

شبیه‌سازی عددی آب زیرزمینی با استفاده از مدل ریاضی (مطالعه موردی: آبخوان کهورستان، استان هرمزگان)

سپیده خارا^{۱*}، عدنان صادقی لاری^{۲*}، سعیده سامانی^۳

۱- دانش‌آموخته 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.

۳- محقق، دانشکده مهندسی عمران و منابع، دانشگاه دالهورزی - پردیس سکستون، هالیفاکس، نوا اسکوشیا، کانادا.

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵

چکیده

محدودیت منابع آب سطحی و بهره‌برداری بیش از حد منابع آب زیرزمینی در نواحی خشک، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح برای بهره‌برداری پایدار از این منابع را الزام‌آور می‌سازد. شبیه‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های ریاضی این امکان را فراهم می‌سازد تا رفتار آبخوان در پاسخ به شرایط مختلف هیدرولوژیکی، اقلیمی و مدیریتی مورد بررسی قرار گیرد. از این‌رو این مطالعه باهدف واسنجی، حساسیت‌سنجی، اعتبارسنجی و بهینه‌نمودن ضرایب آبگذری اشباع و آبدهی ویژه آبخوان کهورستان، واقع شده در غرب استان هرمزگان، با مدل هیدرولوژیکی محبوب MODFLOW تحت رابط کاربری GMS انجام گردید. اختلاف بین تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده در مراحل واسنجی مدل با معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد. میزان RMSE در واسنجی حالت پایدار، واسنجی حالت ناپایدار و صحت‌سنجی به ترتیب برابر با ۰/۰۹۳، ۰/۰۳ و ۰/۹۹۸ توسط مدل محاسبه گردید که بیان‌کننده دقت مناسب مدل ساخته شده است. نتایج حاصل از واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار، نشان داد که مناطق شمال غربی آبخوان دارای بیشترین مقادیر ضریب نفوذپذیری هستند که از ۲۵ تا ۳۵ متر در روز متغیر است. با این حال، در مناطق جنوب شرقی، ضریب نفوذپذیری به شدت کاهش می‌یابد. تجمع رسوبات دانه‌درشت و دانه‌ریز منجر به افزایش و کاهش قابل توجه ضریب نفوذپذیری در بالادست و پایین‌دست آبخوان شده است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، واسنجی، GMS، MODFLOW.

مقدمه

(McDonald MODFLOW مدل (Lyazidi et al., 2020a) یکی از محبوب‌ترین مدل‌های (and Harbaugh, 1984) شبیه‌سازی آب زیرزمینی است که به طور گسترده در مطالعات کمی آب زیرزمینی به‌ویژه در اراضی تحت آبیاری به کار گرفته شده است (Chepkemoui et al., 2023; Janardhanan et al., 2023; Khaledi Alamdari et al., 2022; Lyazidi et al., 2020a, 2020b, 2020c; nakhaei et al., 2022; Reyhani et al., 2023; Sabah Nia and Sadeghi-Lari, 2024; Yoon et al., 2003).

آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب است که برای مصارف گوناگون کشاورزی، آشامیدنی و صنعتی استفاده می‌شود. در نواحی خشک و نیمه‌خشک، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی نسبت به سایر اقلیم‌ها بسیار مشهود بوده و منجر به کاهش چشمگیر آب زیرزمینی به لحاظ کمی و کیفی گردیده است (Mirzaee Arjenaki et al., 2024). مدل‌های آب زیرزمینی، نسخه ساده شده یک سامانه آب زیرزمینی واقعی است که قابلیت شبیه‌سازی اثرات مثبت و منفی فعالیت‌های مختلف بر منابع آب زیرزمینی را دارا است.

منطقه کهرستان به عنوان یکی از دشتهای مهم این استان، طی دهه های اخیر با کاهش محسوس تراز آب زیرزمینی و با تهدیداتی نظیر کاهش شدید کیفیت آب زیرزمینی و شورشدن تدریجی آبخوان مواجه شده است (Sadeghi-Lari et al., 2024). افزایش برداشت از چاه های مجاز و غیرمجاز، کاهش بارندگی و اثرات تغییر اقلیم از جمله عوامل مؤثر در ایجاد این بحران ها محسوب می شوند (Malmir et al., 2021a). با توجه به محدودیت منابع آب سطحی و فشار روزافزون بر منابع آب زیرزمینی، مدیریت و برنامه ریزی صحیح برای بهره برداری پایدار از این منابع اهمیت ویژه ای دارد. شبیه سازی عددی آبخوان ها با استفاده از مدل هایی چون MODFLOW، این امکان را فراهم می سازد تا رفتار دینامیکی آب زیرزمینی در پاسخ به شرایط مختلف هیدرولوژیکی، اقلیمی و مدیریتی به طور دقیق مورد ارزیابی قرار گیرد (Azadegan et al., 2024). بررسی هیدروگراف معرف آبخوان کهرستان و آزمون های آماری نشان داد که در طول دو دهه اخیر تراز آب زیرزمینی این دشت دارای روند کاهشی معنی داری بوده است و افت m $5/24$ را تجربه نموده است. عامل اصلی کاهش تراز آب زیرزمینی در این ناحیه را می توان به وجود چاه های غیرمجاز و بهره برداری بیش از حد نسبت داد (Sadeghi-Lari et al., 2024). با توجه به اینکه منابع آب زیرزمینی دشت کهرستان بیشتر برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد، از این رو این دشت از اهمیت ویژه ای در استان هرمزگان است. از طرفی داده های مورد نیاز برای اجرای مدل MODFLOW شامل تراز آب زیرزمینی اندازه گیری شده در پانزده چاه مشاهده ای، ضرایب هیدرو دینامیکی آبخوان، تراز ارتفاعی سطح زمین، اطلاعات تغذیه و برداشت آب زیرزمینی توسط سازمان های ذی ربط قابل دسترس بود. همچنین در این آبخوان از مدل های ریاضی برای شبیه سازی آبخوان استفاده نشده است، لذا مطالعه حاضر با هدف ساخت مدل مفهومی مناسب برای آبخوان این دشت، واسنجی، حساسیت سنجی، اعتبارسنجی و بهینه نمودن ضریب آگذری اشباع $(P)^{\wedge}$ و ضریب آبدی ویژه $(S_y)^{\wedge}$ با مدل هیدرولوژیکی محبوب MODFLOW تحت رابط کاربری GMS انجام گردید.

طی یک دهه گذشته، مطالعات متعددی در مناطق مختلف ایران بر پایه مدل MODFLOW جهت تحلیل کمی منابع آب زیرزمینی انجام شده است. صباح نیا و صادقی لاری مطالعه ای را با هدف واسنجی و اعتبارسنجی^۱ مدل MODFLOW و نرم افزار سامانه مدل سازی آب زیرزمینی^۲ (GMS) برای آبخوان دشت شمیل واقع در استان هرمزگان انجام دادند. ارزیابی این محققین نشان داد که دقت مدل با شاخص جذر میانگین مربعات^۳ (RMSE) در مراحل واسنجی پایدار و ناپایدار^۴ به ترتیب برابر با $1/2$ و $1/4$ است 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 20 الی 50 m/day هستند (Sabah Nia and Sadeghi-Lari, 2024). در پژوهشی در دشت تایباد، شبیه سازی کمی جریان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW و رابط کاربری GMS نشان داد که برای یک دوره زمانی پنج ساله، کسری مخزن آبخوان تایباد برابر $33/09$ MCM^۵ است. اما با کاهش 10 و 20 درصدی برداشت و کاهش 5 و 10 درصدی تغذیه^۶ (R)، کسری مخزن به ترتیب به میزان $21/38$ MCM و $25/94$ کاهش می یابد (Azadegan et al., 2024). همچنین در دشت شازند، تلفیق مدل MODFLOW با مدل های سطحی نظیر OWHM نشان داد که مدل های ترکیبی می توانند در تحلیل دقیق تر تعامل آب های سطحی و زیرزمینی مؤثر باشند. نتایج شبیه سازی مدل نشان داد بیشترین سهم تغذیه آبخوان ناشی از نزولات جوی است و بیشترین تخلیه^۷ در ماه های خشک سالی را به چاه های بهره برداری نسبت دادند. این محققین عنوان نمودند که ساخت مدل مفهومی آبخوان ها با به کارگیری مدل های ریاضی می تواند به عنوان ابزار قوی در راستای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و بر منابع آب سطحی و زیرزمینی و اجرای سناریوهای مدیریتی به کار گرفته شود (Soltani et al., 2022).

استان هرمزگان واقع در جنوب ایران یکی از مناطق خشک کشور محسوب می شود که منابع آب زیرزمینی در آن نقش مهمی در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت ایفا می کنند.

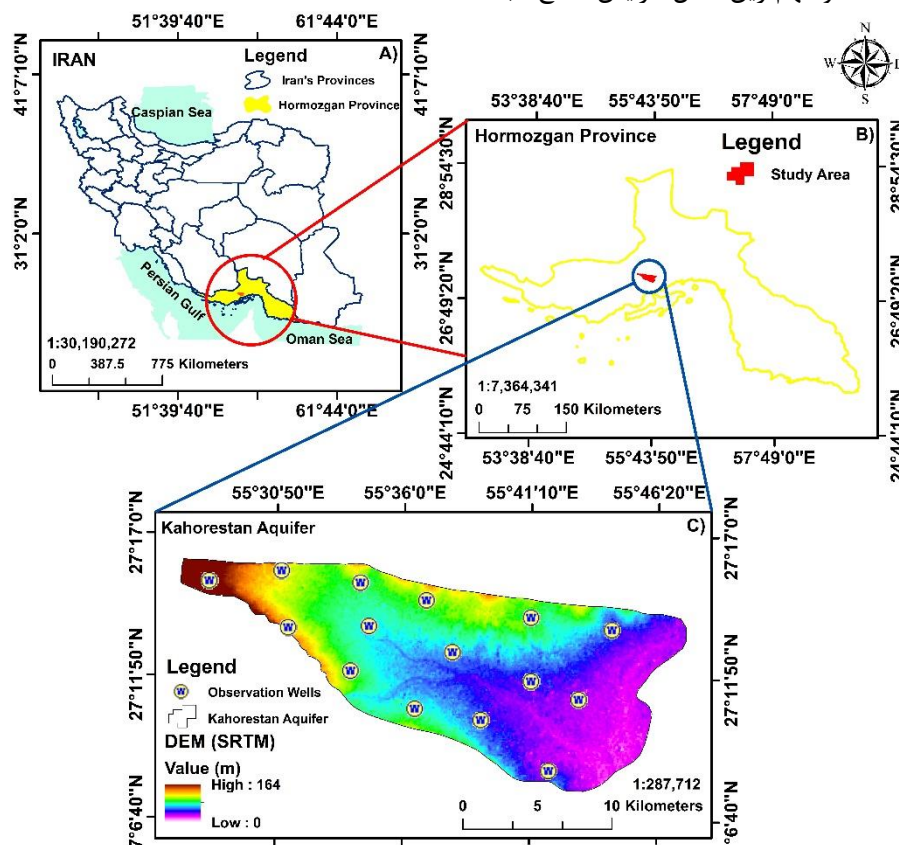
⁶ Recharge⁷ Depletion⁸ Coefficient of saturated permeability⁹ Coefficient of specific yield¹ Calibration and validation² Groudwater Modeling System³ Root mean square error⁴ Steady and unsteady state⁵ Million Cubic Metre

مواد و روش‌ها

ناحیه مورد مطالعه

زیرزمینی این بخش از آبخوان است. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی از سمت شمال شرقی به سمت نواحی مرکزی و سپس به سمت نواحی شمال شرقی دشت در جریان بوده و از توپوگرافی سطحی تبعیت می‌نماید. نوع آبخوان کهورستان آزاد بوده و اصلی‌ترین جریان‌های ورودی آب زیرزمینی شامل نفوذ مستقیم و غیرمستقیم بارش، تغذیه زیرزمینی، تغذیه توسط آب برگشتی کشاورزی و مهم‌ترین جریان خروجی آب زیرزمینی پمپاژ از چاه‌ها است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در کشور ایران، موقعیت چاه‌های مشاهداتی و مدل رقومی ارتفاعی^۲ آبخوان مورد مطالعه نشان داده شده است.

محدوده مطالعاتی کهورستان با مساحت ۲۷۵/۲ کیلومتر مربع در غرب استان هرمزگان بین عرض‌های ۲۶° ۴۰' تا ۲۷° ۱۷' شمالی و طول‌های ۵۵° ۲۵' تا ۵۵° ۴۶' شرقی واقع شده است. این ناحیه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با میانگین بارش سالانه ۱۸۷ mm، میانگین دمای سالانه ۲۳ و ارتفاع MSL^۱ ۴۵ است (Sdeghi lari et al., 2024). ضخامت آبرفت در قسمت غربی آبخوان زیاد بوده و به سمت شرق از ضخامت آن کاسته می‌شود. گنبد‌های نمکی، به‌عنوان قدیمی‌ترین رسوبات رخنمون‌یافته در منطقه، در بخش جنوب شرقی بیرون‌زدگی داشته و مهم‌ترین عامل افزایش املاح آب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و مدل رقومی ارتفاعی منطقه‌ی مورد مطالعه (Sdeghi lari et al., 2024).

Figure 1- Geographical location and SRTM DEM of the study area (Sadeghi lari et al., 2024).

آبگذری و آبدهی ویژه، تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری‌شده، تشکیلات زمین‌شناسی، مشخصات ارتفاعی ناحیه، مورفولوژی سنگ کف، کاربری و پوشش اراضی، جنس خاک، شرایط مرزی محدوده مطالعاتی، و سیستم‌های آبیاری و زهکشی است. به‌منظور شبیه‌سازی آبخوان کهورستان، ابتدا تمامی داده‌های

گردآوری اطلاعات

مدیریت بهینه و استحصال اصولی از منابع آب زیرزمینی، مستلزم دسترسی به مشخصات هیدروژئولوژیکی و دینامیکی منطقه مورد بررسی است. این پارامترها شامل نزولات جوی، ضخامت آبرفت، میزان برداشت و تغذیه آبخوان، ضرایب

² Digital Elevation Model

¹ Meters above Mean Sea Level

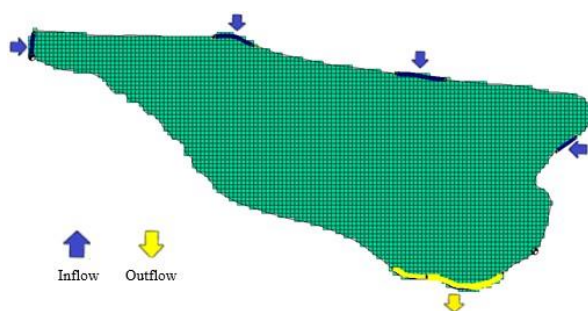
مشخص شود (Anderson et al., 1992). معادله حاکم بر جریان یک محیط متخلخل در لایه آبدار آزاد به نام معادله بوسینسک یا دوپوئی - فورشایمر (Kashef Abdel-Aziz I., 1986) مشهور است. شکل کلی آن در یک لایه آبدار ناهمگن و ناهمسان در شرایط جریان ناپایدار به صورت معادله ۱ است:

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

در معادله بالا S_y ضریب آبدی ویژه، K_x ، K_y و K_z ضریب آبگذری اشباع محیط متخلخل در راستای محوره‌های x ، y و z ، h پتانسیل هیدرولیکی در هر نقطه از آبخوان و t : زمان است.

وضعیت جریان در مرزهای آبخوان

تعیین شرایط مرزی یکی از مراحل اولیه و بااهمیت در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی است. مدل باتوجه به اختلاف ارتفاع سطح ایستابی در داخل مرزها و سلول‌های شبکه مجاور آن‌ها و نیز ضریب انتقال‌پذیری مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در مرزها، میزان جریان ورودی و خروجی از مرزها را مشخص می‌نماید. جهت تعیین مکان‌های جریان ورودی به و خروجی از مرزها، از داده‌های اندازه‌گیری‌شده تراز آب زیرزمینی در مجاورت مرزها استفاده گردید. سپس جریان‌های ورودی و خروجی آب زیرزمینی در مرزها محاسبه و به عنوان مرز تراوا در مدل مفهومی آبخوان معرفی گردید. باتوجه به شکل ۲ جریان آب زیرزمینی از بخش‌هایی از شمال و شمال غربی آبخوان وارد و از نواحی جنوب غربی آبخوان خارج می‌شود. شرایط مرزی در قسمت‌های دیگر آبخوان با تراوا در نظر گرفته شد.



شکل ۲- مرزهای تراوا در آبخوان کهورستان.

Figure 2- Permeable borders in the Kahorestan aquifer.

ورودها به مدل MODFLOW

تغذیه و تخلیه آبخوان

استحصال شده از منابع مختلف در پلتفرم GIS^۱ مورد پردازش و ساماندهی قرار گرفت. سپس، با ایجاد لایه‌های اطلاعاتی مجزا برای هر یک از پارامترها، این داده‌ها از طریق واسط کاربری GMS به مدل MODFLOW معرفی گردید. همچنین، جهت استخراج ارتفاع سطح زمین در منطقه مطالعاتی از مدل رقومی ارتفاعی STRM DEM استفاده شد و پس از پردازش‌های لازم، وارد مدل MODFLOW گردید. لایه‌های اطلاعاتی ورودی به مدل MODFLOW در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- لایه‌های اطلاعاتی ورودی به مدل MODFLOW.

Table 1- Input data layers to the Modflow model.

Aquifer boundary
DEM
Mesured groundwater level
Groundwater pumping rate
Groundwater recharge rate
Coefficient of permeability
Bed rock level

مدل مفهومی و ریاضی آبخوان

مدل مفهومی سه‌بعدی آبخوان، ابزاری اساسی برای ساده‌سازی پیچیدگی‌های واقعی سیستم‌های آب زیرزمینی است که به درک بهتر شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه کمک می‌کند. در این مطالعه ایجاد مدل مفهومی آبخوان کهورستان با استفاده از GMS که رابط گرافیکی کاربری پیشرفته‌ای را برای راه‌اندازی مؤثر مدل و مصورسازی فراهم می‌کند، انجام گردید. در مدل مفهومی آبخوان کهورستان لایه داده‌های ارتفاعی STRM DEM و تراز سنگ کف به ترتیب به عنوان مرز بالایی و پایینی آبخوان معرفی گردید. در راستای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، پارامترهای ورودی کلیدی به مدل جهت شبیه‌سازی آبخوان کهورستان عبارت بودند از: ۱- نرخ تخلیه و تغذیه آبخوان ۲- ضرایب آبگذری اشباع و آبدی ویژه مواد تشکیل‌دهنده آبخوان ۳- داده‌های تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری‌شده. مدل مفهومی به عنوان زیربنای مدل‌های ریاضی محسوب می‌شود، از این رو پس از ساخت مدل مفهومی آبخوان اقدام به ساخت مدل ریاضی گردید. در یک مدل ریاضی ضروری است معادلات حاکم بر جریان، شرایط مرزی و اولیه برای یک منطقه معلوم

¹ Geographic Information System

ضریب آبدهی ویژه آبخوان به عنوان دومین پارامترها واسنجی شده در حالت ناپایدار است. مقادیر این پارامتر با استفاده از لوگ چاه‌های حفاری در نواحی مختلف آبخوان برآورد و به مدل وارد شد.

هر یک از لایه‌های موضوعی، تهیه شده در پلتفرم GIS، ابتدا در محیط GMS فراخوانی و سپس به پوشش‌های ایجاد شده در زیر مجموعه مدل مفهومی وارد گردید. پوشش‌ها شامل مرز آبخوان، ضریب آبگذری اشباع آبخوان، دبی تخلیه چاه‌های پمپاژ، نرخ تغذیه آبخوان و تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده بودند. در راستای افزودن اطلاعات درون پوشش‌های ایجاد شده در مدل مفهومی به مدل MODFLOW ابتدا محدوده‌ی مورد مطالعه با سلول‌هایی به ابعاد 150×150 متر شبکه‌بندی گردید. سپس داده‌ها به سلول‌های شبکه مدل MODFLOW معرفی گردید. داده‌های رقومی ارتفاعی سطح زمین به عنوان مرز بالایی مدل و داده‌های تراز سنگ کف به عنوان مرز پایینی نیز به درون این شبکه‌ها معرفی گردید. بعد از معرفی پوشش‌ها و ورود داده‌های مورد نیاز به درون مدل، مدل در حالت پایدار اجرا گردید. طبیعی است که مدل در اولین اجرا به دلیل اختلاف زیاد تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل، واسنجی نمی‌شود و خطای شبیه‌سازی در اولین مرحله از اجرای مدل در دامنه مجاز قرار ندارد. لذا در مرحله بعدی سعی گردید واسنجی مدل به صورت دستی در دو حالت پایدار و ناپایدار جهت کاهش خطای شبیه‌سازی به زیر یک متر انجام شود.

واسنجی و حساسیت‌سنجی مدل

واسنجی یک مدل عبارت است از کاهش یا افزایش مقادیر پارامترهای ورودی به مدل، به طوری که اختلاف تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به حداقل مقدار ممکن برسد (Sabah Nia and Sadeghi-Lari, 2024). تخمین پارامترها به دو روش دستی و یا استفاده از یک برنامه واسنجی به نام برآورد پارامتر^۲ (PEST) در محیط کاربری GMS انجام می‌شود. در این مطالعه از ترکیب دو روش در راستای برآورد صحیح و بهینه‌سازی مقادیر دو پارامتر ضریب آبگذری و آبدهی ویژه در طول مرحله واسنجی در دو حالت پایدار و ناپایدار

منابع آب زیرزمینی توسط منابع مختلفی از جمله بارندگی و جریان‌ات سطحی تغذیه می‌گردد. در مدل‌سازی آب زیرزمینی حدود ۸ تا ۲۲ درصد از متوسط بارش ناحیه مورد مطالعه به عنوان تغذیه توسط بارش در نظر گرفته می‌شود؛ لذا در این مطالعه با توجه به اینکه بخش اعظم تغذیه آب زیرزمینی در دشت کهرستان ناشی از نفوذ مستقیم و غیرمستقیم باران است ۱۵ درصد میانگین بارندگی طولانی مدت منطقه به عنوان تغذیه آبخوان از بارش در نظر گرفته شد. همچنین تغذیه آبخوان توسط آب‌های برگشتی از چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی ۳۰ درصد و آب‌های برگشتی شرب ۶۰ درصد منظور گردید (Yekom Consulting Engineering, 2012). مقادیر به دست آمده به عنوان نرخ اولیه تغذیه بر حسب m/day وارد مدل مفهومی گردید.

مهم‌ترین منابع برداشت از آب زیرزمینی دشت کهرستان چاه‌های پمپاژ عمیق و نیمه عمیق جهت مصارف کشاورزی و آشامیدنی است. بنابراین در این مطالعه از اطلاعات دبی پمپاژ ۳۶۰ حلقه چاه موجود در راستای برآورد میزان تخلیه هر چاه بر حسب m^3/day استفاده گردید و برای واسنجی در شرایط پایدار و ناپایدار وارد مدل گردید.

ضریب آبگذری و آبدهی ویژه آبخوان

ضریب آبگذری آبخوان با اهمیت‌ترین و اصلی‌ترین پارامتر واسنجی شده اجرای مدل در حالت پایدار است. جهت ایجاد لایه ضریب آبگذری اشباع آبخوان ابتدا با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده ضریب قابلیت انتقال با آزمایش پمپاژ در بخش‌های مختلف آبخوان، نقشه پهنه‌بندی ضریب انتقال‌پذیری در پلتفرم GIS ایجاد گردید. سپس لایه میانگین بلندمدت تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده از لایه تراز سنگ کف برای تولید نقشه ضخامت آبخوان کسر گردید. با استفاده از معادله ۲ لایه ضریب آبگذری اشباع آبخوان تهیه و به مدل وارد گردید.

$$K = \frac{T}{D} \quad (2)$$

در این معادله K ، T و D به ترتیب ضریب آبگذری اشباع (m/day)، ضریب قابلیت انتقال (m^2/day)، و ضخامت آبخوان (m) است.

² Parameter estimation

¹ Coverage

میزان اختلاف بین مقادیر تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تمامی مراحل اجرای مدل، با شاخص آماری خطای RMSE مورد ارزیابی قرار گرفت (معادله ۳). در صورت قابل قبول بودن خطای محاسبه شده در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، مدل تهیه شده قادر است اثرات سناریوهای مدیریتی و یا تأثیرات رخدادهای آینده بر رفتار آبخوان را شبیه‌سازی و یا پیش‌بینی نماید.

$$RMSE = \left(\frac{\sum (O-S)^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

که در این معادله O: مقادیر اندازه‌گیری شده، S: مقادیر شبیه‌سازی شده و N: تعداد داده‌ها که در این مطالعه معادل تعداد چاه‌های مشاهداتی است.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی آبخوان یکی از اساسی‌ترین گام‌های اولیه جهت مدیریت و بهره‌برداری پایدار منابع آب زیرزمینی است. اولین مرحله مدل‌سازی یک آبخوان ساخت مدل مفهومی و دومین مرحله ایجاد مدل ریاضی و سپس واسنجی، حساسیت‌سنجی مدل در شرایط پایدار و ناپایدار جهت تعدیل و بهینه‌سازی ضرایب آبگذری و آبدهی ویژه آبخوان است. در ادامه اعتبارسنجی مدل در راستای اطمینان از کارکرد صحیح مدل صورت می‌پذیرد.

واسنجی شرایط پایدار آبخوان

در شبیه‌سازی حالت پایدار، تغییرات تراز آب زیرزمینی نسبت به مکان متغیر اما نسبت به زمان تغییری نمی‌کند؛ لذا مدل ساخته شده منطقه مورد مطالعه تغییرات آن نسبت به مکان بدون در نظر گرفتن شرایط اولیه مدل‌سازی گردید. شکل ۳ نقشه پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده را در حالت پایدار نشان می‌دهد. در این شکل نوار (میل) خطا^۱ در مجاورت هر یک از چاهک‌های مشاهداتی ترسیم شده است. میزان اختلاف تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (باقیمانده خطا^۲) در نوار خطا به رنگ‌های سبز، زرد و قرمز نشان داده شده است.

استفاده گردید. واسنجی مدل در شرایط پایدار بر اساس داده‌های تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در ۱۵ حلقه چاه مشاهداتی در مهرماه سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹، به انجام رسید. مقادیر ضریب آبگذری واسنجی شده و تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در این مرحله، مبنای شبیه‌سازی واسنجی در شرایط ناپایدار قرار گرفت. به منظور اجرای مدل در شرایط ناپایدار، از داده‌های تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در ۱۵ حلقه چاه مشاهداتی در یک دوره زمانی پنج‌ساله (از مهرماه سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ الی شهریورماه سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۴)، شامل ۶۰ دوره تنش و گام زمانی ماهانه، استفاده گردید.

پس از واسنجی مدل در حالت پایدار و ناپایدار، تحلیل حساسیت‌سنجی مدل به پارامترهای ورودی انجام گردید. هدف از حساسیت‌سنجی یافتن تأثیرگذارترین پارامتر بر رفتار سامانه آب زیرزمینی است (Sabah Nia and Sadeghi-Lari, 2024). از این رو در شرایط پایدار پارامترهای ضریب آبگذری، میزان تغذیه و تخلیه از آبخوان، و در شرایط ناپایدار علاوه بر این پارامترها، مقادیر آبدهی ویژه نیز به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد کاهش و سپس افزایش داده شد و برای هر یک از این حالات، مدل اجرا و حساسیت‌سنجی هر یک از آن‌ها با شاخص RMSE ارزیابی شد. در واقع خطای ایجاد شده نشانگر تفاوت میزان تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده قبل و بعد از افزایش یا کاهش پارامتر مورد نظر است.

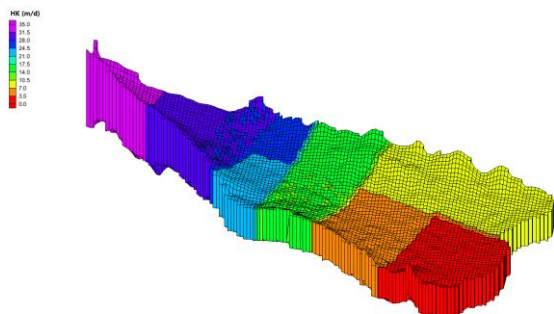
صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی خروجی یک مدل بررسی توانایی یک مدل برای شبیه‌سازی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی است که در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار نگرفته است. صحت‌سنجی پس از مرحله واسنجی مدل در حالت ناپایدار، صورت می‌پذیرد. از این رو در این مطالعه از داده‌های تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در ۱۵ حلقه چاه مشاهداتی در یک دوره زمانی یک‌ساله (مهرماه تا شهریورماه سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹) شامل دوازده دوره تنش با گام زمانی ماهانه و مقادیر تغذیه و تخلیه مربوط به این دوره در راستای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید.

² Residual error

¹ Error bar

آبخوان در محدوده مرکز آبخوان در دامنه ۱۵ تا ۲۵ m/day قرار دارد و با نزدیک شدن به مناطق جنوب شرقی از میزان ضریب آبگذری به شدت کاسته می‌شود. تجمع مواد درشت دانه در بالادست و وجود رسوبات ریزدانه در پایین دست آبخوان منجر به افزایش و یا کاهش چشم‌گیر ضریب آبگذری در این نواحی گردیده است.

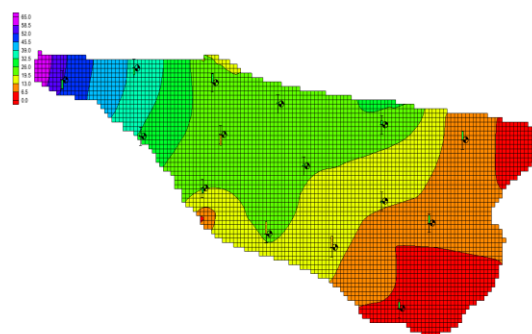


شکل ۴- نقشه ضریب آبگذری واسنجی شده در حالت پایدار.

Figure 4- Map of coefficient of calibrated permeability in the steady state.

واسنجی شرایط ناپایدار آبخوان

در شبیه‌سازی آب زیرزمینی در حالت ناپایدار، تراز آب زیرزمینی نسبت به زمان و مکان متغیر بوده و علاوه بر شرایط مرزی شرایط اولیه نیز برای اجرای مدل منظور می‌شود. بدین منظور مقادیر تغذیه، برداشت و تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده در طی یک دوره پنج‌ساله شامل ۶۰ دوره تنش و گام زمانی ماهانه به مدل معرفی و اجرا گردید. نمودار پراکندگی^۱ تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده توسط مدل در هر چاه مشاهده‌ای در ابتدا، اواسط و انتهای دوره تنش (به ترتیب در گام‌های زمانی اول، سی‌ام و شصتم) به همراه نقشه نوار خطی چاه‌های مشاهده‌ای در شکل ۶ ارائه گردیده است. همان‌طور که در نقشه نوار خطی ملاحظه می‌شود در هر گام زمانی بیشتر از یک مسای پهناده‌درد نوارهای خطی نشان داده شده در مجاورت چاه‌های مشاهده‌ای به رنگ سبز است. با ملاحظه نمودار پراکندگی نیز هم‌بستگی بسیار بالای تراز آب زیرزمینی محاسباتی و مشاهده‌ای در هر چاه مشاهده‌ای به وضوح دیده می‌شود که نشان از دقت مناسب مدل در تخمین تراز آب زیرزمینی در شرایط ناپایدار آبخوان است. میزان خطای کلی RMSE در واسنجی حالت ناپایدار برابر با ۱/۰۳ توسط مدل محاسبه گردید که بسیار نزدیک به



شکل ۳- تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در حالت پایدار.

Figure 3- Simulated and measured groundwater level in the steady state.

اگر اختلاف تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در بازه تعیین شده قرار گیرد، باقیمانده خطا به رنگ سبز و در غیر این صورت برای خطای کمتر از ۲۰۰ درصد و یا بیشتر از ۲۰۰ درصد باشد، باقیمانده خطا به ترتیب به رنگ زرد و قرمز نشان داده می‌شود. از این‌رو رنگ‌های سبز باقیمانده خطا در اکثریت چاه‌های مشاهده‌ای در شکل ۴ دلالت بر تطابق بسیار خوب بین تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده دارد که نشان‌دهنده خطای بسیار کم مدل واسنجی شده آبخوان مورد مطالعه است. خطاهای پیش آمده در طول اجرای مدل ناشی از شرایط مرزی و عدم قطعیت داده‌های ورودی به مدل است. با توجه به اینکه حداکثر مجاز خطای باقیمانده بین تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ± 1 m به مدل معرفی شد؛ بنابراین RMSE کمتر از یک به عنوان خطای مجاز در نظر گرفته شد. شاخص خطای RMSE محاسبه شده توسط مدل پس از اجرای آن در حالت پایدار برابر با ۰/۹۳ بود که تأییدکننده دقت مناسب شبیه‌سازی در مرحله واسنجی پایدار است. از این‌رو پارامتر ضریب آبگذری محاسباتی در این مرحله با شرایط میدانی سامانه آبخوان مطابقت دارد و کاربرد آن در مراحل بعدی شبیه‌سازی امکان‌پذیر است.

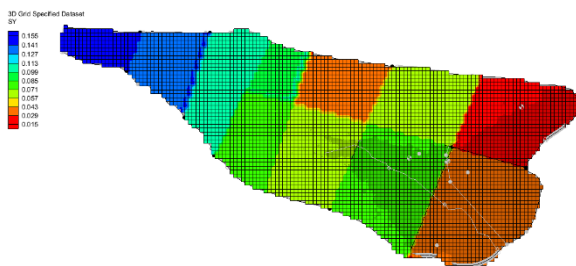
شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی ضریب آبگذری اشباع آبخوان کهورستان را نشان می‌دهد. مطابق با این نقشه نواحی شمال غربی آبخوان دارای بیشترین مقادیر ضریب آبگذری است که از ۲۵ الی ۳۵ m/day متغیر هستند. ضریب آبگذری مواد

¹ Scatter plot

شکل ۵- نمودار پراکندگی تراز آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و محاسبه شده و نقشه خطای چاه‌های مشاهداتی (الف: گام زمانی اول، ب: گام زمانی سی‌ام، ج: گام زمانی شصتم).

Figure 5- Scatter plot of measured and computational groundwater level and map of observation wells error bar (a; first time step, b: thirtieth time step, c: sixtieth time step).

از آنجایی که اطلاعات بسیار اندکی از وضعیت ضریب آبدی ویژه در آبخوان‌ها در سازمان‌های متولی در دسترس است و در صورت موجود بودن فقط میانگینی از ضریب آبدی ویژه کل آبخوان است، لذا ساخت مدل ریاضی یک آبخوان این فرصت را فراهم می‌سازد که در مرحله واسنجی ناپایدار مقادیر ضریب آبدی ویژه بهینه و نقشه پهنه‌بندی آن فراهم گردد. نقشه پهنه‌بندی ضریب آبدی بهینه‌شده ناحیه مورد مطالعه در شکل ۶ ارائه شده است. دامنه ضریب آبدی در آبخوان کهورستان بین ۰/۱۵ الی ۰/۱۵۵ متغیر است. روند تغییرات آن از نواحی بالادست به سمت پایین‌دست آبخوان شبیه به ضریب آبگذری اشباع کاهشی است. درشت‌دانه بودن مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در نواحی جنوب غربی منجر به افزایش ضریب آبدی ویژه در این نواحی گردیده است. درحالی‌که نواحی شمال شرقی و جنوب شرقی از ضریب آبدی ویژه بسیار پایین‌تری برخوردار است.



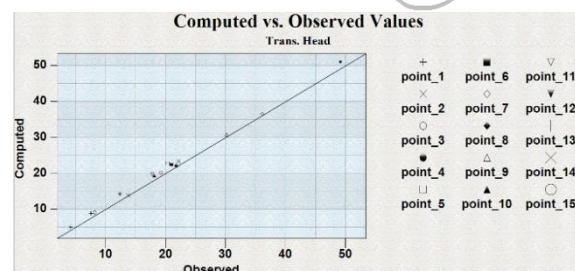
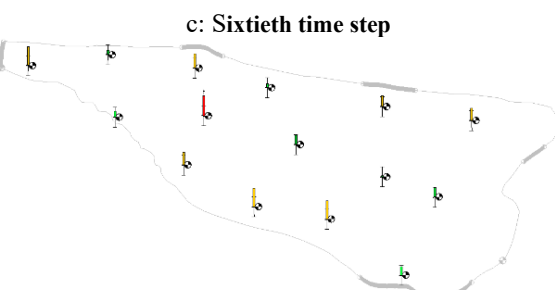
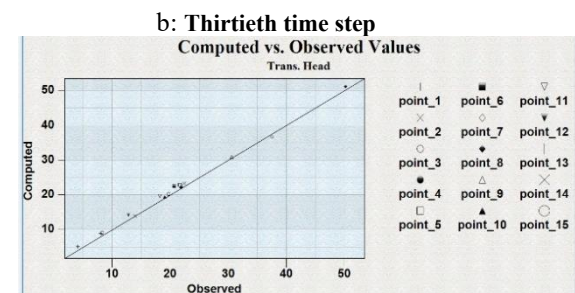
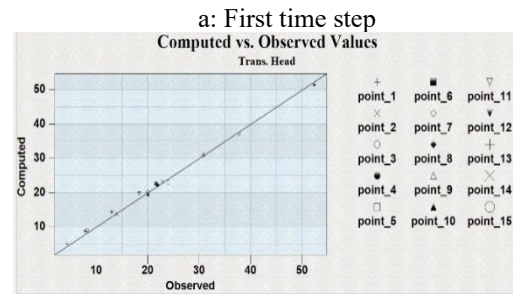
شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی ضریب آبدی ویژه واسنجی شده.

Figure 6- Zoning map of coefficient of calibrated specific yield.

حساسیت‌سنجی ورودی‌ها به مدل

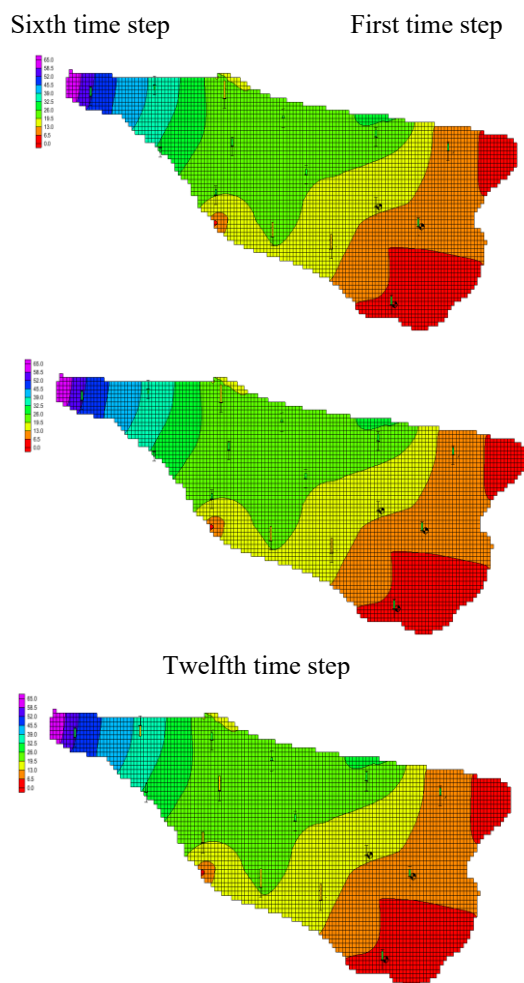
شکل ۷ حساسیت‌سنجی مدل نسبت به افزایش و کاهش پارامترهای مختلف در شرایط اجرای پایدار و ناپایدار مدل را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر معیار خطای RMSE، مدل بیشترین و کمترین حساسیت را به ترتیب به تغییرات ضریب آبگذری و تخلیه آبخوان نشان داد. بعد از ضریب آبگذری مدل بیشترین حساسیت را به میزان تخلیه از آبخوان نشان داد.

خطای مجاز معرفی شده به مدل ($\pm 1m$) بود و نشان از تطابق بسیار خوب مدل ساخته‌شده با داده‌های اندازه‌گیری شده تراز آب زیرزمینی است.



شرایط آبخوان در آینده و اجرای سناریوهای مدیریتی قابل اعتماد می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب آبدهی ویژه اندک بود.

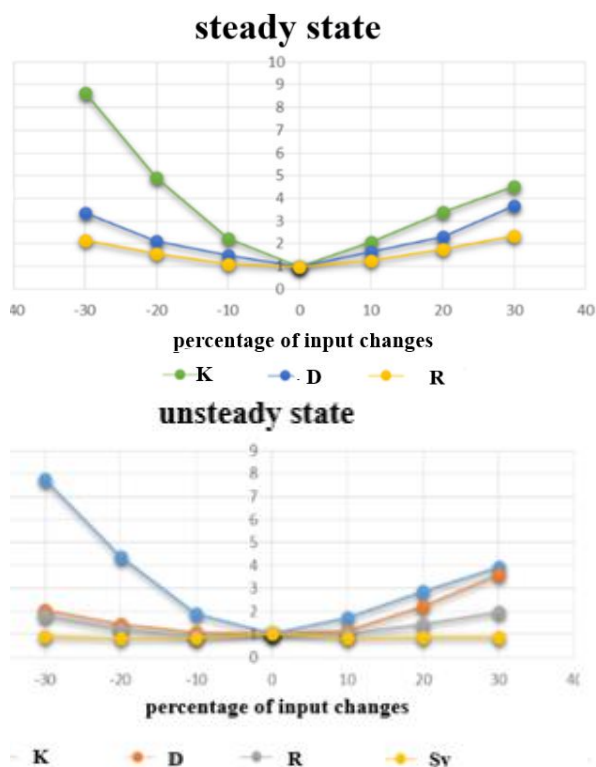


شکل ۸- تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی (اول: گام زمانی اول، ب: گام زمانی ششم، ج: گام زمانی دوازدهم).

Figure 8- Simulated groundwater level in the validation step (a: first time step, b: sixth time step, c: twelfth time step).

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر اولین مطالعه در خصوص آبخوان محدوده مطالعاتی کهرستان با مدل MODFLOW است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در شرایط اجرای مدل در حالت‌های پایدار و ناپایدار برقرار است. معیار RMES نزدیک به یک نیز مؤید آن است. باتوجه به دقت مناسب مدل در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، به‌کارگیری این مدل جهت شبیه‌سازی رفتار آبخوان با راهبردهای مدیریتی مختلف و یا پیش‌بینی تراز آب



شکل ۷- RMSE محاسبه شده از حساسیت‌سنجی ورودی‌های مختلف.

Figure 7- RMSE calculated from sensitivity testing for different inputs.

صحت‌سنجی مدل

مدل‌های ساخته شده آبخوان منطقه مورد مطالعه پس از واسنجی ضرایب آبگذری و آبدهی ویژه و حساسیت‌سنجی به ورودی‌های مختلف جهت اطمینان و تأیید کارکرد آن‌ها صحت‌سنجی گردید. شکل ۸ نتایج صحت‌سنجی مدل را در یک دوره زمانی یک‌ساله برای گام‌های زمانی ابتدایی (اول)، میانی (ششم) و انتهایی (دوازدهم) نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تمامی نوارهای خطای نشان داده شده در کنار چاه‌های مشاهداتی در دامنه مناسب (رنگ سبز) یا قابل قبول (رنگ زرد) قرار دارند. میزان خطای RMSE در این مرحله برابر با ۰/۹۹۸ توسط مدل برآورد گردید. میزان خطای مذکور و نتایج بصری ارائه شده 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

موردی: دشت کهورستان، هرمزگان). مجله علوم ومهندسی
آبخیزداری ایران، ۱۸ (۶۶): ۵۹-۷۲.

میرزائی، ا.، مجدم، ی.، سهیلا و چیت سازان، م.، ۱۴۰۳.
مدل سازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی دشت گلگیر
خوزستان، جنوب غرب ایران، با استفاده از مدل GMS. زمین
شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۴(۳).

نخعی، م.، حسنی، ع.، مقیمی، ه.، و نوین پور، ن.، ۱۴۰۰.
پیش بینی اثرات ناشی از بهره برداری بی رویه بر آبخوان دشت
زرنديه (استان مرکزی) با استفاده از نرم افزار GMS.
هیدروژئولوژی، ۶(۲).

Reference

Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992. The role of the postaudit in model validation. Adv Water Resour 15, 167–173.

Azadegan, B., Hanafi, H., Varavi pour, M., Kardan moghaddam, hamid, 2024. Numerical simulation of Taybad plain aquifer using MODFLOW and prediction of management scenarios. Water and Irrigation Management 14, 343–355.

Chepkemioi, A.K., Home, P.G., Raude, J.M., Kiptum, C.K., 2023. Modeling of groundwater potential in Kericho County, Kenya, using GMS_MODFLOW. Sci Afr 19, e01492.

Janardhanan, S., Islam, M.M., Islam, Md Tohidul, Peña-Arancibia, J., Hodgson, G., Karim, F., Mainuddin, M., Islam, Md Tarikul, Rahman, M.A., Kirby, J.M., 2023. Groundwater balance and long-term storage trends in the regional Indo-Gangetic aquifer in northwest Bangladesh. J Hydrol Reg Stud 49, 101500.

Kashef Abdel-Aziz I., 1986. Groundwater Engineering. New York: McGraw-Hill.

Khaledi Alamdari, M., Majnooni Heris, A., Fakheri Fard, a., 2022. Estimation of Hydraulic conductivity and Specific storage of Shabestar Plain Aquifer Using Numerical model. Hydrogeology 7, 42–52. [In Persion]

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

زیرزمینی تحت سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی
قابل اعتماد هست. نتایج حاصل از واسنجی مدل در دو حالت
پایدار و ناپایدار، حاکی از آن بود که نواحی شمال غربی دارای
بیشترین میزان ضریب آبگذری و آبدهی ویژه هستند. این
نتایج با تراکم بسیار زیاد چاه های بهره برداری و دبی پمپاژ زیاد
در این مناطق مطابقت دارد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از شرکت آب منطقه ای هرمزگان جهت در
اختیار قراردادن اطلاعات لازم مطالعه حاضر، تشکر و قدردانی
می شود.

دسترسی به داده ها

داده های به دست آمده در این پژوهش در متن مقاله ارائه
شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد
منفعی در رابطه با نوشتن و یا انتشار این مقاله ندارند.

منابع

ریحانی، ا.، یوسفی، ح.، میرزاوند، م. و ساداتی نژاد، ج.،
۱۴۰۲. مدل سازی اثر سناریوی مدیریتی روی آبخوان کاشان
با مدل ریاضی Modflow و Seawat. مجله
اکوهیدرولوژی، ۱۰(۱).

سلطانی، ف.، جوادی، س.، روزبهانی، ع.، مساح بوانی، ع.
و لطفی، س.، ۱۴۰۱. شبیه سازی تبادلات آب سطحی و
زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW-OWHM (منطقه
مورد مطالعه: دشت شازند). مجله اکوهیدرولوژی، ۹(۱)، ۱۹۹-
۲۱۰.

صباح نیا، د. و صادقی لاری، ع.، ۱۴۰۳. مدل سازی کمی
آب زیرزمینی با استفاده از GMS-MODFLOW (مطالعه
موردی: آبخوان شمیل در استان هرمزگان).
هیدروژئولوژی، ۹(۱)، ۷۱-۸۵.

صادقی لاری، ع.، کاظمی، م.، رجبی، ف.، ۱۴۰۳. بررسی
اثر ویژگی های اقلیمی و سطح زمین بر کیفیت آب زیرزمینی
با استفاده از داده های گوگل ارت انجین (GEE) (مطالعه

irrigation purposes in the arid and hot weather of Southern Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 134, 103582.

Sadeghi Lari, A., Kazemi, M., Rajabi, F., 2024. Investigating the Impact of Climatic and Land Surface Characteristics on Groundwater Quality Using Google Earth Engine (GEE) Data (Case Study: Kahorestan Plain, Hormozgan). *ijwmse* 18, 59–72. [In Persian]

Soltani, F., Javadi, S., Roozbahani, A., Massah Bavani, A.R., Lotfi, S., 2022. Simulation of surface water-groundwater interaction using MODFLOW-OWHM (case study: Shazand plain). *Journal of Ecohydrology* 9, 199–210. [In Persian]

Yekom Consulting Engineering, 2012. Hydrogeology study of Kahorestan area.

Yoon, G.-L., Kim, B.-T., Kim, B.-O., Han, S.-H. J. W.M., 2003. Chemical–mechanical characteristics of crushed oyster-shell 23, 825–834.

groundwater modeling system. *Groundw Sustain Dev* 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. *Groundw Sustain Dev* 11, 100471.

Lyazidi, R., Hessane, M.A., Moutei, J.F., Bahir, M., 2020c. 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. *Groundw Sustain Dev* 11, 100471.

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

Mirzaee Arjenaki, S.Y., mojadam, soheila, Chitsazan, M., 2024. Modeling the effects of climate change on the groundwater resources of Golgir Plain, Khuzestan, southwest Iran, using the GMS model. *Advanced Applied Geology* 14, 694–712. [In Persian]

nakhaei, mohammad, hasani, ali, Moghimi, H., Abbasnovinpour, E., 2022. Predicting the effects of overuse on Zarandieh plain aquifer (Markazi province, Iran) using GMS software. *Hydrogeology* 6, 13–29. [In Persian]

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, 17–32. [In Persian]

Sabah Nia, D., Sadeghi-Lari, A., 2024. Quantitative Modeling of Groundwater Using GMS-MODFLOW (Case Study: Shamil Aquifer in the Hormozgan Province). *Hydrogeology* 9, 71–85. [In Persian]

Sadeghi-Lari, A., Bahrami, M., Dastandaz, T., 2024. Temporal and spatial variations of groundwater quantity and quality for drinking and