

مدل سازی کمی آب زیرزمینی با استفاده از GMS-MODFLOW (مطالعه موردی: آبخوان شمیل در استان هرمزگان)

داود صباح نیا^۱، عدنان صادقی لاری^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

* نویسنده مسئول: adnan.sadeghilari@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

چکیده

آب زیرزمینی به عنوان یک منبع مهم تأمین آب در استان هرمزگان، به شمار می آید. منابع آب زیرزمینی این استان به دلایل برداشت بیش از حد و تغییر اقلیم در معرض آسیب قرار گرفته است؛ لذا در شرایط کنونی ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی این بخش از کشور ضروری به نظر می رسد. از این رو، مطالعه حاضر باهدف واسنجی و اعتبارسنجی یک مدل هیدرولوژیکی مناسب برای آبخوان دشت شمیل و پیش بینی تأثیر راهبردهای مدیریتی مختلف بر وضعیت این آبخوان انجام گردید. در این راستا مدل MODFLOW و نرم افزار سامانه مدل سازی آب زیرزمینی (GMS) برای توسعه یک مدل مفهومی و ارزیابی رفتار آبخوان و روندهای آینده به کار برده شد. تفاوت بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و محاسبه شده در مراحل واسنجی مدل با معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد. میزان RMSE در واسنجی مدل پایدار و ناپایدار به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۱/۴ به دست آمد که بیان کننده دقت قابل قبول مدل ساخته شده است. نتایج حاصل از واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار، حاکی از این بود که نواحی شمالی، مرکزی و جنوبی آبخوان دارای بیشترین ضریب هدایت هیدرولیکی (بین ۲۰ الی ۵۰ m/day) هستند. پیش بینی مدل از رفتار آبخوان با ادامه روند جاری در ده سال آینده حاکی از میزان افت تراز آب زیرزمینی به میزان ۰/۴ متر در هر سال بود. اجرای مدل با راهبردهای کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی برداشت آب از آبخوان، تراز آب زیرزمینی را به ترتیب ۳/۵، ۴/۵ و ۵/۵ درصد خواهد داد.

واژه های کلیدی: پیش بینی، مدل هیدرولوژیکی، واسنجی، هدایت هیدرولیکی.

مقدمه

تولید غذا بیشتر به این منبع وابسته خواهند بود (Dalin et al., 2016). در بیشتر کشورهای واقع شده در غرب آسیا، تامین آب مزارع تحت آبیاری از طریق بهره برداری از چاه های حفره شده در آبخوان های بزرگ صورت می پذیرد (Dangar and Mishra, 2021; Mainuddin et al., 2020; Mojidi et al., 2021). اگرچه این آبخوان ها از بازدهی بالا برخوردار هستند، اما به دلیل برداشت بیش از اندازه، بهره برداری پایدار از این ذخایر تجدیدپذیر را در معرض خطر قرار داده است (Mukherjee, 2018).

آب زیرزمینی به عنوان یک منبع حیاتی آب برای بسیاری از مردم در سراسر جهان به حساب می آید که از آن برای آبیاری و مصارف آشامیدنی استفاده می کنند، از این رو تقاضا برای آب های زیرزمینی در بسیاری از مناطق افزایش یافته است (Janardhanan et al., 2023; Jasechko and Perrone, 2021). از طرفی تغییر چرخه آب ناشی از تغییر اقلیم، دسترسی به آب سطحی قابل پیش بینی و قابل اتکاء را کاهش داده است (Kirby et al., 2015). بیشتر آب های زیرزمینی در جهان برای کشت و زرع استفاده می شود و مردم در آینده برای

پیش‌بینی نمود. این محققین پیشنهاد نمودند برای جلوگیری از تخریب بسستر منابع آب زیرزمینی اجرای همزمان چندین راهبرد علمی و مدیریتی الزامی می‌باشد (Reyhani et al., 2023).

Khaledi Alamdari et al., (2022) با استفاده از مدل عددی MODFLOW و رابط کاربری GMS آبخوان دشت شبستر را با هدف تخمین ضرایب هیدرودینامیک آبخوان شبیه‌سازی نمودند. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی نشان‌دهنده تغییر-پذیری زیاد مکانی ضرایب هیدرودینامیک در آبخوان‌های نا-همگن بود. این محققین تنوع زیاد ضرایب هیدرودینامیک را به وجود آبرفت‌هایی با منشأ سازندهای زمین‌شناسی مختلف نسبت دادند (Khaledi Alamdari et al., 2022).

Nakhaei et al., (2022) پیامدهای حاصل از بهره‌برداری بی-رویه از آبخوان دشت زرنده واقع در استان مرکزی را با کد MODFLOW و رابط کاربری GMS مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پیش‌بینی این محققین نشان داد که وضعیت آبخوان در سال‌های آتی با ادامه روند جاری برداشت از آب زیرزمینی، منجر به کاهش محسوس تراز آب زیرزمینی در قسمت‌های مرکزی و غرب آبخوان و افزایش میزان فرونشست در این بخش‌ها خواهد شد. آنان پیشنهاد نمودند در راستای بهبود وضعیت آبخوان راهکارهای مدیریتی شامل کاهش میزان برداشت آب، اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی، تغییر الگوی کشت و افزایش راندمان آبیاری با به‌کارگیری سامانه‌های نوین آبیاری در دستور کار متخصصین و ذی‌نفعان منابع آب زیرزمینی قرار گیرد (Nakhaei et al., 2022).

ارزیابی آب‌های زیرزمینی در سطح جهان نشان می‌دهد که ایران بالاترین نرخ تخلیه آب زیرزمینی را در بین کشورها دارد (Noori et al., 2021). بر اساس برنامه ملی سازگاری با کم‌آبی، که توسط کارگروه ملی سازگاری با کم‌آبی گردآوری و تدوین شده است، تعدادی از سفره‌های زیرزمینی ایران تا سال ۲۰۵۰ قابل تجدید نیستند و بیش از شصت درصد آن‌ها در استان‌های هرمزگان، فارس، کرمان، یزد و خراسان جنوبی واقع شده‌اند (National Water Scarcity Adaptation Working Group, 2021). در حال حاضر از مجموع ۶۰۹ دشت ایران، ۳۹۴ دشت (۶۵ درصد) جزء دشت‌های ممنوعه است که دولت اجازه حفر چاه‌های جدید را نمی‌دهد. دشت شمیل، واقع شده در استان

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نظیر ایران، آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع طبیعی تأمین آب جهت مصارف کشاورزی و شرب به شمار می‌آید (Malmir et al., 2021; Neshat et al., 2014; Quitaneg, 2021a). از طرفی افزایش تقاضا برای تأمین این ماده حیاتی در بخش‌های مختلف و کاهش منابع آب سطحی منجر به خسارات سنگینی به آبخوان‌های ایران در چند دهه اخیر گردیده است (Javadi et al., 2015; Lalehzari and Tabatabaei, 2015). قیمت پایین و دسترسی آسان آب نیز باعث برداشت بیش از حد از آب زیرسطحی در کشورهای در حال توسعه شده است (Thangarajan, 2007). به‌منظور بهبود شرایط پیچیده مخازن آب‌های زیرزمینی، بررسی جامع و استفاده از روش‌های پیشرفته جهت درک پاسخ سامانه آب زیرزمینی به تنش‌های انسانی و محیطی و برنامه‌ریزی جهت استفاده پایدار از این منابع بسیار ضروری می‌باشد (Jabbari et al., 2020; Jalut et al., 2018). در این راستا، ساخت و واسنجی^۱ یک مدل جریان آب زیرزمینی به کارشناسان و متخصصان منابع آب کمک می‌کند تا رفتار این‌گونه سامانه‌ها را در آینده پیش‌بینی و بهینه نمایند (Praveena et al., 2010). مدل‌های هیدرولوژیکی آب زیرزمینی شکل قابل فهمی از سیستم یک آبخوان واقعی بوده، که مسائل آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کند. در میان مدل‌های موجود، MODFLOW (McDonald et al., 1984) به عنوان یک شبیه‌ساز سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی متداول بوده و به‌طور گسترده در بسیاری از مطالعات منطقه‌ای استفاده شده است (Chepkemoui et al., 2023; Deb et al., 2019; Harbaugh, 2005; Harbaugh et al., 2000; Jafari et al., 2016; Jafari et al., 2021; Janardhanan et al., 2023; Lyazidi et al., 2020a; Lyazidi et al., 2020b).

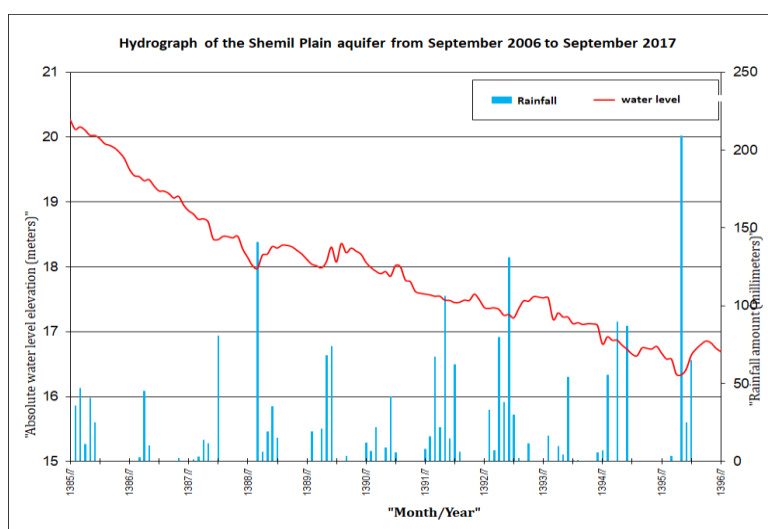
Reyhani et al., (2023) اقدام به مدل‌سازی آبخوان کاشان با کد MODFLOW نمودند و سپس وضعیت آبخوان با راهبرد-های مدیریتی مختلف را بررسی نمودند. واسنجی و صحت-سنجی^۲ مدل MODFLOW حاکی از دقت مناسب آن برای اجرای آن تحت راهبردهای مختلف مدیریتی بود. اجرای مدل با راهبرد خاموشی چاه‌ها به مدت یک ماه در آبخوان مذکور، افزایش حجم ذخیره آبخوان به میزان ۰/۰۱۴۷ MCM را

² Verification

¹ Calibration

مدیریت شده منجر به کاهش قابل توجه عمق سطح ایستابی گردیده است. هیدروگراف واحد آبخوان دشت شمیل (شکل ۱) نشان داد که تراز آب زیرزمینی به طور مداوم در طول ۱۲ سال (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶) به میزان حدوداً ۴ متر کاهش یافته است (شکل ۱) که اکنون نیز به دلیل خشکسالی شدید و برداشت‌های بیش از حد با نرخ بسیار بالاتری روبه‌کاهش است. بنابراین با توجه به اهمیت بالای دشت شمیل در تأمین آب بخش‌های مختلف، عدم وجود مدل شبیه‌سازی مناسب و وجود داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل MODFLOW، آبخوان این دشت برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد.

هرمزگان. نیز به دلیل کاهش زیاد در تراز سطح ایستابی در زمزه‌ی دشت‌های ممنوعه طبقه‌بندی شده است. در چنین دشت‌هایی، احتمال فرونشست زمین و ایجاد فروچاله‌ها بسیار محتمل بوده، که می‌تواند منجر به تخریب زیرساخت‌های حیاتی شود (Motagh et al., 2017; Noori et al., 2021). همچنین مجاورت این منطقه با دریا و بهره‌برداری بیش از حد می‌تواند احتمال نفوذ آب شور به این سفره را افزایش دهد. در شمال شرقی دشت دو سد نیان و شمیل در کنار یکدیگر در سال ۱۳۹۰ به منظور تغذیه آب زیرزمینی آبخوان دشت مذکور احداث شده است. با این حال، برداشت‌های بی‌رویه و غیر



شکل ۱- هیدروگراف معرف آبخوان دشت شمیل طی سال‌های ۱۳۹۶ - ۱۳۸۵، (Iran Water Resources Management Company, 2015).

Figure 1- Unit Hydrograph of Shamil Palin during 2006 – 2017 years (Iran Water Resources Management Company, 2015).

دشت شمیل در استان هرمزگان، جنوب ایران، واقع شده است. حوضه آبریز و مساحت آبخوان آن به ترتیب ۴۰۵۳/۳۰ و ۲۸۵/۵۲ km² است. متوسط بارندگی و تبخیر این ناحیه به ترتیب ۲۲۰ mm و ۲۶۱۶ mm است. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از سمت شمال شرقی به سمت نواحی مرکزی و سپس به سمت نواحی جنوبی دشت در جریان بوده و از توپوگرافی سطحی تبعیت می‌نماید. نوع آبخوان شمیل آزاد بوده و مهم‌ترین جریان‌های ورودی آب زیرزمینی شامل نفوذ از بارندگی، تغذیه زیرزمینی، آب برگشتی کشاورزی و

هدف از این مطالعه واسنجی، تحلیل حساسیت^۳ و اعتبار-سنجی^۴ مدل MODFLOW در محیط نرم‌افزاری سامانه مدل‌سازی آب زیرزمینی^۵ (GMS) است. پیش‌بینی وضعیت تراز آب زیرزمینی در صورت ادامه روند برداشت آب فعلی و با راهبردهای مدیریتی مختلف نیز از دیگر اهداف این پژوهش هستند.

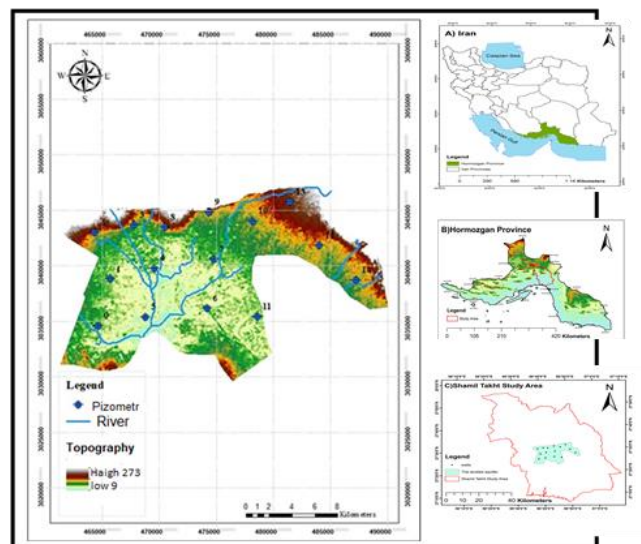
مواد و روش‌ها معرفی منطقه مورد مطالعه

⁵ Groundwater Modeling System

³ Sensitivity Analysis

⁴ Validation

همچنین تغذیه توسط سدهای شمال و نیان، واقع شده در مجاورت مرز شمال شرقی دشت است. با اهمیت‌ترین جریان خروجی آب زیرزمینی در این ناحیه برداشت از چاه‌های بهره‌برداری است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، موقعیت چاه‌های مشاهداتی، رودخانه‌های موجود و توپوگرافی دشت نشان داده شده است.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (Iran Water Resources Management Company, 2015).
Figure 2- Location of study area (Iran Water Resources Management Company, 2015).

جمع‌آوری داده

هم‌چنین جهت استخراج داده‌های ارتفاعی سطح زمین در منطقه مورد مطالعه از نقشه DEM استفاده گردید و پس از پردازش وارد مدل MODFLOW گردید.

تهیه مدل مفهومی آبخوان دشت شلیل

مدل مفهومی سه‌بعدی آبخوان به‌منظور ساده‌تر نمودن پیچیدگی‌های واقعی آبخوان، درک بهتر شرایط ناحیه مورد مطالعه و نمایش مشخصه‌های هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی لایه آبدار ایجاد می‌گردد. در واقع هدف از تشکیل مدل مفهومی آماده‌سازی و ادغام رقوم ارتفاعی سطح زمین به همراه واحدهای چینه‌شناسی حاصل از چاه‌های گمانه است (Quitaneq, 2021b). در این مطالعه از رابط کاربری GIS جهت ساخت مدل مفهومی و درون‌یابی داده‌ها استفاده گردید. در مدل مفهومی بایستی شکل هندسی و شرایط مرزی آبخوان و عوامل مؤثر بر تراز آب زیرزمینی مشخص شود. از این‌رو لایه تراز سنگ کف به عنوان مرز تحتانی آبخوان شلیل و داده‌های

بهبود مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مستلزم در دسترس بودن اطلاعات فیزیکی و هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه است. این عوامل شامل داده‌های اقلیمی (بارش)، ضخامت لایه آبدار، میزان تخلیه و تغذیه آب زیرزمینی، ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان (هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه آبخوان)، تراز آب زیرزمینی مشاهداتی، سامانه آبخوان، تشکیلات زمین‌شناسی، نقشه توپوگرافی، نقشه سنگ کف، پوشش و کاربری اراضی، جنس خاک، شرایط مرزی، روش‌های آبیاری و سامانه‌های زهکشی است (Lyazidi et al., 2019; Lyazidi et al., 2020b). در راستای مدل‌سازی آبخوان دشت شلیل، ابتدا داده‌های جمع‌آوری شده از منابع مختلف در یک سیستم مختصات مکانی جهانی UTM^۶ در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی^۷ (GIS) پردازش و سازماندهی گردید، سپس با ایجاد لایه‌ی مربوط به هر پارامتر، به مدل MODFLOW از طریق رابط کاربری GMS 7.1 معرفی گردید.

⁷ Geographic Information System

⁶ Universal Transverse Mercator

در رابطه بالا S_y ضریب آبدهی ویژه، K_x ، K_y و K_z هدایت هیدرولیکی در راستای محورهای x ، y و z ، h بار هیدرولیکی در هر نقطه از آبخوان و t زمان است.

شرایط مرزی

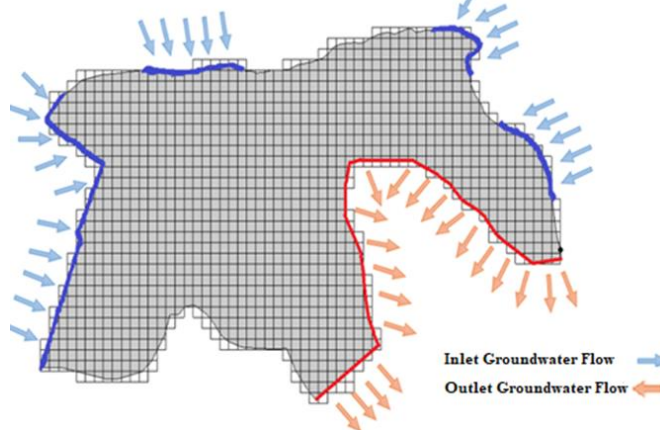
باتوجه به اینکه مرزها الگوی جریان را تا حد زیادی کنترل می‌کنند، لذا انتخاب مناسب شرایط مرزی یکی از مراحل بسیار مهم در ساخت مدل است. مدل باتوجه به اختلاف تراز آب زیرزمینی در مرزها و سلول‌های اطراف شبکه آن و قابلیت انتقال آبخوان در مرزها، مقدار جریان ورودی و خروجی از مرزها را محاسبه می‌نماید. از این رو جهت تعیین مقاطع تغذیه و تخلیه در مرزها، با استفاده از میانگین طولانی مدت داده‌های مشاهداتی تراز آب زیرزمینی نقشه خطوط هم‌پتانسیل تهیه و سپس با استفاده از آن جریان‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی در مرزها استخراج و به صورت بار کلی^۸ و مرز تراوا در قلمرو مدل مفهومی آبخوان مورد مطالعه فعال گردید. باتوجه به شکل ۳ سرتاسر مرز غربی آبخوان و قسمت‌های از شمال، شمال شرقی و شرق آبخوان جریان آب زیرزمینی وارد آبخوان دشت شمیل می‌گردد و از بخش‌هایی از جنوب و جنوب شرقی خارج می‌شود. شرایط مرزی فیزیکی یا هیدرولوژیکی مشخصی در قلمروهای دیگر مدل وجود نداشت، لذا این مرزها بدون جریان (ناتراوا) در نظر گرفته شد.

ارتفاعی DEM، به عنوان مرز فوقانی آن در نظر گرفته شد. ابعاد سلول‌های شبکه نیز 500×500 متر، برای محدوده مورد مطالعه منظور گردید. پارامترهایی نظیر تخلیه، تغذیه، هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره آبخوان و تراز آب زیرزمینی مشاهداتی به عنوان لایه‌های ورودی به مدل و انجام عملیات شبیه‌سازی آبخوان دشت شمیل به کار گرفته شد.

مدل‌سازی ریاضی

مدل مفهومی به عنوان پایه و اساس مدل‌های ریاضی محسوب می‌شود. در یک مدل ریاضی ضروری است معادلات حاکم بر جریان، شرایط مرزی و اولیه برای یک منطقه معلوم مشخص شود (Anderson et al., 1992). کد MODFLOW معادلات جریان آب زیرزمینی را با روش عددی تفاضل محدود مرکز شبکه و بر اساس بسط سری تیلور مدل‌سازی می‌نماید. معادله کلی جریان آب زیرزمینی در آبخوان آزاد به نام معادله بوسینسک یا دوپوئی – فورشه‌ایمر (Kashef A, 1986) مشهور است. این معادله یک معادله دیفرانسیل جزئی غیر خطی است که از ادغام معادله دارسی و معادله پیوستگی جریان حاصل شده و شکل کلی آن در یک آبخوان ناهمگن و ناهمسان در شرایط جریان غیر ماندگار (ناپایدار) به صورت معادله ۱ می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_x h \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_y h \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (K_z h \frac{\partial h}{\partial z}) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$



شکل ۳- جریان ورودی و خروجی آب زیرزمینی در مرز آبخوان.

Figure 3- Inflow and outflow of groundwater in aquifer boundary.

باتوجه به اینکه بخش اعظم تغذیه آب زیرزمینی در دشت شمیل ناشی از نفوذ مستقیم و غیرمستقیم باران است؛ لذا با

معرفی پارامترهای ورودی به مدل MODFLOW

تغذیه و تخلیه

⁸ General head

مدل وارد شد. سپس در مرحله واسنجی ناپایدار مدل، مقادیر آن در نواحی مختلف آبخوان بهینه گردید.

هر یک از لایه‌های موضوعی، ایجاد شده در محیط GIS، ابتدا در محیط GMS فراخوانی شد. سپس به پوشش‌های ایجاد شده در زیر مجموعه مدل مفهومی تبدیل گردید. پوشش‌ها شامل مرز آبخوان، هدایت هیدرولیکی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان، دبی چاه‌های بهره‌برداری، نرخ تغذیه آبخوان و تراز سطح آب زیرزمینی مشاهداتی بودند.

جهت افزودن اطلاعات درون پوشش‌ها به سلول‌های شبکه، مدل مفهومی به مدل معرفی گردید (Aquaveo, 2019). شبکه MODFLOW با سلول‌هایی با طول و عرض یکسان ۵۰۰×۵۰۰ متر با در نظر گرفتن یک لایه عمودی ساخته شد. سپس رقوم سطح زمین به عنوان مرز بالایی مدل و رقوم تراز سنگ کف به عنوان مرز پایینی به درون این شبکه‌ها معرفی گردید. بعد از معرفی پوشش‌ها و ورود اطلاعات لازم به مدل، مدل در حالت پایدار اجرا گردید. به دلیل اختلاف زیاد تراز سطح آب زیرزمینی محاسباتی و مشاهداتی، مدل در اولین اجرا واسنجی نگردید. لذا در گام بعدی واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار انجام گردید.

واسنجی، تحلیل حساسیت و صحت‌سنجی مدل

واسنجی عبارت است از تنظیم و تعدیل پارامترهای ورودی مدل، به‌طوری‌که اختلاف تراز آب زیرزمینی محاسباتی توسط آن با مقادیر اندازه‌گیری شده صحرائی کمینه گردد. فرایند تخمین پارامتر با استفاده از یک برنامه واسنجی به نام برآورد پارامتر^۹ (PEST) انجام شد (Doherty, 2020). دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدی ویژه در طول مرحله واسنجی در دو حالت پایدار و ناپایدار تخمین زده شد. واسنجی مدل در شرایط پایدار بر اساس داده‌های تراز آب زیرزمینی مشاهداتی در مهرماه سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۵ به انجام رسید. مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی واسنجی شده و تراز سطح ایستابی محاسباتی در این مرحله، مبنای شبیه‌سازی واسنجی در شرایط ناپایدار قرار گرفت. به‌منظور اجرای مدل در شرایط ناپایدار، از آمار تراز سطح آب زیرزمینی در یک دوره زمانی طولانی مدت یازده‌ساله (از مهرماه سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۵ الی

فرض تغذیه یکنواخت منطقه مورد مطالعه ۲۰ درصد متوسط بارندگی سالیانه به‌عنوان منبع تغذیه در نظر گرفته شد (Iran Water Resources Management Company, 2015). متوسط بارش سالیانه دشت شمیل ۲۲۰ mm است. بنابراین، میزان تغذیه آن ۴۴ mm در سال، معادل ۰/۰۰۱۲ m/day، محاسبه گردید. مقدار به دست آمده به عنوان نرخ اولیه تغذیه وارد مدل مفهومی برای واسنجی در حالت پایدار گردید. منابع تخلیه آبخوان شمیل فقط شامل چاه‌های بهره‌برداری است. بدین منظور از مقادیر مربوط به دبی چاه‌های بهره‌برداری منطقه در راستای محاسبه میزان تخلیه هر چاه بر حسب m³/day استفاده گردید و برای واسنجی در شرایط پایدار و ناپایدار وارد مدل گردید.

هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدی ویژه آبخوان

جهت ایجاد نقشه ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع آبخوان در نواحی مختلف، ابتدا بین مقادیر ضریب انتقال-پذیری، اندازه‌گیری شده با آزمایش پمپاژ در نقاط مختلف آبخوان، در محیط GIS میان‌یابی گردید و نقشه ضریب انتقال‌پذیری ترسیم گردید. سپس با کسر لایه تراز آب زیرزمینی، حاصل شده از میانگین بلندمدت تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در چاه‌های مشاهداتی، از لایه تراز سنگ کف در محیط GIS نقشه ضخامت لایه اشباع تولید گردید. سپس با استفاده از معادله ۲ لایه هدایت هیدرولیکی اشباع آبخوان به مدل مفهومی معرفی گردید. این پارامتر در حین واسنجی و صحت‌سنجی مدل در دامنه مجاز خود برای به‌دست‌آوردن مناسب‌ترین انطباق بین داده‌های تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل، تغییر یافت.

$$T=K \times B \quad (2)$$

در این معادله T ، K و B به ترتیب قابلیت انتقال‌پذیری محیط متخلخل (m²/day)، هدایت هیدرولیکی اشباع (m/day) و ضخامت لایه اشباع (m) است

یکی از مهم‌ترین پارامترهای واسنجی شده در حالت ناپایدار، آبدی ویژه است. دامنه مقادیر این پارامتر با استفاده از لوگ چاه‌های مشاهده‌ای و لیتولوژی آبخوان تخمین زده شد و به

⁹ Parameter estimation

در این مطالعه جهت پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان، با فرض ادامه روند جاری، یک دوره زمانی ۱۰ ساله به مدل معرفی و با در نظر گرفتن شرایط بهره‌برداری فعلی و الگوی تغذیه گذشته مدل اجرا گردید، لذا مهرماه سال آبی ۹۷-۹۸ به عنوان ابتدای دوره پیش‌بینی و انتهای آن شهریورماه سال آبی ۱۴۰۶-۱۴۰۷ در نظر گرفته شد. مدل حالت ناپایدار جریان آب زیرزمینی واسنجی و اعتبارسنجی شده برای بررسی نحوه پاسخگویی سیستم جریان آب زیرزمینی به تغییرات مدیریت آب زیرزمینی و شرایط هیدرولوژیکی در آبخوان دشت شمیل مورد استفاده قرار گرفت. باتوجه به ممنوعه بودن دشت مورد مطالعه، هدف اصلی از اجرای مدل با راهبردهای مدیریتی پیشنهادی، کاهش میزان افت تراز آب زیرزمینی و کمک به تعادل بخشی آبخوان دشت است؛ لذا در راستای نیل به این هدف، راهبرد تعدیل میزان برداشت آب از چاه‌های موجود به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با در نظر گرفتن الگوی تغذیه گذشته به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

واسنجی مدل MODFLOW در محیط کاربری GMS

واسنجی حالت پایدار

در شبیه‌سازی حالت پایدار، تغییرات تراز آب زیرزمینی نسبت به زمان در نظر گرفته نمی‌شود و لذا بدون منظور نمودن شرایط اولیه، تغییرات آن نسبت به مکان و با شرایط مرزی ثابت شبیه‌سازی گردید. شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی محاسباتی را در حالت پایدار نشان می‌دهد. در این شکل هدف واسنجی در قالب میزان اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی محاسباتی و مشاهده شده در مجاورت هر یک از چاهک‌های مشاهداتی ترسیم شده است. در واقع نوار رنگی نشان‌دهنده خطا است که از این طریق می‌توان به وضعیت واسنجی پس از هر بار اجرای مدل پی برد. اگر اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای به طور کامل در داخل هدف قرار گیرد (بازه تعیین شده)، نوار به رنگ سبز نشان داده می‌شود. در صورتی که نوار خارج از هدف باشد، اما خطا کمتر از ۲۰۰ درصد و یا بیشتر از ۲۰۰ درصد

شهریورماه سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۵)، شامل ۱۳۲ دوره تنش و گام زمانی ماهانه، استفاده گردید. طی واسنجی مدل در حالت ناپایدار، ضریب آبدهی ویژه بهینه شد. پس از واسنجی مدل در حالت پایدار و ناپایدار، تحلیل حساسیت مدل انجام گردید. هدف از تحلیل حساسیت یافتن مؤثرترین پارامتر بر پیش‌بینی رفتار سامانه آبخوان است. از این رو در شرایط پایدار پارامترهای ضریب هدایت هیدرولیکی (K)، ضریب آبگذری مرزها (C) و میزان پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری (Q) و در شرایط ناپایدار علاوه بر این پارامترها، مقادیر آبدهی ویژه (Sy) نیز به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش و سپس افزایش داده شد و برای هر یک از این حالات، مدل اجرا و حساسیت هر یک از آن‌ها با معیار جذر میانگین مربعات خطا^{۱۰} (RMSE) سنجیده شد. در واقع خطای ایجاد شده نشانگر تفاوت میزان تراز سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده قبل و بعد از افزایش یا کاهش پارامتر مورد نظر است.

بعد از انجام عملیات واسنجی و تحلیل حساسیت مدل در حالت ناپایدار، اقدام به صحت‌سنجی آن گردید. صحت‌سنجی بررسی قابلیت یک مدل برای پیش‌بینی با استفاده از داده‌های مستقل از داده‌های استفاده شده در مرحله واسنجی است. طی انجام این فرایند، تراز سطح آب زیرزمینی در یک دوره یک‌ساله از مهرماه سال آبی ۹۷-۹۶ الی شهریورماه سال آبی ۹۷-۹۶ شامل دوازده دوره تنش با گام زمانی ماهانه و مقادیر تخلیه و تغذیه مربوط به هر ماه نیز به مدل وارد و در نهایت مدل اجرا گردید.

میزان خطا بین مقادیر تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و محاسباتی در تمامی مراحل اجرای مدل، با معیار آماری RMSE مورد ارزیابی قرار گرفت (معادله ۳). پس از انجام مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، مدل برای استفاده در پیش‌بینی وقایع آتی آماده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (M-C)^2}{N}} \quad (3)$$

که در این معادله M: مقادیر مشاهداتی، C: مقادیر محاسباتی و N: تعداد چاه‌های مشاهداتی است.

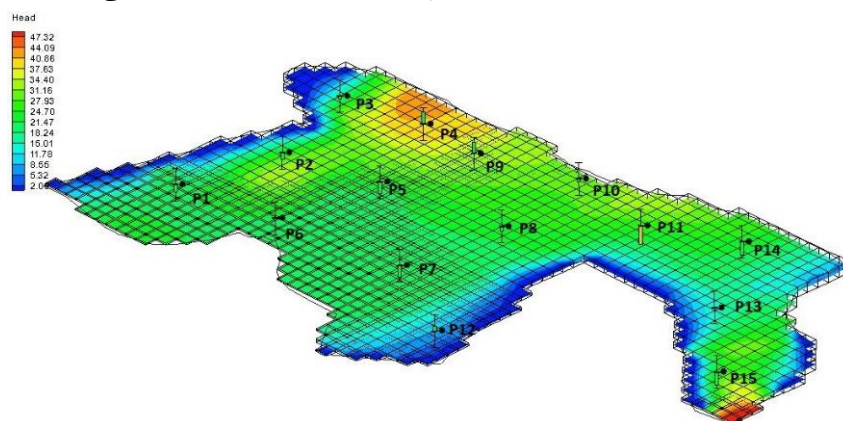
پیش‌بینی وضعیت آینده و اجرای سناریوهای مدیریتی آبخوان

¹⁰ Root mean square error

در مرحله اول واسنجی است. در نتیجه پارامتر هدایت هیدرولیکی محاسباتی در مرحله واسنجی منعکس‌کننده شرایط واقعی سامانه آبخوان بوده و کاربرد آن در مراحل بعدی شبیه‌سازی با مدل مورد تأیید است.

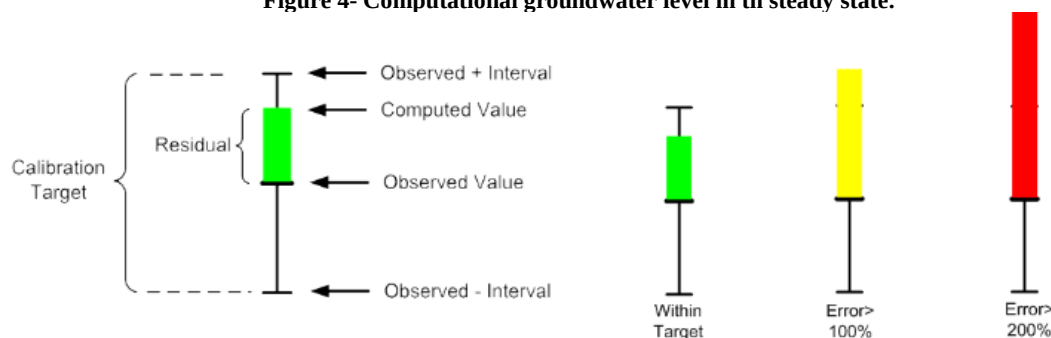
نقشه پهنه‌بندی ضریب هدایت هیدرولیکی واسنجی شده نیز در شکل ۶ ارائه گردیده است. با توجه به این نقشه نواحی شمالی، مرکزی و جنوبی آبخوان از هدایت هیدرولیکی بالایی برخوردار می‌باشد (بین ۲۰ الی ۵۰ m/day)، که دلیل این امر وجود رسوبات درشت دانه و نفوذپذیر در این بخش‌ها می‌باشد. بخش‌های غربی، شرقی، شمال غرب، شمال شرق، جنوب شرقی و جنوب غربی آبخوان از میزان این ضریب به شدت کاسته می‌شود، که نشان دهنده تجمع رسوبات ریزدانه‌تر در پایین دست ناحیه مورد مطالعه می‌باشد.

باشد، نوار به ترتیب به رنگ زرد و قرمز ظاهر می‌شود (شکل ۵). از این‌رو رنگ‌های سبز هدف واسنجی در اکثریت چاه‌های مشاهداتی در شکل ۴ حاکی از تطابق بسیار خوب بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و محاسباتی است. اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهده شده را می‌توان به مدل واسنجی شده نسبت داد که منجر به حداقل خطا در طول اجرای مدل شد. خطاهای موجود احتمالاً ناشی از شرایط مرزی و عدم قطعیت داده‌های ورودی به مدل است. معیار RMSE برای تعیین توازن بهینه بین تراز آب زیرزمینی مشاهده شده و محاسباتی استفاده شد. هدف واسنجی تراز آب زیرزمینی مشاهداتی $m \pm 1/5$ در نظر گرفته شد؛ بنابراین RMSE کمتر از $1/5$ به عنوان خطای مجاز در نظر گرفته شد. معیار خطای RMSE، برابر با $1/2$ که توسط مدل محاسبه شد، نیز مؤید دقت مناسب مدل



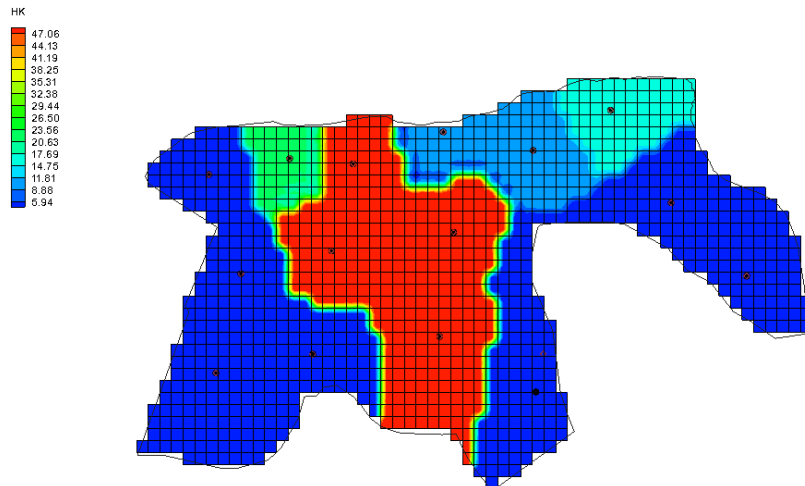
شکل ۴- تراز آب زیرزمینی محاسباتی در حالت پایدار.

Figure 4- Computational groundwater level in the steady state.



شکل ۵- هدف واسنجی و نوارهای خطای هدف مشاهداتی.

Figure 5- Calibration target and observation target error bars.



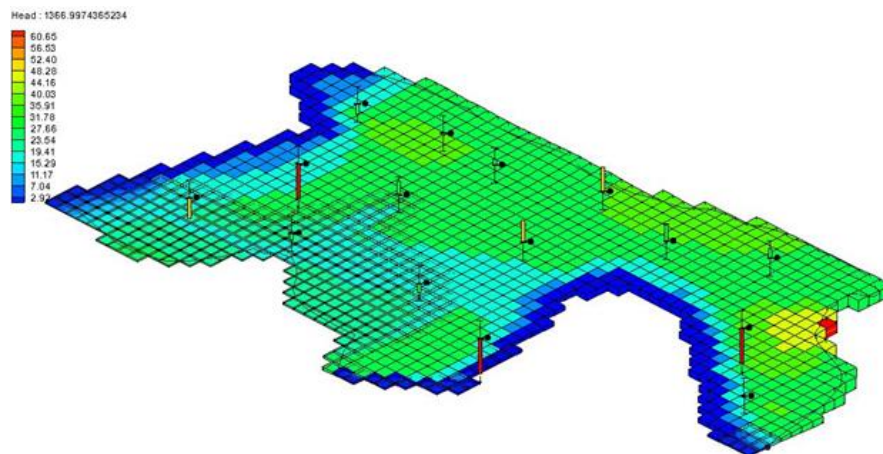
شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی ضریب هدایت هیدرولیکی.

Figure 6- Zoning map of hydraulic conductivity coefficient.

واسنجی حالت ناپایدار

مدل‌سازی آبخوان به شرایط طبیعی نزدیک‌تر می‌شود. تراز آب زیرزمینی تخمین زده شده توسط مدل به‌عنوان نمونه در اواسط دوره تنش (گام میانی شصت و ششم) در شکل ۷ ارائه گردیده است. رنگ سبز هدف واسنجی در اکثریت چاه‌های مشاهداتی دلالت بر دقت خوب مدل در تخمین تراز آب زیرزمینی در شرایط ناپایدار آبخوان است. مقدار میانگین معیار خطای RMSE در واسنجی حالت ناپایدار برابر با ۱/۴ محاسبه گردید که بیان‌کننده دقت قابل‌قبول مدل ساخته شده است.

در شبیه‌سازی آبخوان در شرایط ناپایدار، تراز آب زیرزمینی نسبت به زمان و مکان متغیر بوده، بنابراین شرایط اولیه و مرزی هر دو برای اجرای مدل در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله پارامترهای تغذیه، تخلیه و تراز آب زیرزمینی مشاهداتی در طی یک دوره یازده‌ساله به‌صورت ماهانه به مدل معرفی و شبیه‌سازی صورت پذیرفت. شرایط حاکم بر آبخوان‌ها اساساً شرایطی ناپایدار است، ازاین‌رو در این مرحله از واسنجی



شکل ۷- تراز آب زیرزمینی محاسباتی در حالت ناپایدار و گام زمانی شصت و ششم (وسط دوره)

Figure 7- Computational groundwater level in the unsteady state and sixty-sixth time step (middle of period).

تحلیل حساسیت

کمترین میزان حساسیت مدل نیز مربوط به ضریب آب‌گذری مرزها و آبدهی ویژه به ترتیب در حالت‌های پایدار و ناپایدار بود. لذا ضروری است اطلاعات ورودی این دو پارامتر به مدل از صحت و دقت کافی برخوردار بوده تا به بهترین نحو ممکن قادر به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی باشد.

در جدول ۱ تحلیل حساسیت مدل نسبت به افزایش و کاهش پارامترهای مختلف ارائه شده است. با توجه به مقادیر معیار خطای RMSE، مدل بیشترین حساسیت را به تغییر ضریب هدایت هیدرولیکی و در درجه دوم به میزان پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری در هر دو حالت پایدار و ناپایدار نشان داد.

جدول ۱- مقادیر RMSE حاصل شده از تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف.

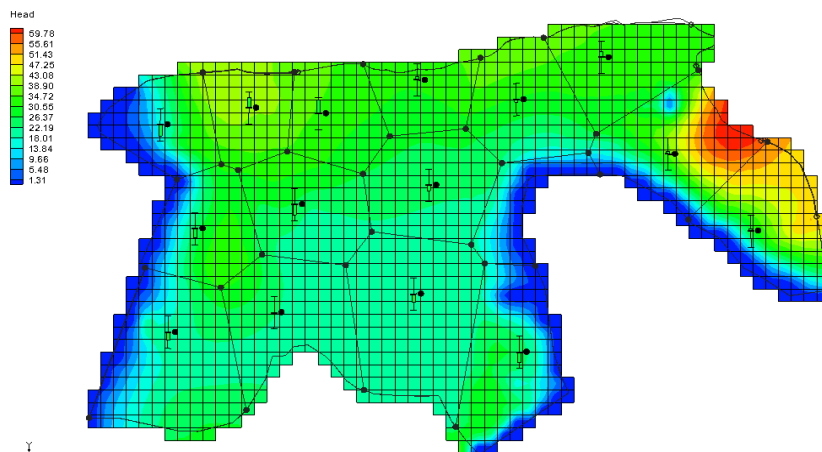
Table 1- RMSE values obtained from sensitivity analysis for different parameter.

Percentage of parameter change in the steady state							Parameter
+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	
7.1	6.4	3.9	1.2	3.5	6.8	7.2	K
6.8	5.9	4.1	1.2	2.8	5.4	5.9	Q
6.8	5.9	4.1	1.2	2.3	2.4	2.6	C
Percentage of parameter change in the unsteady state							Parameter
+30	+20	+10	0	-10	-20	-30	
6.2	5.6	5.0	1.4	4.2	5.8	6.3	K
5.8	4.5	3.8	1.4	3.6	4.8	5.3	Q
2.3	2.2	2.0	1.4	2.1	2.2	2.3	C
2.3	2.1	2.0	1.4	2.0	2.0	2.2	Sy

صحت‌سنجی مدل

میان (دوره صحت‌سنجی را در کل آبخوان نشان می‌دهد. میزان خطای مذکور و نتایج مندرج در شکل ۸ مؤید آن است که مدل واسنجی شده به خوبی قادر به شناسایی رفتار سامانه‌ی آب زیرزمینی منطقه‌ی مورد مطالعه بوده و جهت پیش‌بینی شرایط آبخوان در آینده و اجرای سناریوهای مدیریتی قابل اعتماد می‌باشد.

پس از انجام تحلیل حساسیت، اقدام به صحت‌سنجی مدل آبخوان در طی یک دوره یک‌ساله از آبان‌ماه ۱۳۹۶ الی مهرماه ۱۳۹۷ با ۱۲ دوره تنش و گام زمانی ماهانه گردید. میزان خطای RMSE در این مرحله برابر با ۱/۱۵ محاسبه شد. شکل ۹ تراز آب زیرزمینی محاسباتی در گام زمانی ششم (گام



شکل ۸- تراز آب زیرزمینی محاسباتی در گام زمانی ششم (گام میانی).

Figure 8- Computational groundwater level in the middle well sixth time step (middle well).

بررسی بیلان آبخوان در طول دوره ناپایدار

هیدروگراف شبیه‌سازی شده آبخوان نیز مؤید عدم تعادل در تغذیه و تخلیه آبخوان و کاسته شدن پیوسته از میزان ذخیره آبخوان است. قمر نیا و همکاران (۱۴۰۱) مدل‌سازی آبخوانی واقع در شمال غربی ایران را با استفاده از کد MODFLOW و بررسی تأثیرات خشکسالی با استفاده از شاخص خشکسالی SPI به انجام رسانیدند. نتایج شبیه‌سازی حاکی از افت تراز آب زیرزمینی به میزان ۰/۵ m/year بود. باتوجه‌به اینکه شاخص محاسباتی SPI در محدوده نرمال بود، لذا تأثیر خشکسالی را بسیار ناچیز بر بیلان منفی آبخوان مورد مطالعه عنوان نمودند و دلیل این امر را بیشتر به عدم مدیریت صحیح و برداشت آب بیش از حد ظرفیت آبخوان نسبت دادند (Ghamarnia et al.,

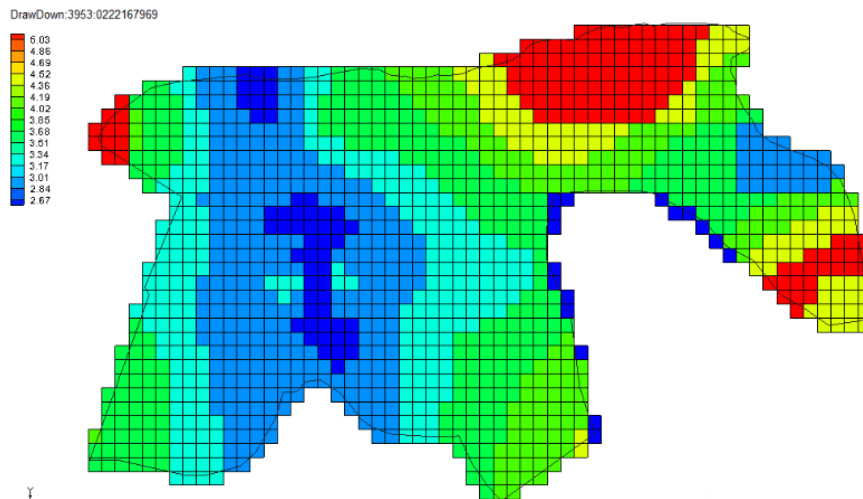
یکی از کاربردی‌ترین اهداف مدل‌سازی آبخوان، محاسبه بیلان آبی و شناخت دقیق‌تر مؤلفه‌های مختلف آن برای یک دوره مشخص است. محاسبه بیلان توسط مدل، به دلیل تصحیح پارامترهای گوناگون و محاسبه سلول به سلول تغییرات حجم ذخیره، دقیق‌تر از روش‌های محاسبه دستی است. مقادیر اجزای بیلان آبی آبخوان شمیل برای کل دوره ۱۱ ساله شبیه‌سازی در حالت ناپایدار در جدول ۲ درج شده است. بر اساس این جدول در صورتی‌که مجموع ورودی به و خروجی از آبخوان کسر گردد، میزان کسری مخزن در طول دوره ۱۱ ساله برابر ۷/۶۳۰ MCM حاصل می‌شود. روند نزولی

(2022). با توجه به جدول ۲ در آبخوان حاضر نیز بیشترین (MCM) داشته و نقش بسزایی بر کاهش ذخیره آبخوان ایفا می‌زان اجزای بیلان اختصاص به چاه‌های بهره برداری (7.897) نموده است.

جدول ۲- مقادیر احزای بیلان آب زیرزمینی محاسباتی.

Table 2= Computational values of groundwater balance components.		
Groundwater outflow (MCM)	Groundwater inflow (MCM)	balance components
7.897	0	Wells
0.686	1.221	Rivers
0	0.365	Recharge
1.760	1.127	Groundwater flow
10.342	2.714	Total

آبخوان به دلیل برداشت بیش از ظرفیت آبخوان کاسته شده و این امر در مناطق شمال شرقی آبخوان و خروجی آبخوان (جنوب شرقی) حادثر بوده و آبخوان را با افت بیشتری مواجه خواهند نمود. این در حالی است که مناطق مرکزی، شمالی، جنوبی و غربی آبخوان دارای افت کمتری می‌باشد. Reyhani et al., (2023) اقدام به پیش‌بینی شرایط آینده آبخوان به مدت ۱ سال، از مهر ۳۱۱۰ تا مهر ۳۴۶۳ با استفاده از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده MODFLOW نمودند. نتایج خروجی از مدل نشان داد که با فرض ادامه روند کنونی برداشت از آب‌های زیرزمینی در محدوده مورد پژوهش به تدریج از ابتدای تا انتهای دوره شبیه‌سازی میزان افت تراز آب زیرزمینی افزایش بیشتری می‌یابد (Reyhani et al., 2023).



شکل ۹- نقشه پهنه‌بندی افت تراز آب زیرزمینی در انتهای دوره پیش‌بینی.

Figure 9- zoning map of dropdown groundwater level at the end of prediction period.

از آبخوان می‌باشد، در این راستا راهبرد کاهش ۲۰،۱۰ و ۳۰ درصدی برداشت آب از آبخوان توسط چاه‌ها بهره‌برداری در دوره ده سال آینده با استفاده از مدل واسنجی و اعتبارسنجی شده اجرا گردید. نتایج شبیه‌سازی توسط مدل در انتهای دوره

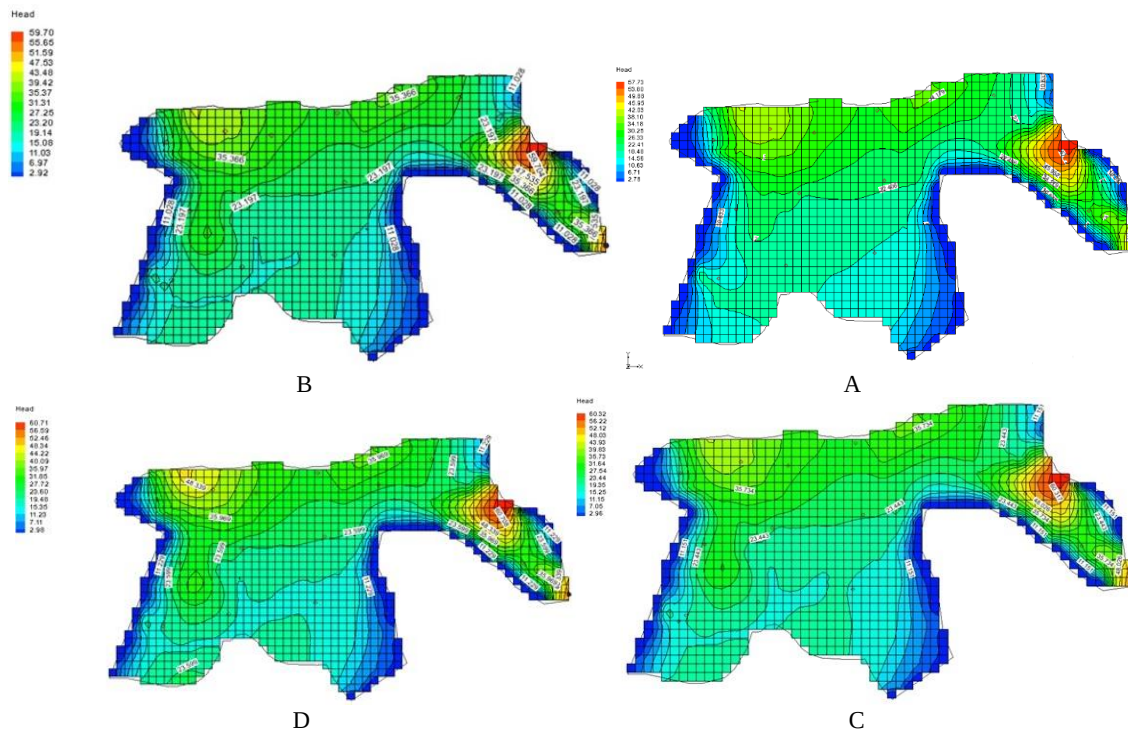
نتایج حاصل از پیش‌بینی و اجرای راهبردهای مدیریتی آبخوان

یکی از اهداف اصلی پژوهش حاضر، پیش‌بینی وضعیت آبخوان با ادامه روند جاری در ده سال آینده (از مهرماه سال آبی ۹۸-۹۷ الی شهریورماه سال آبی ۱۴۰۶-۱۴۰۷) می‌باشد. لذا جهت محقق نمودن این هدف از میانگین بارش بلند مدت ماهانه جهت ایجاد لایه تغذیه ورودی به مدل واسنجی شده استفاده گردید. با توجه به ممنوعیت برداشت آب از آبخوان مورد مطالعه، از الگوی برداشت سابق آب از آبخوان جهت ساخت لایه تخلیه استفاده گردید. نقشه پهنه‌بندی افت تراز آب زیرزمینی در انتهای دوره‌ی پیش‌بینی نسبت به ابتدای دوره در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است. نتایج نمایانگر این واقعیت بوده که با گذشت زمان از مقادیر تراز در تمام نقاط

باتوجه به پیش‌بینی افت بیش از پنج‌متر در بخش‌هایی از آبخوان در سال ۱۴۰۷ و همچنین تغییرات شدید اقلیمی و خشکسالی‌های پیاپی در این منطقه، سریع‌ترین و ارزان‌ترین راه ممکن جهت تعادل بخشی به آبخوان، مدیریت برداشت آب

(شکل ۱۰c و ۱۰d)، به طوری که دامنه آن به ترتیب به ۲/۹۶ الی ۶۰/۳۲ m و ۲/۹۸ الی ۶۰/۷۱ m ارتقا یافت. در واقع با کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی برداشت از آبخوان تراز آب زیرزمینی به ترتیب ۳/۵، ۴/۵ و ۵/۵ درصد نسبت به قبل از کاهش برداشت آب افزایش نشان داد. لذا راهبرد کاهش برداشت آب از آبخوان در دراز مدت می‌تواند نتایج مطلوبی را برای این محدوده در پی داشته باشد و در تعادل بخشی به آبخوان کمک قابل توجهی می‌نماید.

پیش‌بینی نسبت به ابتدای آن (قبل از کاهش برداشت آب) در شکل ۱۰ ارائه شده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌گردد که دامنه نوسان تراز آب زیرزمینی قبل از کاهش برداشت بین ۲/۷۸ الی ۵۷/۷۳ متر در کل آبخوان متغیر می‌باشد (شکل ۱۰a) اما پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی توسط مدل پس از کاهش ۱۰ درصدی برداشت آب دلالت بر افزایش دامنه نوسان تراز آب زیرزمینی به ۲/۹۲ الی ۵۹/۷۰ m دارد (شکل ۱۰b). همچنین با کاهش بیشتر برداشت آب به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد تراز آب زیرزمینی محاسباتی افزایش بیشتری نشان داد



شکل ۱۰- تراز آب زیرزمینی پیش‌بینی شده با راهبردهای مختلف: (A) انتهای دوره پیش‌بینی قبل از کاهش برداشت، (B، C و D) انتهای دوره پیش‌بینی به ترتیب با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش برداشت.

Figure 10- The predicted groundwater level with different strategies, A) the end of the prediction period before reducing the extraction, B, C and D) the end of the prediction period with 10, 20 and 30% reduction of the extraction, respectively.

میانگین ۰/۴ m در هر سال خواهد بود، اما شدت آن در نواحی مختلف منطقه مورد مطالعه متفاوت خواهد و در بعضی از نواحی ممکن است افت تراز آب زیرزمینی به بیش از ۰/۵ و کمتر از ۰/۳ m نیز برسد. شبیه‌سازی راهبرد کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی برداشت آب از آبخوان در ده سال آتی با فرض الگوی تغذیه گذشته، اثرات مثبت این راهبرد را در افزایش تراز آب زیرزمینی در آبخوان مورد مطالعه آشکار ساخت. پیشنهاد می‌شود در دشت بسیار مهم شمل که تأمین‌کننده آب در بخش‌های کشاورزی و شرب هست، با اتخاذ راهکارهای

نتیجه‌گیری

باتوجه به دقت نسبتاً مناسب مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، به‌کارگیری این مدل جهت پیش‌بینی رفتار آبخوان با راهبردهای مدیریتی مختلف قابل اعتماد هست. نتایج حاصل از واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار، حاکی از آن بود که نواحی شمالی، مرکزی و جنوبی آبخوان دارای بیشترین ضریب هدایت هیدرولیکی هستند. خروجی‌های حاصل از مدل نشان داد که در طول دوره پیش‌بینی ده‌ساله، میزان افت تراز آب زیرزمینی در آبخوان مورد مطالعه به طور

Ghamarnia, H., Enayati, S., and Amini, A., 2022. Numerical Simulation of Bijar-Divandere Plain Aquifer Using MODFLOW Code and Investigation in The Effects of Drought on Its Quantitative Changes. *Environment and Water Engineering*, 8(1), 15–30.

Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process. In *Techniques and Methods*.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., 2000. MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. In *Open-File Report*.

Iran Water Resources Management Company., 2015. Report on the extension of the ban on groundwater resources in the study area of Shamil-Takht plain. the regional water company of Hormozgan, Hormozgan Province, Iran. [In Persian].

Jabbari, E., Fathi, M., Moradi, M., 2020. Modeling groundwater quality and quantity to manage water resources in the Arak aquifer, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(14).

Jafari, F., Javadi, S., Golmohammadi, G., Karimi, N., Mohammadi, K., 2016. Numerical simulation of groundwater flow and aquifer-system compaction using simulation and InSAR technique: Saveh basin, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 833.

Jafari, T., Kiem, A.S., Javadi, S., Nakamura, T., and Nishida, K., 2021. Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 35, 100822.

Jalut, Q.H., Abbas, N.L., and Mohammad, A. Th., 2018. Management of groundwater resources in the Al-Mansourieh zone in the Diyala River Basin in Eastern Iraq. *Groundwater for Sustainable Development*, 6, 79–86.

Janardhanan, S., Islam, M.M., Islam, M. T., Peña-Arancibia, J., Hodgson, G., Karim, F., Mainuddin, M., Islam, M. T., Rahman, M. A., and

مدیریتی نظیر تغییر الگوی مصرف با تغییر الگوی کشت و کاشت گیاهان کم‌مصرف، نصب کنتورهای هوشمند، انسداد چاه‌های غیرمجاز، ایجاد سازه‌های تغذیه مصنوعی در مکان‌های مناسب، ارتقا فرهنگ مصرف آب و اجرای طرح‌های تعادل-بخشی، نرخ افت تراز آب زیرزمینی را به حداقل میزان ممکن در این آبخوان کاهش داد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان جهت تأمین اطلاعات لازم مطالعه حاضر، تشکر و قدردانی می‌شود.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نوشتن و یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع

Anderson, M. P., and Woessner, W. W., 1992. The role of the postaudit in model validation. *Advances in Water Resources*, 15(3), 167–173.

Chepkemoi, A.K., Home, P.G., Raude, J. M., Kiptum, C.K., 2023. Modeling of groundwater potential in Kericho County, Kenya, using GMS_MODFLOW. *Scientific African*, 19, e01492.

Dalin, C., Puma, M., Wada, Y., and Kastner, T., 2016. Food supply reliance on groundwater. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EPSC2016-4178.

Dangar, S., and Mishra, V., 2021. Natural and anthropogenic drivers of the lost groundwater from the Ganga River basin. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114009.

Deb, P., Kiem, A.S., Willgoose, G., 2019. A linked surface water-groundwater modelling approach to more realistically simulate rainfall-runoff non-stationarity in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 575, 273–291.

elaborating database under GIS: case of Gareb-Bouareg aquifer (Rif, Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*, 12(11), 352.

Mainuddin, M., Maniruzzaman, Md., Alam, Md.M., Mojid, M.A., Schmidt, E.J., Islam, Md.T., Scobie, M., 2020. Water usage and productivity of Boro rice at the field level and their impacts on the sustainable groundwater irrigation in the North-West Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 240, 106294.

Malmir, M., Javadi, S., Moridi, A., Neshat, A., Razdar, B., 2021. A new combined framework for sustainable development using the DPSIR approach and numerical modeling. *Geoscience Frontiers*, 12(4), 101169.

McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W., 1984. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. In *Open-File Report*.

Mojid, M.A., Mainuddin, M., Murad, K.F.I., Kirby, J.M., 2021. Water usage trends under intensive groundwater-irrigated agricultural development in a changing climate – Evidence from Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 251, 106873.

Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas Haghighi, M., Wetzel, H.U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, S., Arabi, S., 2017. Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjani plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering Geology*, 218, 134–151.

Mukherjee, A., 2018. Overview of the Groundwater of South Asia. In A. Mukherjee (Ed.), *Groundwater of South Asia* (pp. 3–20). Springer Singapore.

Nakhaei, M., hasani, A., Moghimi, H., and Abbasnovinpour, E., 2022. Predicting the effects of overuse on Zarandieh plain aquifer (Markazi province, Iran) using GMS software. *Hydrogeology*, 6(2), 13–29.

National Water Scarcity Adaptation Working Group., 2021. the National Adaptation Plan for Water Scarcity in Iran. [In Persian].

Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., Shafri, H., 2014. Estimating groundwater vulnerability to

Kirby, J.M., 2023. Groundwater balance and long-term storage trends in the regional Indo-Gangetic aquifer in northwest Bangladesh. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 49,

Jasechko, S., and Perrone, D., 2021. Global groundwater wells at risk of running dry. *Science*, 372(6540), 418–421.

Javadi, S., Saatsaz, M., Hashemy Shahdany, S. M., Neshat, A., Ghordoyee Milan, S., and Akbari, S., 2021. A new hybrid framework of site selection for groundwater recharge. *Geoscience Frontiers*, 12(4), 101144.

Kashef, A. A. I., (1986). *Groundwater Engineering*. New York: McGraw-Hill.

Khaledi Alamdari, M., Majnooni Heris, A., and Fakheri Fard, A., 2022. Estimation of Hydraulic conductivity and Specific storage of Shabestar Plain Aquifer Using Numerical model. *Hydrogeology*, 7(1), 42–52.

Kirby, J.M., Ahmad, M.D., Mainuddin, M., Palash, W., Quadir, M. E., Shah-Newaz, S. M., and Hossain, M. M., 2015. The impact of irrigation development on regional groundwater resources in Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 159, 264–276.

Lalehzari, R., Tabatabaei, S.H., 2015. Simulating the impact of subsurface dam construction on the change of nitrate distribution. *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3241–3249.

Lyazidi, R., Hessane, M.A., Moutei, J. F., Bahir, M., 2020a. Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the Gareb-Bourag plains, Morocco embedding the visual MODFLOW techniques in groundwater modeling system. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100471.

Lyazidi, R., Hessane, M.A., Moutei, J.F., Bahir, M., 2020b. Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the Gareb-Bourag plains, Morocco embedding the visual MODFLOW techniques in groundwater modeling system. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100471.

Lyazidi, R., Hessane, M.A., Moutei, J.F., Bahir, M., Ouhamdouch, S., 2019. Management of water resource from semiarid area by

Conference Series: Earth and Environmental Science, 958(1), 12005.

Reyhani, E., Yousefi, H., Mirzavand, M., Sadatinejad, S.J., 2023. Modeling the Impact Of Manangement Scenario On the Kashan Aquifer Using Mathematical Model of Modflow and Seawat. Iranian Journal of Ecohydrology, 10(1), 17–32.

Praveena S.M., Abdullah, M.H., Aris, Z., 2010. Modeling for Equitable Groundwater Management. International Journal of Environmental Research, 4(3), 415–426.

Thangarajan, M., 2007. Groundwater models and their role in assessment and management of groundwater resources and pollution. Groundwater: Resource Evaluation, Augmentation, Contamination, Restoration, Modeling and Management, 189–236.

pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. Environmental Earth Sciences, 71.

Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Torabi Haghighi, A., Kløve, B., Madani, K., 2021. Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(25), e2024221118.

Quitaneq, L.C., 2021a. GMS-MODFLOW application in the investigation of groundwater potential in Concepcion, Tarlac, Philippines. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 958(1), 012005.

Quitaneq, L.C., 2021b. GMS-MODFLOW application in the investigation of groundwater potential in Concepcion, Tarlac, Philippines. IOP