



Investigation of Groudwater Level Decreasing Effects on Qazvin Aquifer Hydrodynamic Characteristics

Mahnoosh Jenab¹, Hadi Ramezani Etedali^{✉2}, Peyman Daneshkar Arasteh³

1. Water Engineering Department, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: mahn.je@gmail.com

2. Corresponding Author, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

3. Water Engineering Department, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: arasteh1348@yahoo.com

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: March. 12, 2022

Revised: May. 22, 2022

Accepted: June. 11, 2022

Published online: Aug. 23, 2022

Keywords:

Hydraulic Conductivity,
Specific Yield,
GMS.

Increasing groundwater consumption and water table level leads to changes in hydrodynamic properties of the aquifer especially the parameters of hydraulic conductivity and specific yield. In this study, that was conducted in 2021 using GMS model version. 10 in Qazvin aquifer, the coefficients of hydraulic conductivity and specific yield of aquifer in three census periods of 2002, 2009 and 2018 after calibration and validation of the model in two cases steady and unsteady were determined and compared. The root mean square errors in the steady state for the proposed periods were 0.86, 0.73 and 0.84 m, respectively, and in the unsteady state were 1.7, 0.93 and 1.06 m, respectively. That shows high accuracy of the model simulation. The average hydraulic conductivity in the aquifer was estimated for the years of 2002, 2009 and 2018 which was 19.13, 16.85 and 14.06 meters per day and the average specific yield was 0.078, 0.071 and 0.064, respectively. The results showed that over time and by decreasing the groundwater level, the parameters of hydraulic conductivity and specific yield decrease. Since 2015 due to the measures taken for balancing and artificial recharge plan, the slope rate of hydraulic conductivity has decreased from 0.38 to 0.31. Also the slope rate of special discharge has decreased from 0.00117 to 0.00078. The main reason for this decreasing trend can be the destruction of soil structure and effective reduction of porosity indicating the irreversibility of the aquifer to its previous state. Therefore, it is necessary to pay attention to these changes regarding the recharge of aquifers and return water from irrigation systems.

Cite this article: Jenab, M., Ramezani Etedali, H., & Daneshkar Arasteh, P. (2022). Investigation of groudwater level decreasing effects on Qazvin aquifer hydrodynamic characteristics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (6), 1373-1386.

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.340403.669230>

بررسی تغییرات خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان در گذر زمان با استفاده از مدل GMS (مطالعه موردی: آبخوان دشت قزوین)

مهنوش جناب^۱، هادی رضائی اعتدالی^۲، پیمان دانش کار آراسته^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. ایمیل: mahn.je@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. ایمیل: amezani@eng.ikiu.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. ایمیل: arasteh1348@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	افزایش مصرف آب زیرزمینی و افت روزافزون سطح ایستابی منجر به ایجاد تغییراتی در خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان به‌ویژه پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه می‌شود. در این مطالعه که در سال ۱۴۰۰ و با استفاده از نسخه ۱۰ نرم‌افزار GMS در آبخوان قزوین انجام شده، ضرایب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در سه دوره آماربرداری سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار تعیین و مقایسه شدند. ریشه میانگین مربعات خطا در حالت پایدار در سه دوره موردبررسی به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۷۳ و ۰/۸۴ متر و در حالت ناپایدار نیز به ترتیب ۱/۷۰، ۰/۹۳ و ۱/۰۶ متر بدست آمد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی مدل دارد. متوسط هدایت هیدرولیکی در محدوده آبخوان در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ به ترتیب ۱۹/۱۳، ۱۶/۸۵ و ۱۴/۰۶ متر بر روز و متوسط آبدهی ویژه در محدوده آبخوان به ترتیب ذکرشده ۰/۰۷۸، ۰/۰۷۱ و ۰/۰۶۴ تخمین زده شد. نتایج نشان داد که با گذشت زمان و بروز افت سطح آب زیرزمینی پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه کاهش می‌یابند. بر اساس هیدروگراف واحد آبخوان، شیب کاهش سطح آب زیرزمینی به دلیل اقدامات صورت گرفته در طرح تعادل بخشی و تغذیه مصنوعی، از سال ۱۳۹۴ از ۰/۱۱۵۴ به ۰/۰۵۹۱ کاهش یافته است، شیب کاهش هدایت هیدرولیکی از ۰/۳۸ به ۰/۳۱ و شیب کاهش آبدهی ویژه از ۰/۰۱۱۷ به ۰/۰۰۷۸ کاهش یافته است. دلیل اصلی این روند کاهش می‌تواند تخریب ساختمان خاک و کاهش تخلخل مؤثر باشد که حاکی از برگشت‌ناپذیر بودن آبخوان به وضعیت قبلی آن است. بنابراین لازم است در خصوص تغذیه آبخوان‌ها و آب‌برگشتی از سامانه‌های آبیاری این تغییرات موردتوجه قرار گیرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۱	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۳/۲۱	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۶/۱	
واژه‌های کلیدی: هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، GMS	

استناد: جناب، مهنوش؛ رضائی اعتدالی، هادی؛ دانش کار آراسته، پیمان (۱۴۰۱). بررسی تغییرات خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان در گذر زمان با استفاده از مدل GMS (مطالعه موردی: آبخوان دشت قزوین). *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳ (۶)، ۱۳۸۶-۱۳۷۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.340403.669230>



مقدمه

شناخت کامل آبخوان از طریق بررسی‌های اکتشافی و صحرایی به دلیل پرهزینه و وقت‌گیر بودن، همچنین عدم دسترسی بودن داده‌ها و شرایط اعماق زمین عملاً امکان‌پذیر نیست. از طرفی کاهش میزان بارندگی، افزایش خشکسالی و توسعه کشاورزی در سال‌های اخیر منجر به افزایش مصرف آب زیرزمینی و افت روزافزون سطح ایستابی شده است. پیش‌بینی دقیق نوسانات سطح آب زیرزمینی و شناخت رفتار آب زیرزمینی جهت برنامه‌ریزی تأمین آب قابل‌اعتماد و نیز مدیریت جامع و پایدار منابع آب به علت پیچیده بودن ماهیت آن و عدم قطعیت در پارامترهای مربوط به آن، نیاز به مدل‌های مناسبی دارد.

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 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. دقت پیش‌بینی‌های مدل به کالیبراسیون موفق و تصدیق مدل در تعیین جهت جریان آب زیرزمینی بستگی دارد. استفاده از مدل‌های آب زیرزمینی در این راستا بسیار سودمند است (Ziaee and Ansari, 2021).

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. . Abareshi et al (2013) به منظور تعیین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان دشت زرینگل، از نرم‌افزار $\gamma, 1$ GMS 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 $12/8$ تا $178/1$ متر در روز و آبدهی ویژه آبخوان از $0/07$ تا $0/09$ متغیر است.

Nakhaei et al (2014) 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 نرم‌افزار $2,4$ MODFLOW Visual تهیه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار هدایت هیدرولیکی برای آبخوان مورد مطالعه بین 1 تا 10 متر در روز و مقدار آبدهی ویژه 1 تا 10 درصد است. Abedi Koupai and Golabchian (2015) 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 $15/26$ تا $19/87$ متر در روز و آبدهی ویژه آبخوان از $0/017$ تا $0/186$ متغیر است.

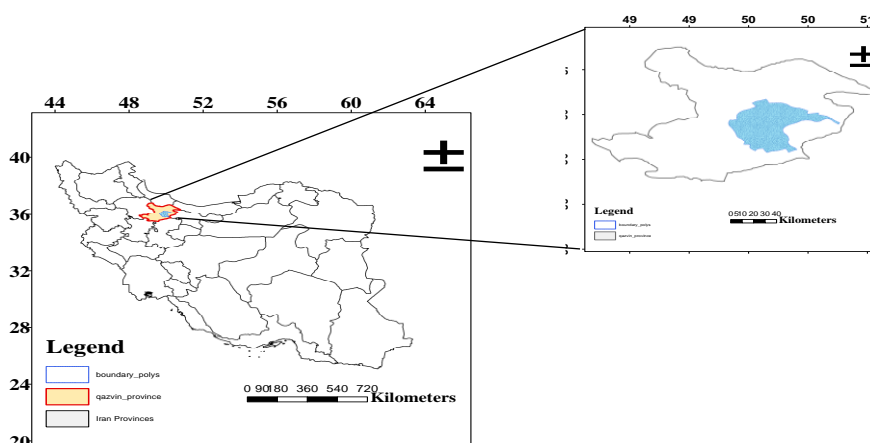
Ketabchi et al (2018) برای بررسی اثرات مدیریت آب سبز در احیای آبخوان نمدان در استان فارس، این آبخوان را با استفاده از مدل MODFLOW شبیه‌سازی کردند. بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق، هدایت هیدرولیکی آبخوان نمدان از 1 تا 25 متر در روز و آبدهی ویژه آبخوان از $0/008$ تا $0/21$ متغیر است.

Barati et al (2019) ضرایب هیدرودینامیک آبخوان کرمانشاه را از طریق مدل‌سازی با نرم‌افزار $\gamma, 1$ GMS تعیین نمودند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد مقدار هدایت هیدرولیکی در آبخوان مذکور، از $0/1$ تا 30 متر در روز و مقدار آبدهی ویژه از $0/02$ تا $0/4$ متغیر است.

از آنجائی که با افزایش برداشت‌های بی‌رویه و افت سطح ایستابی امکان بروز تأثیرات جبران‌ناپذیری بر آبخوان وجود خواهد گذاشت و از طرفی با افت سطح آب و بالتبع تخلیه خلل و فرج لایه‌های آبدار و از بین رفتن فشار آب بین منفذی رسوبات، بروز پدیده نشست زمین قطعی خواهد بود که این موضوع در مطالعه Janbaz fotamy et al (2020) در آبخوان قزوین با میانگین $39/9$ میلی‌متر در سال گزارش شده است. این رخداد باعث تخریب ساختمان خاک شده و ضرایب هیدرودینامیک آبخوان تحت تأثیر قرار می‌گیرند. بحث احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی با استفاده از تغذیه آب زیرزمینی و آب برگشتی از سامانه‌های آبیاری نیازمند بررسی وضعیت آبخوان‌ها پس از افت سطح ایستابی در طی سال‌های گذشته است. لذا هدف از این پژوهش، بررسی تغییرات ضرایب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان دشت قزوین با استفاده از نسخه 10 نرم‌افزار GMS با توجه به اثرات برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی است.

روشنی بررسی

منطقه مورد مطالعه آبخوان قزوین واقع در محدوده مطالعاتی قزوین است. 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 است. 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 است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

منابع بهره‌برداری کننده از آب‌های زیرزمینی در این محدوده در سه دوره آماربرداری سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ در جدول ۱ اشاره شده است. میزان مصارف مختلف از منابع آب زیرزمینی نیز در سه دوره اشاره شده در جدول ۲ ارائه شده است. عمده بهره‌برداری در دشت قزوین با استفاده از چاه صورت می‌گیرد. بر اساس مطالعات بیلان محدوده مطالعاتی قزوین که توسط 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 مترمکعب در سال بدست آمده است که ۲۶ درصد آب مصرفی آبیاری است. مقدار آب نفوذ یافته از مصارف شرب و صنعت چون دفع پساب آنها عمدتاً از طریق چاه‌های جذبی صورت می‌گیرد، برابر $۱۱۹/۳$ میلیون مترمکعب حاصل شده است که ۸۲ درصد آب مصرفی است. 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 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. ولی همچنان این دشت با افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و نشست زمین مواجه است (Janbaz fotami et al., 2020).

جدول ۱. منابع بهره‌برداری کننده از آب‌های زیرزمینی در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷

منبع	سال	۱۳۸۱	۱۳۸۸	۱۳۹۷
چاه	تعداد	۹۵۳۰	۷۸۸۱	۷۷۷۳
	تخلیه (mcm)	۱۴۴۷	۱۵۷۲	۱۲۸۵
چشمه	تعداد	۲۲۷۹	۱۹۵۹	۲۰۸۸
	تخلیه (mcm)	۱۲۳/۵	۴۰/۳	۲۰/۸۳
قنات	تعداد	۵۶۹	۲۶۰	۲۶۵
	تخلیه (mcm)	۸۶/۶	۵۳/۲۶	۳۰/۷۶

جدول ۲. میزان مصارف مختلف آب زیرزمینی برحسب میلیون مترمکعب در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷

نوع مصرف	۱۳۸۱	۱۳۸۸	۱۳۹۷
کشاورزی	۱۲۹۳/۱۸	۱۴۲۸/۳۲	۱۰۱۹/۵۲
شرب	۶۶/۱۳	۹۳/۳۲	۱۲۷/۸۴
صنعت	۷/۰۳	۳۵/۸۳	۸۰/۵۴

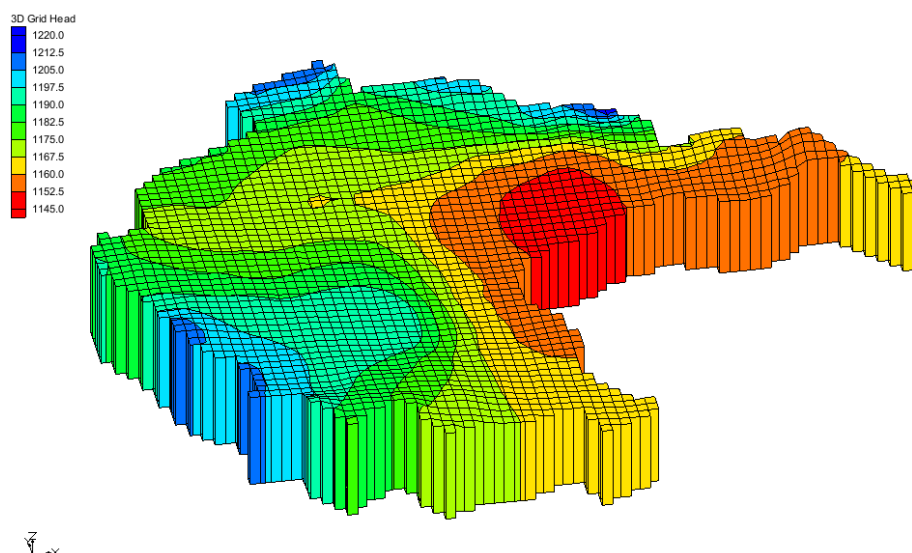
برای مدل‌سازی آبخوان دشت قزوین از مدل MODFLOW2000 موجود در نسخه ۱۰ نرم‌افزار GMS استفاده شد. مدل جریان در آب‌های زیرزمینی با چگالی ثابت و مواد متخلخل با شرایط متعادل در معادله ۱ نشان داده می‌شود.

$$\partial \partial x k_{xx} \partial h \partial x + \partial \partial y k_{yy} \partial h \partial y + \partial \partial z k_{zz} \partial h \partial z = 0 \quad \text{رابطه ۱}$$

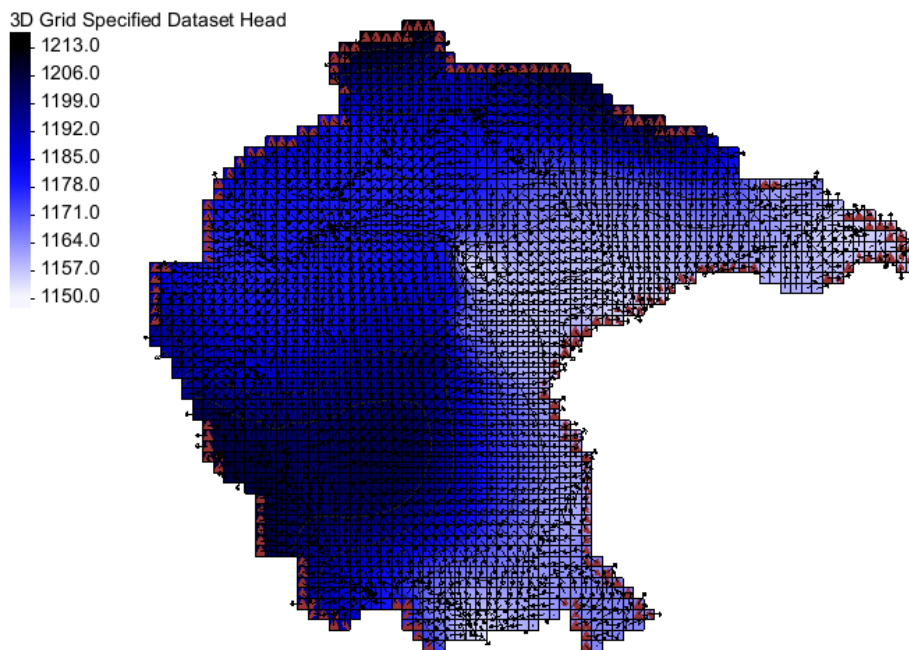
که در این معادله k_{xx} ، k_{yy} و k_{zz} به ترتیب هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x ، y و z و h تراز پیزومتريک است (Harbaugh, 2005). در MODFLOW نیز با فرض ثابت بودن چگالی آب و حرکت آب در سه جهت x ، y و z ، شرایط برای همه سلول‌های مدل به صورت همگن در نظر گرفته می‌شود (Yang et al., 2009).

با استفاده از اطلاعات اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای قزوین و به کمک نرم‌افزار GIS داده‌های ورودی نرم‌افزار GMS تهیه گردید. در این پژوهش از اطلاعات تراز آب ۵۸ حلقه چاه پیزومتر موجود در منطقه و تخلیه چاه‌های بهره‌برداری برای ساخت مدل سه‌بعدی 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 هیدروژئولوژیکی را شبیه‌سازی کرده و به محاسبه جریان در هر سلول می‌پردازد (Yang et al., 2009). اطلاعات موردنیاز جهت ساخت مدل مفهومی شامل اطلاعات چاه‌های پیزومتر به‌عنوان مقادیر مشاهده‌ای، منابع تخلیه (چاه‌های بهره‌برداری، 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 آبخوان، تراز زمین، تراز آب زیرزمینی، تراز سنگ کف و مرز آبخوان است. داده‌های ورودی در نرم‌افزار GIS تهیه شده و در محیط GMS بصورت پوشش‌های مختلف فراخوانی شدند. در حالت پایدار هدایت هیدرولیکی آبخوان کالیبره و تخمین زده شد و در حالت ناپایدار آبدی 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 به سلول‌های کوچک‌تری تقسیم‌بندی شده و معادله جریان برای هر سلول به‌طور 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 ۲ نقشه سه‌بعدی مدل مفهومی آبخوان قزوین و شکل ۳ نقشه جهت جریان آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نقشه سه‌بعدی مدل مفهومی آبخوان قزوین



شکل ۳. نقشه جهت جریان آب زیرزمینی آبخوان قزوین

در مرحله بعد با توجه به عدم دست بودن اطلاعات ضرایب هیدرودینامیک در آبخوان با استناد به آماربرداری سراسری سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ توسط وزارت نیرو و گزارش بیلان منابع آب زیرزمینی اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای برای محدوده مطالعاتی مدنظر، اقدام به واسنجی مدل در شرایط پایدار گردید. در این حالت از اطلاعات ماه مهر سال‌های مذکور استفاده شد. GMS در هر مرحله از واسنجی مقادیر تراز آب مشاهده‌ای و محاسبه شده را مقایسه کرده و نتایج را به صورت گرافیکی 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 (Rasoulzadeh et. al, 2012) در نظر گرفته شد. پس از واسنجی مدل در شرایط پایدار، اقدام به واسنجی در شرایط ناپایدار 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 دوره آماری مهر ۱۳۸۱ تا شهریور ۱۳۸۲، مهر ۱۳۸۸ تا شهریور ۱۳۸۹ و مهر ۱۳۹۷ تا شهریور ۱۳۹۸ استفاده گردید. و پارامتر آبدهی ویژه استفاده شد. مدل برای این شرایط نیز واسنجی گردید. پس از واسنجی مدل در شرایط ناپایدار، مدل با استفاده از اطلاعات مهر تا اسفند سال‌های ۱۳۸۲، ۱۳۸۹ و ۱۳۹۸ صحت سنجی شد.

سپس نمودار هیدروگراف آبخوان رسم شده و مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه محاسبه شده با منحنی افت آب مقایسه شدند. در این پژوهش برای ارزیابی مدل از شاخص‌های آماری مندرج در جدول ۳ استفاده شد.

جدول ۳. شاخص‌های آماری و جدولی مورد استفاده در پژوهش (Azizian and Etedai, 2018)

No	Measure	Equation
1	Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_o - H_c)^2}$
2	Correlation Coefficient	$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (H_o - H_{mo})(H_c - H_{mc})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_o - H_{mo})^2 \sum_{i=1}^n (H_c - H_{mc})^2}}$
3	Relative Bias	$RB = \frac{\sum_{i=1}^n \text{abs}(H_c - H_o)}{H_o}$
4	Mean Absolute Residual	$MAR = \frac{\sum_{i=1}^n \text{abs}(H_c - H_o)}{n}$

در جدول ۳ شاخص RMSE ریشه میانگین مربعات خطا، CC ضریب همبستگی، RB خطای نسبی، MAR میانگین خطای مطلق، n تعداد چاه‌های مشاهده‌ای، H_o تراز آب مشاهده‌ای، H_c تراز آب محاسبه شده، H_{mo} میانگین تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای و H_{mc} میانگین

تراز آب محاسباتی است.

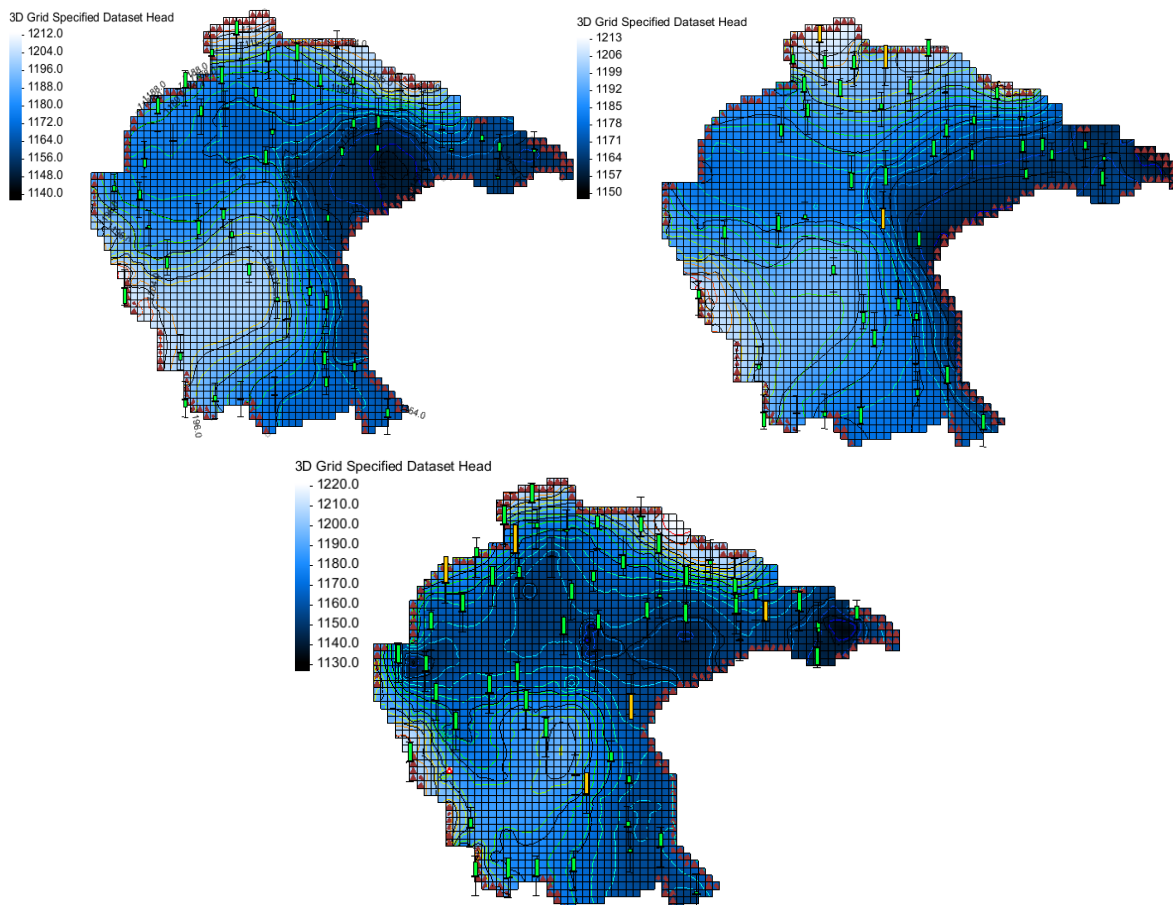
یافته‌ها

واسنجی حالت پایدار

واسنجی حالت پایدار برای ماه مهر سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ انجام شد. بدین منظور از مقادیر متوسط تراز آب زیرزمینی، بارش، تغذیه و تخلیه در طی ماه و مشخص نمودن مرزهای ورودی و خروجی و میزان آب ورودی و خروجی به آبخوان بر اساس تراز نزدیک‌ترین چاه‌های پیژومتر به مرزها استفاده شد. شکل ۴-a مدل آبخوان واسنجی شده را در سال ۱۳۸۱ و شکل ۴-b مدل واسنجی شده سال ۱۳۸۸ و شکل ۴-c مدل واسنجی شده سال ۱۳۹۷ را نشان می‌دهد. برای واسنجی مدل از روش سعی و خطا استفاده شد. تفاوت تراز چاه‌های پیژومتر با تراز محاسبه‌شده به صورت 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 ۴ وضعیت شاخص‌های آماری و خطاهای تراز محاسباتی را نسبت به مشاهداتی نشان می‌دهد.

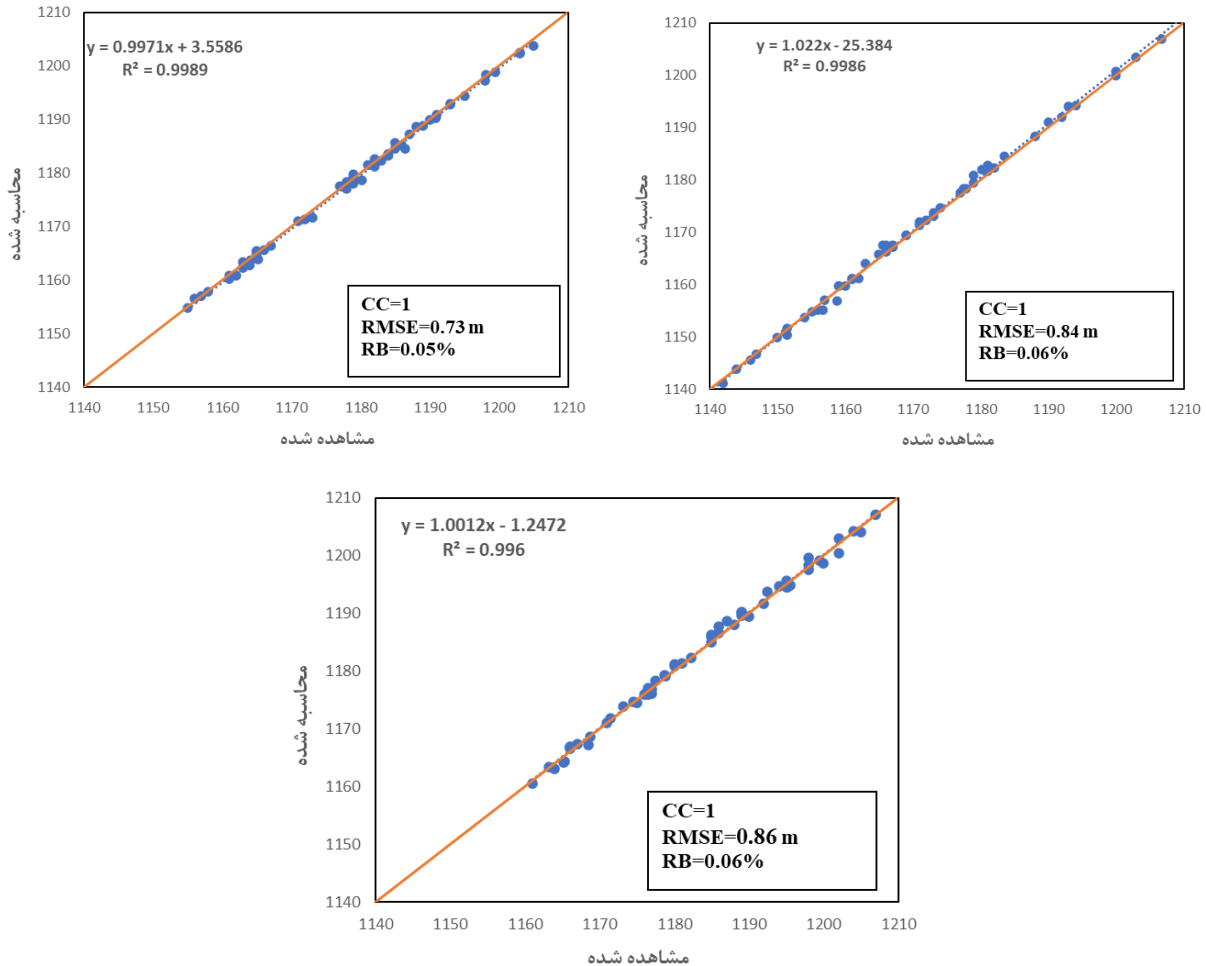
جدول ۴. وضعیت شاخص‌های آماری مدل واسنجی شده در شرایط ماندگار

Time (year)	۱۳۸۱	۱۳۸۸	۱۳۹۷
property	Head(m)	Head(m)	Head(m)
Mean Residual	-۰/۲۳	-۰/۳۷	-۰/۲۹
Mean Absolute Residual	۰/۷۲	۰/۶۱	۰/۶۶
Root Mean Squared Residual	۰/۸۶	۰/۷۳	۰/۸۴



شکل ۴. مدل واسنجی شده آبخوان در سال‌های (a) ۱۳۸۱، (b) ۱۳۸۸ و (c) ۱۳۹۷

شکل ۵ نیز نمودار مقایسه‌ای تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای و واسنجی شده را نشان می‌دهد. مقادیر همبستگی و ضریب رگرسیون سه دوره مورد مطالعه، حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی است. Makvandi et. al (2020) در مطالعه بررسی پایداری منابع آب در حوضه زاینده رود با استفاده از شاخص‌های پایداری و مدل GMS در آبخوان نجف‌آباد در حوضه زاینده‌رود، میزان شاخص RMSE را در شرایط ماندگار ۸۱ سانتیمتر بدست آوردند. با توجه به مقادیر جدول ۴ مقدار خطای RMSE در هر سه دوره کمتر از یک متر بدست آمده است؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت دقت شبیه‌سازی در حالت پایدار مناسب است.



شکل ۵. نمودار مقایسه‌ای تراز آب چاه‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در شرایط ماندگار در سال‌های ۱۳۸۱ (a)، ۱۳۸۸ (b) و ۱۳۹۷ (c)

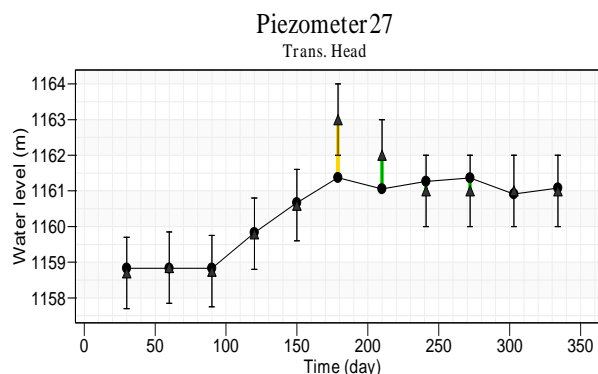
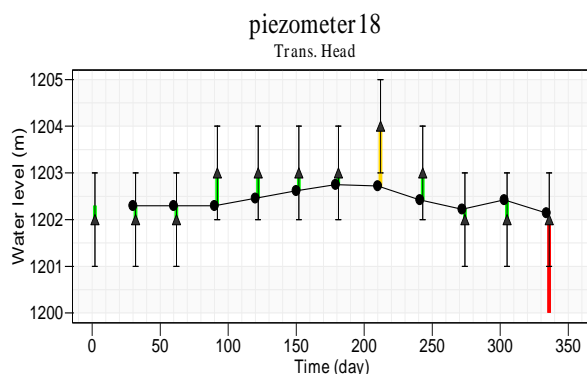
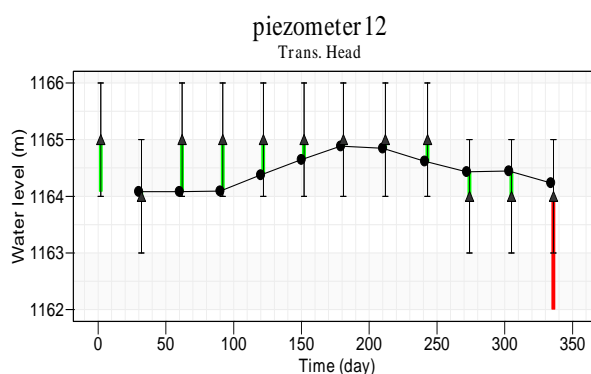
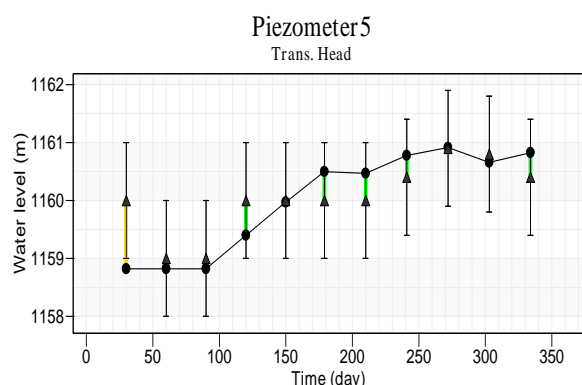
واسنجی و صحت سنجی مدل در حالت ناپایدار

واسنجی در حالت جریان ناپایدار هم با روش سعی و خطا انجام شد. در این حالت داده‌های ماهانه چاه‌های پیژومتر، بهره‌برداری، مقادیر تغذیه و شرایط مرزی از مهر سال ۱۳۸۱ تا شهریور ۱۳۸۲، مهر ۱۳۸۸ تا شهریور ۱۳۸۹ و مهر 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 محاسبه‌شده هدایت هیدرولیکی در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از بازه زمانی ماه مهر سال ۱۳۸۲ لغایت اسفند آن سال، مهر ۱۳۸۹ لغایت اسفند ۱۳۸۹ و مهر ۱۳۹۸ لغایت اسفند آن سال مدل صحت سنجی شد. جدول ۵ وضعیت شاخص‌های آماری و خطاهای تراز محاسباتی را نسبت به مشاهداتی در وضعیت ناپایدار در دو مرحله واسنجی و صحت سنجی نشان می‌دهد. مقادیر شاخص آماری RMSE در هر سه دوره در مراحل واسنجی در شرایط ناپایدار زیر یک متر بوده است. در مراحل صحت سنجی مقدار این شاخص با اندکی افزایش زیر دو متر بدست آمده است. شکل ۶ نیز سری زمانی تعدادی از پیژومترهای واسنجی شده را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از جدول ۵ و شکل ۶ می‌توان گفت دقت شبیه‌سازی در حالت ناپایدار، مناسب است. در نهایت بر اساس مدل پایدار،

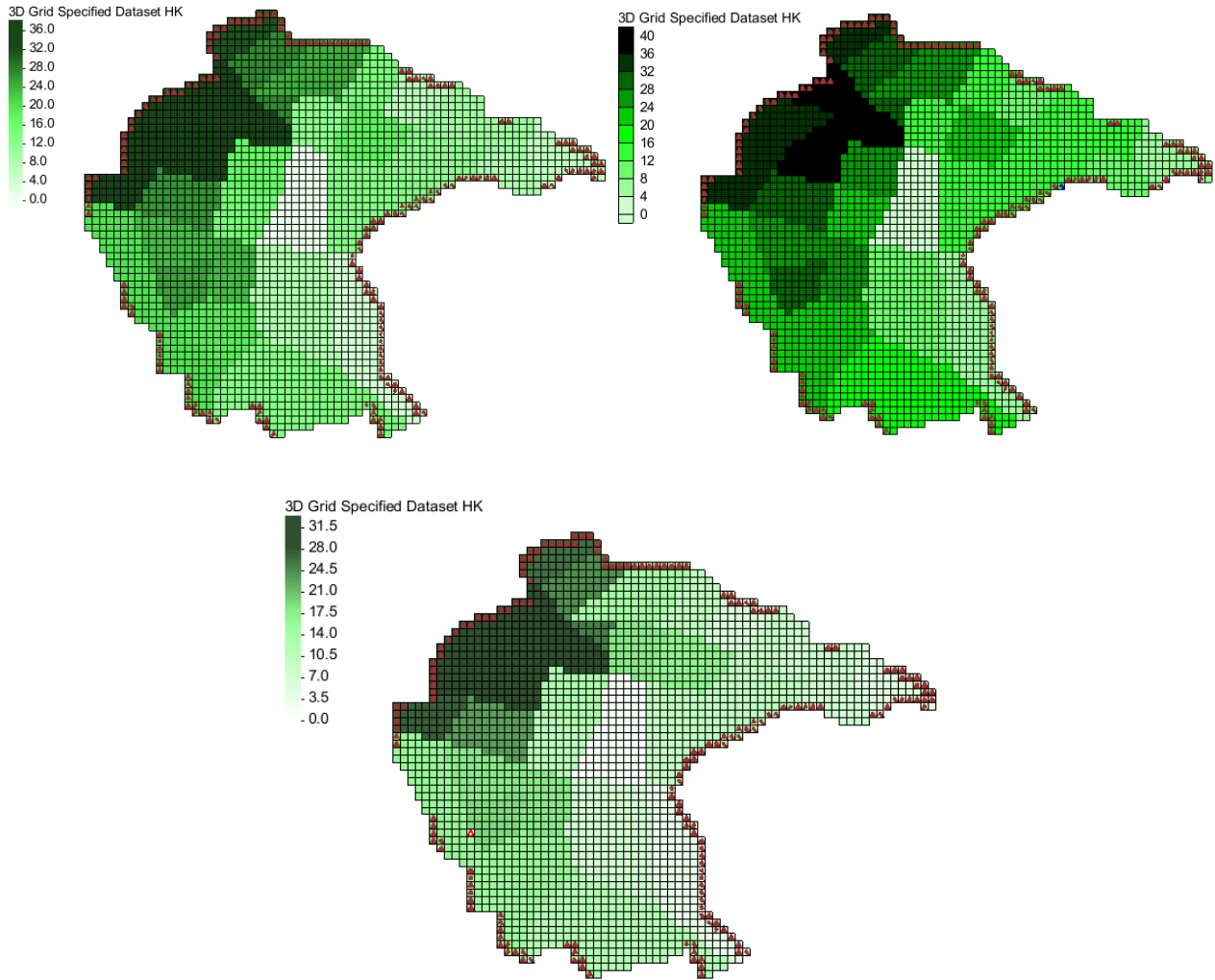
مقادیر هدایت هیدرولیکی افقی آبخوان (k) و بر اساس مدل ناپایدار مقادیر آبدهی ویژه (Sy) با توجه به وضعیت و تجمع چاه‌های بهره‌برداری و جهت جریان و شیب منطقه بدست آمده و با افت سطح ایستابی مقایسه شد (شکل‌های ۷-۱۰). طبق مقادیر بدست آمده و مقایسات انجام شده با کاهش سطح ایستابی و با گذشت زمان ضرایب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه کاهش یافته است. این در حالی است که در سال‌های آخر مطالعه، شیب کاهشی سطح ایستابی، به دلیل اقدامات انجام‌شده در طرح تعادل بخشی و تغذیه مصنوعی، کاهش یافته است. شیب کاهش هدایت هیدرولیکی نیز از ۰/۳۸ به ۰/۳۱ و شیب کاهش آبدهی ویژه از ۰/۰۱۱۷ به ۰/۰۰۷۸ کاهش یافته است. دلیل اصلی این روند کاهشی می‌تواند برگشت‌ناپذیر بودن وضعیت آبخوان را نشان دهد. چنانچه روند رو به افزایش برداشت آب زیرزمینی، همچنان ادامه یابد، خطر مرگ آبخوان بیش از پیش منطقه را تهدید خواهد کرد.

جدول ۵. وضعیت شاخص‌های آماری مدل واسنجی شده در شرایط ناپایدار

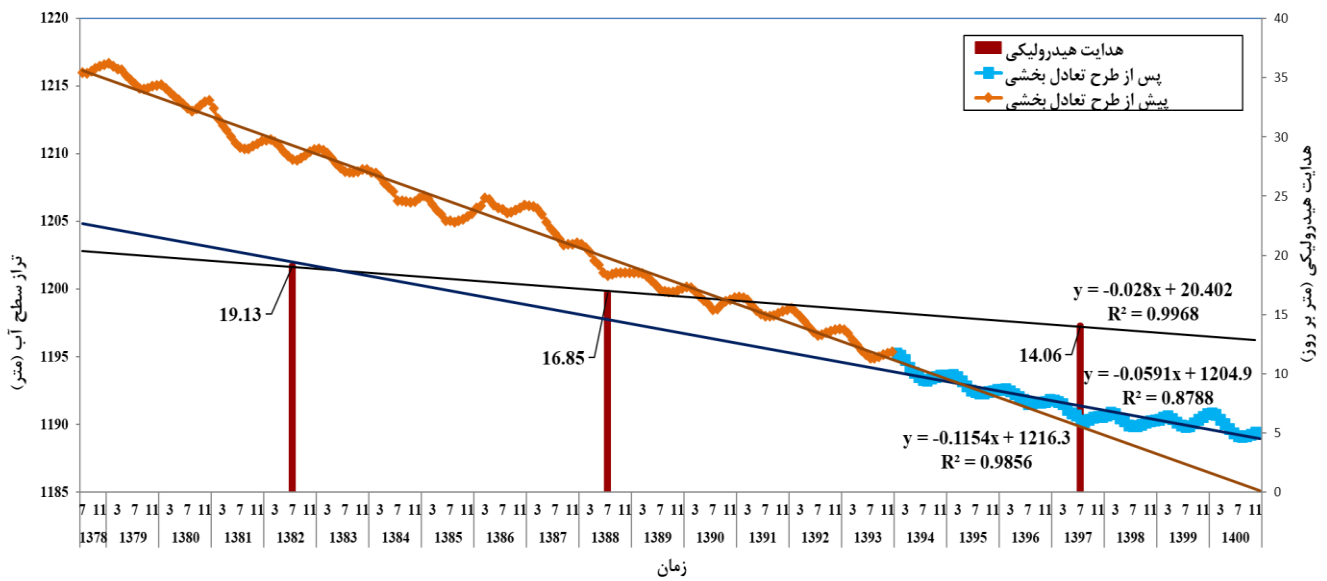
Time (year)	Property	مقادیر مرحله واسنجی (m)	مقادیر مرحله صحت سنجی (m)
1381	Mean Residual	۰/۴	۰/۶۲
	Mean Absolute Residual	۱/۰۳	۱/۲
	Root Mean Squared Residual	۱/۷	۱/۹۴
1388	Mean Residual	-۰/۱۵	-۰/۲۲
	Mean Absolute Residual	۰/۷۱	۰/۸۹
	Root Mean Squared Residual	۰/۹۳	۱/۱۲
1397	Mean Residual	۰/۱۲	-۰/۵
	Mean Absolute Residual	۰/۷۵	۱/۰۷
	Root Mean Squared Residual	۱/۰۶	۱/۶۶



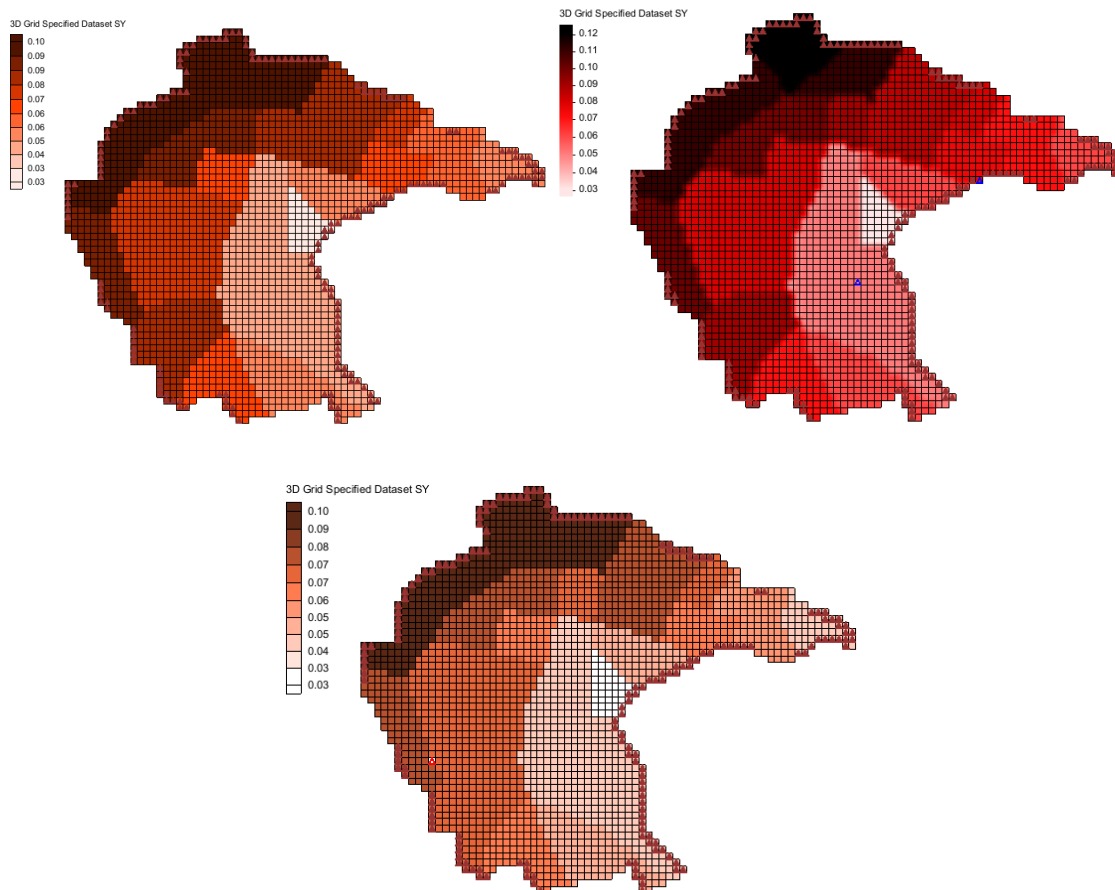
شکل ۶. سری زمانی تعدادی از پیزومترهای واسنجی شده (چاه‌هایی که کمتر از یک متر اختلاف دارند با رنگ سبز، چاه‌هایی که بین ۱ تا ۲ متر اختلاف دارند با رنگ زرد و بیشتر از ۲ متر با رنگ قرمز مشخص می‌شوند.)



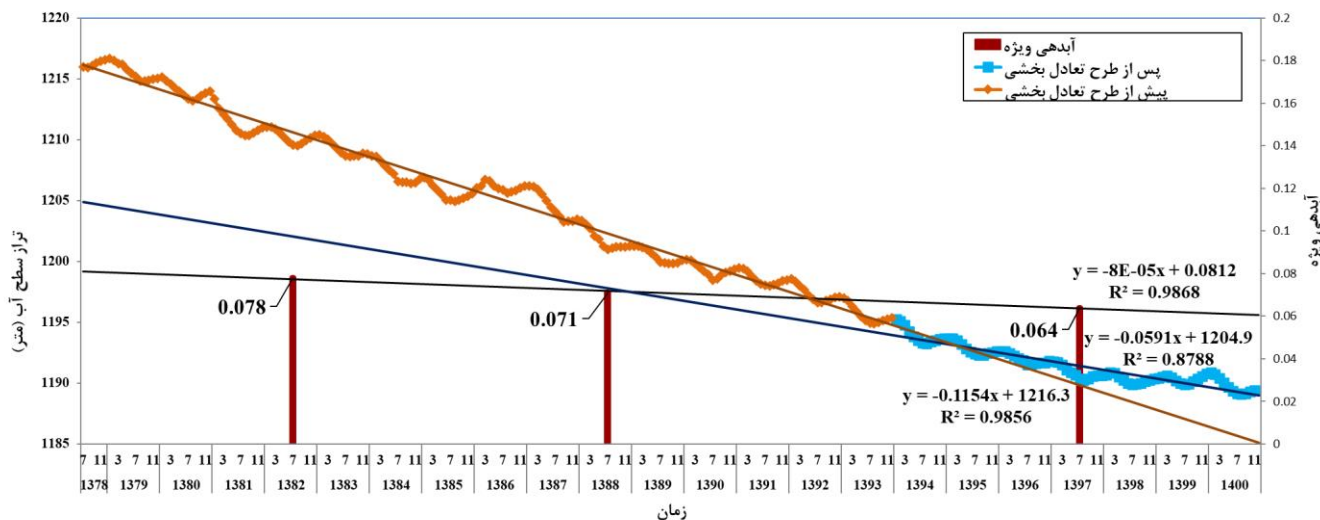
شکل ۷. نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت قزوین در سال‌های (a) ۱۳۸۱، (b) ۱۳۹۷ و (c) ۱۳۸۸



شکل ۸. نمودار مقایسه هدایت هیدرولیکی آبخوان با افت سطح ایستابی دشت قزوین



شکل ۹. نقشه آبدهی ویژه آبخوان قزوین در سال‌های (a) ۱۳۸۱، (b) ۱۳۸۸ و (c) ۱۳۹۷



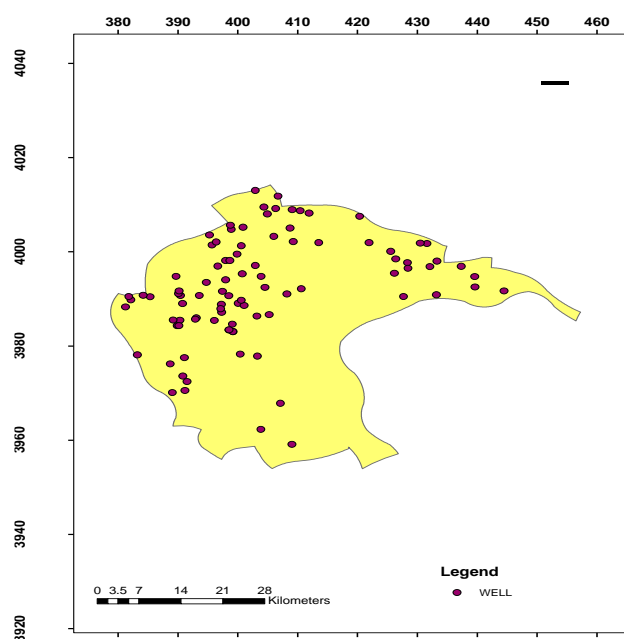
شکل ۱۰. نمودار مقایسه آبدهی ویژه آبخوان با افت سطح ایستابی دشت قزوین

بحث

در این مطالعه با استفاده از نسخه ۱۰ نرم‌افزار GMS و بسته LPF کد MODFLOW2000 وضعیت آبخوان دشت قزوین در دو حالت پایدار و ناپایدار در سه دوره آماری مربوط به سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ واسنجی و در سه دوره ۶ ماهه صحت سنجی گردید. واسنجی مدل در حالت پایدار نشان می‌دهد ریشه میانگین مربعات خطا در سه دوره سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ به ترتیب ۸۶، ۷۳ و ۸۴ سانتیمتر است؛ در حالت ناپایدار نیز این شاخص به ترتیب ۱۷۰، ۹۳ و ۱۰۶ سانتیمتر محاسبه شده است. نمودار سری زمانی

چاه‌های پیژومتر واسنجی شده در ماه‌های مختلف، نشان می‌دهد که در اکثر ماه‌ها میزان اختلاف مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده کمتر از یک متر است. لذا دقت شبیه‌سازی مدل در حالت پایدار و ناپایدار بالاست. نتایج صحت‌سنجی نیز حاکی از این است که واسنجی مدل به درستی انجام شده است. Makvandi et. al (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای که با استفاده از نرم‌افزار GMS در آبخوان نجف‌آباد انجام دادند، ریشه میانگین مربعات خطا را در شرایط ماندگار ۸۱ سانتیمتر و در شرایط غیرماندگار ۸۸ سانتیمتر بدست آوردند. Rajabi Khamseh et. al (۲۰۲۱) نیز مقدار خطای محاسبه‌شده در دوره واسنجی را در شبیه‌سازی دشت ایزه ۱/۲۳ متر گزارش نمودند. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت مدل GMS با دقت بالایی آبخوان را شبیه‌سازی می‌نماید.

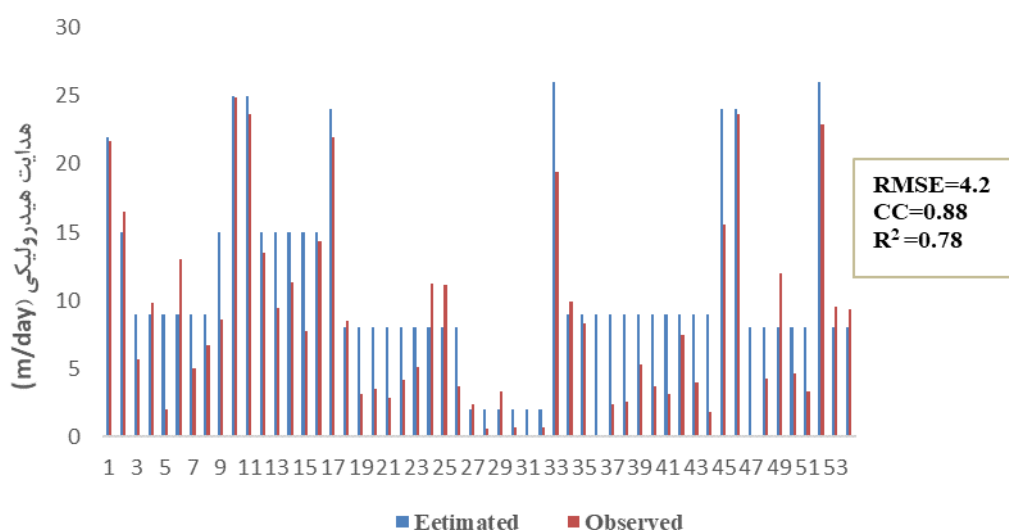
در نتیجه واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار نقشه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان در دوره‌های آماری مورد مطالعه بدست آمد. متوسط هدایت هیدرولیکی در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ به ترتیب ۱۹/۱۳ متر بر روز، ۱۶/۸۵ متر بر روز و ۱۴/۰۶ متر بر روز محاسبه شد. ارقام متوسط آبدهی ویژه آبخوان قزوین در این سال‌ها به ترتیب ۰/۰۷۸، ۰/۰۷۱ و ۰/۰۶۴ بدست آمد. طی بررسی‌های بعمل آمده از نتایج آزمایش‌های 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 ۰/۰۰۱۸ تا ۰/۱۵ بوده است. موقعیت مکانی چاه‌های مذکور در شکل ۱۱ نشان داده شده است. لازم بذکر است عددی که شرکت آب منطقه‌ای قزوین در طی سالیان گذشته در محاسبات خود به‌عنوان آبدهی ویژه استفاده می‌کنند عدد ۰/۰۶ است که در گزارش مطالعات بیلان که توسط مهندسین مشاور آبخوان در سال ۱۳۹۲ تهیه شده است نیز این رقم درج شده است.



شکل ۱۱. موقعیت مکانی چاه‌های دارای آزمایش پمپاژ

شکل ۱۲ نمودار مقایسه‌ای هدایت هیدرولیکی بدست آمده از نتایج آزمایش‌های پمپاژ تعدادی از چاه‌های آبخوان قزوین با مقادیر بدست آمده از مدل را در سال ۱۳۸۱ نشان می‌دهد. مقادیری که از مدل استخراج شده با نتایج آزمایش‌های پمپاژ، از روند نسبتاً یکسانی برخوردارند و در اکثر چاه‌ها، تقریباً نزدیک به هم می‌باشند. ریشه میانگین مربعات خطای حاصل از این مقایسه، ۴/۲ متر بر روز است. مقدار هم‌بستگی، ۰/۸۸ و ضریب رگرسیون ۰/۷۸ بدست آمده است.

نتایج حاکی از این است که دقت مدل در برآورد مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه مناسب است.



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ای هدایت هیدرولیکی حاصل از نتایج آزمون پمپاژ با مدل در سال ۱۳۸۱

با رسم هیدروگراف واحد سطح آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۷ شاهد افت سالانه سطح آب زیرزمینی در آبخوان هستیم. اما از سال ۱۳۹۴ به بعد با اقداماتی که در راستای طرح تعادل بخشی و تغذیه مصنوعی آبخوان از قبیل انسداد چاه‌های غیرمجاز و جلوگیری از اضافه برداشت چاه‌های مجاز انجام شده، شیب کاهش سطح ایستابی از ۰/۱۱۵۴ به ۰/۰۵۹۱ کاهش یافته است.

در مقایسه هیدروگراف واحد آبخوان با مقادیری که برای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در سه دوره مورد مطالعه انجام شد، مشاهده می‌شود که این ضرایب با کاهش سطح ایستابی و با گذشت زمان کاهش یافته‌اند. با کاهش شیب افت سطح آب از سال ۱۳۹۴ به بعد، شیب کاهش ضرایب هیدرودینامیک کاهش یافته اما روند رو به کاهش همچنان ادامه دارد. این مسأله می‌تواند ناشی از تخریب ساختمان خاک، از بین رفتن خلل و فرج خاک و در نتیجه تخلخل مؤثر و نشست زمین باشد. روند رو به کاهش این ضرایب، حاکی از برگشت‌ناپذیری بودن وضعیت آبخوان است. Wu et. al (۲۰۰۹) نیز اذعان نموده‌اند که با توجه به روند تحکیم خاک در طولانی‌مدت، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره ویژه با تغییر تخلخل تغییر می‌کنند. لذا لازم است قبل از اینکه آبخوان به مرحله نابودی کامل نزدیک شود، برای احیای آن چاره‌های اندیشیده شود.

نتیجه‌گیری

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی نسخه ۱۰ مدل GMS در سه دوره آماری سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۷ نشان می‌دهد که آبخوان قزوین با دقت بالایی مدل‌سازی شده است. لذا می‌توان گفت با واسنجی دقیق می‌توان از مدل GMS برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبخوان در آینده استفاده کرد. متوسط هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان مستخرج از واسنجی مدل در شرایط پایدار و ناپایدار از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۷ رو به کاهش است. با مقایسه سطح آب زیرزمینی و مقادیر ضرایب هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه می‌توان نتیجه گرفت با کاهش سطح ایستابی، این مقادیر با گذشت زمان کاهش یافته‌اند ولی به دلیل تخریب ساختمان خاک با از بین رفتن خلل و فرج و کاهش تخلخل مؤثر و نشست زمین با کاهش شیب افت سطح ایستابی در سال‌های اخیر روند کاهشی این ضرایب معادل روند کاهشی سطح آب نبوده است. این موضوع اهمیت احیاء و تعادل بخشی آبخوان را بیش از پیش مشخص می‌کند زیرا با توجه به روند شیب نزولی ضرایب هیدرودینامیک، نظریه عدم برگشت آبخوان به وضعیت قبلی تقویت می‌شود و می‌بایست تلاش نمود با اقداماتی که در راستای تعادل بخشی آبخوان انجام می‌شود حداقل وضع موجود را حفظ کرده و از مرگ آبخوان جلوگیری نمود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abareshi, F., Meftah Holghi, M., Dehghani, A. A., Kaboli, A. and Rahimian, M. (2013) Optimization of hydrodynamic coefficients of Zarin Gol plain aquifer using mathematical model. The first conference of



- practical geochemistry of Iran, 27-28 August, Damghan University, Iran, 571-576 (In Persian)
- Abedi Koupai, J. and Golabchian, M. (2015) Estimation of hydrodynamic coefficients of groundwater resources in Kouhpayeh-Segzi watershed using MODFLOW. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Science*, 19(72), 281-292. (In Persian)
- Azizian, A. and Etedali, H.R. (2018). Assessing the Accuracy of European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis Datasets for Estimation of Daily and Monthly Precipitation. 791-777. (in Persian)
- Barati, Kh., Abedi Koopaei, J., Azari, A., Darvishi, E. and Yousefi, A. (2018) Groundwater Modeling to Determine Hydrodynamic Coefficients in Unconfined Aquifer (Case Study: Kermanshah Plain). *Journal of Iran-Water and Soil Research*, 5(3), 687-700. (In Persian)
- Janbaz Fotamy, M., Kholghi, M., Abdeh Kolachi, A. and Roostaei, M. (2020) Assessment of Land Subsidence due to Groundwater Exploitation by Using Differential Radar Interferometry Technique, Case Study: Qazvin Province. *Journal of Iran-Water Resources Research*, 16(3), 133-147. (In Persian)
- 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.
- Ketabchi, H., Nikkhah, R. and Morid, S. (2018) Numerical simulation of Namdan aquifer in the Fars province of Iran: Assessment of green water management impacts on the aquifer restoration. *Journal of Iran-Water Resources Research*, Online publication (In Persian)
- Makvandi, A. Mohammadi, H. Kardovani, P. Javadi, S. and Farajzadeh Asl. M. (2020). Study of water resources stability in Zayandehrud basin using sustainability indicators and GMS model (Case study: Najafabad aquifer in Zayandehrud basin). *Irrigation Science and Engineering*. 43(3), 197-211. (in Persian)
- McDonald, M. G. and Harbaugh, A. W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *United States Government Printing Office. Washington*.
- 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. (in Persian)
- Nakhaei, M., Mohammadi, Kh. and Rezaei, H. (2014) Optimizing of aquifer withdrawal numerical model using genetic algorithm (Case study: Uromiyeh coastal aquifer). *Journal of Iran-Water Resources Research*, 10(2), 94-97. (In Persian)
- Rajabi Khamseh, K. Nilbakht Shahbazi, A. Fathian, H. and Zohrabi, N. (2021). Izeh Plain Subsidence Modeling Using MODFLOW Mathematical Code. *Iran-Water Resources Research*.16 (4), 112-126. (in Persian)
- Rasoulzadeh, A. Razavi Qala-e-Jogh, s. and Neyshabouri, M. R. (2012). Assessing the accuracy of methods for estimating saturated hydraulic conductivity for different soils. *Journal of Water Research in Agriculture*. 26(3), 303-316. (in Persian)
- Wu, J. C., Shi, X. Q., Ye, S. J., Xue, Y. Q., Zhang, Y. and Yu, J. (2009). Numerical simulation of land subsidence induced by groundwater overexploitation in Su-Xi-Chang area, China. *Environ Geol*. 57, 1409-1421.
- 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.
- Zhou, Y. and Li, W. (2011). A review of Regional Groundwater Flow Modeling. *Geoscience Frontiers* 2(2), 205-214.
- Ziaee ,A. N, and Ansari, H, (2020). Study of the effect of various methods and irrigation management on deep infiltration and groundwater recharge by numerical modeling. Research Project. *Khorasan Razavi Regional Water Company*. (in Persian)