نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۵، جلد ۱۷، آذر - دی ۱۴۰۲، ص. ۹۶۵-۹۵۳

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.5, Vol. 17, Dec.-Jan. 2023, p. 953-965

مقاله علمی-پژوهشی

مدیریت برنامه‌ریزی جهت بهره‌برداری از آبخوان آزاد با استفاده از مدل GMS

مرضیه قربانی اقدم [۱]، حسین خزیمه‌نژاد*[۲]، محسن پوررضا بیلندی[۳]، هدی قاسمیه[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۰

چکیده:

بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب به‌ویژه منابع آب زیرزمینی بسیار حائز اهمیت است. مدیریت منابع آب، نیازمند شناخت دقیق خصوصیات آبخوان، تنش‌های وارده به آن و در نهایت بیلان آب زیرزمینی است. مدل‌های شبیه‌ساز کمک شایانی به مدیران برنامه‌ریز جهت تعیین میزان بهره‌برداری از آبخوان برای استفاده بلندمدت و پایدار می‌نمایند. بدین منظور تغییرات ترازآبی آبخوان دشت کاشان در دوره آماری ۱۳۸۷-۱۳۹۷ توسط مدل GMS برای ۱۲۵ دوره تنش شبیه‌سازی شد. مدل در دو حالت دایمی و غیر دائمی برای دوره (۱۳۹۵-۱۳۸۷) واسنجی و برای دوره (۱۳۹۷-۱۳۹۵) صحت سنجی شد. نتیجه، افت آب زیرزمینی به میزان ۴/۴ متر در طول ۱۰ ساله مطالعاتی بود. برای پیش‌بینی رفتار آبخوان در آینده نزدیک، سطح ایستابی تا سال ۱۴۰۷ شبیه‌سازی شد. به جهت واقع شدن این دشت در کمربند خشک اقلیمی و رخ داد تغییر اقلیم و نبود بارش مؤثر جهت تغذیه مناسب آبخوان، در این مطالعه تمرکز بر روی مدیریت برداشت از آبخوان بود و بدین جهت، سه سناریوی، برداشت با روند کنونی، ۱۵ درصد افزایش و ۱۵ درصد کاهش در برداشت تعریف و شبیه‌سازی انجام شد. نتایج به ترتیب افت ۹/۸ ، ۱۱/۹ و ۶/۹ متری در پایان سال ۱۴۰۷ را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری پایدار، سطح ایستابی، مدل شبیه¬ساز آب زیرزمینی، واسنجی، GMS

مقدمه

افزایش تقاضای آب، در سراسر جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به طور مداوم منابع آب زیرزمینی را به‌عنوان تنها منبع قابل اطمینان و در دسترس تشدید می‌کند. آبخوان دشت کاشان، به‌عنوان منبع اصلی آب مورد نیاز برای شرب، بهداشت و کشاورزی برای حدود نیم‌میلیون نفر در مناطق کاشان و آران و بیدگل، علاوه بر این‌که با کاهش سطح ایستابی مواجه است، به دلیل وجود پتانسیل‌های شورکننده در منطقه (مانند دریاچه نمک، کفه نمکی سراجه، گنبد نمکی مدفون نصرآباد، پدیده آپ‌کنینگ و تبخیر) با مشکل شور شدن منابع آب روبرو است. همچنین به دلیل تغذیه قائم آبخوان با استفاده از پساب برگشتی اراضی کشاورزی و پساب صنعتی و شهری، این آبخوان در معرض آلوده شدن به آلاینده‌های مختلف قرار دارد. در نتیجه، عدم آگاهی کامل، دقیق و به‌روز از مکانیسم‌های حاکم بر آبخوان، هم از نظر کمی و هم از نظر کیفی، می‌تواند استفاده از منابع آب این آبخوان را با مشکل بسیار جدی مواجه نماید. مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، یکی از اهداف اصلی برای حفظ این منابع ارزشمند در آینده است. به خصوص زمانی که با افزایش تقاضای آب و تنش در بخش شرب و کشاورزی مواجه باشیم. این مدیریت نیازمند درک درست از سیستم آب زیرزمینی است. در این میان مدل‌سازی عددی آب‌های زیرزمینی را می‌توان به عنوان ابزاری مفید، سریع و ارزان برای شناخت صحیح و دقیق خصوصیات آبخوان، تنش‌های وارده به آن و تعیین درست مؤلفه‌های تخلیه و تغذیه و در نهایت بیلان آب زیرزمینی بکار گرفت.

مدل ریاضی آب زیرزمینی، شبیه‌سازی یک سامانه هیدروژئولوژیکی است که از قوانین فیزیک و ریاضی کمک می‌گیرند. دو مؤلفه اساسی آن مدل مفهومی و مدل ریاضی می‌باشد. مدل مفهومی در حقیقت تصویر ساده شده‌ای از سامانه می‌باشد و مدل ریاضی نیز مجموعه‌ای از فرمول‌های ریاضی است که با توجه به فرضیات خاص به فرایندهای فیزیکی فعال در درون سامانه آبخوان مقدار می‌دهد. بدیهی است که مدل به خودی خود جزئیات واقعی سامانه آب زیرزمینی را شامل نمی‌شود ولی رفتار یک مدل معتبر

۱ - دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۴- دانشیار گروه مهندسی طبیعت دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
(*-نویسنده مسئول Email: Hkhozeymeh@birjand.ac.ir)

تقریباً نشان دهنده رفتار آبخوان می‌باشد. مدل آب زیرزمینی ابزاری در اختیار می‌دهد تا بتوان داده‌های موجود را به ویژگی‌های عددی برای سامانه آب زیرزمینی تبدیل نمود. چنین مدلی تا حد قابل قبولی نماینده سامانه آب زیرزمینی خواهد بود.

برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی، پارامترهای هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی دخالت دارند که با نبود اطلاعات دقیق از این پارامترها و یا فقدان دقت و توجه در جمع‌آوری داده‌ها، نمی‌توان به شبیه‌سازی انجام شده اطمینان کرد. بدین منظور برای اینکه بتوان خطای شبیه‌سازی را به کمترین مقدار رسانید از ابزار واسنجی استفاده می‌شود. در حقیقت واسنجی کمینه نمودن اختلاف میان مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی سطح آب زیرزمینی می‌باشد (صادقی طبس و همکاران،۱۳۹۴).

یکی از مدل‌های شبیه‌سازی که ظرفیت بسیار خوبی در مطالعه آب زیرزمینی دارد و اساس حل معادلات حاکم بر آن روش‌های عددی تفاضل محدود و اجزای محدود می‌باشد، رابط کاربر دوست GMS است (صادقی طبس و همکاران،۱۳۹۴). در این راستا به چند نمونه از مطالعات انجام شده در داخل و خارج از ایران در خصوص شبیه‌سازی آبخوان پرداخته شده است.

رجا و همکاران (۱۴۰۱)، از مدل تلفیقی و جامع آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW-NWT برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی دشت مهاباد استفاده نمودند. نتایج ایشان حاکی از کارامد بودن این مدل در تبیین الگوی بهره‌برداری مناسب از منابع آب سطحی و زیرزمینی بود. در ملایر نیز صمدی و همکاران (۱۴۰۱)، از دو مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی MODFLOW و آب سطحی SWAT بهره بردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر افت به میزان ۹/۷ متر در طول ۱۰ سال مطالعه بود. در تحقیقی اسکندری و همکاران (۱۴۰۱)، به ارزیابی تغییر اقلیم در دشت میناب و تأثیر آن بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در دوره آتی پرداختند. جهت بررسی پدیده تغییر اقلیم از مدل اقلیمی CanESM2 با استفاده از نرم‌افزار SDSM4.2و برای مدل‌سازی کمی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی از نرم‌افزار GMS10.0.5 تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده نمودند. نتایج حاصل از بررسی سناریوهای یاد شده نشان داد که به ترتیب دما به میزان ۱/۸، ۲/۶ و ۴/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش به میزان ۳۴/۱، ۴۲/۰۸ و ۵۹/۴ درصد نسبت به حالت پایه کاهش می‌یابد. نتایج اعمال سناریوهای اقلیمی بااستفاده از مدل آب زیرزمینی نشان داد که به دلیل کاهش بارندگی در این دوره، در تمامی سناریوهای مذکور متوسط تراز سطح آب زیرزمینی افت قابل توجهی می یابد. خواجه‌ایم و همکاران (۱۴۰۰)، نیز با هدف حداکثرسازی سود اقتصادی و همچنین کنترل افت آب زیرزمینی به مدل‌سازی منابع آب دشت کرج با استفاده از شبیه‌سازی عددیMODFLOW و الگوریتم بهینه‌سازی غیر خطی چند هدفه ژنتیک پرداختند. نتایج نشان دادکه این بهینه-سازی، باعث کاهش ۹ درصدی اختصاص آب به بخش کشاورزی و تقویت آبخوان به میزان ۳/۰۳ میلیون متر مکعب آب در سال شد. در مطالعه‌ای حججی پور و همکاران (۱۳۹۸)، با هدف بررسی تأثیر سناریوهای مرتبط با میزان تأمین تقاضا و منابع آب موجود، در بجنورد برای یک دوره ۲۸ ساله (۱۴۱۹-۱۳۹۲) از مدل تلفیقی-(WEAP MODFLOW) استفاده نمودند. نتایج نشان داد به کارگیری مدل تلفیقی، بهتر از حالت استفاده بصورت جداگانه، برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی را کاهش می‌دهد. پناهی و همکاران (۱۳۹۷)، به شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی به وسیله نرم افزار GMS در آبخوان زنجان پرداختند. مدل با فرض نرخ کاهش آب‌های زیرزمینی و مقدار ثابت تغذیه برای فاصله زمانی ۱۵ ساله از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۲ اجرا شد که نقشه‌های به دست آمده برای تراز آب زیرزمینی نشان دهنده افت شدید تراز آب با ادامه برداشت‌های بی‌رویه از ذخیره آب-های زیرزمینی این منطقه بود. در پژوهشی که در آبخوان واقع در گتوند-عقیلی انجام گرفت سعید حمزه و همکاران (۱۳۹۷) تاثیرات تغییر اقلیم را بر روی تراز آب زیرزمینیی این منطقه با استفاده از مدل MODFLOW در محیط GMS در یک دوره ۱۰ ساله ۱۳۹۱-۱۳۸۱ مورد بررسی قرار دادند. ایشان پنج سناریوی اقلیمی را در سطوح ریسک مختلف اعمال نمودند. نتایج نشان داد که در سطح ریسک ۰/۱ بیشترین میزان افت آبخوان به میزان ۱/۸ متر و در سطح ریسک ۰/۹ افزایش سطح آب زیرزمینی به میزان ۰/۴۳ متر اتفاق می افتد. در اندیمشک زینالی و همکاران، به منظورتعیین برداشت بهینه از منابع آبی موجود، الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب (NSGA) را با مدل آب سطحی(WEAP) و زیرزمینی (MODFLOW) ترکیب نمودند. استفاده از این روش باعث شده تا حدی اطمینان تأمین تقاضا افزایش یافته و برداشت آب زیرزمینی کاهش یابد (Zeinali et al., 2020). برای تعیین سیاست‌های بهینه اجتماعی و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در منطقه برخوار اصفهان خطیری و همکاران، از تلفیق سه مدلSWAT ، MODFLOW و MT3DMS با اتصال به MOPSO استفاده نمودند. ایشان نتیجه گرفتند که تقریباً همه روش-های انتخاب شده برای حل تعارض رفتار مشابهی داشته و تفاوت چشمگیری با یکدیگر نداشتند (Khatiri et al., 2020). صاغی و همکاران، از مدل MODFLOW و الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی کلنی مورچه برای سفره آب زیرزمینی نمدان واقع در استان فارس استفاده نمودند. نتایج نشان داد که برنامه‌ریزی مبتنی بر شاخص های پایداری، پرشدگی و إحیا منجر به افزایش در ارتفاع آب زیرزمینی به میزان ۳ ، ۹/۴۷ و ۱۰/۶۱ متر در پایان دوره مدیریت در مقایسه با آغاز دوره گردیده است (Saghi-Jadid et al., 2020). در تونس بوگاریو و همکاران، بر اساس دوره پایه ۱۹۹۰-۱۹۶۱ از مدل جریان آب زیرزمینی MODFLOW و سیستم اطلاعات جغرافیایی

ArcGIS9.3 برای شبیه‌سازی رفتار آب زیرزمینی در سال ۲۰۵۰ استفاده نمودند. ایشان بر اساس دو سناریوی الف) مصرف ثابت و در حال رشد ب) پیش‌بینی بارندگی را بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم (A2,B2) و مدل HADCM3، شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان دهنده کاهش تراز آب به میزان ۰/۵ متر در سال ۲۰۲۰ و یک متر در سال ۲۰۵۰ و افزایش دما به میزان ۰/۸ و ۱/۶ در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۵۰ بود (Bougharioua et al., 2018). برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت پونیایار هند سریدهار و همکاران، از نرم افزار MODFLOW استفاده نمودند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که نوسانات تراز آب زیرزمینی به تغییرات فصلی تغذیه حاصل از نفوذ باران و آب آبیاری وابسته می‌باشد. همچنین تراز آب در بخش غربی افزایش و در قسمت جنوب رودخانه پونیایار در حال کاهش می‌باشد (Sridhar et al., 2018).

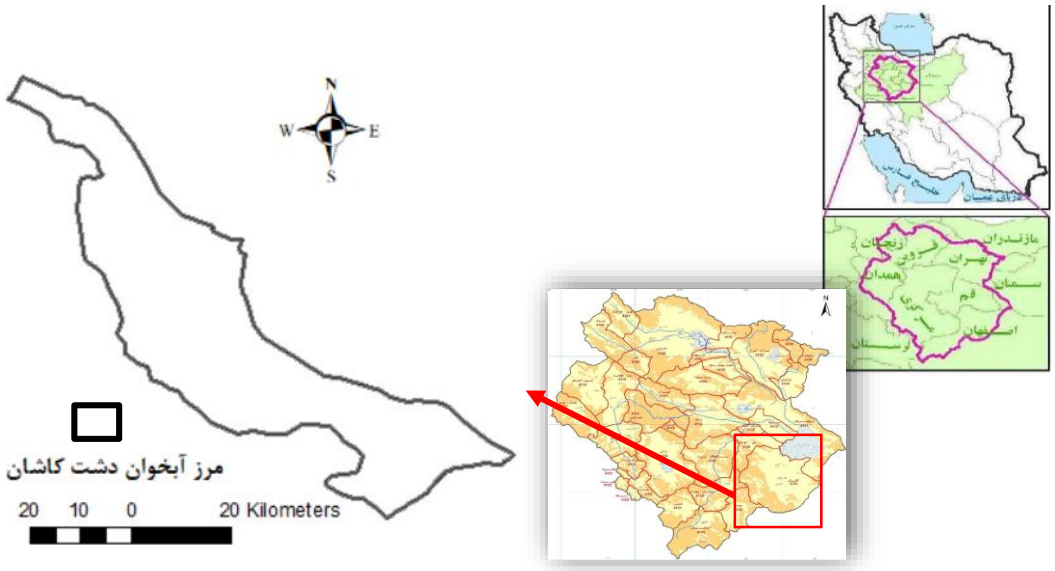
تاکنون مدیریت برداشت تحت سناریوهای مختلف در آبخوان دشت کاشان انجام نشده است. در مطالعه حاضر و با درنظر گرفتن شرایط فوق‌بحرانی آبخوان دشت کاشان و مقدار ثابت تغذیه، آبخوان با تکیه بر سه سناریوی برداشت یعنی ۱) برداشت از آبخوان با روند کنونی ۲) ۱۵ درصد افزایش برداشت ۳) ۱۵ درصد کاهش برداشت شبیه‌سازی گردید تا تأثیر مدیریت در برداشت روی آبخوان شبیه‌سازی گردد.

مواد و روش‌ها

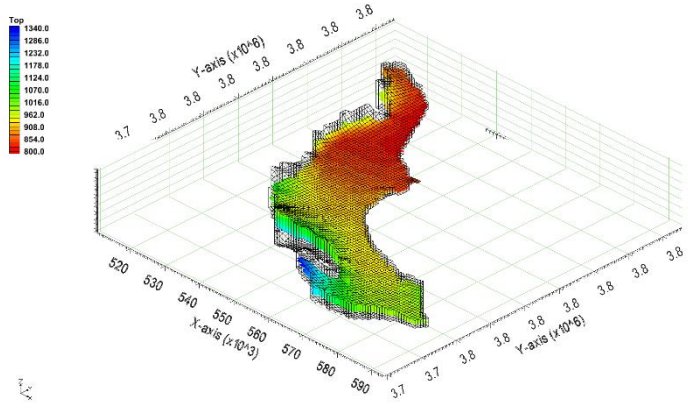
موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

دشت کاشان به وسعت ۱۷۳۶ متر مربع در دامنه کوه‌های کرکس و حاشیه کویر مرکزی ایران در حدود ۲۴۰ کیلومتری جنوب تهران و بین طول‌های جغرافیائی ۵۱ درجه و ۵ دقیقه و ۵۱ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه و ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی قراردارد. با توجه به روش دومارتن دشت کاشان با ضریب خشکی ۴/۸ جزء مناطق خشک محسوب می‌گردد. از سوی دیگر نواحی کوهستانی جنوب دشت کاشان از نقطه نظر طبقه بندی دومارتن جزء مناطق نیمه خشک محسوب می‌شود. تقریباً تمام بهره-برداری از آبخوان آبرفتی دشت کاشان نیز در همین محدوده انجام می‌گیرد.

خاک دشت کاشان، عموماً جوان و تکامل نیافته هستند. این خاک‌ها عمدتاً از رسوبات شنی، ماسه‌ای، رسی، تپه‌های گچی و نیز از سازندهای آواری و آتشفشانی حد واسط به‌وجود آمده‌اند (اسماعیل‌زاده نوش‌آبادی، ۱۳۸۶). موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. حداکثر ارتفاع دشت کاشان از سطح دریا ۱۳۰۰ متر در قسمت حاشیه‌های غربی دشت و حداقل ارتفاع آن ۸۰۰ متر در حاشیه کویر است.

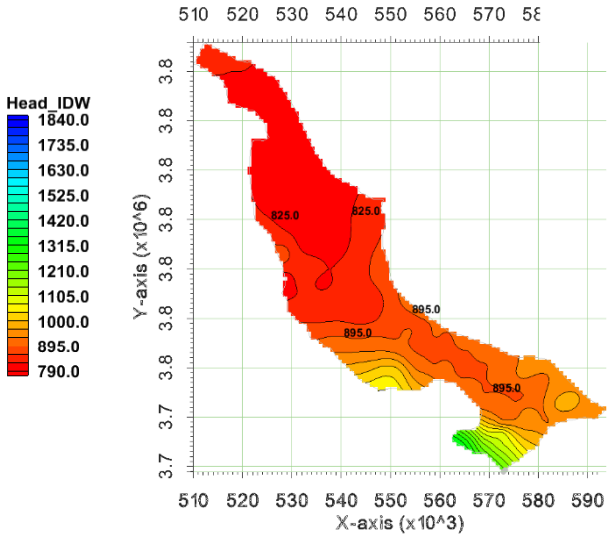


شکل ۱- زیر حوضه آبریز کاشان با شماره ٤١٣٢ و دشت کاشان



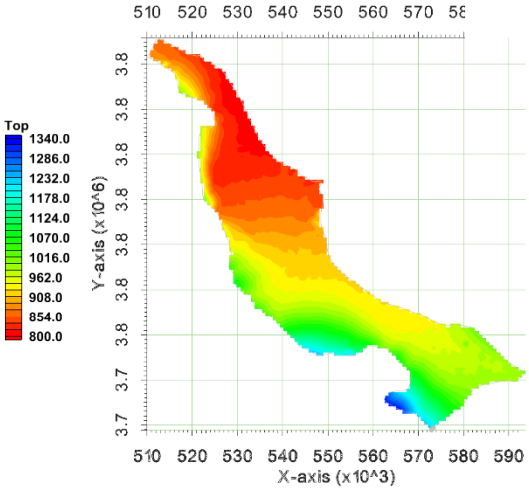
شکل ۲- تصویر سه بعدی از ارتفاع آبخوان

(واحد محورها متر می‌باشد)

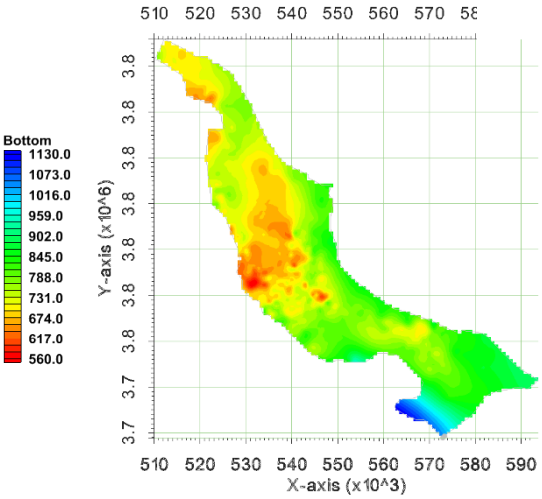


شکل ۳- تراز آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی

(واحد محورها متر می‌باشد)



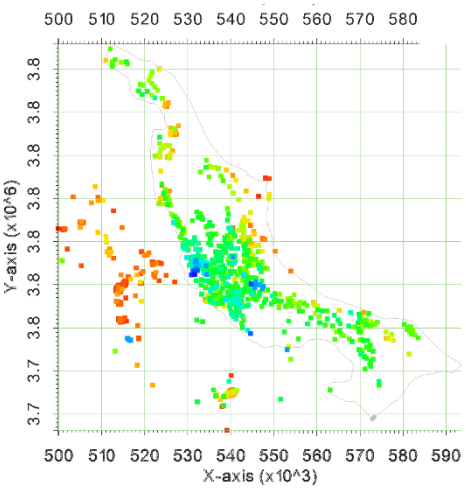
شکل ٤- توپوگرافی سطح زمین(واحدمحورها متر می باشد)



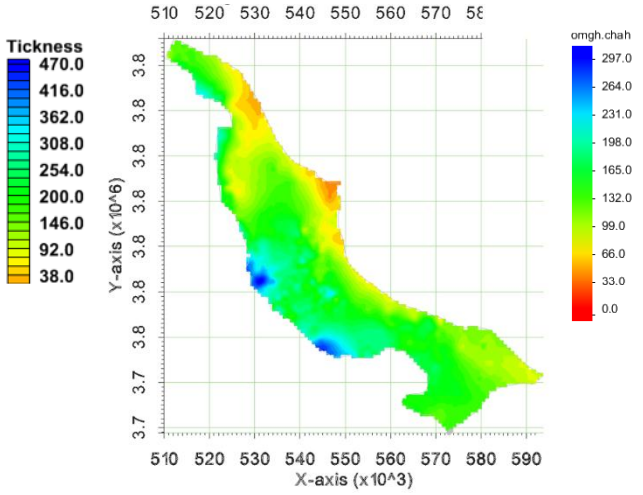
شکل ٥- توپوگرافی سنگ بستر آبخوان(واحدمحورها متر می باشد)

شکل (۲) تصویر سه بعدی آبخوان را در مدل آب زیرزمینی نشان می‌دهد. بر اساس اطلاعات و ارقام سطح آب زیرزمینی در چاه‌های پیزومتری، منحنی‌های هم‌تراز آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی کاشان برای دوره درازمدت ۱۰ ساله (۱۳۹۷-۱۳۸۷) در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنان که مشاهده می‌شود، تغییرات تراز متأثر از تغییرات ارتفاعی و توپوگرافی ساختار آبرفتی آبخوان بین ۸۰۰ تا ۱۸۴۰ متر متغیرمی‌باشد. شکل (۴) و (۵) به ترتیب توپوگرافی سطح زمین و توپوگرافی سنگ بستر آبخوان را نشان می‌دهد. توپوگرافی سطح زمین طبق پهنه بندی بین نقاط پراکنده حاصل شده از ساختار DEM ماهواره بدست آمده است. و در مورد سنگ بستر، با کسر لایه ضخامت از لایه توپوگرافی سطح زمین، این مقادیر به دست آمد.

به جهت توسعه مدل مفهومی آب زیرزمینی، نیاز به تخمین دقیق از تغییرات ضخامت آبخوان در حدود ناحیه اشباع بود. برای این منظور با توجه به در دسترس نبودن مطالعات اکتشافی، از اطلاعات عمق متوسط چاه‌های بهره‌برداری استفاده گردید. شکل (۶) عمق چاه‌های بهره‌برداری پراکنده در منطقه مطالعاتی و شکل (۷) نیز لایه پیوسته پهنه‌بندی کریجینگ را که معرف تغییرات ضخامت آبرفت آبخوان دشت مورد مطالعه است را نشان می‌دهد.



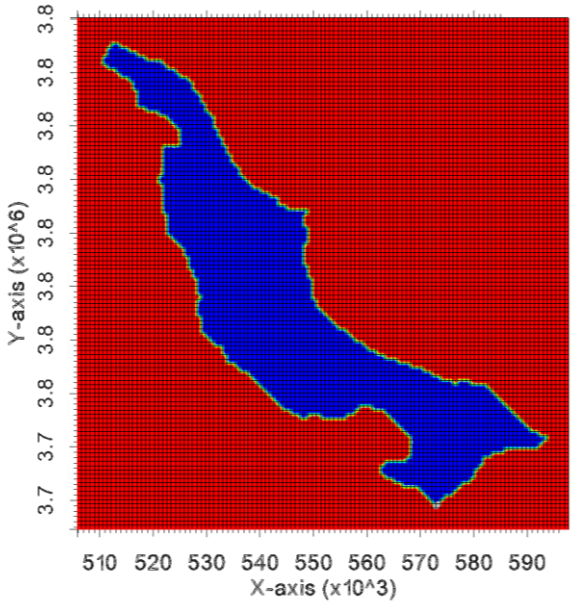
شکل ٦- عمق چاه‌های بهربرداری (واحدمحورها متر می باشد)



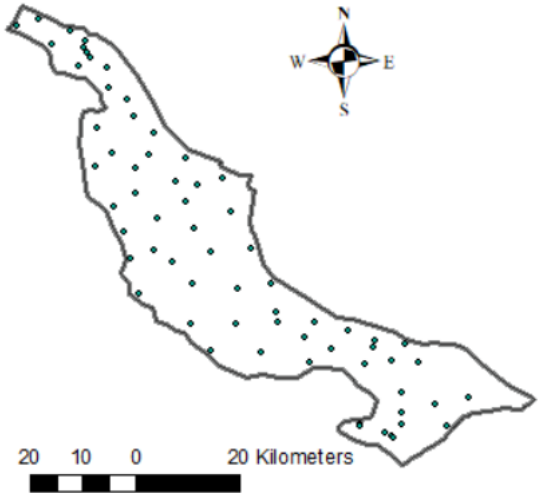
شکل ۷- ضخامت آبرفت آبخوان(واحدمحورها متر می باشد)

مدل‌سازی کمی آبخوان دشت کاشان:

مدل مفهومی آبخوان کاشان براساس عوامل تأثیرگذار و مؤثر مانند منابع تغذیه و تخلیه آبخوان، مرز محدوده مدل‌سازی، مناطق تغذیه در مدل MODFLOW با شبکه‌بندی ۵۰۰×۵۰۰ متری در دو حالت دائمی و غیردائمی اجرا شده است. ۱۲۰×۱۱۵ سطر و ستون این شبکه‌بندی است. تعداد کل سلول‌های به وجود آمده حاصل از این شبکه ۱۳۸۰۰ می‌باشد که از این تعداد ۱۱۰۷۶ سلول غیرفعال و ۲۷۲۴ عدد سلول فعال می‌باشد. شکل شماره (۸) شبکه‌بندی آبخوان، سلول‌های غیرفعال (قرمز رنگ) و سلول‌های فعال (آبی رنگ) رانشان می‌دهد. اندازه‌گیری سطح آب در کاشان از سال ۱۳۴۴ با تعداد ۱۰۰ حلقه پیزومتر شروع شده ولیکن در حال حاضر براساس آخرین آمار در این دشت، تعداد ۵۶ حلقه پیزومتر فعال وجود دارد. شکل شماره (۹) موقعیت پیزومترهای پراکنده در منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۸- شبکه بندی آبخوان



شکل ۹- پراکندگی و موقعیت پیزومترها در منطقه مطالعاتی

جدول ۱- تعداد و تخلیه منابع آب زیرزمینی (ارقام به میلیون مترمکعب)

نوع منبع	دشت		ارتفاعات		جمع محدوده		آبخوان آبرفتی	
	تعداد	تخلیه	تعداد	تخلیه	تعداد	تخلیه	تعداد	تخلیه
چاه	۹۷۱	۲۴۱/۵	۹۸۷	۲۵/۸۶	۱۹۵۸	۲۶۷/۳۶	۹۶۱	۲۳۹/۴۲
چشمه	۰	۰	۲۶۸	۲۷/۹۰	۲۶۸	۲۷/۹۰	۰	۰
قنات	۳۶	۲۵۰/۹	۵۰۴	۸۸	۵۴۰	۹۷/۳۷	۳۳	۶/۴۶

جدول ۲- مصارف آب و منابع تأمین آن به تفکیک دشت و ارتفاعات (ارقام به میلیون مترمکعب)

ناحیه	منابع زیرزمینی (چاه و قنات)			جریان سطحی و چشمه‌ها		جمع
	شرب	صنعت	کشاورزی	شرب	صنعت	کشاورزی	
دشت	۲۷/۱۱	۵/۳۷	۲۶۸/۲۹	۸/۵۰	۰	۱/۸۵	۲۶۱/۱۳
ارتفاعات	۸/۹۰	۱/۱۶	۵۱/۱۱	۰/۵۱	۰/۲۱	۲۶/۶۱	۸۸/۵۰

دشت کاشان فاقد رودخانه‌های بزرگ و دائمی است و تنها چندین رودخانه فصلی در آن جریان دارد که دارای جریان پایه ناچیز است و در ابتدای ورود به دشت معمولاً خشک می‌باشد. تنها تغذیه سطحی در مدل ناشی از آب برگشتی مصارف شهری و کشاورزی به میزان ۸۰ و ۱۵ درصد می‌باشد. منابع بهره‌برداری کننده از آب‌های زیرزمینی در این محدوده مطالعاتی شامل ۱۹۵۸ حلقه چاه، ۲۶۸ دهنه چشمه و ۵۴۰ رشته قنات می‌باشد که سهم هر کدام از ارتفاعات و دشت به تفکیک در جدول شماره (۱) به همراه میزان برداشت از هر یک از این منابع آورده شده است.

مصارف آب در این محدوده مجموعاً ۳۹۹ میلیون مترمکعب است که شامل ۳۶۱/۹۵ میلیون مترمکعب در سال از آب‌های زیرزمینی چاه و قنات و ۳۷/۶۸ میلیون مترمکعب در سال از جریان‌های سطحی و چشمه می‌باشد. جدول شماره (۲) اطلاعات مربوط به مصارف آب را در دشت کاشان نشان می‌دهد.

جهت تهیه مدل مفهومی آبخوان، آمار و اطلاعات پایه‌ای مانند داده‌های هواشناسی، هیدرولوژی) آمار ایستگاه هیدرومتری)، هیدروژئولوژی (چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های بهره‌برداری، تراز آب، مشخصات فیزیکی آبخوان و ...) مورد نیاز می‌باشد. با استفاده از این آمار و اطلاعات، ساختار اصلی مدل مفهومی آبخوان دشت کاشان شامل: لایه‌های مرز آبخوان (که از داده‌های ژئوفیزیک سنگ کف، زمین شناسی و همچنین چاه‌های پیزومتری تعیین می‌شود)، تراز ارتفاعی سطح زمین، تراز سنگ کف آبخوان، چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌های مشاهده‌ای، هدایت هیدرولیکی و تغذیه سطحی ایجاد شده است.

پس از تهیه مدل شبیه‌ساز جهت بررسی و ارزیابی درستی مدل از معیارهای میانگین خطا (ME)، ضریب رگرسیون اصلاح شده (bR^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بهره برده شده است که رابطه‌های شماره (۱)، (۲) و (۳) بیانگر این معیارها می‌باشند.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_o - h_s)_i}{n} \quad (۱)$$

$$bR^2 = \frac{n(\sum ho \times h_s) - (\sum h_o)(\sum h_s)}{\sqrt{[n\sum {h_o}^2 - (\sum h_o)^2][n\sum {h_s}^2 - (\sum h_s)^2]}} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_o - h_s)_i^2}{n}} \quad (۳)$$

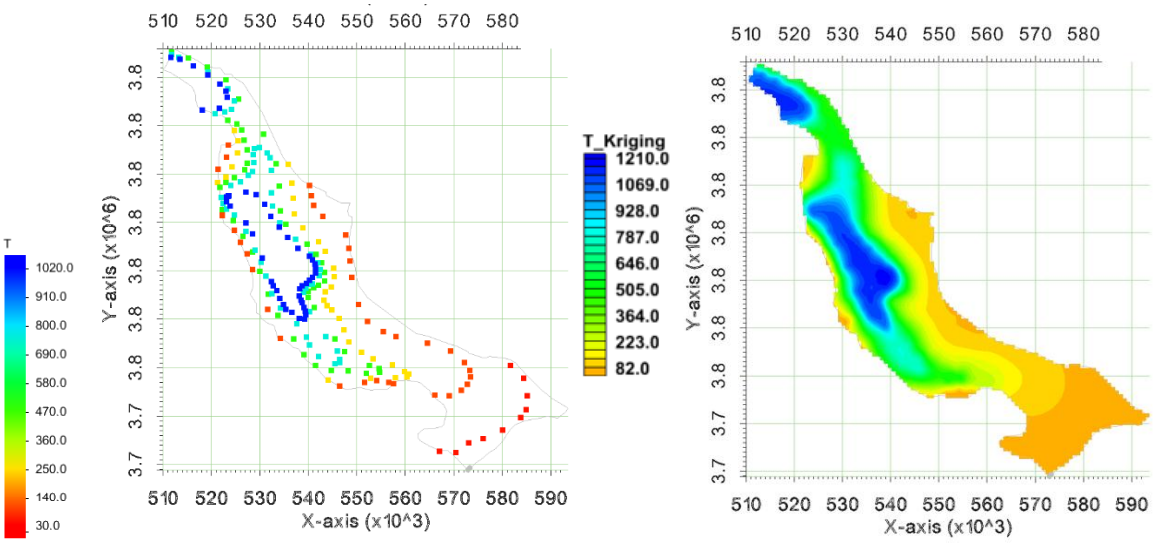
در روابط فوق h_o تراز مشاهداتی، h_s تراز محاسباتی حاصل از شبیه‌سازی و b ضریب رگرسیون می‌باشد.

مقادیر هیدرودینامیکی آبخوان:

آبخوان‌ها با دو مشخصه مهم که به نام ضرایب هیدرودینامیک معروف است توصیف می‌شوند. این دو مشخصه عبارتند از ضریب انتقال (مترمربع در روز) و ضریب ذخیره (بی بعد). در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) پراکنش نقاط هم مقدار قابلیت انتقال و مقدار پهنه‌بندی حاصل از آن نمایش داده شده است. است. در دشت کاشان رقوم منحنی‌های هم قابلیت انتقال رسوبات آبرفتی بین ۸۰ متر مربع در روز در اراضی مخروط افکنه ای دشت تا ۱۲۰۰ مترمربع در روز در مرکز دشت به واسطه کاهش و افزایش ضخامت اشباع آبخوان، متغیر می‌باشد.

متوسط ضریب ذخیره در این دشت بر اساس مطالعات بهنگام سازی بیلان منابع آب محدوده‌های مطالعاتی حوزه آبریز دریاچه نمک ۴ درصد برآورد شده است.

مقدار هدایت هیدرولیکی نیز با استفاده از پهنه‌بندی ضریب قابلیت انتقال به‌صورت شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است هدایت هیدرولیکی در قسمت مرکز به سمت شمال غرب دارای مقادیر بیشتری نسبت به سایر قسمت ها می‌باشد.

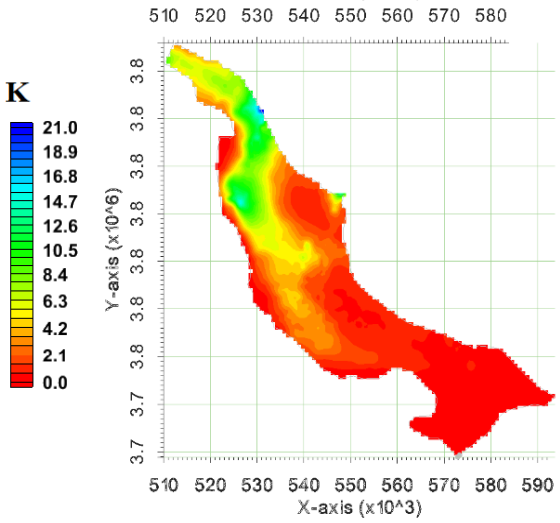


شکل ۱۰- حدود پراکنش نقاط هم مقدار قابلیت انتقال

(واحد محورها متر می‌باشد)

شکل ۱۱- پهنه بندی نقاط هم مقدار قابلیت انتقال

(واحد محورها متر می‌باشد)



شکل ۱۲- پهنه بندی هدایت هیدرولیکی (واحدمحورها متر می باشد)

نتایج و بحث

مدل‌سازی آبخوان آزاد دشت کاشان برای ۱۰ سال از مهر ۱۳۸۷ تا مهر ۱۳۹۷ انجام شد. جهت این مدل‌سازی از ۱۲۵ دوره تنش با گام زمانی ماهانه استفاده گردیده است.

مدل ریاضی با توجه به فرآیند ساده‌سازی‌ها، کمبودهای داده، عدم قطعیت بازسازی رقوم مفقود، محدودیت خود مدل و بسیاری عوامل دیگر، نیاز به واسنجی داشت که پس از مجموع چندین دوره کلی تکرار در گام‌های پایدار و ناپایدار و با بیش از ده‌ها متغیر به صورت پایلوت، با استفاده از موتور محاسباتی PCGN، واسنجی گردید.

آبدهی ویژه یا S_Y بر پایه بافت آبخوان به مقدار مفروض اولیه به تمام سلول‌های مدل معرفی گردید. سپس در گام واسنجی فرم پایدار همین مقادیر به‌عنوان اولیه در قالب نقاط پایلوت به مدل معرفی و مقادیر بهینه در این گام حاصل شد. در دوره واسنجی ناپایدار بلندمدت ۹۴ ماهه، برای پارامتر مذکور با میان‌یابی IDW نقاط پایلوت، فایل رستری (Grid) شکل شماره (۱۳) حاصل گردید.

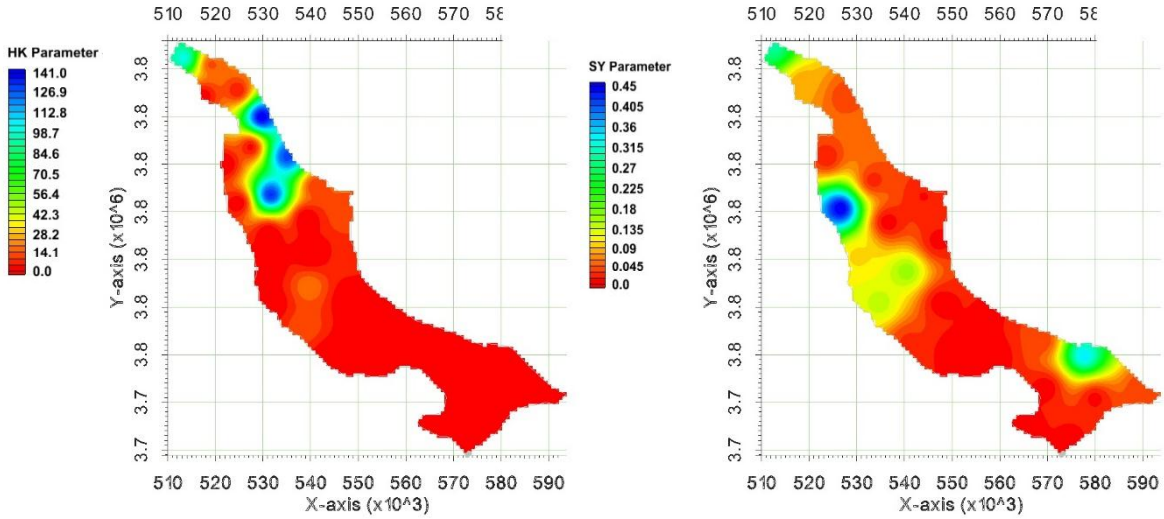
مقدار هدایت هیدرولیکی یا H_K با توجه به وجود اطلاعات برداشتی ضریب انتقال، در قالب مدل مفهومی به شبیه‌سازی در فرم پایدار معرفی گردید و تمامی مراحل بالا در مورد این پارامتر نیز انجام شد. شکل شماره (۱۴) مقادیر میان‌یابی شده نقاط پایلوت را نشان می‌دهد. نکته قابل ذکر آنکه مقدار بیشینه هدایت هیدرولیکی اگرچه

در نگاه اول زیاد به نظر می‌رسد (در گام واسنجی) اما باید توجه داشت که در مدل MODFLOW آنچه به عنوان هدایت هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود، معادل هدایت هیدرولیکی افقی بوده که مقدار آن چندین برابر هدایت هیدرولیکی کل و عمودی می‌تواند باشد (طاحونی،۱۳۹۹). جدول (۳) خلاصه مقادیر بدست آمده از مرحله واسنجی ناپایدار این دو پارامتر را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول (۳)، شبیه‌سازی مقادیر تراز آب زیرزمینی توسط مدل در دوره واسنجی انجام گرفت. مقادیر همبستگی و همچنین خطای بین تراز آب زیرزمینی محاسبه شده و مشاهداتی برای پیزومترهای موجود در منطقه برای ماه اول شبیه‌سازی به ترتیب در شکل (۱۵) و (۱۶) نمایش داده شده است.

جهت ارزیابی مقادیر پارامترهای بهینه (دوره واسنجی)، دوره صحت سنجی با ۳۱ دوره تنش ماهه انجام شد. مقادیر همبستگی و همچنین خطای بین تراز آب زیرزمینی محاسبه شده و مشاهداتی برای پیزومترهای موجود در منطقه برای ماه آخر شبیه‌سازی به ترتیب در شکل (۱۷) و (۱۸) نمایش داده شده است.

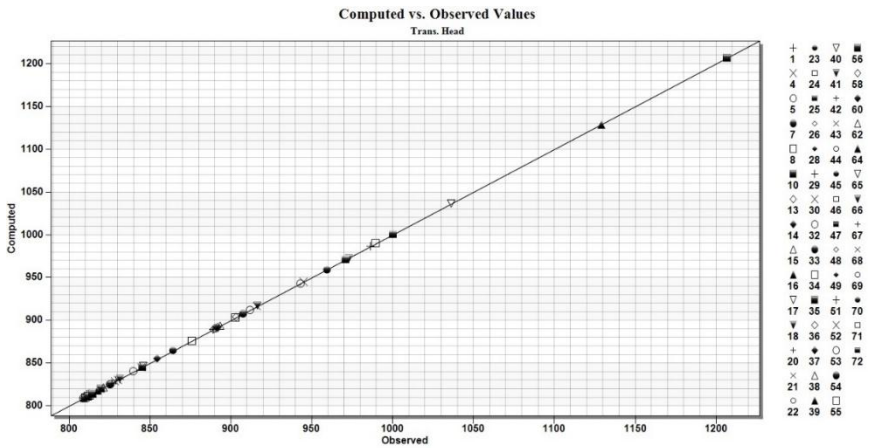
جدول ۳- مقادیر حاصل از واسنجی ناپایدار

پارامتر	مقدار حداکثر	مقدار حداقل	میانگین	میانه	انحراف معیار
S_y	۰/۴۵	۰/۰۰۲۶	۰/۰۷۲	۰/۴۰	۰/۰۸۱
HK(m/day)	۱۳۹/۵	۰/۰۰۳	۱۵/۷۳	۳/۲۰	۲۹/۵

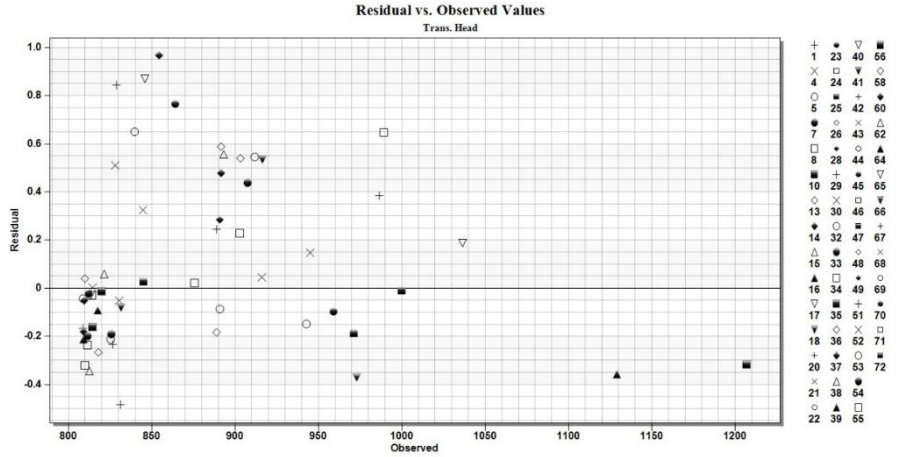


شکل ۱۳- پهنه بندی مقادیر واسنجی شده ضریب آبدهی

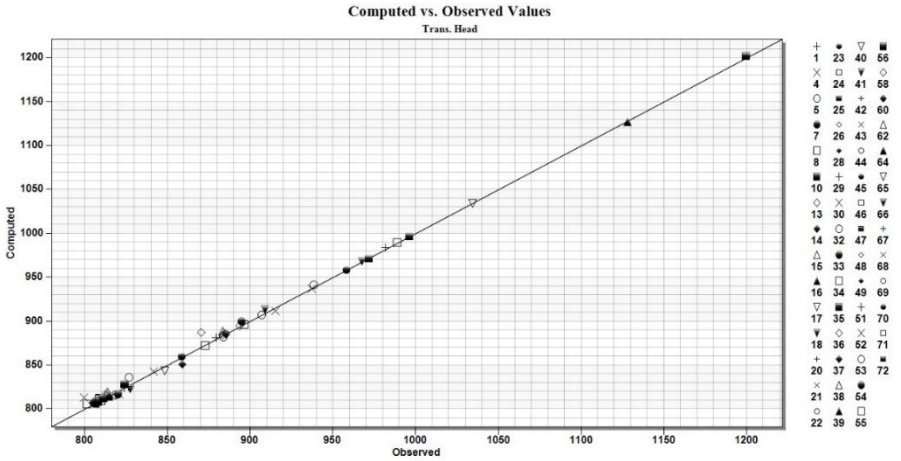
شکل ۱۴- پهنه بندی مقادیر واسنجی شده هدایت هیدرولیکی



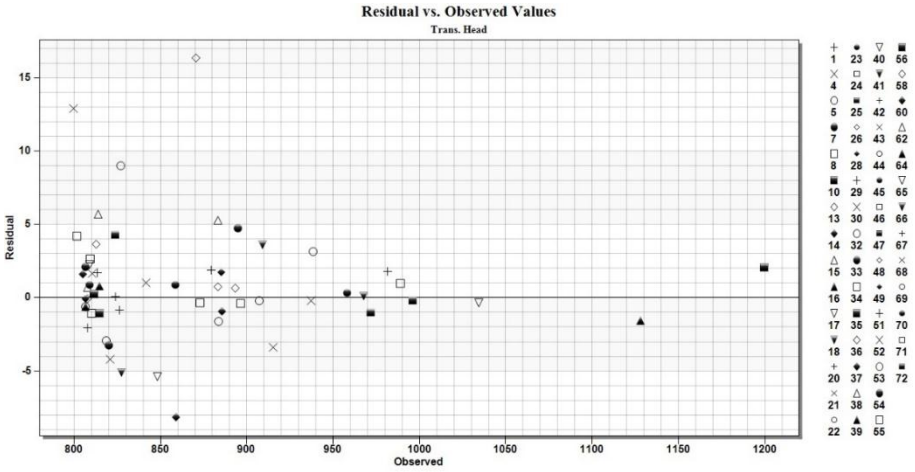
شکل ۱۵- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سطح ایستابی در گام واسنجی برای پیزومترهای موجود در منطقه (ماه اول)



شکل ۱۶- خطا بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سطح ایستابی در گام واسنجی برای پیزومترهای موجود در منطقه (ماه اول)



شکل ۱۷- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سطح ایستابی در گام صحت سنجی برای پیزومترهای موجود در منطقه (ماه آخر).



شکل ۱۸- خطا بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی سطح ایستابی در گام صحت سنجی برای پیزومترهای موجود در منطقه (ماه آخر).

برای بررسی میزان دقت مدل در شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی، مقایسه بین مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای به‌وسیله معیارهای سنجش مدل در دوره واسنجی و صحت سنجی انجام گرفت. نتایج حاصل از این ارزیابی در جدول (۴) آورده شده است. با توجه به این نتایج و کم بودن میزان اختلاف سطح ایستابی مشاهداتی با محاسباتی می‌توان دریافت که مدل قادر به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

آبخوان در حد قابل قبولی بوده است. پس از انجام فرایند واسنجی و صحت‌سنجی مدل و اطمینان از درستی عملکرد آن، به شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی در طی دوره مطالعاتی ۱۳۹۷-۱۳۸۷ (۲۰۱۹-۲۰۰۸) پرداخته شد. تراز آب زیرزمینی در مهر ۱۳۸۷ برابر با ۸۸۷/۶۸۳ متر و در مهر ۱۳۹۷ به مقدار ۸۸۳/۲۶۰ متر رسید که حاکی از افت ۴/۴ متری سطح ایستابی در طی ۱۰ سال بود. این رقم بیانگر این است که با روند برداشت کنونی هر سال به طور متوسط آبخوان افت ۰/۴۴ متری را تجربه کرده است.

در ادامه شبیه‌سازی با توجه به سه سناریوی تعریف شده یعنی، روند کنونی برداشت، ۱۵درصد افزایش و ۱۵ درصد کاهش برداشت آب زیرزمینی، تغییرات سطح ایستابی در دشت کاشان تا سال ۱۴۰۷ معادل ۲۰۲۹ میلادی شبیه¬سازی گردید. شکل (۲۰) روند تغییرات آب زیرزمینی را با توجه به سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

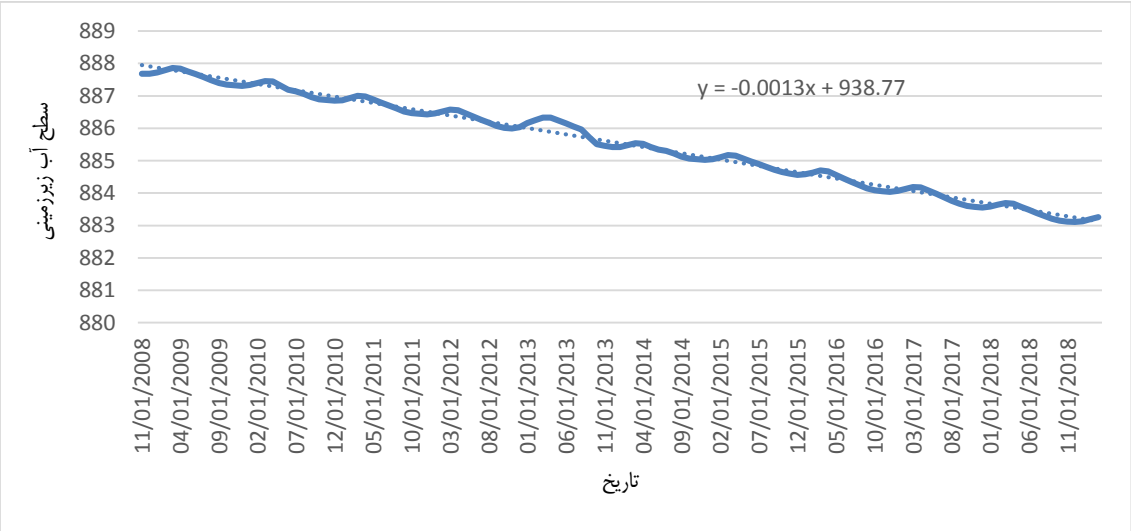
در جدول (۵) خلاصه نتایج حاصل از شبیه‌سازی رفتار آبخوان تحت سه سناریوی برداشت را تا سال ۱۴۰۷(۲۰۲۹) بیان شده است. طبق خروجی مدل GMS و آنچه که واضح است سطح ایستابی با افزایش (کاهش) ۱۵ درصدی برداشت و عدم تغذیه و ورودی به آبخوان با توجه به نوع اقلیم منطقه و متکی بودن تغذیه به بارش های ناچیز و اب برگشتی حاصل از کشاورزی، شرب و صنعت، افت ۱۱/۸ (۶/۹) متری را در طول ۲۰ سال(۱۳۸۷-۱۴۰۷) تجربه خواهد کرد. در صورت برداشت بصورت روند کنونی در انتهای سال ۱۴۰۷ با افت ۹/۸ مواجه خواهیم شد.

جدول ٤- معیارهای ارزیابی خطا در مدل شبیه¬سازی

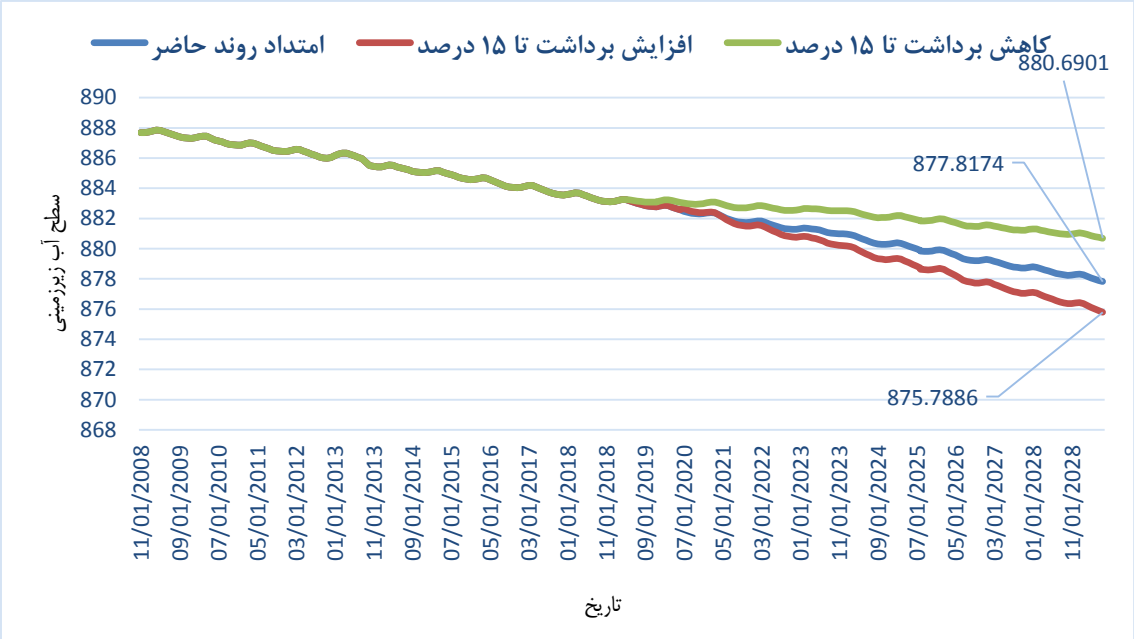
گام	bR^2	RMSE(m)	ME(m)
واسنجی	۰,۹۵	۰/۳۴	۰/۶۴
صحت سنجی	۰,۸۹	۰/۴۱	۰/۸۲

جدول ۵- خلاصه نتایج حاصل از شبیه¬سازی اب زیرزمینی تحت سه سناریوی برداشت

	روند کنونی برداشت	۱۵ درصد افزایش برداشت	۱۵ درصد کاهش برداشت
تراز آب ماه ابتدایی	۸۸۷/۶	۸۸۷/۶	۸۸۷/۶
تراز آب ماه انتهایی	۸۷۷/۸۱	۸۷۵/۷۸	۸۸۰/۶
افت آب زیرزمینی	-۹/۸	-۱۱/۹	-۶/۹



شکل ۱۹- هیدروگراف واحد آبخوان در دوره مطالعاتی ۱۳۹۷-۱۳۸۷



شکل ۲۰- روند تغییرات تراز اب زیرزمینی دشت کاشان تحت سناریوهای مختلف برداشت از آبخوان (۱۴۰۷-۱۳۸۷)

نتیجه‌گیری

در این مطالعه از میان مدل‌های شبیه‌ساز رفتار آب زیرزمینی در یک آبخوان از مدل Modflow با رابط کاربر پسند GMS با ورژن ۱۰/۴جهت شبیه‌سازی تراز آب در آبخوان دشت کاشان برای ۱۲۵ دوره تنش ماهانه (۱۳۹۷-۱۳۸۷) استفاده شد. مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار و با ۹۴ دوره تنش ماهانه مورد واسنجی و سپس برای ۳۱ دوره تنش ماهانه باقیمانده مورد صحت سنجی قرار گرفت.

جهت ارزیابی دقت واسنجی و صحت سنجی مدل شبیه‌ساز از معیارهای میانگین خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) استفاده شد. مقادیر معیارهای فوق برای گام واسنجی (صحت سنجی) ۱/۲۶(۱/۴۷)، ۰/۳۴ (۰/۴۱) و ۰/۶۴ (۰/۸۲) بدست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده مدل قادر خواهد بود تا پارامترهای آبخوان را به خوبی تخمین بزند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییرات تراز اب زیرزمینی در دوره مطالعاتی ۱۰ ساله، با روند برداشت کنونی از آبخوان، حاکی از افت ۴/۴ متری بود. شبیه-سازی تا افق ۱۴۰۷ (۲۰۲۹) از افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت کاشان تحت سه سناریوی روند کنونی برداشت، افزایش ۱۵ درصدی در برداشت و کاهش ۱۵ درصدی در برداشت خبر داد. نتایج با بررسی های خراسانی زاده و همکاران (۱۴۰۱) بر روی وضعیت کمی منابع آب زیرزمینی دشت کاشان انطباق داشته است. ایشان با توجه به سناریوی روند کنونی برداشت از آبخوان نشان دادند که افت آب زیرزمینی حادتر می گردد و این افت در نواحی غربی به دلیل تمرکز بیشتر چاه های بهره‌برداری بیشتر خواهد بود.

با توجه به وضعیت پیش رو و روند کاهشی حجم آبخوان یکی از راهکارهای مفید جهت تغذیه آب زیرزمینی و تقویت آبخوان، ذخیره‌سازی یا نفوذ دادن بخشی از رواناب ارتفاعات به خصوص در نواحی غربی و بالادست دشت به‌دلیل کیفیت نسبتاً بهتر آب با استفاده از سازه‌های آبخیزداری یا سامانه‌های پخش سیلاب می‌باشد. البته لازم به ذکر است در بخش کشاورزی منطقه که خود به تنهایی حجم زیادی از آبخوان برداشت می‌نماید می‌توان پیشنهاد نمود که به‌جای کشت محصولات آب بر مانند هندوانه، طالبی، پنبه و یونجه از محصولاتی با نیاز آبی کمتر و باصرفه اقتصادی بیشتر مثل کاشت زعفران بهره برد.

منابع

اسکندری دامنه، ح، زهتابیان، غ، خسروی، ح، آذرنیوند، ح و براتی، ع. ۱۴۰۱. کمی سازی اثر تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک .نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری. (۲)۷۵: ۲۴۴-۲۲۷.

اسماعیل‌زاده نوش‌آبادی، م. ۱۳۸۶. پیش‌بینی تأثیر شیب هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی در اثر برداشت در آبخوان‌های مجاور آب شور و استفاده از آن در مدیریت منابع آب با نگرشی بر وضعیت آبخوان کاشان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران - آب، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۹۷ ص.

پناهی، م. میثاقی، ف .و عسگری، پ. ۱۳۹۷. شبیه‌سازی و تخمین نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از GMS (بررسی موردی

دشت زنجان). فصلنامه علوم محیطی(۱)۱۶:۱۴-۱.
حجی پور، م. ذاکری نیا، م. ضیائی، ع نقی. و حسام، م. ۱۳۹۸. مدیریت تلفیقی تقاضای آب در بخش شرب و صنعت به کمک اتصال مدل‌های WEAP-MODFLOW مطالعه موردی شهر بجنورد. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. (۱)۲۶:۲۰۳-۱۸۷.
حمزه، س.، باقرپورطوله لات، ز. دلقندی، م. و کاردان مقدم، ح. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک تأثیرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی (مطالعه ی موردی: آبخوان گتوند عقیلی). اکوهیدرولوژی،(۱)۵ : ۱۲۲-۱۱۱.
خراسانی زاده، ح. قاسمیه، ه. سلیمانی، م. و میرزاوند، م . ۱۴۰۱. بررسی وضعیت کمی منابع آب زیرزمینی دشت کاشان، چشم‌انداز و ارائه راه‌کارهای مناسب .فصلنامه علمی مهندسی منابع آب. (۵۳) ۴۷-۱۵:۵۳.
خواجه‌ایم مقدم، آ. ثقفیان، ب. نجارچی، م. و دلاور، م. ۱۴۰۰. تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه از منابع آب با رویکرد پایداری آبخوان با شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بروش الگوریتم ژنتیک چند هدفه. مهندسی عمران امیرکبیر. (۵۳) ۴۳۹۷-۱۰:۴۴۱۲.
رجا، ا. پارسی نژاد، م. و تجریشی ، م. ۱۴۰۱. شبیه¬سازی بیلان آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی و جامع آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW-NWT مطالعه موردی: دشت مهاباد. آب و خاک،(۱)۳۶ :۵۲-۳۱.
صادقی طبس، ص. اکبرپور، ا. پوررضا بیلندی، م. و صمدی، ز. ۱۳۹۴. کاربرد الگوریتم فاخته در واسنجی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از مدل ریاضی. آبیاری و زهکشی ایران، (۲)۹: ۳۵۶-۳۴۵.
صمدی، گ. موسوی، ف. و کرمی، ح. ۱۴۰۱. مدل‌سازی آبخوان ملایر توسط مدل آب‌های زیرزمینی MODFLOW و مدل شبیه‌سازی آب سطحیSWAT . علوم آب و خاک (۳)۲۶ :۲۰۹-۱۹۳.
طاحونی، ش. ۱۳۹۹، اصول مهندسی ژئوتکنیک (جلد اول) مکانیک خاک، تهران، پارس آیین،
Boughariou, E., Allouche, N., Jmal, I., Mokadem, N., Ayed, B., Hajji, S. and Bouri, S. 2018. Modeling aquifer behaviour under climate change and high consumption: Case study of the Sfax region, southeast Tunisia. Journal of African Earth Sciences. 141: 118-129
Khatiri, K. N., Niksokhan, M. H., Sarang, A. and Kamali, A. 2020. Coupled Simulation-Optimization Model for the Management of Groundwater Resources by Considering Uncertainty and Conflict Resolution. Water Resources Management. 34(11): 3585-3608.
Saghi-Jadid, M. and Ketabchi, H. 2021. Result-based management approach for aquifer restoration problems using a combined numerical simulation–parallel evolutionary optimization model. Journal of Hydrology. 594: 125709.
Sridhar, N., et al. 2018. Groundwater Flow Modelling Using Visual MODFLOW - A Case Study of Lower Ponnaiyar Sub-Watershed, Tamilnadu, India. International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering 3(2):109-114.
Zeinali, M., Azari, A. and Heidari, M. M. 2020. Multiobjective optimization for water resource management in low-flow areas based on a coupled surface water–groundwater model. Journal of Water Resources Planning and Management. 146(5): 04020020.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.5, Vol. 17, Dec.-Jan. 2023, p. 953-965

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۵، جلد ۱۷، آذر - دی ۱۴۰۲، ص. ۹۶۵-۹۵۳

Management of Planning for the Use of Unconfined Aquifer by Using GMS Model

M. ghorbaniaghdam[1], H. khozeymehnezhad[2*] , M. pourreza bilondi[3], H. ghasemie[4]
Recived: Jun.27, 2023 Accepted: Aug.01, 2023

Abstract

Exploitation, management and protection of water resources, especially groundwater resources, are very important. The management of water resources requires accurate knowledge of the characteristics of the aquifer, the tension to it and finally the groundwater balance. Simulation models help planning managers to determine the amount of aquifer utilization for long-term and sustainable use. For this purpose, changes in the water level of the Kashan plain aquifer in the statistical period of 1387-1397 were simulated by the GMS model for 125 stress periods. The model was calibrated in two permanent and non-permanent modes for a period of 94 months (1387-1395) and validated for a period of 31 months (1395-1397).The result was a drop of 4.4 meters of groundwater during the 10-year study period. To predict the behavior of the aquifer in the near future, the reservoir level was modeled until 1407. Due to the location of this plain in the climatic dry belt and the occurrence of climate change and the lack of effective rainfall to properly charge the aquifer, in this study the focus was on the management of extraction from the aquifer and according to these three scenarios, extraction with the current trend, 15% increase and 15% reduction definition and simulation was done. The simulation results of these three scenarios showed a drop of 9.866, 11.895 and 6.993 meters at the end of 1407 respectively.

Keyword: Calibration GMS, Groundwater simulation model, Sustainable exploitation, Water table

1- Ph.D. Student, Water Resources Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2 - Associate Professor of Water Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran
3 - Associate Professor of Water Engineering Department, University of Birjand, Birjand, Iran
4 - Associate Professor of Nature engineering Department, University of Kashan, Kashan, Iran
(*- Corresponding Author Email: Hkhozeymeh@birjand.ac.ir)