نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی
سال یازدهم | شماره چهل و یکم | بهار ۱۳۹۹
وصول: ۹۷/۹/۱۰ پذیرش: ۹۸/۷/۲۳
صص ۱۴-۱

بررسی پایداری منابع آب در حوضه زاینده رود با استفاده از شاخص‌های پایداری و مدل‌های GMS و LARS-WG (آبخوان نجف آباد)

اشرف مکوندی[۱]، حسین محمدی [*۲]، پرویز کردوانی[۳]، منوچهر فرج زاده اصل [۴]، سامان جوادی [۵]

۱. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی ،واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران
۲. استاد، گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحدعلوم و تحقیقات تهران، ایران
۳. استاد، گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحدعلوم و تحقیقات تهران، ایران
۴. استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران
۵. استادیار، گروه آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران

چکیده

استفاده بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی این منابع را در معرض خطر قرار داده و از این رو مدیریت منابع آب به خصوص آبهای زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک از اهمیت خاصی برخوردار است. ی .در پژوهش حاضربرای بررسی پایداری منابع آب در این منطقه ازدو شاخص آب در دسترس (WAI) و تنش آبی (WSI)استفاده شده است. نتایج دو شاخص نشان‌دهنده عدم تعادل در عرضه و تقاضا بوده و در نهایت گویای تنش آبی شدید در محدوده مذکور می‌باشد. سپس با استفاده مدل GMSخشکسالی های آبهای زیرزمینی در دشت نجف آباد در طی سالهای 1389تا ۱۳۹۳مورد ارزیابی قرار گرفت و شرایط کنونی این دشت را با استفاده مدل LARSWG برای ۳۰ سال آینده از خروجی مدل HADCM3-A2 برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ استفاده شد.بارندگی در دوره آتی به طور متوسط ۳۴ درصد کاهش و دمای سالانه به طور متوسط ۳۸درصد افزایش را نشان داد. به منظور برنامه ریزی بهتر برای منبع آب زیرزمینی،سه سناریو ادامه بهره برداری با وضع موجود به منظور بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر سطح وبیلان آبخوان دشت نجف آباد برای ۲۰،۱۰ و ۳۰ سال آینده بررسی شد. نتاج نشان داد که ذخیره آبخوان بتدریج در طی این سالها کم خواهد شدو بیشترین تاثیر افت در آبخوان در قسمت مرکزی و جنوبی منطقه است که دارای بیشترین چاه ها با حجم برداشت ۸۰۰ میلیون متر مکعب می باشد و افت حدود ۵۰ متر را در آبخوان نشان داد.. هم‌چنین نتایج بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، در ارزیابی‌های انجام شده در تحقیقات گذشته، صحت‌سنجی شاخص‌ها صورت نگرفته است. از این رو در این تحقیق برای نخستین بار از نتایج مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار GMS در جهت صحت‌سنجی شاخص‌های مورد بررسی استفاده شد. به عبارت دیگر آیا نتایج مدل‌سازی نتیجه شاخص‌ها را تایید می‌کند یا خیر.

کلید واژه‌ها: مدل‌سازی آب زیرزمینی، تنش آبی، بیلان منابع و مصارف، Modflow ، GMS.

* نویسنده مسئول: ۰۲۱-۶۱۱۱۳۵۲۰ Email: hmohamad@ut.ac.ir

مقدمه

کمبود آب شیرین نسبت به تقاضا کمبود آب فیزیکی نامیده شده است و نشان می‌دهد که علت کمبود آب، روند نامطلوب عرضه، تقاضای آب یا منشا مختلفی مانند تغییر و تنوع آب و هوا، استخراج آب زیرزمینی، ساخت‌وساز و افزایش جمعیت می‌باشد. نتایج همه تحلیل‌های مربوط به کم‌آبی آب در جهان نشان می‌دهد که بخش وسیعی از جمعیت جهان تحت تأثیر کم آبی در چند دهه آینده قرار خواهند گرفت. ریزبرمن(۲۰۰۶) شناسایی عوامل تأثیرگذار در فرایندهای هیدرولوژیکی نقش مهمی را در مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. در پژوهشی با به‌کارگیری تبدیل موجک متقابل و ارتباط بین سری‌های زمانی بارش، دما و دبی خروجی میزان تأثیر تغییرات هر یک از این پارامترها بر روی نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت سیلاخور اولویت‌بندی گردید. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش بیان‌گر آن است که سری زمانی دبی که نماینده تأثیرات انسانی است (با میانگین ضریب ارتباط موجکی۰/۸۳) از سری‌های زمانی بارش و دما که نماینده تغییرات اقلیم هستند (با میانگین ضریب ارتباط موجکی به‌ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۵۸) تأثیر بیشتری را بر کاهش تراز سطح آب‌خوان دشت سیلاخور دارد. بنابراین عوامل انسانی از عوامل اقلیمی در کاهش تراز آب زیرزمینی این دشت تأثیرگذارتر است. کوماسی و شارقی(۲۰۱۷) در تحقیقی آثار تغییر اقلیم بر سطح و بیلان آب زیرزمینی دشت سفید دشت در استان چهارمحال و بختیاری را در دوره های آتی مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق مدل GMS جهت شبیه سازی آبخوان مورد استفاده قرار گرفت همچنین ازمدل جفت شده اقیانوس – اتمسفرگردش عمومی جو HadCM3 تحت سناریوی انتشار A2 برای شبیه سازی پارامترهای اقلیمی ماهانه (بارش و دما) استفاده شده است. این داده‌ها بوسیله روش LARS-WG برای منطقه ریز مقیاس شدند. برای شبیه سازی رواناب منطقه در دوره آتی، ابتدا مدل بارش– رواناب IHACRES با داده های ماهانه (دما، بارش و رواناب) مشاهداتی واسنجی شده و سپس متغیرهای اقلیمی تولیدی از مدل LARS-WG به این مدل معرفی گردید. انصاری(۲۰۱۲) با نزدیک شدن به سالها و دهه‌های اخیر ، مقدار سرانه مصرف آب به شدت افزایش یافته است. دلیل این امر افزایش سطح رفاه و به تبع آن تنوع نیازهای آبی می‌باشد. ولی وند و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه ارزیابی اثرات کمی بلندمدت شرایط مدیریت و بهره برداری کنونی بر آبخوان دشت ورامین رفتار هیدرولیکی آبخوان دشت ورامین با استفاده از کد Modflowاز نرم افزار GMSدر دو حالت ماندگار وغیرماندگار شبیه سازی شد . هدف مطالعه ایشان ،ارزیابی تأثیر طرحهای مدیریتی فعلی آبخوان وحوضه آبریز رودخانه جاجرود بر تغییرات سطح ایستابی آبخوان آزاد و سطح پیزومتریک آبخوان محصور، با استفاده از مدل سازی عددی بود. نتایج شبیه سازی نشان میدهد که در هر دو سناریوی موردنظر(سناریوی اول، روند فعلی و سناریوی دوم، پس از اجرای طرح های در دست اجرا)، بیلان آب زیرزمینی دشت منفی بوده و روند افت سطح ایستابی ادامه خواهد داشت، اما از سرعت افت سطح ایستابی در سناریوی دوم، نسبت به سناریوی اول، کاسته خواهد شد .بنابراین می توان گفت که به منظور توقف روند افت سطح آب در آبخوان دشت ورامین، باید علاوه بر طرح ورود آب از تصفیه خانه فاضلاب تهران به دشت ورامین، تغذیه آبخوان دشت از رودخانه جاجرود(به عنوان اصلی ترین منبع تغذیه طبیعی آبخوان)همچنان ادامه یابد . هم‌چنین در راستای مدیریت منابع آب به‌منظور حفظ پایداری، تعادل و بقای آبخوان‌ها مطالعاتی در سطح دنیا برای حل چالش‌ها با استفاده از شاخص‌های پایداری منابع آب و هم‌چنین بررسی وضعیت مناطق مختلف صورت گرفته است.دهکردی و همکارن(۲۰۱۹) در مطالعه ارزیابی و پیش بینی خشکسالی های آب زیرزمینی با استفاده از شاخصGRI و مدل های زنجیره مارکف مرتبه اول تا سوم دشت بروجن به منظور ارزیابی خشک سالی هاي آب زیرزمینی دشت بروجن مقادیر شاخصGRI در مقیاس های زمانی ۱ ،۳،۶و ۱۲ ماهه محاسبه شد .بدین منظور، از آمار تراز آب زیرزمینی ۱۳ چاه مشاهده‌ای در دشت بروجن در دوره ۳۱ ساله(۹۴-۱۳۶۴) استفاده شد .برای پیش بینی مقادیر شاخصGRI زنجیره مارکف با مرتبه های اول، دوم و سوم استفاده گردید و عملکرد این مدل با روش جدول توافقی مورد ارزیابی قرار گرفت نتایج حاصل از بررسی شاخصGRI خشک سالی آب زیرزمینی در سال ۱۳۸۷ شروع شده است .به طور کلی خشکسالی های شدیدی که در سال های اخیربه دلیل کاهش

نزولات جوی رخ داده است، به همراه اضافه برداشت از چاههای موجود در دشت، منطقه را با بحران شدید کاهش سطح آب زیرزمینی مواجه کرده که کاهش کیفیت آب و فرونشست زمین را در پی دارد. جینگوی و همکاران(۲۰۱۷) کاربرد شاخص تنش آبی WSI را جهت افزایش نگرانی‌های قانونی در رابطه با تأثیر کمبود آب بر توسعه پایدار اراضی دیم نواحی شمالی کشور چین بررسی کردند. در این تحقیق این شاخص برای سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱٤ محاسبه و سپس تفاوت این شاخص برای سال‌های فوق الذکر با دیدگاه دینامیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت دینامیک تنش آبی در سه سطح حوضه آبریز، نقاط شهری و کل محدوده مورد مطالعه، بررسی گردید. نتایج نشان داد نواحی که دارای مقادیر تنش آبی بیشتری هستند باید در اولویت اقدامات موثر قرار گیرند.کانگ و همکاران(۲۰۱۱) شاخص WSI را با موفقیت برای ارزیابی پایداری منابع آب در حوضه Geum در کره جنوبی به‌کار بردند.رچمد و همکاران(۲۰۱٤) در ارزیابی پایداری حوضه در منطقه مرطوب و گرمسیری Batang Merao در اندونزی در سال‌های ۲۰۰٦ تا ۲۰۱۱، چهار شاخص هیدرولوژی، محیط‌زیست، زندگی و سیاست را اندازه‌گیری نمودند. طبق نتایج امتیاز WSI حوضه برابر ۰/۵۹ به‌دست آمد که پایداری حوضه را در سطح متوسط نشان می‌دهد.کورتس و همکاران(۲۰۱۲) در ارزیابی حوضه Elqui با مساحت ۹۷۰۰ کیلومترمربع در کشور شیلی با استفاده از WSI در یک دوره پنج ساله ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵، مقدار پایداری این حوضه را ۰/٦۱ برآورد کردند که این امتیاز حاکی از متوسط بودن پایداری سطح حوضه دارد. مؤسسه تحقیقاتی سیاست‌گذاری، برای رسیدن به پایداری، تشخیص تمام فاکتورهای شرکت‌کننده در پایداری منابع آب سطحی و زیرزمینی را امری بسیار ضروری می‌داند. شاخص پایداری آب به‌عنوان ابزاری برای تعیین تمام فاکتورهای دخیل در بهبود منابع آب، مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص، هم‌چنین می‌تواند برای حمایت از تصمیم‌گیرندگان، اولویت‌بندی موضوعات و برنامه‌های مربوط به بهبود منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع این فاکتورها برای ارتباط شرایط موجود منابع آب برای جوامع بزرگتر مفید است. حافظ پرست و همکاران(۲۰۱۷) در تحقیقی که در حوضه آبریز گاماسیاب صورت گرفته است، به محاسبه شاخص پایداری آب و پایداری حوضه در راستای حفظ توسعه پایدار براساس شاخص‌های پایداری منابع آب و حوضه آبریز به‌صورت ترکیبی با استفاده از خروجی مدل شبیه‌سازی WEAP در محیط اکسل پرداخته شده است که در شاخص‌های پایداری منابع آب، مقادیر و میزان دسترسی منابع آب سطحی و زیرزمینی بررسی گردید. در همین راستا حوضه آبریز گاماسیاب توسط دو سناریو یکی شامل تنها سد جامیشان و دیگری سدهای جامیشان، قشلاق و آناهیتا، راه‌کارهای مدیریتی برای حفظ و پایداری در آن شبیه‌سازی شد و شاخص‌های پایداری آن محاسبه گردید که در نهایت بهترین راه‌کار اجرایی در این حوضه با تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) و روش برنامه‌ریزی سازشی در دو سناریو محاسبه شد. در سناریو تنها سد جامیشان بهترین راهکار سازه‌ای برای بهتر شدن وضعیت پایداری حوضه، تلفیق کاهش تلفات و افزایش راندمان و در سناریو هر سه سد، بهترین راهکار کاهش تلفات معرفی گردید در تحقیقی برای نخستین بار، پایداری سیستم آب زیرزمینی را با استفاده از ترکیب سه شاخص اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و مطلوبیت و با در نظر گرفتن اثر سناریوی تغذیه‌ی مصنوعی ارزیابی نمودند. به این منظور با استفاده از مدل MODFLOW و شبیه‌سازی و پیش‌بینی نُه ساله، اثر تغذیه‌ی مصنوعی شورآب سیوجان بر وضعیت آب‌خوان بیرجند تا افق ۱٤۰٤ در شرایط نرمال اقلیمی در سه سناریوی برداشت آب انجام گرفت. بررسی شاخص‌ها در منطقه تحت تأثیر تغذیه‌ی مصنوعی در آبخوان نشان داد اجرای طرح تغذیه‌ی مصنوعی توانسته بین ۲۱ تا ۲۵ درصد با توجه به سناریوی کاهش، ثابت بودن برداشت و افزایش برداشت، مقدار شاخص پایداری سیستم را بهبود دهد. (کاردان و همکاران (۲۰۱۷) بنابراین کاهش شدید منابع آب ناشی از بهره‌برداری‌های غیر مجاز و بی‌رویه از یک سو و رشد شدید تقاضا در بخش‌های مختلف مصرف از سوی دیگر، باعث تنش آبی شدید و عدم تعادل‌بخشی مصرف‌کنندگان گردیده است. لذا به‌منظور حفظ و بقای آب خوان‌ها ارزیابی پایداری آن‌ها براساس شاخص‌های پایداری منابع آب در برابر وقایع و رخدادهای آینده، امری ضروری تلقی می‌گردد. در این تحقیق با استفاده از دو شاخص آب در دسترس و شاخص تنش آبی که مبتنی بر میزان آب

تجدیدپذیر است، میزان آب قابل دسترس سالانه و مجموع مصارف و تقاضاها در کل محدوده مطالعاتی نجف‌آباد محاسبه شده و آسیب‌پذیری منابع آب این محدوده از نظر وجود و یا عدم وجود تعادل میان عرضه و تقاضا و تعیین وضعیت پایداری منابع آب محدوده به لحاظ تعادل بیلان و درجه بحرانی بودن آن مطالعه و بررسی گردید. هم‌چنین از نرم افزار GMS که یک رابطه گرافیکی برای کد MODFLOW می‌باشد، برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی آب‌خوان نجف آباد استفاده شد. مدل ریاضی تهیه شده در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ برای حالت پایدار و در سال-های آبی ۱۳۹۳-۱۳۸۹ برای حالت ناپایدار مورد واسنجی قرار گرفت. طی فرایند واسنجی، مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی (k) و ضریب ذخیره ویژه آبخوان (SY) اصلاح شد. برای داده های تغییر اقلیم به منظور اجرای مدل برای شبیه سازی ازداده‌های بارش و دما در دوره‌های آتی (مقادیر روزانه بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعات آفتابی) مربوط به سال های آماری موجود ۲۰۰۸-۱۹٦٥در ایستگاه ها، به عنوان دوره اقلیم پایه، به مدل GMSمعرفی شده و پیش بینی اقلیم برای دوره آماری ۲۰٤۰ تا ۲۰۱۱ میلادی صورت گرفت.در این تحقیق افزایش بهره‌برداری از چاه‌ها در بررسی‌ها اعمال شده که در این صورت شرایط شبیه-سازی سطح آب زیرزمینی در دوره آتی به شرایط واقعی نزدیک‌تر شده است. هم‌چنین نتایج بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد، در ارزیابی‌های انجام شده در تحقیقات گذشته، صحت‌سنجی شاخص‌ها صورت نگرفته است. از این رو در این تحقیق برای نخستین بار از نتایج مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار GMS در جهت صحت‌سنجی شاخص‌های مورد بررسی استفاده شد. بنابراین هدف این مطالعه این است که آیا نتایج مدل‌سازی نتیجه شاخص‌ها را تایید می‌کند یا خیر.

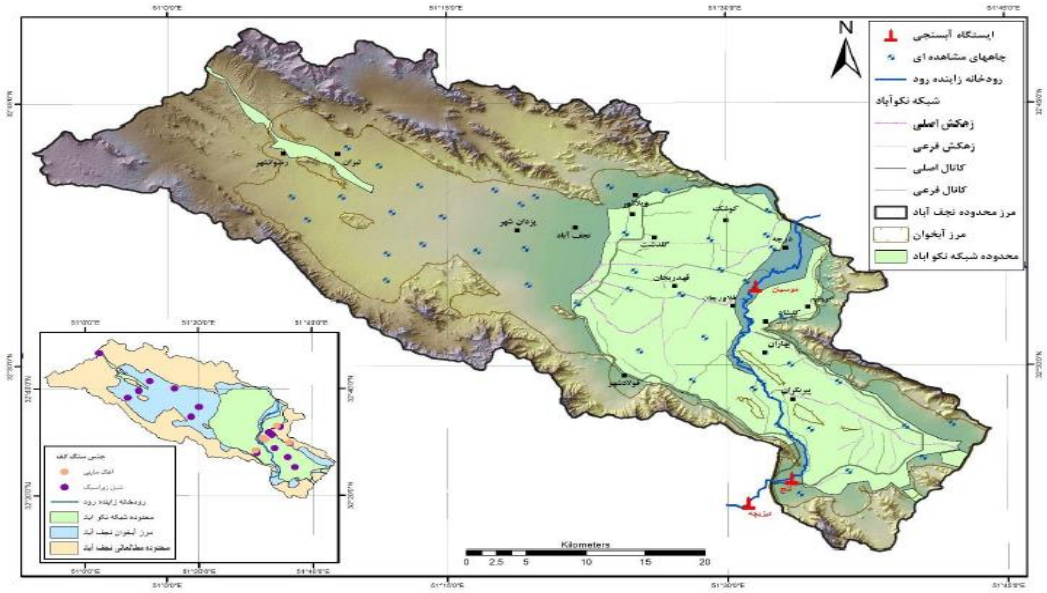
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت نجف‌آباد بخشی از حوضه آبریز گاوخونی با وسعت ۱۷٥٤/۹ کیلومترمربع می‌باشد و آب خوان آبرفتی نجف‌آباد در مساحتی به وسعت ۹٤۱ کیلومتر مربع در مرکز این حوضه آبریز گسترده شده است. متوسط دمای سالانه در ارتفاعات حدود ۱۳/۸ و در دشت ۱٥/٤ درجه سانتی‌گراد است. متوسط بارش سالانه در ارتفاعات ۱۹٥ و در دشت ۱٥۳/۷ میلی‌متر می‌باشد. میزان تبخیر سالانه در دشت و ارتفاعات محدوده به‌ترتیب ۲۲٦۲/۲ و ۲۱۹۹/۲ میلی‌متر است. درحال حاضر از نظر وضعیت بهره‌برداری از آب زیرزمینی این محدوده به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول در حاشیه رودخانه زاینده‌رود قرار دارد و به‌عنوان منطقه آزاد در نظر گرفته شده و بخش دیگر سایر قسمت‌های دشت است که ممنوعه می‌باشد. برای دو بخش مذکور حریم جغرافیایی مشخصی وجود ندارد و براساس نظر کارشناسی در مورد حفر چاه در آن‌ها تصمیم‌گیری می‌شود.نقشه شماره (۱) موقعیت محدوده مطالعاتی نجف‌آباد در حوضه آبریز گاوخونی و آب‌خوان آن را در سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS نشان می‌دهد.

بیلان منابع آب

براساس مطالعات بیلان آب‌خوان نجف‌آباد، از میزان ۱٦٥/۳۰ میلیون مترمکعب حجم آب حاصل از بارش در دشت حدود ۸٤ درصد صرف تبخیر شده و ۱٦ درصد آن بارندگی مفید است. بیلان هیدروکلیماتولوژی محدوده مطالعاتی نشان داده است که نزولات جوی تنها پتانسیل تأمین ۲۷ میلیون مترمکعب آب سالیانه دشت نجف‌آباد و ٤۳/٤ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی ارتفاعات را دارا است. مطالعات بیلان آب زیرزمینی آب‌خوان نجف‌آباد نشان داده است که نرخ متوسط کاهش حجم ذخیره ثابت آب‌خوان آبرفتی معادل ۱۳۸/۳۰ میلیون مترمکعب در سال است و رودخانه زاینده رود در سالیان اخیر در تمامی مسیر محدوده مطالعاتی تغذیه-کننده آبخوان بوده و میزان حجم آب نشتی افته از رودخانه به آب‌خوان حدود ۱۸۹/۲ میلیون مترمکعب درسال است (۲۰۱٥).



شکل ۱-موقعیت محدوده مطالعاتی نجف‌آباد، موقعیت شبکه چاه‌های مشاهده‌ای به همراه نقشه جنس سنگ کف آبخوان براساس اطلاعات گمانه‌های اکتشافی

منابع آب تجدیدپذیر

پتانسیل یا توانایی میزان استحصال منابع آب در یک محدوده مطالعاتی و حوضه آبریز با برقراری بیلان حجم آب برای یک سالآبی قابل تخمین است که معمولا سال آبی برای شرایط نرمال (نه خشکسالی و نه تر سالی) و یا بر اساس میانگین اطلاعات ثبت شده در طولانی مدت میسر می شود (۲۰۱۵). در مطالعه حاضر از بیلان آب زیرزمینی آب‌خوان آبرفتی جدول (۱) و هم‌چنین بیلان عمومی آب جدول (۲) مختوم به سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ در محدوده مطالعاتی نجف-آباد استفاده شده است. آب‌خوان آبرفتی نجف‌آباد در ۸۷ درصد از مساحت دشت محدوده فوق‌الذکر گسترده شده است و در حال حاضر با ۱۵۶۷۳ حلقه چاه بهره‌برداری و با تخلیه و برداشت به میزان ۸۸۱/۱ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی توسط چاه‌های مذکور، رتبه اول برداشت آب را در بین سایر محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز گاوخونی دارا می‌باشد. جدول (۲) وضعیت تخلیه و برداشت از آب زیرزمینی در سطح آب‌خوان آبرفتی محدوده مطالعاتی نجف-آباد را نشان می‌دهد. معمولاً در آب‌خوان‌های آبرفتی چاه‌های بهره‌برداری در مقایسه با چشمه‌ها و قنوات حجم قابل توجهی از میزان تخلیه آب‌خوان را به‌خود اختصاص می-دهند. همین شرایط در آب‌خوان نجف آباد نیز حاکم است و میزان تخلیه از چشمه‌ها و قنوات حجم بسیار ناچیزی (در حدود ٤/٦ میلیون متر مکعب) از میزان کل تخلیه و برداشت در سطح آبخوان را به خود اختصاص داده است. حجم کل بارش در محدوده نجف‌آباد برابر با ۲۹۷/۷ میلیون مترمکعب می‌باشد که از این مقدار تنها ۸۰/۲ میلیون مترمکعب بر سال تبدیل به بارش مفید می‌شود و مابقی توسط تبخیر از دسترس خارج می‌گردد. در این راستا مطابق جدول (۱) میزان نفوذ مستقیم از بارندگی بر سطح دشت در حدود ۲۹/٤ میلی‌متر بوده که معادل ۲٦ میلیون مترمکعب نفوذ از بارش در آب خوان برآورد گردیده است. میزان نفوذ از جریان‌های سطحی ۱۸۹/۵ میلیون مترمکعب و میزان نفوذ آب برگشتی از آبیاری و آب شرب و صنعت به‌ترتیب در حدود ٤۲٤/۸ و ۵۸/۹ میلیون مترمکعب می‌باشد. مطابق جدول (۲) میزان جریان سطحی خروجی از محدوده مذکور برابر ۳۸۰/۵ میلیون مترمکعب و به دلیل برداشت زیاد از منابع آب زیرزمینی و ایجاد مخروط افت در منطقه جریان آب زیرزمینی خروجی از آب‌خوان وجود ندارد. همچنین در حدود ۱٤/۷ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی نیز از محدوده لنجانات و کرون به محدوده نجف‌آباد وارد می‌شود.

جدول۱- بیلان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی نجف آباد(میلیون مترمکعب)

		49.4		**جریان زیرزمینی ورودی**
		26		**نفوذ از بارندگی**
	جمع تغذیه 748.6	189.5		**نفوذ از جریان های سطحی** تغذیه
تغییرات حجم ذخیره -138		424.8		**نفوذ از آب زراعی**
		58.9		**فوذ از آب شرب و صنعت**
		885.7		**تخلیه از چاه ، چشمه و قنات**
	جمع تخلیه 886.6	0		**زهکشی** تخلیه
		0.9		**r تبخیر از آبخوان**
		0		**خروجی زیرزمینی**

جدول۲- بیلان عمومی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد(میلیون مترمکعب)

		132.4	دشت	بارندگی
		165.3	ارتفاعات	
	مجموع 1260.5	557.4		جریان سطحی ورودی
		14.7		جریان زیرزمینی ورودی
		390.6		آبهای انتقالی به محدوده
تغییرات ذخیره -138		6.217	از بارندگی	
		2	از آب آزاد	تبخیر و تعرق
	مجموع 1398.4	9.0	ازسفره	
		732	مصرف خالص	
		380.5		جریان سطحی خروجی
		0		جریان زیرزمینی خروجی
		65.2		آبهای انتقالی به خارج

جدول ۳-وضعیت مصارف از منابع آب زیرزمینی و سطحی در آب‌خوان آبرفتی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد (میلیون مترمکعب)

Source	Alluvial aquifer		
	شرب	کشاورزی	صنعت
آب زیرزمینی (چاه و قنات)	5.7	860.2	17.2
جریان سطحی و چشمه‌ها	52.2	275.7	3
جمع کل	57.9	1135.9	20.2

مصارف آب

درمحدوده نجف‌آباد بخشی از نیاز مصارف مختلف، از آب-های سطحی، چشمه‌ها و پساب (که مجموعاً آب سطحی معرفی می‌شوند) و بخش دیگر توسط آب‌های زیرزمینی (چاه و قنات) تأمین می‌شود. در جدول (۳) وضعیت مصرف از منابع آب زیرزمینی و سطحی در آب‌خوان محدوده مطالعاتی نجف‌آباد ارایه شده است. میزان مصرف از چاه‌ها معادل تخلیه آن‌ها می‌باشد ولی میزان مصرف از چشمه‌ها و قنوات، به‌دلیل عدم مصرف از آب آن‌ها در ماه-های سرد با میزان تخلیه آن‌ها متفاوت در نظر گرفته شده است. مطابق جدول (۳)، ۱۲۱٤ میلیون مترمکعب در سال آب در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد به مصرف می‌رسد. از کل میزان مصرف حجمی بالغ بر ۸۸٦ میلیون مترمکعب مربوط به چاه و قنات و ۳۳۱/۲ میلیون متر مکعب مربوط به آب سطحی، پساب و چشمه است که از این مقدار ٤/٥ میلیون مترمکعب مربوط به پساب و مابقی مربوط به آب سطحی و چشمه‌ها می‌باشد.

شاخص‌های پایداری منابع آب

شاخص نسبت آب مصرفی به آب تجدیدپذیر (C/RW)

اسانو(۲۰۰٦) نسبت آب مصرفی (C) به آب‌تجدیدپذیر (RW)را به‌عنوان شاخصی برای بررسی پایداری منابع آب معرفی می‌کنند. مطابق استاندارد بین‌المللی (جدول (٤)) میزان آب مصرفی معادل ۰/۷ آب تجدیدپذیر به‌عنوان مرز شرایط بحرانی در نظر گرفته می‌شود. با رعایت این حد تنها پایداری کمی و کیفی منابع آب حفظ می‌شود لیکن برای حفظ پایداری توسعه متکی به منابع آب، رعایت حد ۰/٤ مصرف از آب تجدیدپذیر به‌عنوان استاندارد مطرح شده و بیان‌گر شرایطی است که این نوع توسعه در خشک‌سالی‌های طولانی هم پایداری خود را حفظ نماید.

شاخص آب در دسترس (WAI)

میگ و همکاران (۱۹۹۹) در مدل جهانی ارزیابی و در دسترس بودن آب، تغییرپذیری زمانی در دسترس بودن منابع آب را به‌حساب آورده‌اند. این شاخص، شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی و کل مقدار تقاضای آب برای مصارف خانگی، صنعت و کشاورزی را مقایسه می‌کند. این شاخص در محدوده ۱- تا ۱ نرمال می‌شود (رابطه ۵). زمانی که مقدار شاخص برابر صفر باشد یعنی تقاضا و در دسترس بودن آب برابر است. شاخص موجودی آب طبق رابطه در دسترس بودن منابع آب سطحی به صورت ۹۰ درصد روان‌آب قابل اعتماد محاسبه می‌گردد. در دسترس بودن آب زیرزمینی، یا به‌عنوان پتانسیل تغذیه‌ای که از بیلان ماهانه آب سطحی محاسبه می‌شود و یا به‌صورت پتانسیل عرضه آب‌خوان برآورد می‌گردد و مقدار کمتر در محاسبات در نظر گرفته می‌شود. اگر مقدار این شاخص مثبت و نزدیک به ۱ شود نشان‌دهنده وضعیت خوب و مقدار عرضه بیش از تقاضا می‌باشد و برای مقدار شاخص منفی وضعیت برعکس و نشان‌دهنده این است که مقدار تقاضا بیشتر از منابع آب است.

$$WAI = (R + G - D)/(R + G + D) \qquad (۱)$$

در این رابطه، R روان‌آب سطحی، G منابع آب زیرزمینی و D تقاضا در همه بخش‌ها است.

شاخص تنش آبی (WSI)

جینگ وی و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی نشان داد شاخص (WSI) که شاخص بحران آب نیز نامیده می‌شود از حاصل تقسیم مقادیر برداشت آب به موجودی آب طبق رابطه (٤) به‌دست می‌آید. در این شاخص می‌توان مناطقی که دارای مصرف آب بیش از حد مجاز بوده و به اکوسیستم آسیب می‌رساند را شناسایی کرد.

$$WSI = TW / Ba \qquad (۲)$$

در این رابطه TW معرف میزان کل برداشت از منابع آب که شامل کل مصرف آب کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد و Ba معرف میزان آب قابل دسترس سالانه که شامل جریان سطحی ورودی به محدوده نجف‌آباد، مقدار جریان ورودی توسط شبکه آبیاری نکوآباد، چهار خط لوله فولادی انتقال آب شرب نجف‌آباد و مقدار روان‌آب سطحی ناشی از بارش در محدوده مطالعاتی می‌باشد. برداشت‌ها از منابع آب شامل مصارف کشاورزی، شرب و صنعت در محدوده مطالعاتی بوده و میزان آب قابل در دسترس نیز از مجموع میزان روان‌آب سطحی و آب انتقالی از محدوده‌های مجاور به‌دست می‌آید. مقادیر به‌دست آمده از شاخص WSI در سه گروه مطابق جدول (٤) طبقه‌بندی می‌گردد. مقادیر بزرگ WSI به معنی افزایش تنش در منطقه می‌باشد هم‌چنین اگر مقدار شاخص WSI کمتر از ۰/٤ باشد، بدین معنی است که هیچ تنش آبی و یا حداقل تنش آبی در منطقه وجود دارد

.جدول ٤- طبقه‌بندی شاخص WSI

گروه	مقدارشاخص
1	$0.4 \leq WSI < 0.8$
2	$0.8 \leq WSI < 1.2$
3	$WSI \geq 1.2$

مدل مفهومی آب‌خوان نجف آباد

بعد از تعیین بیلان دستی آب زیرزمینی و شناخت کامل ورودی‌ها و خروجی‌های دشت، به ایجاد ساختار مدل مفهومی آب‌خوان دشت نجف‌آباد بر اساس اطلاعات موجود اقدام شد. در این راستا از مدل ریاضی Modflow در نرم‌افزار GMS استفاده شد. مدلModflow، یک مدل

جریان آب زیرزمینی تفاضل محدود سه بعدی می‌باشد، به‌طوری‌که حرکت سه بعدی آب زیرزمینی با چگالی ثابت به‌وسیله معادله دیفرانسیل جزیی با استفاده از روش تفاضل محدود و براساس معادله پیوستگی حل می‌شود. حل تحلیلی این معادله، عملاجز در موارد بسیار محدود و ساده امکان‌پذیر نبوده و لذا به جهت آن‌که درطبیعت، شرایط واقعی سیستم‌های آب زیرزمینی اکثرا غیریکنواخت و دارای خواص و شکل هندسی نامنظم و شرایط مرزی و تغذیه و تخلیه متغیر در زمان و مکان می‌باشد، از روش‌های مختلف عددی مانند روش تفاضل‌های محدود، اجزای محدود، المان‌های مرزی و غیره جهت حل آن استفاده می‌شود. روش عددی به‌کار گرفته شده درمدل Modflow، روش تفاضل‌های محدود است ساختار مدل مفهومی آب‌خوان شامل سه دسته کلی داده‌های ورودی که عبارتند از خصوصیات حوضه (مرز آب‌خوان، توپوگرافی سطح و کف و ضخامت آب‌خوان)، ضرایب هیدرودینامیک دشت (ضریب ذخیره و هدایت هیدرولیکی) و اطلاعات هیدرواقلیمی و هیدروژئولوژیکی (تغذیه، ورودی و خروجی جریان زیر قشری از دشت، برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و تراز سطح ایستابی) و میزان تغذیه از سطح به آب‌خوان و شرایط مرزی آب‌خوان است. مدل مفهومی آب‌خوان نجف‌آباد در شبکه‌ای در ابعاد ۵۰۰ در ۵۰۰ متر و در یک لایه طراحی شد. در شکل (۲) موقعیت چاه مشاهداتی محدوده مطالعاتی و هم‌چنین موقعیت مرزهای ورودی آب زیرزمینی در محیط GIS نشان داده شده است. در مدل‌سازی آب زیرزمینی، پس از ساخت مدل مفهومی مدل برای یک بازه‌ی زمانی در حالت ماندگار واسنجی و از نتایج آن به‌عنوان شرایط اولیه برای شبیه‌سازی در حالت غیرماندگار استفاده می‌شود. در حالت ماندگار تراز سطح آب در یک بازهٔ **زمانی در کل** محدوده‌ی آبخوان ثابت می‌ماند و در حالت غیرماندگار تراز سطح آب در بازه‌های زمانی مختلف تغییر می‌کند. شبیه‌سازی در حالت غیر ماندگار به‌آن‌چه در طبیعت اتفاق می‌افتد، نزدیک‌تر است. بدین منظور در حالت ماندگار، متوسط تراز سطح آب در مهر ماه سال آبی ۱۳۹۰- ۱۳۸۹ با استفاده از آمار روزانه‌ی ۵۳ چاه مشاهداتی در محدوده‌ی مد نظر به‌دست آمد و از آن برای وارد کردن شرایط اولیه و مقادیر تراز مرزهای ورودی و خروجی به مدل استفاده شد. هم‌چنین کلیه‌ی مقادیر تغذیه به آب‌خوان، شامل بارندگی و مقادیر تخلیه از آب‌خوان شامل چاه‌های بهره‌برداری در سال یادشده برای اجرا در حالت ماندگار وارد مدل شد. بعد از اجرای مدل در حالت ماندگار، با تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی به وسیله‌ی ترکیبی از دو روش خودکار PEST و سعی و خطا، اختلاف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تراز سطح آب به حداقل مقدار ممکن رسید و واسنجی مدل در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۸۹ انجام شد. به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر نتایج واسنجی مدل، از سه معیار ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) استفاده شده است.

. مقدار R بیانگر ارتباط خطی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی است که مقدار آن بین صفر و یک است. در حالت غیرماندگار تمام پارامترهای یادشده در حالت ماندگار، در ٤٨ گام زمانی از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۳ برای مدل در نظر گرفته شد با این تفاوت که در حالت غیرماندگار به جای هدایت هیدرولیکی، مقادیر اولیه‌ی آبدهی ویژه وارد مدل و با تغییر مقادیر اولیه‌ی تغذیه و آبدهی ویژه، واسنجی انجام شد. البته از این ٤٨ گام زمانی حالت غیرماندگار، داده‌های مشاهداتی پیزومتری سه سال اول این دوره زمانی برای واسنجی و سال چهارم برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. ماحصل نتایج حالت غیرماندگار، تراز سطح آب شبیه‌سازی شده در ٤٨ گام زمانی فوق و نقشه‌ای دقیق‌تر از مقادیر اولیه آبدهی ویژه آب‌خوان پس **از واسنجی مدل را شامل شد. ضمناً کالیبره کردن نقشه** آبدهی ویژه به‌صورت دستی و با روش سعی و خطا انجام شد.

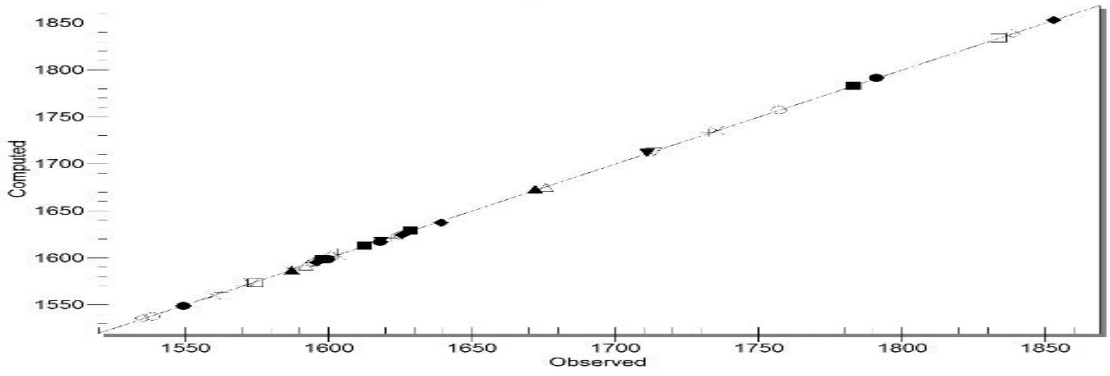
نتایج و بحث

مقادیر (RMSE) و (MAE) بعد از واسنجی در حالت ماندگار به‌ترتیب برابر با ۰/۸ متر و ۰/۵۹ متر است که نشان‌دهنده‌ی دقت قابل قبول مدل‌سازی در حالت ماندگار است. در حالت غیرماندگار نیز مانند حالت ماندگار باید مقادیر

سطح آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده انطباق مناسبی داشته باشد که در شکل (۱) مقادیر سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده را در مقابل مقادیر مشاهده‌ای برای پیزومترها طی دوره زمانی ۱۳۹۳-۱۳۸۹ نشان می‌دهد.

مقادیر (RMSE) بعد از واسنجی و صحت‌سنجی در حالت غیرماندگار به‌ترتیب برابر با ۰/۸۸ متر و ۱/۲ متر می‌باشد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل‌سازی در حالت غیرماندگار است.

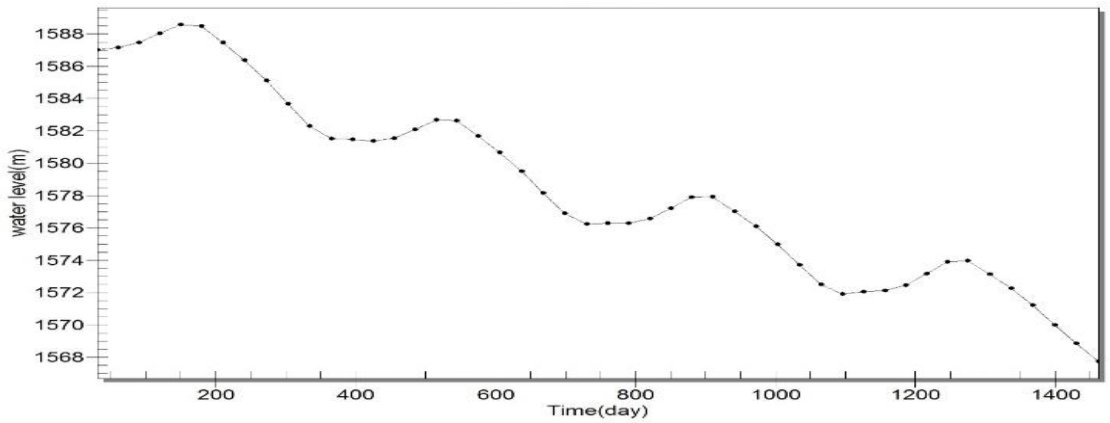
تراز آب



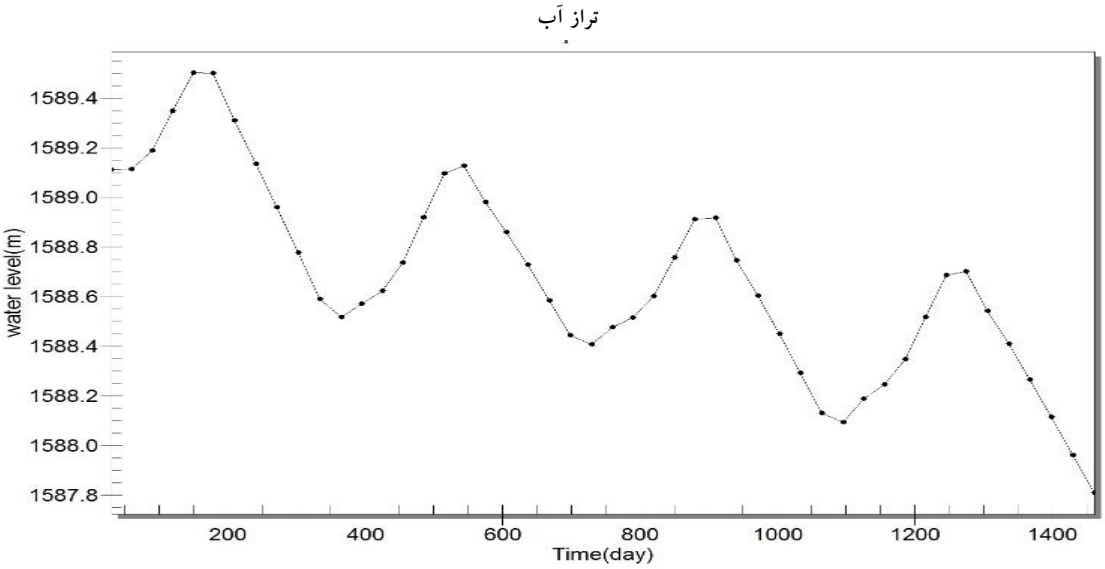
روز

شکل ۲- پراکنش داده‌های تراز آب زیرزمینی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بعد از واسنجی در حالت غیر ماندگار (۹۳-۱۳۸۹)

تراز آب



شکل۳- تراز آب شبیه‌سازی‌شده (۱۳۹۳-۱۳۸۹) (پیزومتر ۱)



شکل٤- تراز آب شبیه‌سازی‌شده (۱۳۹۳-۱۳۸۹) (پیزومتر ۱۲)

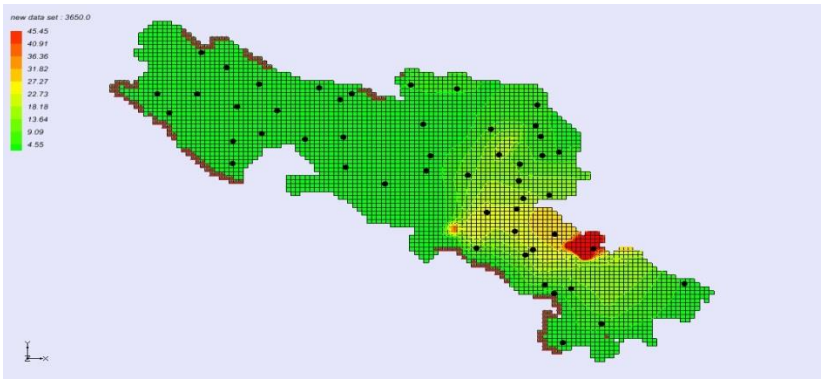
در شکل‌های ۳ و ٤ به عنوان نمونه مقادیر تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی‌شده در دوره صحت‌سنجی در دو چاه مشاهداتی انتخابی نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور عمودی تراز سطح آب زیرزمینی بر حسب متر و محور افقی دوره زمانی مدل‌سازی بر حسب روز است. هم-چنین نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد، توزیع مقادیر هدایت هیدرولیکی بین اعداد ۰/۵ تا ۵ متر در روز متغیر می‌باشد و دامنه تغییرات مقدار آبدهی ویژه بین ۰/۰۱ تا ۰/۲ است. بیشترین افت سطح آب مربوط به نواحی مرکزی آب‌خوان می‌باشد. جهت غالب جریان آب زیرزمینی با توجه به نقشه-های هم‌عمق آب‌خوان از شمال و جنوب به سمت مرکز آب‌خوان می‌باشد. تهیه بیلان آب زیرزمینی دشت نجف‌آباد توسط مدل در حالت غیرماندگار یکی از کاربردهای مهم جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی و همچنین شاخص‌های پایداری در این تحقیق بوده است که از نتایج آن می‌توان در بررسی و اتخاذ رویکردهای صحیح مدیریت وکنترل سفره آب زیرزمینی بهره جست. به شرایط آب‌خوان دشت نجف‌آباد، صفر می‌باشد. با توجه به بیلان خروجی مدل ، آب‌خوان دشت نجف‌آباد سالانه حدود ۱۷۸ میلیون مترمکعب کسری مخزن دارد. سپسسناریوهای اقلیم توسط مدل LARS-WG در سه مرحله تولید شد. ابتدا مدل LARSWG توسط داده‌های مشاهداتی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارندگی ٤٠ ساله ایستگاه سینوپتیک نجف آباد در دوره ۲۰۰۸-۱۹٦٥مورد واسنجی قرار گرفته سپس در مرحله صحت سنجی توانایی مدل در شبیه سازی اقلیم ایستگاه ها بررسی شدند و در نهایت مشخصه‌های آماری داده‌های هواشناسی مشاهده شده و ساختگی برای تعیین اینکه آیا اختلاف معنی‌داری وجود دارد یا نه از طریق مقایسه آماری تحلیل شدند . نتایج مقایسه توزیع‌های احتمال و میانگین‌های ماهانه متغیرهای بارندگی، دمای حداقل و دمای حداکثر نشان دهنده این است که میتوان از مدل LARSWG برای شبیه سازی داده‌های بارش و دما در دوره‌های آتی استفاده کرد. به منظور اجرای مدل، مقادیر روزانه بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعات آفتابی مربوط به سال های آماری موجود در ایستگاه ها، به عنوان دوره اقلیم پایه، به مدل معرفی شده و پیش بینی اقلیم برای دوره آماری ۲۰٤۰ تا ۲۰۱۱ میلادی صورت گرفت.

شبیه سازی وضعیت آبخوان در دوره آتی تحت تاثیر پدیده تغییراقلیم

پس از بررسی تغییر اقلیم منطقه و روند و میزان تغییرات بارش در دوره زمانی آتی طرح، نسبت به دوره پایه، نتایج مدل تغییر اقلیم را که همان مقادیر ماهانه بارش محدوده مورد مطالعه می‌باشد، به عنوان یک عامل بیلان آبخوان،برای دوره زمانی ۳۰ ساله آتی به مدل آب زیرزمینی اعمال نموده و با تکمیل نمودن مدل برای دوره زمانی ۳٦۰ ماهه آتی، میزان تأثیر تغییر اقلیم، بر بیلان مخزن و سطح آب زیرزمینی

بررسی می‌شود.جداول و نقشه‌های نتایج مربوط به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی آبخوان در ادامه درج شده است. **سناریو یک: ادامه بهره برداری با وضع موجود در ۱۰ سال آینده**

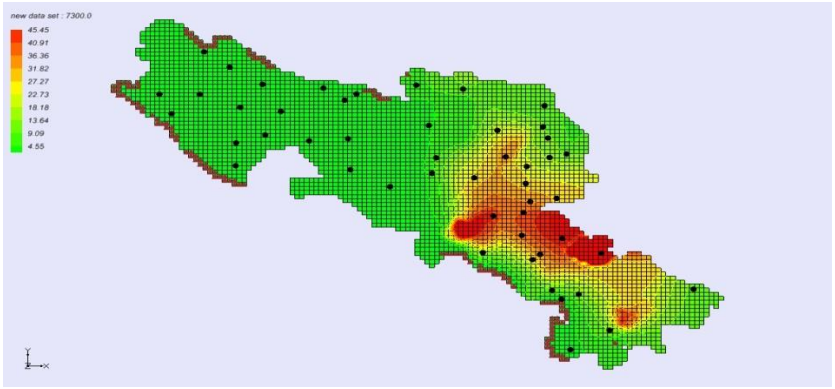
در این سناریو فرض شده است که روند بهره برداری از چاه ها در دوره ۱۰ سال آتی نسبت به سال پایه، مقایسه گردد. سایر شرایط در مرزها و تغییرات اقلیمی مانند حالت قبلی در نظر گرفته شده است. ، تغییرات متوسط تراز سطح آب زیرزمینی در دوره آتی را نسبت به سال آبی پایه نشان می دهد. با افزایش نرخ بهره برداری از چاه ها، متوسط سطح آب زیرزمینی در دوره ۱۴۰۸-۱۳۹٤ نسبت به سال ۹۳-۱۳۹۲ به طور متوسط سطح بیشتری در محدوده آبخوان نشان می یابد. همانطورکه در شکل ٤ دیده می شود به دلیل تجمع چاه های بهره برداری در قسمت های مرکزی و جنوبی آبخوان بیشترین مقدار افت سطح آب در همین ناحیه بوده می رسد.



شکل ٤-نقشه تأثیر تغییر اقلیم تحت سناریوی HCM3A2 بعد از ۱۰ سال آینده بر روی سطح آب زیرزمینی نجف آباد

سناریودو: ادامه بهره برداری با وضع موجود در ۲۰ سال آینده

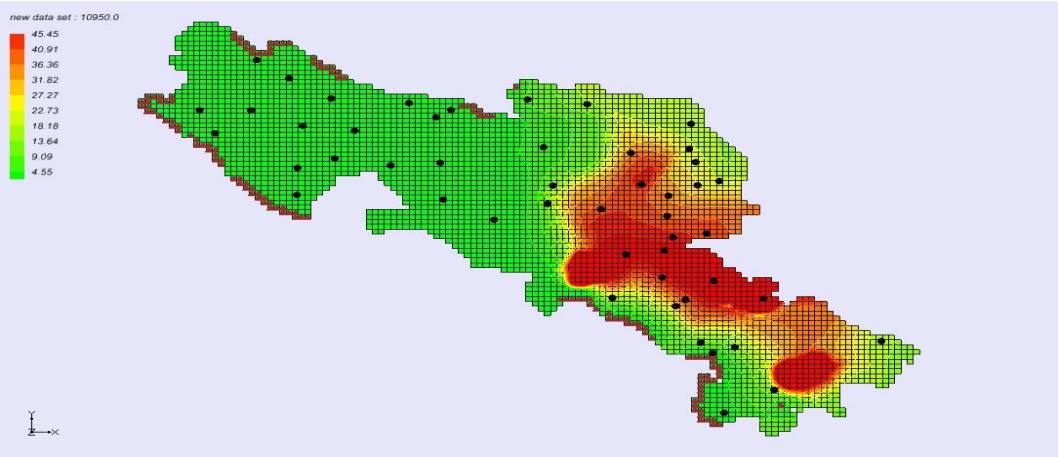
با توجه به با افزایش بهره برداری از چاهها، متوسط سطح آب زیرزمینی در دوره ۲۰ سال آتی نسبت به سال ۹۳-۱۳۹۲ به طور متوسط در شکل ۵ سطح بیشتری در محدوده آبخوان افزایش می یابد. در این حالت نیز مانند حالت قبل به دلیل تجمع چاههای بهره برداری در قسمتهای مرکزی و جنوبی آبخوان بیشترین مقدار افت سطح آب در همین ناحیه بوده و در محل پیزومتر خروجی به دلیل نزدیک بودن به مرز خروجی آبخوان میزان افت خیلی بیشتر است.



شکل ۵-نقشه تأثیر تغییر اقلیم تحت سناریوی HCM3A2 بعد از ۲۰ سال آینده بر روی سطح آب زیرزمینی نجف آباد

سناریو سوم: ادامه بهره برداری با وضع موجود در ۳۰ سال آینده

در این سناریو نیز فرض شده است که روند بهره برداری از چاه ها در دوره ۳۰ سال آتی نسبت به سال پایه، مقایسه شود. سایر شرایط از قبیل بار در مرزها و تغییرات اقلیمی مانند سناریو قبلی در نظر گرفته شده است. شکل ٦ ، تغییرات متوسط تراز سطح آب زیرزمینی در دوره ۳۰ سال آتی را نسبت به سال آبی پایه نشان می دهد.



شکل ٦- نقشه تأثیر تغییر اقلیم تحت سناریوی HCM3A2 بعد از ۳۰ سال آینده بر روی سطح آب زیرزمینی نجف آباد

شکل‌های ٤ تا ٦ نقشه‌های مربوط به خروجی مدل از اثر دادن تغییر اقلیم با سناریوهای ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ سال را بر روی سطح آب زیرزمینی دشت تا انتهای سی ساله آتی (آخرین گام زمانی مدل) نسبت به سال اجرای حالت غیرماندگار مدل می‌باشد و میزان افت سطح آب را در نواحی مختلف آبخوان طی دوره سی ساله آتی مورد بررسی نشان می‌دهد. با توجه به این نقشه‌ها بیشترین افت سطح آب در قسمت‌های مرکزی و بیشتر در جنوب دشت در حدود ۵۰ متر مشاهده می‌شود که علت اصلی آن تمرکز چاه‌های برداشت در این قسمت‌ها می‌باشد. کمترین مقادیر افت سطح آب در طی دوره زمانی مذکور نیز با توجه به شکل‌ها در حاشیه‌های شمال و شرقی دشت مشاهده می‌شود که افتی حدود ٤ الی ۹متر طی دوره سی ساله رخ خواهد داد. مطابق با نقشه های فوق به دلیل کاهش بارندگی و فرض ثابت ماندن میزان بهره برداری از چاهها در دوره آتی، متوسط تراز سطح آب زیرزمینی در دوره آتی نسبت به تراز سطح آب در سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ به میزان ٤٥ متر در کل محدوده آبخوان کاهش می یابد. باتوجه به اینکه بیشترین میزان تغذیه آبخوان از طریق جریان آب زیرزمینی ورودی، از طرف مرزهای ورودی انجام می شود، بیشترین میزان افت تراز سطح آب نیز در قسمت مرکز و جنوب صورت گرفته به طوری که کاهش سطح آب ۵۰ متر می رسد.

نتیجه‌گیری

شاخص آب در دسترس (WAI) در این محدوده با توجه به میزان روان‌آب سطحی، میزان منابع آب زیرزمینی و کل مصارف آب‌خوان نجف‌آباد در حدود ۰/۳- برآورد گردید که با توجه به دامنه تعریف شاخص، نشان‌دهنده عدم تعادل پایدار محدوده به لحاظ نابرابری میان عرضه و تقاضا و فزونی قابل توجه میزان تقاضا از عرضه منابع آب می‌باشد. هم‌چنین برای محاسبه شاخص تنش آبی (WSI) در محدوده نجف‌آباد، نسبت کل برداشت از منابع آب به میزان آب قابل در دسترس (شامل مجموع میزان روان‌آب سطحی و آب انتقالی از محدوده‌های مجاور) محاسبه و به میزان ۱/۲۷ برآورد گردید. عدد محاسبه‌شده با توجه به طبقه‌بندی شاخص در گروه ۳ قرار دارد که نشان‌دهنده وضعیت تنش آبی شدید در محدوده مطالعاتی نجف‌آباد است. بنابراین در این تحقیق نتایج هر دوشاخص دلالت بر عدم تعادل بیلان و شرایط حاد و بحرانی محدوده مطالعاتی نجف‌آباد به لحاظ منابع آب و مصارف آن دارد. از سوی دیگر بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی منطقه به کمک مدل MODFLOW نیز

نشان‌دهنده روند افزایش کسری مخزن در طی دوره مدل-سازی بوده است. **نتایج بیلان مدل‌سازی آب زیرزمینی نیز نشان داد که تغییرات ذخیره ناشی از بیلان آبی دشت منفی است و سیر نزولی هیدروگراف دشت، در دو** گام زمانی ٤٨ و ٦٠ ماهه نیز کاهش سطح ایستابی و بحران آب را نشان داد. هم‌چنین بررسی مدل آب زیرزمینی در دوره زمانی ٦٠ ماهه که به‌منظور صحت‌سنجی شاخص‌های پایداری به‌دست آمده، صورت گرفت هم‌سو بودن نتایج مدل‌سازی و شاخص‌های پایداری را به خوبی نشان داد با بررسی تغییر اقلیم در دشت نجف آباد با تلفیق چهار مدل از مدل‌های AOGCM، مشخص شد که در دوره سی ساله آتی (۲۰٤۰-۲۰۱۱) بارش نسبت به دوره پایه طرح (۲۰۰۸-۱۹٦٥) کمتر شده است و دما افزایش یافته است . به طوریکه طبق نتایج مدل اقلیمی، در مقیاس بارش سالانه تحت سناریوی A2 حدود ٤۳٪ کاهش بارش سالانه را شاهد خواهیم بود. و اثرات سوء تغییر اقلیم بر روی سطح آب زیرزمینی محسوس بوده و غیرقابل چشم‌پوشی است.با اعمال نتایج حاصل از مدل تغییر اقلیم بر مدل آب زیرزمینی، تراز سطح آب دشت طی پایان دوره آتی طرح از ۱ متر در حاشیه‌های آبخوان تا ۵۰ متر در نواحی میانی دشت افت سطح آب را نشان می‌دهد. در مجموع هیدروگراف چاه‌های پیزومتری دشت نجف‌آباد نشان داد که سطح ایستابی دشت رو به کاهش است. بنابراین با توجه به شرایط اقلیمی منطقه و نیز خشک‌سالی‌های اخیر و افزایش روزافزون زمین‌های کشاورزی داخل دشت و اطراف آن که به افت سطح آب زیرزمینی دشت منجر شده است، ادامه این روند و این میزان کسری مخزن می‌تواند منجر به بروز بحران‌های جبران‌ناپذیر در سال‌های آتی شود. چه بسا که تأثیر تغییر اقلیم نیز به‌طور مستقیم و غیر مستقیم بر کمیت و کیفیت منابع آب زیرزمینی این منطقه قابل چشم‌پوشی نبوده و امکان تشدید این بحران در اثر وقوع تغییر اقلیم نیز محتمل خواهد بود. با فرض ادامه روند کنونی تخلیه‌ها و در نظر گرفتن نتایج آینده بارش که قبلاً تصویرسازی شدند، در پایان دوره زمانی آتی مورد مطالعه یعنی در سال ۲۰۳۰ در حدود ۱۹۷ میلیون متر مکعب کسری مخزن خواهیم داشت که این مسئله برای دشت نجف آباد بحران غیرقابل جبرانی خواهد بود. چه بسا که به علت قرار گرفتن در شرایط افت بیش از حد تراز سطح آب، بعنوان دشت ممنوعه لحاظ شود. به منظور کاهش آثار سوء ناشی از ناشی از افت شدید سطح آب در دو دهه پیش رو می‌بایست راهکارهایی مؤثر ارائه و اتخاذ کرد تا بتوان بحران پیش رو را تا حدودی کنترل کرد. راهکارهایی که برای این منطقه مناسب به نظر می‌رسید یکی کاهش برداشت و دیگری احداث طرح‌های تغذیه مصنوعی می‌باشد.

منابع

1. Chaves, H. and Alipaz, S., 2007. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. Journal of water resources management, 21(5), pp.883-895.
2. Chenini, L. and Ben mamou, A., 2010. Groundwater recharge study in arid region, an approach using GIS techniques and numerical modelling. Computers and geosciences, 36, pp.801-817.
3. DehkurdiKhosrow.etal2019, roundwater, DroughtAssessment and ForecastingUsing the IndexGRIAnd Markov Chain Models of First to Third Order (Case Study: Borujen Plain),Journal of Soil andwaterConservation ResearchVolume twenty-six, number two, (In Persian).
4. Hafezparest, M. and Fatemi, A., 2017. Calculation of catchment stability indices in order to maintain sustainable development. Journal of geography and environmental sustainability research, 18, pp.33-21. (In Persian).
5. Jingwei, L. and Zhifeng, L., 2017. A comprehensive index for stream depletion in coupled human-water. Journal of Hydro-environment Research Systems Science of the Total Environment, 16, pp.58-70.
6. Kang, M.. and Lee, G., 2011. Multicriteria evaluation of water resources sustainability in the context of watershed management. Journal of the american water resources association. 47(4), PP. 813-827.
7. Kardan Moghaddam, H., Banihabib, M. and Javadi, S., 2017. Assessment of artificial recharge on aquifer restoring

using sustainability index. Journal of Echo hydrology, 4(4), pp.1241-1253. (In Persian).
8. Komasi, M. and Sharghi, S., 2017. Outing and classification of effective factors in the groundwater level decline using cross and coherence wavelet transforms: Case study silakhor plain aquifer, Irrigation and Water Engineering, 7(4), pp. 138-151. (In Persian).
9. Meigh, J.R., Mckenzie, A. and Sene, k., 1999. A gride-based approach to water scarcity, estimates foreastern and southern Africa. Water resources management, 13, pp.85-115.
10. Nowzar poor, L., Chit sazan, M., Nadri, A. and Farhadi manesh, M., 2014. Evaluation of the hydraulic connection between Laur Andimeshk and Dez River aquifers using the MODFLOW model. Journal of Advanced Applied Geology, 17(5), pp.23-36. (In Persian).
11. Rachmad, F., Nobukazu, N. and Aswandi, I. 2014. Sustainablity assessment of humid tropical watershed: A case study of Batang Merao watershed, Indonesia, Procedia Environmental Sciences, 20, pp. 722-731.
12. Rijsberman, F.R., 2006. Water scarcity: Fact or fiction?, Journal of agricultural water management, 80, pp.5–22.
13. Talebi Hossein Abad, F., Shahedi, M., Vellayati, s. and Davari, K., 2014. An estimation of renewable water using water budget model in the absence of adequate data. Journal of geography and regional development, 12(22), pp.129-150. (In Persian).
14. Vali Wende et al 2019 ,Evaluation of Long-term Quantitative Impacts of Current Management and Operation Conditions on Varamin Plain Aquifer ,Journal of Soil and Water Conservation ResearchVolume twenty-six, number two، (In Persian).