده از مدل MODFLOW توسط خدروی و پاندی

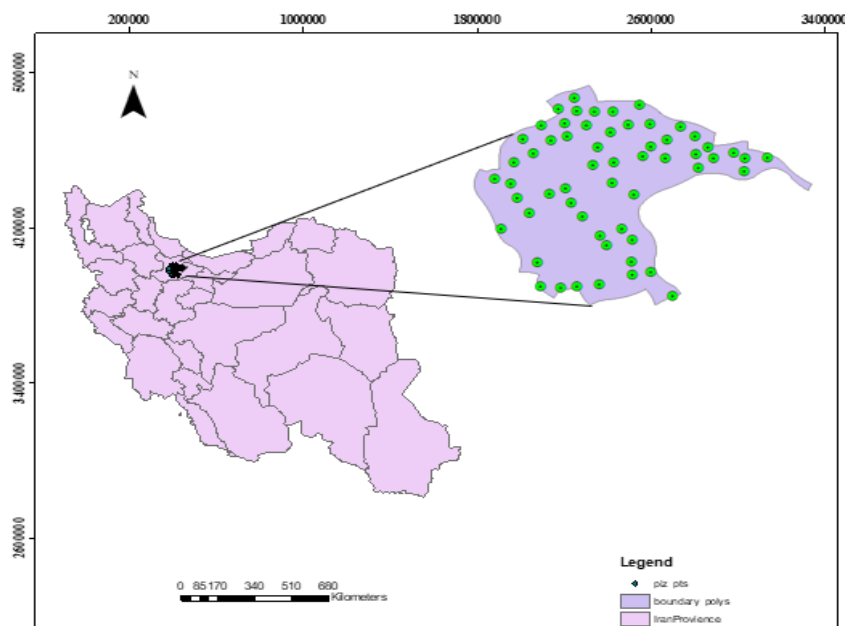
قزوین با استفاده از نسخه ۱۰ نرم افزار GMS و آنالیز حساسیت و واسنجی مقادیر هدایت هیدرولیکی افقی و آبدهی ویژه این دشت و همچنین بررسی تأثیر تغییر سیستم‌های آبیاری بر سطح آب زیرزمینی و آبخوان دشت قزوین می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه آبخوان قزوین واقع در محدوده مطالعاتی قزوین می‌باشد. اطلاعات در سال ۱۴۰۰ جمع‌آوری شده است. محدوده مطالعاتی قزوین در نیمه شمالی و تقریباً غربی حوضه آبریز دریاچه نمک قرار دارد. موقعیت آبخوان در شکل ۱ نشان داده شده است. مساحت ارتفاعات و دشت در این محدوده به ترتیب ۴۴۹۲/۳۷ و ۵۰۵۹/۳ کیلومتر مربع و حداکثر و حداقل ارتفاع محدوده نیز به ترتیب ۲۹۰۲ و ۱۱۳۱ متر می‌باشد. بر اساس گزارش بیلان آب محدوده مطالعاتی قزوین که توسط مهندسین مشاور آبخوان در سال ۱۳۹۲ ارائه گردیده است، در این محدوده یک آبخوان آبرفتی با وسعت ۳۹۵۲/۴ کیلومتر مربع که ۷۸ درصد از کل وسعت دشت را شامل می‌شود تشکیل گردیده است و وسعت ارتفاعات این محدوده مطالعاتی ۱۴۵۴/۳۷ کیلومتر مربع می‌باشد.

روز و آبدهی ویژه آبخوان از ۰/۰۰۸ تا ۰/۲۱ متغیر است. براتی و همکاران (۱۳۹۸) ضرایب هیدرودینامیک آبخوان کرمانشاه را از طریق مدل‌سازی با نرم‌افزار GMS ۷.۱ تعیین نمودند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد مقدار هدایت هیدرولیکی در آبخوان مذکور، از ۰/۱ تا ۳۰ متر در روز و مقدار آبدهی ویژه از ۰/۰۲ تا ۰/۴ متغیر است.

یوسفی و همکاران (۱۴۰۱) راهکارهای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی را در راستای سازگاری با تغییر اقلیم تحت سناریوهای مختلف در منطقه هشتگرد واقع در غرب استان البرز با استفاده از نسخه ۱۰ نرم‌افزار GMS مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی وضعیت کمی آبخوان، ادامه روند افت آب زیرزمینی را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. زنگنه و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه اثر بخشی راهکارهای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی برای کنترل فرونشست با استفاده از نسخه ۱۰ نرم‌افزار GMS در دشت ورامین، میزان آبدهی ویژه را در رنج ۰/۱ تا ۰/۱۹ و مقدار هدایت هیدرولیکی را در رنج ۲ تا ۱۴۲ متر در روز برآورد نمودند. با توجه به ضرورت مدیریت منابع آب در شرایط کنونی و شناخت هر چه بهتر وضعیت آبخوان دشت قزوین که عمده مصرف آب آن از منابع زیرزمینی می‌باشد، مدل‌سازی این آبخوان و شناسایی پارامترهای هیدرودینامیک محیط متخلخل ضرورت می‌یابد. لذا هدف از این پژوهش، مدل‌سازی آبخوان دشت



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و چاه‌های پیژومتر

مهندسین مشاور آبخوان (سال ۱۳۹۲) انجام شده، در محدوده مورد مطالعه عمده آب مصرفی در مزارع از طریق آبیاری کرتی انجام می‌گیرد و در نتیجه میزان تغذیه از آب کشاورزی برابر ۴۷۷/۴ میلیون متر مکعب در سال بدست آمده است که ۲۶ درصد آب مصرفی آبیاری

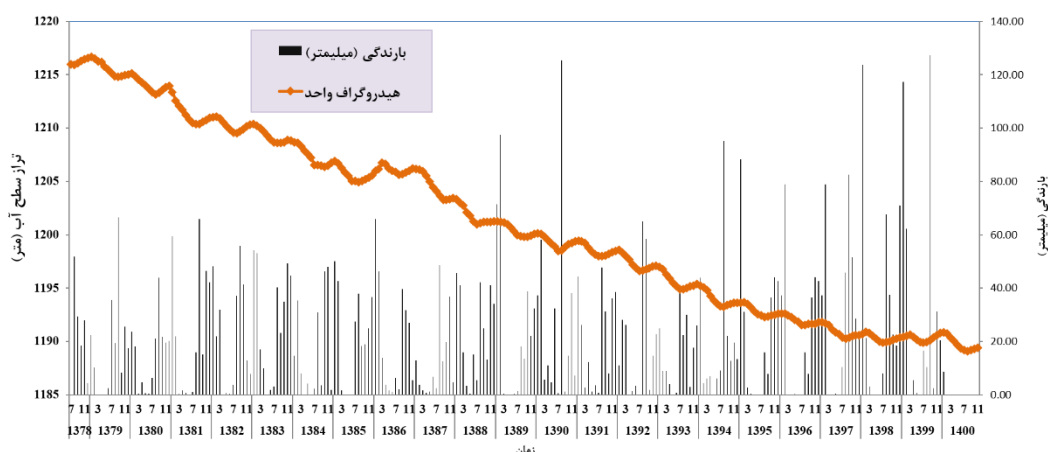
منابع بهره‌برداری کننده از آب‌های زیرزمینی و میزان مصارف مختلف از منابع آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۷ در جدول ۱ ارائه شده است. عمده بهره‌برداری در دشت قزوین با استفاده از چاه صورت می‌گیرد. بر اساس مطالعات بیلان محدوده مطالعاتی قزوین که توسط

این دشت شده است. از طرفی اقداماتی که در راستای طرح تعادل بخشی و تغذیه مصنوعی در این دشت انجام شده تا حدودی از شدت افت سفره‌های آب زیرزمینی کاسته است. شکل ۲ نمودار هیدروگراف واحد دشت قزوین طی سال‌های ۱۳۷۸ تا ۱۴۰۰ را نشان می‌دهد. چنانچه در تصویر دیده می‌شود روند رو به کاهش سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر اندکی کاهش یافته است.

می باشد. مقدار آب نفوذ یافته از مصارف شرب و صنعت چون دفع پساب آنها عمدتاً از طریق چاه‌های جذبی صورت می‌گیرد، برابر ۱۱۹/۳ میلیون متر مکعب حاصل شده است که ۸۲ درصد آب مصرفی می باشد. در سال‌های اخیر به دلیل خشکسالی و توسعه اراضی کشاورزی، برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی افزایش یافته و موجب محدودیت در منابع آب منطقه شده و مشکلات متعددی در

جدول ۱- منابع و مصارف آب‌های زیرزمینی در سال ۱۳۹۷

منابع	چاه		چشمه		قنات	
	تعداد	تخلیه (MCM)	تعداد	تخلیه (MCM)	تعداد	تخلیه (MCM)
	۷۷۷۳	۱۲۸۵	۲۰۸۸	۲۰/۸۳	۲۶۵	۳۰/۷۶
مصارف	کشاورزی (MCM)		شرب (MCM)		صنعت (MCM)	
	۱۰۱۹/۵۲		۱۲۷/۸۴		۸۰/۵۴	



شکل ۲- هیدروگراف واحد دشت قزوین از مهر ۱۳۷۸ تا بهمن ۱۴۰۰

پژوهش از اطلاعات تراز آب ۵۸ حلقه چاه پیژومتر موجود در منطقه و تخلیه چاه‌های بهره‌بردار برای ساخت مدل سه بعدی مفهومی هیدروژئولوژیکی استفاده شد. آبخوان در دو حالت پایدار و ناپایدار با استفاده از بسته LPF که در MODFLOW برای حل جریان و تراز آب‌های زیرزمینی قرار داده شده است، شبیه‌سازی گردید. این بسته به صورت مجزا هر ساختار هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی کرده و به محاسبه جریان در هر سلول می‌پردازد (Yang et al., 2009). برای واسنجی مدل در حالت پایدار از اطلاعات ماه مهر سال ۱۳۹۷ و در حالت ناپایدار از اطلاعات ماهانه دوره آماری ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۸ استفاده گردید. اطلاعات مورد نیاز جهت ساخت مدل مفهومی شامل اطلاعات چاه‌های پیژومتر بعنوان مقادیر مشاهده‌ای، منابع تخلیه (چاه‌های بهره‌بردار، چشمه، قنات)، مقادیر تبخیر از آب زیرزمینی، منابع تغذیه (بارش مؤثر، تغذیه از رودخانه‌ها و آب برگشتی از مصارف کشاورزی، شرب و صنعت)، شرایط اولیه و مرزی، مرزهای ورودی و خروجی

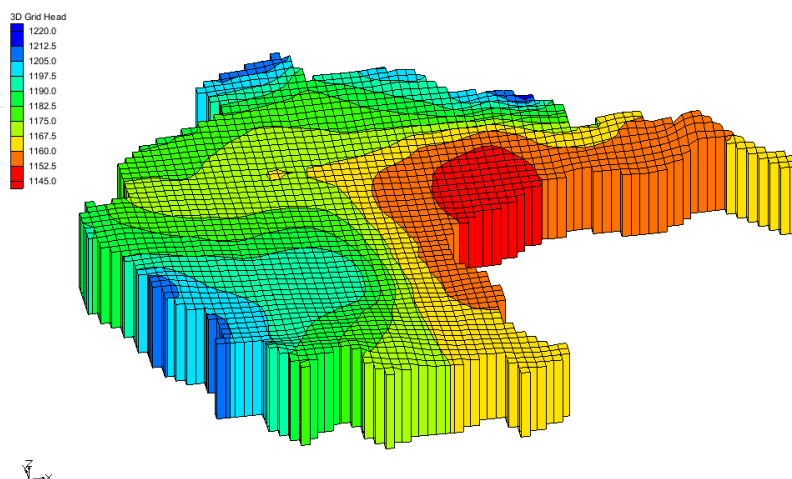
برای مدل‌سازی آبخوان دشت قزوین از مدل MODFLOW2000 موجود در نسخه ۱۰ نرم افزار GMS استفاده شد. مدل جریان در آب‌های زیرزمینی با چگالی ثابت و مواد متخلخل با شرایط متعادل در معادله ۱ نشان داده می‌شود.

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

که در این معادله K_{xx} ، K_{yy} ، K_{zz} به ترتیب هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x ، y ، z ، h ، تراز پیژومتریک، W ترم تخلیه یا تغذیه، Ss آبدهی ویژه و t زمان است (Harbaugh, 2005). در MODFLOW نیز با فرض ثابت بودن چگالی آب و حرکت آب در سه جهت x ، y و z ، شرایط برای همه سلول‌های مدل بصورت همگن در نظر گرفته می‌شود (Yang et al., 2009).

با استفاده از اطلاعات اخذ شده از شرکت آب منطقه ای قزوین و به کمک GIS داده‌های ورودی نرم افزار GMS تهیه گردید. در این

به سلول‌های کوچک‌تری تقسیم‌بندی شده و معادله جریان برای هر سلول بطور جداگانه حل می‌شود. لذا می‌بایست آبخوان را شبکه‌بندی نماییم. بدین منظور آبخوان را با توجه به وسعت و شرایط هیدروژئولوژیکی به سلول‌هایی با ابعاد ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر در جهت x و y شبکه‌بندی نمودیم. شکل ۳ نقشه سه بعدی مدل مفهومی آبخوان قزوین را همراه با جهت جریان آب زیرزمینی نشان می‌دهد.



شکل ۳- نقشه سه بعدی مدل مفهومی آبخوان قزوین

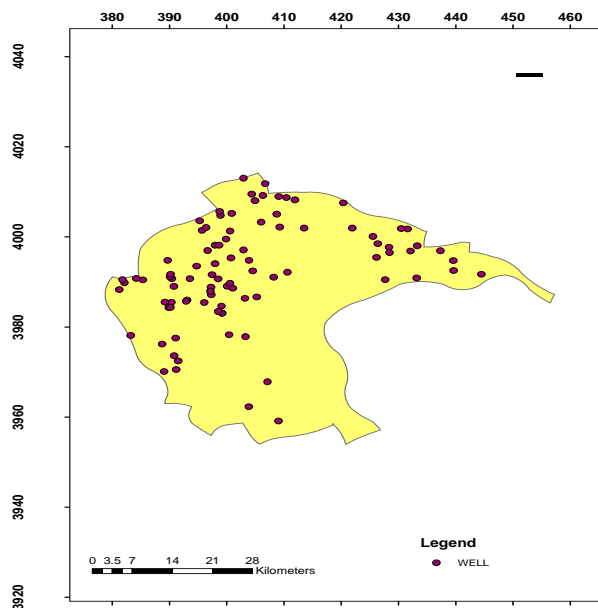
نشان می‌دهد. برای واسنجی از مقادیر آب ورودی و خروجی به آبخوان، مقادیر تغذیه و تخلیه در مناطق مختلف و در نهایت تخمین و تغییر در مقادیر هدایت هیدرولیکی استفاده شد. برای مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی در مناطق مختلف از دامنه ۱/۰۱ تا ۶۷/۱ متر در روز (رسول زاده و همکاران، ۱۳۹۱) در نظر گرفته شد. هم‌چنین از نتایج آزمایشات پمپاژ شرکت آب منطقه‌ای قزوین که به صورت نقطه‌ای قبل از سال ۱۳۸۰ انجام شده برای در نظر گرفتن مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی استفاده شد. موقعیت چاه‌های مذکور در شکل ۴ نشان داده شده است. در هر مرحله از واسنجی مقایسه بیلان مدل با گزارش بیلان وزارت نیرو انجام شد تا تغییرات اعمال شده، مدل را از شرایط واقعی منطقه دور نکند. پس از واسنجی مدل در شرایط ماندگار، اقدام به واسنجی در شرایط غیرماندگار شد. که در این حالت از اطلاعات ماهانه تراز آب چاه‌های اکتشافی منطقه، تخلیه ماهانه چاه‌های بهره‌برداری، تغذیه ماهانه منطقه، تغییرات ماهانه مقادیر ورودی و خروجی آبخوان از ماه مهر سال ۱۳۹۷ تا شهریور ۱۳۹۸ و پارامتر آبدهی ویژه استفاده شد. مدل برای این شرایط نیز واسنجی گردید. پس از واسنجی مدل در شرایط ناپایدار، سپس مدل با استفاده از اطلاعات بازه زمانی مهر ماه تا اسفند ۱۳۹۸ صحت‌سنجی شد.

آبخوان، تراز زمین، تراز آب زیرزمینی، تراز سنگ کف و مرز آبخوان می‌باشد. داده‌های ورودی در GIS تهیه شده و در محیط GIS بصورت پوشش‌های مختلف فراخوانی شدند. در حالت پایدار هدایت هیدرولیکی آبخوان کالیبره و تخمین زده شد و در حالت ناپایدار آبدهی ویژه تخمین زده شد (Milan et. al, 2018; Javadi et. al, 2021). MODFLOW معادله جریان را با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌کند. برای حل عددی معادله دیفرانسیل جزئی، آبخوان

آنالیز حساسیت مدل نیز با توجه به تحقیقی که میلان و همکاران (۲۰۱۸) و جوادی و همکاران (۲۰۲۱) انجام داده بودند، نسبت به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه انجام شد. بدین منظور از قسمت MODFLOW، تغییرات مثبت و منفی در پارامترهای نام‌برده اعمال گردید. تغییرات لحاظ شده شامل افزایش و کاهش ۲۵ و ۵۰ درصدی بود. این تغییرات هم بصورت جداگانه و هم بصورت ترکیبی اعمال گردید و نتایج با مقادیر واسنجی شده مقایسه گردیدند تا مقدار حساسیت مدل نسبت به این ضرایب سنجیده شود. بدین منظور از شاخص حساسیت (رابطه ۲) استفاده شد.

$$Sc = \frac{(O2 - O1) / \bar{O}}{(I2 - I1) / \bar{I}} \quad (2)$$

که در آن Sc شاخص حساسیت، O1، O2 و \bar{O} به ترتیب مقدار اولیه، ثانویه و متوسط پارامتر خروجی و I1، I2 و \bar{I} به ترتیب مقدار اولیه، ثانویه و متوسط پارامتر ورودی است (حمیدپور و همکاران، ۱۳۹۱). در مرحله بعد با توجه به عدم دست بودن اطلاعات ضرایب هیدرودینامیک در آبخوان با استناد به آماربرداری سراسری سال ۱۳۹۷ توسط وزارت نیرو و گزارش بیلان منابع آب زیرزمینی اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای برای محدوده مطالعاتی مد نظر، اقدام به واسنجی مدل گردید. در هر مرحله از واسنجی مقادیر تراز آب مشاهده‌ای و محاسبه شده را مقایسه کرده و نتایج را بصورت گرافیکی



شکل ۴- موقعیت مکانی چاه‌های دارای آزمایش پمپاژ

قرار گیرند؛ اما اطلاعات اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی حاکی از این است که از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۸ سالانه به طور متوسط ۳۲۶۸ هکتار اراضی تحت پوشش سیستم‌های تحت فشار، افزایش یافته‌اند. تاکنون شیب متوسط افزایش سالانه اراضی تحت پوشش آبیاری تحت فشار حدود ۲ درصد می‌باشد. سطح تحت پوشش آبیاری سطحی و تحت فشار از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۸ در جدول ۲ آورده شده است.

سپس آبخوان بر اساس تغییر نوع سیستم‌های آبیاری در ۶ سناریوی مختلف از سال ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۷ شبیه‌سازی شد. لازم به توضیح است بر اساس مطالعات ارزیابی سیستم‌های آبیاری سطحی و تحت فشار منطقه (پندام، ۱۳۸۵؛ لار، ۱۳۸۹؛ رشماملو و همکاران، ۱۳۸۹) متوسط راندمان کاربرد آبیاری سطحی ۳۹/۹ و متوسط راندمان کاربرد سیستم‌های آبیاری تحت فشار ۶۸/۸ درصد گزارش شده است. بر اساس قانون برنامه ششم توسعه مقرر شده بود که سالانه حدود ۶۰۰۰ هکتار از اراضی استان قزوین تحت پوشش آبیاری تحت فشار

جدول ۲- وضعیت اراضی تحت پوشش آبیاری سطحی و تحت فشار در استان قزوین (سازمان جهاد کشاورزی)

سال	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰	۱۳۹۱	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸
اراضی تحت پوشش آبیاری سطحی (هکتار)	۱۴۹۹۸۱	۱۵۶۲۷۳	۱۵۴۶۰۳	۱۶۹۱۱۱	۱۴۸۶۸۹	۱۶۹۸۱۶	۱۴۶۸۸۱	۱۲۳۶۶۶	۱۱۷۰۱۰	۱۰۴۸۴۲	۱۰۰۷۷۴
اراضی تحت پوشش آبیاری تحت فشار (هکتار)	۱۳۱۱۱	۱۵۱۳۴	۱۷۵۸۶	۲۰۲۰۰	۲۱۵۷۹	۲۳۸۰۸	۲۵۰۳۱	۲۹۴۶۹	۳۳۷۱۲	۴۰۴۷۵	۴۵۷۹۸

سناریوی اول: فرض شد سطح اراضی تحت پوشش آبیاری تحت فشار و سطحی، از سال ۱۳۹۸ ثابت باقی بماند. در این حالت میزان آب برگشتی به آبخوان بر اساس مطالعات بیلان آب محدوده مطالعاتی قزوین ۲۶ درصد در نظر گرفته شد (مهندسین مشاور آبخوان، ۱۳۹۲).
 سناریوی دوم: فرض شد سطح اراضی تحت پوشش آبیاری تحت فشار با شیب ثابت قبلی (۲ درصد در سال) افزایش یافته و اراضی تحت پوشش آبیاری سطحی کاهش یابد.

سناریوی سوم: فرض شد از سال ۱۳۹۸ کلیه اراضی تحت پوشش آبیاری سطحی با راندمان کاربرد ۴۰ درصد قرار بگیرند.
 سناریوی چهارم: فرض شد از سال ۱۳۹۸ کلیه اراضی تحت پوشش آبیاری بارانی با راندمان کاربرد ۸۰ درصد قرار بگیرند.
 سناریوی پنجم: فرض شد از سال ۱۳۹۸ کلیه اراضی تحت پوشش آبیاری قطره‌ای با راندمان کاربرد ۹۵ درصد قرار بگیرند.
 سناریوی ششم: فرض شد از سال ۱۳۹۸ کلیه اراضی تحت پوشش آبیاری با راندمان ۱۰۰ درصد قرار بگیرند. در این سناریو میزان

سناریوی اول: فرض شد سطح اراضی تحت پوشش آبیاری تحت فشار و سطحی، از سال ۱۳۹۸ ثابت باقی بماند. در این حالت میزان آب برگشتی به آبخوان بر اساس مطالعات بیلان آب محدوده مطالعاتی قزوین ۲۶ درصد در نظر گرفته شد (مهندسین مشاور آبخوان، ۱۳۹۲).
 سناریوی دوم: فرض شد سطح اراضی تحت پوشش آبیاری تحت فشار با شیب ثابت قبلی (۲ درصد در سال) افزایش یافته و اراضی تحت پوشش آبیاری سطحی کاهش یابد.

از فرونشست زمین صرفنظر شده است. میزان آب برگشتی به آبخوان هم بر اساس دو سناریوی اول و آخر با فرض مشخص بودن میزان آب برگشتی‌ها (سناریوی اول ۲۶ درصد و سناریوی ششم صفر) کنترل شد. در این پژوهش برای ارزیابی مدل از شاخص‌های آماری مندرج در جدول ۳ استفاده شد.

آب برگشتی صفر در نظر گرفته شد. در کلیه سناریوها، میزان برداشت از آب زیرزمینی ثابت و نوع سیستم آبیاری متغیر در نظر گرفته شد. فرض عدم کاهش برداشت آب زیرزمینی، با توجه به آمار اخذ شده از جهاد کشاورزی و وزارت نیرو (۱۴۰۰) می‌باشد که با وجودی که اراضی تحت پوشش آبیاری تحت فشار، هر سال رو به افزایش است ولی کاهش در میزان برداشت آب‌های زیرزمینی مشاهده نمی‌شود. همچنین در این تحقیق

جدول ۳- شاخص‌های آماری و جدولی مورد استفاده در پژوهش (Azizian and Ramezani Etedali, 2018)

No	Measure	Equation
1	Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Ho - Hc)^2}$
2	Correlation Coefficient	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (Ho - Hmo)(Hc - Hmc)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Ho - Hmo)^2 \sum_{i=1}^n (Hc - Hmc)^2}}$
3	Relative Bias	$RB = \frac{\sum_{i=1}^n abs(Hc - Ho)}{Ho}$
4	Mean Absolute Residual	$MAR = \frac{\sum_{i=1}^n abs(Hc - Ho)}{n}$
5	Normalized Root Mean Square Error	$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Ho - Hc)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Ho)^2}}$

در جدول ۳ شاخص RMSE ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب همبستگی، RB خطای نسبی، MAR میانگین خطای مطلق، NRMSE ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده، n تعداد چاه‌های مشاهده‌ای، Ho تراز آب مشاهده‌ای، Hc تراز آب محاسبه شده، Hmo میانگین تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای و Hmc میانگین تراز آب محاسبه‌ای می‌باشد.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

نتیجه آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در جداول ۴، ۵ و ۶ آورده شده است.

جدول ۴- نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامتر هدایت هیدرولیکی

درصد تغییرات	-۵۰	-۲۵	+۲۵	+۵۰
RMSE (m)	۹/۳۳	۳/۰۷	۲/۲۳	۳/۳۷
Sc	۹/۸۲	۳/۲۳	۲/۳۵	۳/۵۵

جدول ۵- نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامتر آبدهی ویژه

درصد تغییرات	-۵۰	-۲۵	+۲۵	+۵۰
RMSE (m)	۱/۵۲	۲/۶۲	۰/۹۲	۰/۹
Sc	۱/۶	۲/۷۶	۰/۹۷	۰/۹۵

جدول ۶- نتایج آنالیز حساسیت مدل نسبت به ترکیب پارامترهای آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی

پارامتر	HK	Sy	HK	Sy	HK	Sy	HK	Sy
درصد تغییرات	-۵۰	-۵۰	-۵۰	+۵۰	+۵۰	+۵۰	+۵۰	-۵۰
RMSE (m)	۸/۸۸	۹/۵۲	۳/۲	۳/۸۲	۳/۳۷	۴/۰۲	۳/۳۷	۴/۰۲
Sc	۹/۳۵	۱۰/۰۲	۳/۳۷	۴/۰۲	۳/۳۷	۴/۰۲	۳/۳۷	۴/۰۲

دادن این که کدام یک از پارامترها تأثیر بیشتری بر نتایج اعمال می‌کند. لازم به توضیح است در محاسبه شاخص حساسیت مقدار RMSE در شرایط واسنجی شده در حالت ناپایدار ۰/۹۵ بدست آمده

با انجام تحلیل حساسیت مشخص می‌شود چقدر مقادیر خروجی مدل از طریق اعمال تغییرات در مقادیر ورودی مدل تحت تأثیر قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر تحلیل حساسیت روشی است برای نشان

طی ماه و مشخص نمودن مرزهای ورودی و خروجی و میزان آب ورودی و خروجی به آبخوان بر اساس تراز نزدیک‌ترین چاه‌های پیزومتر به مرزها استفاده شد. شکل ۵-a مدل آبخوان قبل از واسنجی و شکل ۵-b مدل واسنجی شده را نشان می‌دهد. برای واسنجی مدل از روش سعی و خطا استفاده شد. تفاوت تراز چاه‌های پیزومتر با تراز محاسبه شده بصورت گرافیکی نشان داده شده است. اختلاف مجاز ± 1 متر در نظر گرفته شده است. چاه‌هایی که کمتر از یک متر اختلاف دارند با رنگ سبز، چاه‌هایی که بین ۱ تا ۲ متر اختلاف دارند با رنگ زرد و بیشتر از ۲ متر با رنگ قرمز مشخص می‌شوند. جدول ۷ وضعیت شاخص‌های آماری و خطاهای تراز محاسباتی را نسبت به مشاهداتی نشان می‌دهند. شکل ۶ نیز نمودار مقایسه‌ای تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای و واسنجی شده را نشان می‌دهد. ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای مطلق در حالت پایدار به ترتیب ۸۴ سانتی‌متر و ۶۶ سانتی‌متر بدست آمد. مکوندی و همکاران در مطالعه بررسی پایداری منابع آب در حوضه زاینده‌رود با استفاده از شاخص‌های پایداری و مدل GMS در آبخوان نجف آباد در حوضه زاینده‌رود، میزان شاخص RMSE را در شرایط ماندگار ۸۱ سانتی‌متر بدست آوردند (مکوندی و همکاران، ۱۳۹۹). لذا می‌توان نتیجه گرفت دقت شبیه‌سازی در حالت پایدار مناسب است.

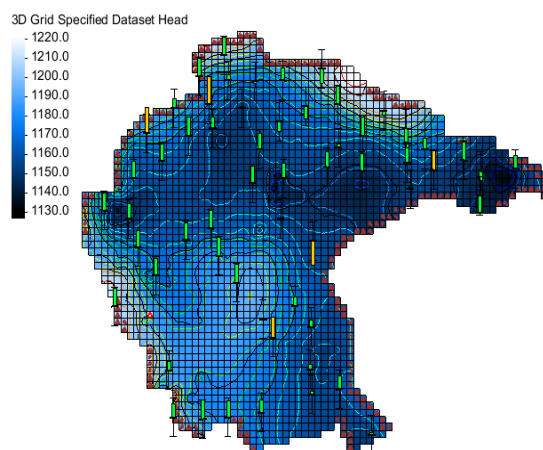
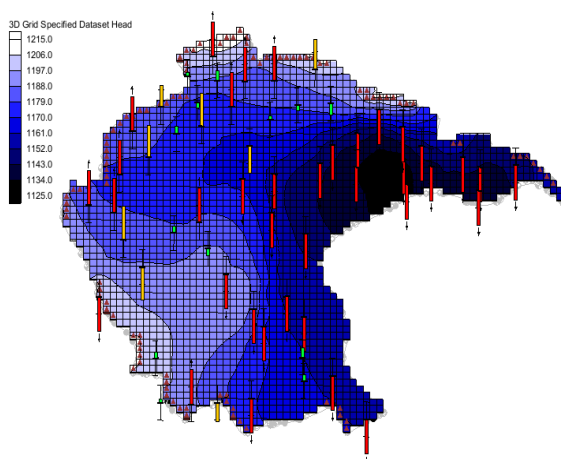
است. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت انجام شده مدل حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی و حساسیت کمتری نسبت به آبدهی ویژه دارد. چنانچه در جداول ۴ تا ۶ نیز مشاهده می‌شود با افزایش و کاهش ۵۰ درصدی هدایت هیدرولیکی شاخص حساسیت RMSE به ترتیب ۳/۵۵ و ۹/۸۲ برابر می‌شود. ولی با افزایش و کاهش ۵۰ درصدی آبدهی ویژه شاخص حساسیت RMSE به ترتیب ۱/۶ و ۹/۹۵ برابر می‌شود. در ترکیب پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه نیز مشاهده می‌شود چنانچه هدایت هیدرولیکی ۵۰ برابر کاهش و آبدهی ویژه ۵۰ برابر افزایش یابد، شاخص حساسیت RMSE تقریباً ۱۰ برابر و کاهش ۵۰ درصدی هر دو پارامتر باعث ۹/۳۵ برابر شدن شاخص حساسیت می‌شود. لذا مدل به کاهش هدایت هیدرولیکی حساسیت خیلی بیشتری نسبت به افزایش آن نشان می‌دهد و افزایش آبدهی ویژه می‌تواند در نتیجه واسنجی مدل تأثیر مثبت داشته باشد. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت عدم قطعیت مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی بویژه نسبت به کاهش آن بیشتر از آبدهی ویژه است.

واسنجی حالت پایدار

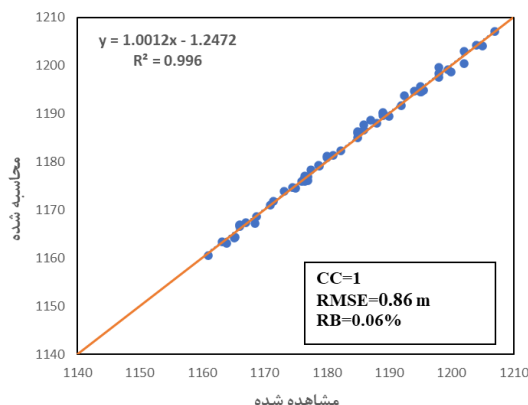
واسنجی حالت پایدار برای ماه مهر سال ۱۳۹۷ انجام شد. بدین منظور از مقادیر متوسط تراز آب زیرزمینی، بارش، تغذیه و تخلیه در

جدول ۷- وضعیت شاخص‌های آماری مدل واسنجی شده در شرایط ماندگار

property	Head(m)
Mean Residual	-۰/۳۹
Mean Absolute Residual	۰/۶۶
Root Mean Squared Residual	۰/۸۴
Normalized Root Mean Square Error	۰/۰۰۰۷



شکل ۵- شرایط مدل قبل (a) و بعد (b) از واسنجی

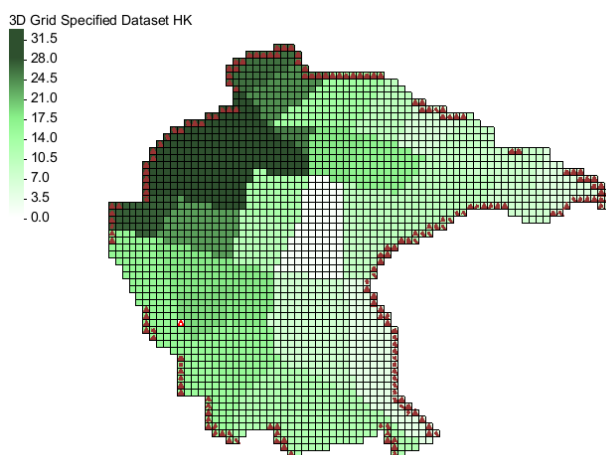


شکل ۶- نمودار مقایسه‌ای تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در شرایط ماندگار

واسنجی و صحت‌سنجی مدل در حالت ناپایدار

واسنجی در حالت جریان ناپایدار هم با روش سعی و خطا انجام شد. در این حالت داده‌های ماهانه چاه‌های پیزومتر، بهره‌برداری، مقادیر تغذیه و شرایط مرزی از مهر سال ۱۳۹۷ تا شهریور ۱۳۹۸ وارد مدل شد. مقادیر هدایت هیدرولیکی ثابت در نظر گرفته شد و در این مرحله با واسنجی مدل برای هر ماه، مقادیر آبدهی ویژه (S_y) تخمین زده شد. مبنای تخمین آبدهی ویژه، مقادیر محاسبه شده هدایت هیدرولیکی در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از بازه زمانی ماه مهر سال ۱۳۹۸ لغایت اسفند ۱۳۹۸ مدل صحت‌سنجی شد. در نهایت بر اساس مدل پایدار، مقادیر هدایت هیدرولیکی افقی آبخوان (k) و بر اساس مدل ناپایدار مقادیر آبدهی ویژه (S_y) با توجه به وضعیت تجمع چاه‌های بهره‌برداری و جهت جریان و شیب منطقه بدست آمد (شکل ۷ و ۸).

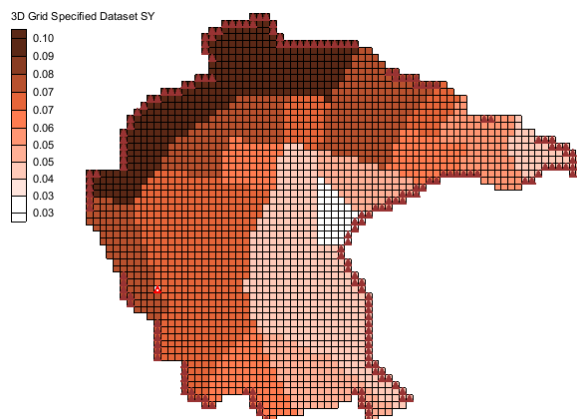
جدول ۸ شاخص‌های آماری مدل واسنجی شده و هم‌چنین نتایج صحت‌سنجی مدل و شکل ۹ سری زمانی تراز آب مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در سه چاه پیزومتر را در شرایط ناپایدار نشان می‌دهد. با توجه به محاسبات انجام شده (ریشه میانگین مربعات خطا، ۱۰۶ سانتیمتر و میانگین خطای مطلق، ۷۵ سانتی‌متر)، دقت شبیه‌سازی در حالت ناپایدار هم بالاست. نتایج صحت‌سنجی نیز حاکی از این است که واسنجی مدل به درستی انجام شده است. مکوندی و همکاران در مطالعه‌ای که با استفاده از نرم‌افزار GMS در آبخوان نجف‌آباد انجام دادند، ریشه میانگین مربعات خطا را در شرایط غیرماندگار ۸۸ سانتی‌متر بدست آوردند (مکوندی و همکاران، ۱۳۹۹). بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت مدل GMS با دقت بالایی آبخوان را شبیه‌سازی می‌نماید.



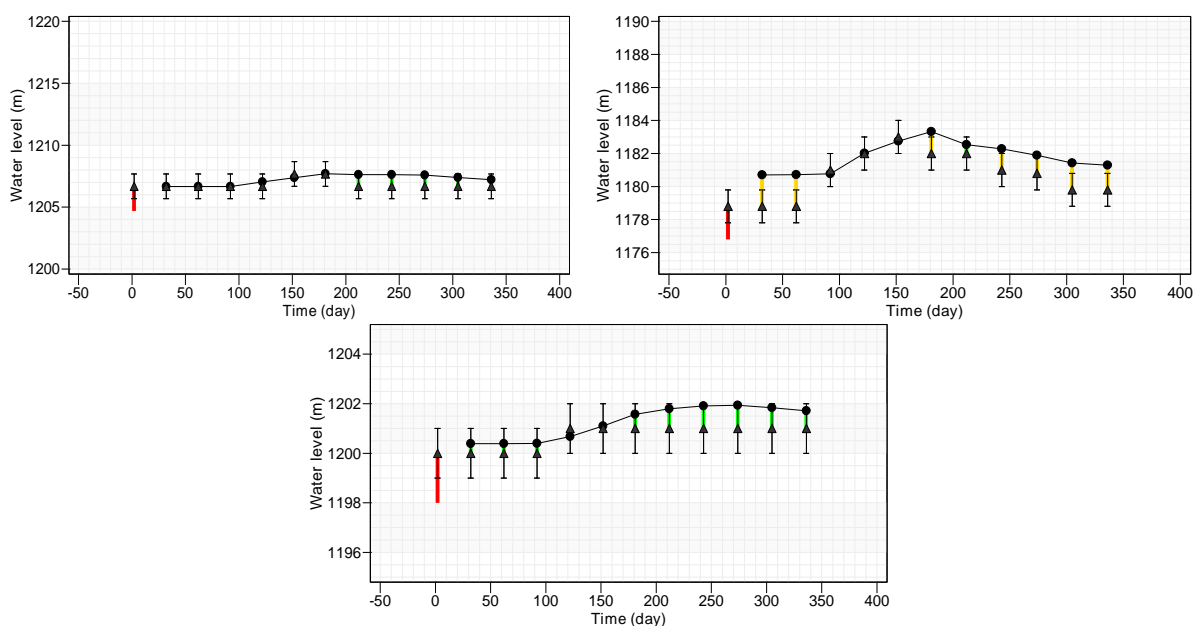
شکل ۷- نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت قزوین

جدول ۸- شاخص‌های آماری مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده در شرایط ناپایدار

property	مقادیر مرحله واسنجی (m)	مقادیر مرحله صحت‌سنجی (m)
Mean Residual (Head)	-۰/۱۲	-۰/۵
Mean Absolute Residual (Head)	-۰/۷۵	۱/۰۷
Root Mean Squared Residual (Head)	۱/۰۶	۱/۶۶
Normalized Root Mean Square Error	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱



شکل ۸- نقشه آبدهی ویژه آبخوان قزوین



شکل ۹- سری زمانی تراز آب مشاهده‌شده و واسنجی‌شده سه چاه بیژومتر در شرایط ناپایدار (چاه‌هایی که کمتر از یک متر اختلاف دارند با رنگ سبز، چاه‌هایی که بین ۱ تا ۲ متر اختلاف دارند با رنگ زرد و بیشتر از ۲ متر با رنگ قرمز مشخص می‌شوند).

نتایج آزمایشات پمپاژ شرکت آب منطقه‌ای قزوین که بصورت نقطه‌ای قبل از سال ۱۳۸۰ انجام شده، مقدار هدایت هیدرولیکی در بازه ۰/۰۳ تا ۲۴/۹ متر بر روز و مقدار آبدهی ویژه نیز در بازه ۰/۰۰۰۱۸ تا ۰/۱۵ بوده است. لازم بذکر است عددی که شرکت آب منطقه‌ای قزوین در

در نتیجه واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار نقشه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان در دوره آماری مورد مطالعه بدست آمد. متوسط هدایت هیدرولیکی ۱۴/۰۶ متر بر روز و متوسط آبدهی ویژه آبخوان قزوین ۰/۰۶۴ بدست آمد. طی بررسی‌های بعمل آمده از

آمار اخذ شده از جهاد کشاورزی و وزارت نیرو (۱۴۰۰)، نشان می‌دهد با وجودی که اراضی تحت پوشش آبیاری تحت فشار هر سال رو به افزایش است نه تنها کاهش در میزان برداشت آب‌های زیرزمینی مشاهده نمی‌شود بلکه شاهد افزایش برداشت نیز هستیم (شکل ۱۱). این افزایش برداشت می‌تواند یا ناشی از افزایش سطح زیرکشت و یا انجام کشت دوم توسط کشاورزان باشد. با توجه به آمارنامه‌های جهاد کشاورزی، سطح زیر کشت تا سال ۱۳۹۳ رو به افزایش و از سال ۱۳۹۳ تاکنون رو به کاهش است. لذا فرض دوم مبنی بر انجام کشت دوم توسط کشاورزان تقویت می‌شود. تخمین میزان آب برگشتی به آبخوان تحت سناریوهای مختلف در جدول ۹ درج شده است.

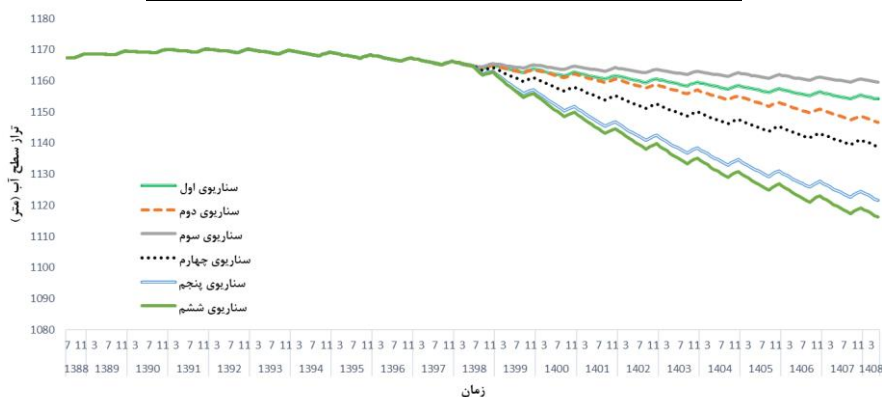
طی سالیان گذشته در محاسبات خود بعنوان آبدهی ویژه استفاده می‌کنند عدد ۰/۰۶ می‌باشد که در گزارش مطالعات بیان که توسط مهندسین مشاور آبخوان در سال ۱۳۹۲ تهیه شده است نیز این رقم درج شده است.

بررسی تغییر نوع سیستم آبیاری بر آبخوان دشت قزوین

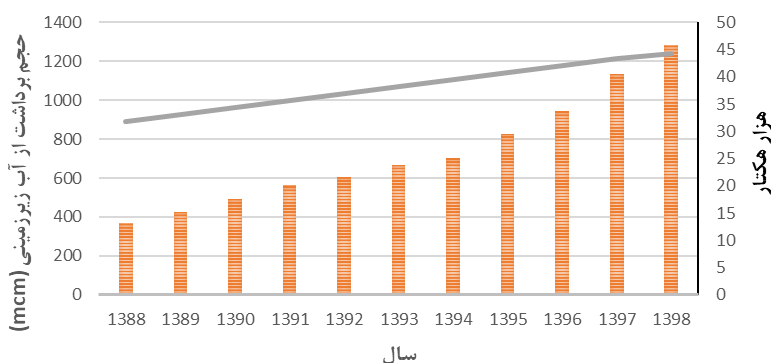
آبخوان در ۶ سناریو بر اساس تغییر نوع سیستم آبیاری از سال ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۷ شبیه‌سازی شد. از سال ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷، شبیه‌سازی بر اساس اطلاعات واقعی و از سال ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۷ وضعیت با توجه به سناریوهای مختلف، متفاوت در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۹- میزان آب برگشتی به آبخوان

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶
میزان آب برگشتی به آبخوان (درصد)	۲۶	۲۳	۳۰	۱۶	۳۶	۰



شکل ۱۰- وضعیت سطح آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف سیستم‌های آبیاری



شکل ۱۱- مقایسه حجم برداشت از آب زیرزمینی و سطح تحت پوشش آبیاری تحت فشار (هزار هکتار)

شکل ۱۱- مقایسه حجم برداشت از آب زیرزمینی و سطح تحت پوشش آبیاری تحت فشار

حجم برداشت از آب زیرزمینی، در سناریوی سوم که فرض گردیده کلیه مزارع تحت پوشش سیستم آبیاری سطحی قرار بگیرند، میزان

سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در شکل ۱۰ و میزان آب برگشتی محاسبه شده در جدول ۹ نشان می‌دهد با فرض ثابت بودن

نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از GMS (بررسی موردی دشت زنجان). فصلنامه علوم محیطی. ۱۶(۱): ۱-۱۴.

رسول زاده، ع.، رضوی قلعه جوق، س. و نیشابوری، م. ر. ۱۳۹۱. ارزیابی دقت روش‌های برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع برای خاک‌های مختلف. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶(۳): ۳۰۳-۳۱۶.

ضیایی، ع. ن. و انصاری، ح. ۱۳۹۹. بررسی تاثیر انواع روش‌ها و مدیریت آبیاری بر نفوذ عمقی و تغذیه آب زیرزمینی با مدل سازی عددی. طرح پژوهشی. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی.

قمری قلعه، ی.، کریمی، ح. و سعیدی، م. ۱۳۹۷. پیش‌بینی رفتار آبخوان دشت مهران (استان ایلام) با استفاده از مدل GMS. مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته. شماره ۲۸. ۸ ص.

مکوندی، ا.، محمدی، ح.، کردوانی، پ.، جوادی، س. و فرج زاده اصل، م. ۱۳۹۹. بررسی پایداری منابع آب در حوضه زاینده‌رود با استفاده از شاخص‌های پایداری و مدل GMS (مطالعه موردی: آبخوان نجف آباد در حوضه زاینده‌رود). علوم و مهندسی آبیاری. ۴۳(۳): ۱۹۷-۲۱۱.

رشماملو، م.، سهرابی، ت.، آبابایی، ب. و وردی نژاد، و. ۱۳۸۹. ارزیابی عملکرد انواع سیستم‌های آبیاری بارانی (مطالعه موردی اراضی کشاورزی دشت قزوین)، سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

ابارشی، ف.، مفتاح هلقی، م.، دهقانی، ا. ا. و کابلی، ع. ۱۳۹۲. بهینه سازی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان دشت زرین گل با استفاده از مدل ریاضی. اولین همایش زمین شیمی کاربردی ایران. دامغان.

نخعی، م.، محمدی، خ. و رضایی، ح. ۱۳۹۳. بهینه‌سازی مدل عددی برداشت از آبخوان با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: آبخوان ساحلی ارومیه). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۰(۲): ۹۴-۹۷.

عابدی کوهپایی، ج. و گلابجیان، م. ۱۳۹۴. برآورد ضرایب هیدرودینامیک منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز کوهپایه-سگری با استفاده از مدل MODFLOW. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی-علوم آب و خاک. ۱۹(۷۲): ۲۸۱-۲۹۳.

کتابچی، ح.، نیک‌خواه، ر. و مرید، س. ۱۳۹۷. شبیه سازی عددی آبخوان نمدان در استان فارس ایران: بررسی اثرات مدیریت آب سبز در احیاء آبخوان. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۴(۲): ۱۱۹-۱۳۰.

آب برگشتی به آبخوان بیشتر از بقیه سناریوها (۳۰ درصد) بوده و سطح آب زیرزمینی در بالاترین حد خود قرار دارد. در سناریوی آبیاری قطره‌ای هم بعد از سناریوی فرضی راندمان صد در صد، میزان آب برگشتی، حداقل بوده (۳/۶ درصد) و سطح آب زیرزمینی در پایین‌ترین حد خود قرار دارد.

نتیجه‌گیری

برای واسنجی هدایت هیدرولیکی مدل در شرایط ماندگار و برای آینده ویژه مدل در شرایط غیرماندگار اجرا می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی نسبت به آینده ویژه حساسیت بیشتری دارد. آنالیز حساسیت مدل نشان می‌دهد با کاهش هدایت هیدرولیکی به میزان ۵۰ درصد شاخص حساسیت RMSE به میزان ۹/۸۲ برابر و با افزایش ۵۰ درصدی این پارامتر شاخص حساسیت ۳/۵۵ برابر می‌شود. همچنین چنانچه هدایت هیدرولیکی ۵۰ برابر کاهش و آینده ویژه ۵۰ برابر افزایش یابد، شاخص حساسیت RMSE، تقریباً ۱۰ برابر و کاهش ۵۰ درصدی هر دو پارامتر باعث ۹/۳۵ برابر شدن شاخص حساسیت می‌شود.

نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل GMS نشان می‌دهد آبخوان قزوین با دقت بالایی مدل‌سازی شده است. ریشه میانگین مربعات خطا در حالت پایدار ۰/۸۴ متر و در حالت ناپایدار ۱/۰۶ متر می‌باشد. متوسط هدایت هیدرولیکی آبخوان پس از واسنجی مدل در حالت پایدار ۱۴/۰۶ متر بر روز و آینده ویژه ۰/۰۶۴ تخمین زده شد. این اعداد با نتایج آزمایشات پمپاژ انجام شده توسط شرکت آب منطقه‌ای قزوین و نتایج حاصل از مطالعات بیلان محدوده مطالعاتی قزوین در وزارت نیرو (۰/۰۶) مطابقت دارد.

بررسی سناریوهای مختلف هم نشان داد که با فرض ثابت بودن حجم برداشت و با صرف‌نظر از فرونشست زمین، سیستم آبیاری سطحی، بیشترین (۳۰ درصد) و سیستم قطره‌ای، کمترین (۳/۶ درصد) آب برگشتی به آبخوان را دارد و در سناریوی آبیاری سطحی، سطح آب زیرزمینی در بالاترین حد و در سناریوی قطره‌ای در پایین‌ترین حد خود قرار دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت تغییر سیستم‌های آبیاری در صورتی می‌تواند مفید باشد که منجر به کاهش برداشت شود ولی آمارها حاکی از این است که در طی سالیان گذشته علی‌رغم افزایش سطح تحت پوشش آبیاری تحت فشار، برداشت از آب زیرزمینی همچنان افزایش داشته است که دلیل آن می‌تواند انجام کشت دوم توسط کشاورزان و عدم مدیریت صحیح منابع آب باشد.

منابع

پناهی، م.، میثاقی، ف. و عسگری، پ. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی و تخمین

- Khadri, S.F.R. and Pande, C. 2016. Ground water flow modeling for calibrating steady state using MODFLOW software: a case study of Mahesh River basin, India. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2: 1-17.
- Emace R and et al. 2000. Numerical ground water flow model of the upper and middle Trinity a quifer, Hill Country area, Texas Water Development Board. Open _ file Report 00 – 02.
- Yang, F.R, Lee, C.H, Kung, W.J. and Yeh, H.F. 2009. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of “Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project” in Taiwan. *Engineering Geology*. 103: 39-58.
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. United States Government Printing Office. Washington.
- Zhou, Y. and Li, W. 2011. A review of Regional Groundwater Flow Modeling. *Geoscience Frontiers* 2(2): 205-214.
- Azizian, A. and Etedali, HR. 2018. Assessing the Accuracy of European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis Datasets for Estimation of Daily and Monthly Precipitation. 791-777.
- Milan, S. G., Roozbahani, A. and Banihabib, M. E. 2018. Fuzzy optimization model and fuzzy inference system for conjunctive use of surface and groundwater resources. *Journal of hydrology*. 566: 421-434.
- Javadi, S., Saatsaz, M., Shahdany, S. M. H., Neshat, A., Milan, S. G. and Akbari, S. 2021. A new hybrid framework of site selection for groundwater recharge. *Geoscience Frontiers*. 12(4): 101-144.
- براتی، خ، عابدی کوهپای، ج، آذری، آ، درویشی، ا. و یوسفی، ع. ۱۳۹۸. مدل سازی آب زیرزمینی به منظور تعیین ضرایب هیدرودینامیکی در آبخوان آزاد (مطالعه موردی: دشت کرمانشاه). تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران). ۵۰ (۳): ۶۸۷-۷۰۰.
- یوسفی، ع، سرائی تبریزی، م، پرهمت، ج. و بابازاده، ح. ۱۴۰۱. مطالعه طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی هشتگرد). مجله پژوهش آب ایران. ۱۶ (۲): ۱-۲۰.
- زنگنه، م، سرائی تبریزی، م، خسروجردی، ا. و صارمی، ع. ۱۴۰۰. اثربخشی راهکارهای تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی برای کنترل فرونشست (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی ورامین). تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲ (۷): ۱۷۳۵-۱۷۵۱.
- حمیدپور، م، جلالیان، ا، افیونی، م. و قربانی، ب. ۱۳۹۱. تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل یوروسم برای پیش بینی رواناب در حوزه آبخیز کارون جنوبی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. ۱۶ (۶۲): ۴۹-۶۰.
- مهندسین مشاور پندام. ۱۳۸۴. گزارشات مطالعات بازنگاری شبکه آبیاری و زهکشی دشت قزوین.
- مهندسین مشاور لار. ۱۳۸۹. مطالعات طرح بهنگام سازی و اجرایی نمودن سند ملی الگوی مصرف بهینه آب کشاورزی در سطح دو دشت قزوین و فومنات.
- Gurwin J. and Lubczynski, M. 2005. Modeling of complex multi-aquifer systems for groundwater resources evaluation-Swidnica study case (Poland). *Hydrogeology Journal*. 13: 627-639.

Sensitivity Analysis and Study of Change of Irrigation System on Qazvin Plain Aquifer Using GMS Software

M. Jenab¹, H. Ramezani Etedali^{2*}, P. Daneshkar Arasteh³

Received: Aug.21, 2022

Accepted: Sep.27, 2022

Abstract

The decrease in rainfall, the increase in drought and the development of agriculture in recent years have led to an increase in the consumption of underground water and an increasing decline in water levels. In this study, using version 10 of GMS software, the condition of Qazvin Plain aquifer was modeled in two stable states for October 2017 and unstable from October 2017 to September 2018. The sensitivity analysis of the model was performed with respect to the parameters of hydraulic conductivity and specific yield, and these parameters were determined after calibration and validation of the model. The sensitivity analysis of the model with respect to the two mentioned parameters shows that the model is more sensitive to changes in hydraulic conductivity compared to changes in specific yield. The root mean square error in stable and unstable state was 0.84 and 1.06 m, respectively, and the absolute mean error was 0.66 and 0.75 m, respectively, which shows the high accuracy of the model simulation. The average value of hydraulic conductivity in the aquifer area was estimated as 14.06 m/day and specific drainage was 0.064. Then the underground water level in 6 scenarios of changing the irrigation systems (maintaining the existing situation, increasing the irrigation level under pressure, changing the systems to surface, changing the systems to rain, changing the systems to drip and irrigation with 100% efficiency) was simulated. The results showed that assuming that the underground water extraction is constant, in the surface irrigation scenario, the underground water level will be at its highest level with 30% return water and in drip irrigation conditions at its lowest level with 3.6% return water.

Keywords: Hydraulic Conductivity, Return Water, Specific Yield, Simulation

1- PhD Candidate in Water Sciences and Engineering, Irrigation and Drainage, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

3- Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(*- Corresponding Author Email: ramezani@eng.ikiu.ac.ir)