

شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از مدل GMS

اسماء رستگار^۱، شهلا پایمزد^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۳۰

چکیده

پدیده تغییر اقلیم از جمله مواردی است که تأثیر بسزایی در کاهش سطح آب رودخانه‌ها و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی به‌ویژه طی سال‌های اخیر داشته است. در این راستا مدل‌های مختلفی به پیش‌بینی دما و بارش تحت تأثیر اقلیم حاضر و آینده می‌پردازند. این مقادیر پیش‌بینی‌شده، توسط مدل‌های متنوع، رفتار آبخوان طی سناریوهای گوناگون (تعریف‌شده توسط گزارش‌های IPCC) را شبیه‌سازی می‌کنند. هدف از این مطالعه، مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از مدل GMS تحت تأثیر تغییر اقلیم برای دوره آتی (۲۰۳۰) می‌باشد. بدین منظور از مدل LARS و سناریوهای مطرح A1B، B1 و A2 (حالت‌های بینابینی، خوشبینانه و بدبینانه) برای بررسی تغییر اقلیم استفاده شد. در ابتدا، نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی نشان‌دهنده افزایش دمای حداقل بین ۰/۵۹ تا ۰/۸۶ درجه سانتی‌گراد و افزایش دمای حداکثر بین ۰/۵۶ تا ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه است. مقایسه بارش سالیانه درازمدت نشان می‌دهد که کمترین مقدار بارش طی سناریو B1 در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ اتفاق خواهد افتاد که معادل ۱۰/۰۲ میلی‌متر بیشتر از بارش دوره پایه خواهد بود. این در حالی است که بیشترین مقدار بارش با افزایش ۱۵/۸۰ میلی‌متری در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ طی سناریو A2 اتفاق خواهد افتاد. در ادامه، مقادیر RMSE، MAE و ME بعد از واسنجی (به ترتیب برابر ۰/۳۸ متر، ۰/۲۱ متر و ۰/۲۰ متر) نشانگر دقت قابل قبول مدل GMS در این منطقه است. بعد از ارائه عملکرد مناسب مدل GMS، برای شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر تراز سطح ایستابی، از چهار سناریوی مختلف برداشت از آبخوان، استفاده شد و تغییرات افت آبخوان نسبت به دوره پایه بررسی شد. نتایج حاکی از افت شدید تراز آب زیرزمینی در دوره‌های آتی می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که افت سطح آب مطابق سناریو اول معادل ۱۰/۰۶- (سال ۲۰۳۰) خواهد بود. از طرفی، مقادیر افت سطح آب طی سناریوهای تغییر اقلیم A2، A1B و B1 به ترتیب برای سناریو دوم ۱۱/۹-، ۱۲/۳۲- و ۱۶/۵۲- متر، سناریو سوم ۱۶/۴۱-، ۱۶/۶۶- و ۱۷/۳۰- متر و در نهایت برای سناریو چهارم ۱۶/۶۵-، ۱۶/۹۰- و ۱۸/۱۷- متر خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: آب‌های زیرزمینی، تغییر اقلیم، دشت کرمان، مدل HADCM3 و مدل GMS.

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک، نویسنده مسئول، Paimozd.ar@hotmail.com

مقدمه

یکی از چالش‌های مهم در خاورمیانه، رقابت برای دسترسی به منابع آب است و مسئله‌ای که این منطقه را در آینده وارد ابعاد تازه‌ای از چالش‌ها خواهد کرد، کاهش منابع آب در این منطقه با توجه به تغییر اقلیم جهانی خواهد بود. بر اساس برآورد هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم^۱ (IPCC) این منطقه در آینده، گرم‌تر و خشک‌تر خواهد شد. مطابق با مدل‌سازی‌های IPCC بیش از ۸۰ تا ۱۰۰ میلیون نفر تا سال ۲۰۵۰ در معرض کمبود آب در منطقه قرار خواهند گرفت و آب‌های زیرزمینی نیز کاهش سریعی خواهند یافت. از طرفی، تغییر اقلیم به دلیل تغییر بر روی آبدهی رودخانه و بارندگی، تغییر در بیلان آب زیرزمینی، از دسترس خارج شدن آب دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، تالاب‌ها و دیگر پیکره‌های آبی و نیز تبخیر بیشتر رطوبت خاک را به همراه خواهد داشت (IPCC, 2007). بنابراین، این موضوع زنگ خطری برای حفاظت بیشتر از منابع خاک در مقابل تخریب و کاهش بهره‌وری است. در این راستا هاشمی‌نسب و همکاران (۲۰۱۳) به پیش‌بینی تغییرات بارش ۲۰ سال آینده در استان کرمان با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌کننده لارس^۲ و گردش عمومی^۳ (HadCM3) پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که میانگین بارش در همه ایستگاه‌ها افزایش یافته است. نتایج حاصل از بارش در ۲۰ سال آینده نیز نشان داد که بیشترین افزایش مربوط به ایستگاه‌های بم و رفسنجان با ۲۶/۵٪ و کمترین میزان افزایش مربوط به ایستگاه کهنوج با ۱۱٪ است (هاشمی‌نسب و همکاران، ۲۰۱۳). مزاده^۴ و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی، اقدام به تهیه مدل کمی آب‌های زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار GMS در دشت قوچان کردند. با توجه به تعداد چاه‌های مشاهده‌ای در دشت (۲۳ حلقه) و کشیدگی آبخانه و نبود اطلاعات کافی نظیر ضرایب هیدرودینامیکی، وضعیت سنگ کف و...، نتایج مدل‌سازی نشان داد که مدل به خوبی توانسته است تغییرات

سطح آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کند. تصحیح سنگ کف، ضرایب آب برگشتی از چاه‌ها، میزان تغذیه آبخانه، میزان هدایت هیدرولیکی از نتایج مدل‌سازی آبخانه است. همچنین بررسی آنالیز حساسیت نشان داد که مدل نسبت به هدایت هیدرولیکی و سپس سنگ کف حساسیت بیشتری دارد. در تحقیق دیگری، شکوهی و همکاران (۲۰۱۳) به مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت تویسرکان با استفاده از مدل ریاضی GMS پرداختند. آنالیز حساسیت مدل در شرایط ناپایدار نسبت به پارامترهای مختلف نشان می‌دهد بیشترین حساسیت مدل به هدایت هیدرولیکی است. نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری و آبدهی ویژه در درجات بعدی اهمیت قرار دارند صحت‌سنجی برای سال آبی ۱۳۸۸ تا ۱۳۸۹، دقت و درستی مدل را تأیید کرده و در نهایت مدل صحت‌سنجی شده برای پیش‌بینی وضعیت آینده آبخوان با در نظر گرفتن سناریو ادامه روند کنونی، به مدت چهار سال از مهر ۱۳۹۲ تا مهر ۱۳۹۶ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که بیشترین افت سطح آب در قسمت‌های مرکزی دشت اتفاق می‌افتد.

در تحقیقی دیگر، ساپریزا^۵ و همکاران (۲۰۱۵) اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و بهره‌برداری آب زیرزمینی را روی پویایی حوزه آبخیز در اسپانیا بررسی کردند. آن‌ها از مفهوم بیلان تصادفی برای ارزیابی پاسخ مدل هیدرولوژیکی به شبیه‌سازی‌های مدل گردش عمومی جو^۶ (GCM) استفاده کردند. سپس از این روش برای ارزیابی اثر ترکیبی تغییر اقلیم پیش‌بینی شده و بهره‌برداری از آب زیرزمینی استفاده کردند. نتایج کاهش معنی‌داری را در قابلیت دسترسی به آب در دوره آبی نشان داد. به‌طور کلی، رطوبت خاک و تبخیر و تعرق واقعی تا حدود ۲۰٪، تغذیه آب زیرزمینی تا حدود ۵۰٪ و پاسخ‌های مرتبط با آبخوان (تولید رواناب، تبادل آب سطحی و زیرزمینی، تالاب‌ها و جریان سطحی) تا حدود ۶۰٪ کاهش خواهد یافت.

آبدار اصفهانی و همکاران (۲۰۱۴) برای شبیه‌سازی آبخوان دشت قم، از نرم‌افزار GMS و برای ارزیابی تغییرات

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. LARS-WG
3. Hadley Coupled Model
4. Mazadeh

5. Sapriza

6. Global Circulation Models

MODFLOW در مخروط‌افکنه آبرفتی رودخانه تدروری ژاپن ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که متغیرهایی مثل دمای هوای روزانه، بارش، رطوبت، تابش خورشیدی و سرعت باد از طریق آبیاری، تبخیر و تعرق، ریزش و ذوب برف روی آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارند و سطح آب زیرزمینی بیشتر نسبت به تغییر در بارش در طول دوره عدم آبیاری حساس است. همچنین روند سطح آب زیرزمینی کاهش یافته و حداکثر افت سطح آب در دوره ۲۰۱۰-۲۰۹۰ حدود ۱ متر خواهد بود.

طبق گزارش وزارت نیرو، سالانه حدود ۷ میلیارد مترمکعب از مخازن آب زیرزمینی کشور کاسته می‌شود. همچنین از ۶۰۹ دشت کشور، حدود ۳۵۰ دشت به‌عنوان دشت ممنوعه شناخته شده‌اند و روند افزایش تعداد دشت‌های ممنوعه از تعداد ۱۵ چاه در سال ۱۳۴۷ به ۱۹۹ دشت در سال ۱۳۸۰ و ۳۵۰ دشت ممنوعه در سال ۱۳۹۴، نشان‌دهنده وضعیت نامناسب منابع آب کشور است. در این بین، بیشترین میزان کسری آب مخازن زیرزمینی مربوط به حوزه درجه دو دریاچه نمک است و یکی از دشت‌های مهم این حوزه که در این چند سال به دلیل افت زیاد آب زیرزمینی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته، دشت کرمان است. درباره تغییر اقلیم مطالعات زیادی صورت گرفته اما اغلب این مطالعات به بررسی ارتباط تغییر اقلیم با آب‌های سطحی پرداخته است. از طرفی، در مطالعات گذشته، بیشتر از روش‌های تجربی استفاده شده است.

در این پژوهش، از مدل‌های گردش عمومی جو HadCM3^۵ استفاده شده است. این مدل از مدل‌های گردش عمومی جفت‌شده جوی-اقیانوسی (AOGCM)^۶ است و در مرکز هادلی سازمان هواشناسی انگلیس طراحی و توسعه یافته است. از طرفی به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم ابتدا ریزمقیاس‌نمایی با به کار بردن مدل لارس (LARS-WG) انجام خواهد گرفت. در این بخش، برای بررسی میزان تأثیر تغییر اقلیم در کاهش حجم آبخوان و افت سفره سناریوهای مورد نظر تدوین می‌گردد تا نقش تغییر اقلیم به‌وضوح

سطح آب، از آمار سطح ایستابی ۳۰ حلقه چاه پیزومتری موجود در محدوده مورد مطالعه استفاده کرده‌اند. مدل ریاضی تهیه‌شده در گام‌های زمانی یک‌ماهه (مهر ۱۳۸۸) برای دوره پایدار و ۱۲ ماهه (مهر ۱۳۸۸ تا شهریور ۱۳۸۹) برای دوره ناپایدار، مورد واسنجی قرار گرفت. آنالیز حساسیت مدل نشان داد که مدل به تغییرات هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، حساسیت بسیاری دارد. سپس صحت‌سنجی مدل با استفاده از پارامترهای واسنجی و داده‌های سال آبی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۰ انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل، تراز سطح آب را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرده است؛ بنابراین توانایی مدل کردن جریان آب زیرزمینی در آبخوان مذکور را نیز دارد. میزان همبستگی پارامترها و خطای محاسبات با استفاده از معیار RMS در حالت پایدار و ناپایدار به ترتیب ۰.۲۶۴ و ۰.۶۱۳، محاسبه شد.

شresta^۱ و همکاران (۲۰۱۶) اثرات تغییر اقلیم روی منابع آب زیرزمینی در دلتای مکنونگ با استفاده از مدل مادفلو^۲ (MODFLOW) تحت سناریوهای RCP بررسی کردند. نتایج پیش‌بینی نشان داد که دما در دوره آتی افزایش و بارش در فصل مرطوب افزایش و در فصل خشک کاهش می‌یابد. همچنین سطح و ذخیره آب زیرزمینی در دوره آتی کاهش خواهد یافت. مانی و همکاران (۲۰۱۶) مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی را تحت سناریوهای اقلیمی دوره آتی در لوئیزیانا^۳ شمالی بررسی کردند. نتایج پیش‌بینی رواناب تحت سناریوهای اقلیمی نشان داد که رواناب سطحی به‌طور احتمالی در فصل زمستان کاهش و در دیگر فصل‌ها افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از مدل مدیریت تلفیقی با MILFP نشان داد که ذخیره و کاهش میزان پمپاژ آب زیرزمینی در دوره آتی می‌تواند به تعادل برسد. یوشیکا^۴ و همکاران (۲۰۱۶) اثرات تغییر اقلیم روی منابع آب زیرزمینی را با استفاده از مدل غیر اشباع HYDRUS-1D (برای برآورد تغذیه آب زیرزمینی) و مدل جریان آب زیرزمینی سه‌بعدی

1. Shrestha
2. Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model
3. Louisiana
4. Yoshioka

5. Hadley Coupled Model
6. Atmosphere Ocean Global Circulation Models

استان کرمان محسوب می‌شود (شکل ۱). وسعت دشت کرمان ۵۴۲۰ کیلومتر مربع است که ۳۲۰۰ کیلومتر مربع آن را سطوح آبرفتی و ۲۲۲۰ کیلومتر مربع دیگر را نواحی کوهستانی و کوهپایه‌ای تشکیل می‌دهد. اختلاف ارتفاع معادل ۲۵۳۲ متر است که ماکزیمم ارتفاع مربوط به کوه بلوار با ارتفاع ۴۲۳۲ متر و مینیمم آن در حدود ۱۷۰۰ متر است که مربوط به محل خروج حوضه می‌باشد. در این منطقه، اطلاعات ایستگاه کرمان برای استفاده از مدل LARS و ۱۴ پیزومتر جهت استفاده در مدل GMS استفاده شده است.

اطلاعات پایه

داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز برای انجام این پژوهش عبارت است از: آمار و اطلاعات پارامترهای اقلیمی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش به صورت روزانه از ایستگاه سینوپتیک کرمان، آمار و اطلاعات ۱۴ پیزومتر، آمار ۲۰ حلقه چاه‌های بهره‌برداری.

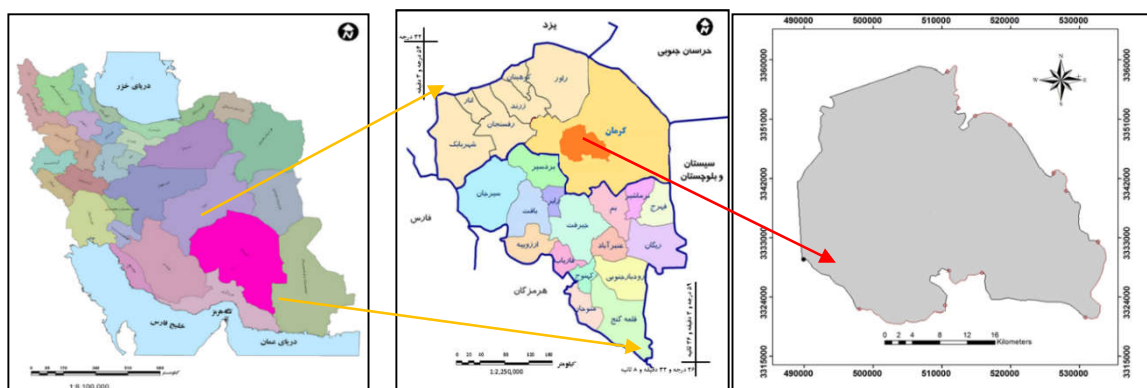
نقشه‌های مورد نیاز

نقشه‌های مورد نظر شامل نقشه^۴ (DEM)، نقشه^۱ زمین‌شناسی و همچنین نقشه سنگ کف آبخوان است (مطالعات بهنگام‌سازی بیابان آب محدوده مطالعاتی کرمان، ۲۰۱۰).

مشخص شود. با توجه به مطالب یادشده در این پژوهش، در ابتدا به پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی با مدل لارس و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با مدل آب زیرزمینی^۱ (GMS) پرداخته می‌شود. نرم‌افزار GMS توسط آزمایشگاه تحقیقات مدل‌سازی محیط‌زیست از دانشگاه بریگهام یانگ^۲ تولید شده است. MODFLOW یک مدل سه‌بعدی جریان اشباع، تفاضل محدود است که توسط سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۳ (مک دونالد و هارباگ، ۱۹۹۸) تهیه شده است و در تجزیه تحلیل‌های حالت پایدار و ناپایدار جریان به کار برده می‌شود. به‌عنوان یک پیش‌پردازشگر و پس‌پردازشگر بسیار قدرتمند برای کد مادفلو ۲۰۰۰ به حساب می‌آید. داده‌های ورودی برای مادفلو توسط GMS تهیه و در فایل‌هایی ذخیره می‌شوند که این فایل‌ها توسط مادفلو (MODFLOW) به‌هنگام راه‌اندازی GMS فراخوانی می‌شوند. در انتها سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی در دشت کرمان تدوین می‌گردد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد بررسی، محدوده مطالعاتی دشت کرمان بخشی از حوزه آبریز کویر در انجیر می‌باشد که خود بخشی از حوزه آبریز مرکزی ایران است. این محدوده تقریباً در جنوب غرب دشت لوت واقع است و از نظر تقسیمات کشوری مرکز



شکل (۱): موقعیت دشت کرمان

Figure (1): The location of the Kerman plain

4. Digital elevation model

1. Groundwater Modeling System
2. Brigham Young
3. United States Geological Survey

مواد و روش‌ها

مدل‌سازی تغییر اقلیم

در این مطالعه، برای مطالعه تغییر اقلیم از یک مدل گردش عمومی جو مرسوم به HadCM3 استفاده شد. همچنین برای ریزمقیاس‌نمایی نیز از مدل LARS-WG استفاده شد. ورودی‌های مدل LARS-WG پارامترهای اقلیمی دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و تابش خورشیدی است که همگی در بازه زمانی روزانه می‌باشد. در این مدل، تابش به‌طور مستقل از درجه‌حرارت مدل شده است و به‌جای آن می‌توان از ساعت آفتابی نیز استفاده کرد. مقدار بارش یک روز تر از توزیع نیمه‌تجربی بارش ماه مورد نظر و مستقل از سری‌های تر با مقدار بارش در روز قبل به دست می‌آید. در این مدل سری‌های فوریه درجه‌حرارت را تخمین می‌زنند. درجه‌حرارت‌های کمینه و بیشینه روزانه به‌صورت فرایندهایی تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر هستند، مدل‌سازی می‌شوند. سری فوریه مرتبه سوم برای شبیه‌سازی میانگین و انحراف معیار درجه‌حرارت فصلی به کار می‌رود. مقادیر مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار مشاهده‌شده به دست می‌آیند، در تحلیل خودهمبستگی زمانی داده‌های مینیمم و ماکزیمم مورد استفاده قرار می‌گیرند (بابائیان و نجفی، ۲۰۰۷). خروجی‌های این مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و تابش هستند. تولید داده‌های مدل LARS-WG در سه مرحله انجام می‌شود که عبارت‌اند از: کالیبره کردن، ارزیابی و ایجاد داده‌های مصنوعی هواشناسی (بابائیان و همکاران، ۲۰۰۹).

کالیبره کردن مدل

این مرحله دربرگیرنده تمام پارامترهای لازم برای تولید داده‌های مصنوعی است. LARS-WG خودهمبستگی (در آمار، خودهمبستگی یک فرایند تصادفی همبستگی بین مقادیرهای فرایند در نقاط مختلف زمان را به‌عنوان تابع دو زمانه یا تفاضل زمانی توصیف می‌کند) میانگین بین داده‌های دیده‌بانی‌شده را برای مدل کردن دمای بیشینه و تابش

به کار می‌برد (سمنو و استراتونوویچ^۱، ۲۰۱۰).

ارزیابی مدل

گام دوم در اجرای LARS-WG ارزیابی مدل است. در این مرحله باید تعیین شود که آیا این مدل برای تولید داده‌های تصادفی در مکان مورد مطالعه مناسب است یا خیر. به‌منظور ارزیابی مدل و سناریوها از معیارهای خطا همچون ضریب همبستگی، ضریب نش ساتکلیف و جذر میانگین مربعات خطاها استفاده می‌شود.

ایجاد داده‌های مصنوعی

بعد از کالیبره کردن و ارزیابی مدل، باید پارامترهای هواشناسی تولید شوند. برای تولید داده‌های آب‌وهوای مصنوعی نیاز به یک سناریوی تغییر اقلیم است (ریچاردسون و رایت^۲، ۱۹۸۴). همان‌طور که اشاره شد، در این تحقیق از سه سناریو که اغلب مورد توجه محققان است، استفاده شده است (A2, B1, A1B). باید توجه داشت در تولید داده‌های مصنوعی، مدل LARS-WG 5.5 (آخرین نسخه مدل لارس) داده‌های اقلیمی را در ۳ دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰، ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ و ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۹ میلادی ریزمقیاس می‌کند.

- مدل‌سازی آب زیرزمینی

مدل‌سازی سیستم آب‌های زیرزمینی در این تحقیق GMS است. همان‌طور که اشاره شد، این مدل یک برنامه کامل برای ساخت و شبیه‌سازی مدل‌های زیرزمینی است. این مدل جریان را به‌صورت سه‌بعدی و به روش تفاضل محدود برای حالت پایدار و ناپایدار شبیه‌سازی می‌کند.

برای ایجاد مدل جریان در نرم‌افزار GMS از روش مدل مفهومی^۳ استفاده شده است. در این روش، ابزار سیستم اطلاعات جغرافیایی^۴ (GIS) و مدول Map به کار برده می‌شوند. موقعیت منابع تغذیه و تخلیه^۵ مانند موقعیت چاه‌ها و تغذیه سطحی، پارامترهای لایه از قبیل هدایت هیدرولیکی، مرزهای مدل و اطلاعات دیگر مورد نیاز برای مدل‌سازی در

1. Semenov & Stratonovitch
2. Richardson & Wright
3. Conceptual Model Approach
4. Geographic Information System
5. Sources/Sinks

سلول‌های مرزی تخصیص داده می‌شود. از جمله راه‌های تعیین نوع مرز استفاده از نقشه‌های هم‌تراز آب زیرزمینی و نقشه خطوط جریان است. مرزهایی که خطوط جریان به صورت عمود بر آن‌ها قرار دارد (و یا نزدیک به عمود) را بسته به جهت جریان می‌توان به عنوان مرز ورودی و یا خروجی در نظر گرفت. هرکجا خطوط جریان با مرز موازی باشد، می‌توان مرز نفوذناپذیر دانست. پس از مشخص کردن پارامترهای زمانی و پارامترهای هیدرولوژیک و هیدروژئولوژیک برای هر سلول مدل، توصیف دقیق شرایط مرزی با استفاده از مناسب‌ترین بسته‌های مادفلو (MODFLOW) صورت می‌گیرد. به منظور شناسایی مناطق تغذیه و تخلیه زیرزمینی و محاسبه میزان تغذیه و تخلیه از نقشه خطوط هم‌تراز سطح آب زیرزمینی دشت و همچنین مدل مفهومی استفاده شد. این نقاط پس از مشخص شدن به مدل وارد شد. همچنین در بعضی مناطق مرزی تغذیه و تخلیه زیرزمینی مشاهده می‌شود.

پس از تعیین تمام داده‌های مورد نیاز کد ۲۰۰۰ مدل مادفلو، مدل آماده اجراست. در ابتدا با استفاده از چک‌کننده مدل (Model Checker) خطاهای احتمالی بررسی و تصحیح می‌شود. در مرحله بعد، یکی از روش‌های محاسباتی مادفلو (مانند LMG, SIP1, PCG2, SOR1, GMG) انتخاب و مدل اجرا می‌شود؛ در این مطالعه از روش تکرار PCG2 استفاده شد. معمولاً در اولین اجرا، برازش مناسبی بین بار هیدرولیکی محاسبه شده و اندازه‌گیری شده به دست نخواهد آمد. بنابراین برای رسیدن به یک برازش قابل قبول، باید خطاهای احتمالی موجود در فرایند مدل‌سازی شناسایی و تا حد ممکن رفع کرد و مدل واسنجی شود. در این مطالعه با استفاده از بسته PEST از نرم‌افزار مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی (GMS) حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف سنجیده شد. برای ارزیابی نتایج واسنجی از امکانات نرم‌افزار GMS استفاده شده است. هدف واسنجی در این نرم‌افزار ابزاری برای نمایش بصری میزان خطا (تفاوت بین بار هیدرولیکی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای)، پس از هر اجرای مدل در مجاورت هر پیزومتر است. سه روش معمول برای

سطح مدل مفهومی به نرم‌افزار داده می‌شود و سپس شبکه ایجاد و مدل مفهومی به مدل شبکه‌ای^۱ تبدیل می‌گردد. محدوده دشت به مدل وارد می‌شود، سپس هریک از ویژگی‌های آبخوان، منابع تغذیه و تخلیه و چاه‌های مشاهده‌ای در یک پوشش جداگانه تعریف می‌شوند. در مدل مفهومی محدوده مورد مطالعه، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای به مدل داده شد. پس از اینکه مدل مفهومی تهیه شد، شبکه و ابعاد آن طراحی می‌شود. کد مادفلو برای حل مسائل، از شبکه سلول مرکزی تفاضل محدود^۲ استفاده می‌کند. انتخاب اندازه شبکه، تابعی از اندازه کل محدوده مدل، گستردگی داده‌ها (داده‌های پیزومتری، داده‌های حفاری، نتایج آزمون پمپاژ و...)، گرادیان آب زیرزمینی، ایجاد قابلیت تعریف خصوصیات فیزیکی و هیدرودینامیکی بر روی شبکه منفصل در انطباق با خصوصیات آبخوان و همچنین امکان تعریف منابع تغذیه - تخلیه به شکلی مناسب روی شبکه است (افتخاری، ۲۰۱۰). با توجه به وسیع بودن دشت مورد نظر، کم بودن داده‌ها و استفاده از تجارب محققان گذشته شبکه‌ای با سلول‌هایی به ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ مترمربع برای محدوده مورد نظر در یک لایه تهیه شده است. اطلاعات رقومی توپوگرافی سطح زمین از داده‌های DEM^۳ و با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی^۴ (GIS) استخراج و به مدل وارد شده است. سپس با استفاده از درون‌یابی، همه نقاط به‌طور مستقیم به شبکه مدل نسبت داده شد. نقشه مدل رقومی سنگ کف آبخوان نیز به کمک داده‌های ژئوفیزیک و نقشه تغییرات ضخامت آبخوان ساخته شد. شناخت ناحیه مدل و مرزهای آن، یکی از اعمال مهم در مدل‌سازی آب زیرزمینی است. در تعریف ناحیه مدل، کاربر مدل می‌بایست ناحیه مورد مطالعه را از سیستم‌های آب زیرزمینی مجاور آن متمایز سازد. در نتیجه مرز مدل، فصل مشترک بین ناحیه مدل و محیط اطراف آن است. برای مشخص کردن شرایط مرزی^۵، بار هیدرولیکی، نرخ جریان و یا ترکیبی از آن‌ها به

1. Grid Model
2. Block-Centered Finite Difference Grid
3. Digital Elevation Model
4. Geographic Information System
5. Boundary Condition

صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد و نتایج به‌دست‌آمده از مدل با مقادیر مشاهده‌شده، مقایسه و نحوه عملکرد مدل ارزیابی شد. به‌منظور ارزیابی مدل و سناریو از معیارهای ضریب همبستگی (R^2)، ضریب نش ساتکلیف (NSE) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) استفاده شده که در رابطه (۱) تا (۳) معادلات مربوط به محاسبه آنهاست. معادلات سپس خروجی‌های مدل شامل دمای حداقل و حداکثر و بارش آن با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه مورد مطالعه مقایسه شد. جدول (۱) آماره‌های خطا حاصل از پارامترهای اقلیمی مشاهداتی و مدل‌سازی‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به بالا بودن ضریب کارایی ناش (NSE) و ضریب همبستگی (R^2) برای هر سه پارامتر اقلیمی در ایستگاه مورد مطالعه، مدل، دقت مدل‌سازی بالایی دارد. پس از اطمینان از قابلیت مدل لارس (LARS-WG) در تولید داده‌های اقلیمی، این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی برون داده‌های مدل گردش عمومی جو (HadCm3) و تولید داده‌های مصنوعی برای پیش‌بینی اقلیم در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ استفاده شد.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$R^2 = \left[\frac{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sigma_s \times \sigma_o} \right]^2 \quad (3)$$

که در آن، O_i داده‌های مشاهداتی، S_i داده‌های برآوردشده، \bar{O} و \bar{S} میانگین داده‌های مشاهده‌ای شده و برآوردشده، σ واریانس است.

در شکل (۲)، مقایسه مقادیر متوسط درازمدت بارش ماهانه برای دوره پایه (۱۹۶۱ تا ۲۰۱۶) و آتی (۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰) طی سناریوهای A1B، A2 و B1 در ایستگاه کرمان مشاهده می‌شود. در ماه‌های اکتبر و می، مقادیر بارش دوره پایه کمتر از سایر دوره‌های مورد بررسی بوده و این امر نشان‌دهنده آن است که بارش در این ماه‌ها بیشتر شده و در سایر ماه‌ها کاهش خواهد یافت. همچنین در این شکل، مقادیر متوسط دمای حداقل ماهیانه برای دوره پایه و آتی در ایستگاه کرمان مورد مقایسه قرار گرفت.

نشان دادن معیار واسنجی عبارت‌اند از: ۱. خطای میانگین (ME)، عبارت است از اختلاف میانگین بین بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده (h_m) با بار هیدرولیکی شبه‌سازی شده (h_s)؛ ۲. خطای میانگین مطلق (MAE) که عبارت است از مقدار میانگین اختلاف بار هیدرولیکی شبه‌سازی شده با بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده؛ ۳. جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) که برابر است با جذر میانگین مربع اختلاف‌های بین بار هیدرولیکی شبه‌سازی شده با بار هیدرولیکی اندازه‌گیری شده.

مدل‌سازی اثرات ناشی از تغییر اقلیم بر افت آب زیرزمینی دشت کرمان

در این بخش، برای مدل‌سازی اثرات ناشی از تغییر اقلیم بر افت سطح ایستابی آب زیرزمینی، از سناریوهای مختلف با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته و مشاوره با سازمان آب منطقه‌ای استان کرمان در این زمینه استفاده می‌شود. بدین منظور برای بررسی اثرات ناشی از تغییر اقلیم تحت سناریوهای اقلیمی A1B، A2 و B1 و شرایط ذیل بر افت آب زیرزمینی استفاده شده است:

سناریوی یک: ادامه بهره‌برداری با وضع موجود، سناریو دو: افزایش نرخ بهره‌برداری از چاه‌ها به میزان ۱۰٪، سناریو سه: افزایش نرخ بهره‌برداری از چاه‌ها به میزان ۱۲/۵٪، سناریو چهارم: افزایش نرخ بهره‌برداری از چاه‌ها به میزان ۱۵٪.

در نهایت با توجه به اعمال سناریوهای مختلف مدیریتی، برای مقایسه عملکرد هر یک از گزینه‌های مدیریتی و اثرات ناشی از سناریوهای مختلف اقلیمی، افت آبخوان بررسی شد.

نتایج

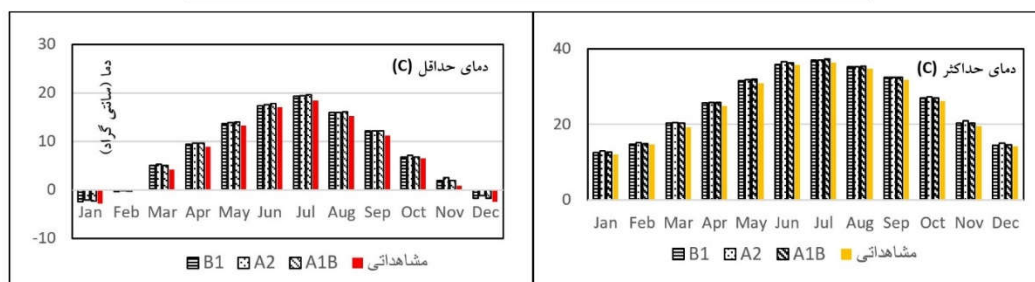
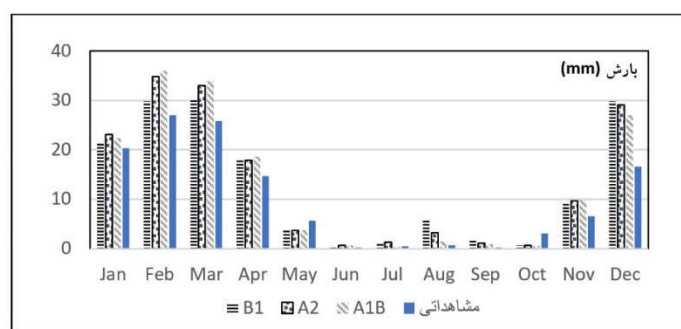
نتایج ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی

با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدل‌های اقلیمی صرفاً در مناطق آزمون از اعتبار لازم برخوردار است، مرحله اعتبارسنجی مدل متناسب با داده‌های منطقه مطالعاتی صورت گرفت. در این تحقیق، دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۰ برای واسنجی استفاده شد و سپس ادامه کل دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) برای

جدول (۱): معیارهای خطا حاصل از پارامترهای اقلیمی مشاهداتی و مدل‌سازی شده توسط مدل LARS-WG
 Table (1): Values of error derived from observation climatic parameters and modeled by LARS WG

ایستگاه	دوره	میانگین بارش ماهانه			میانگین دمای حداقل ماهانه			میانگین دمای حداکثر ماهانه		
		R ²	RMSE	NSE	R ²	RMSE	NSE	R ²	RMSE	NSE
کرمان	واسنجی	۰/۸۱	۲/۲۷	۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۲۴	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۲۵	۰/۸۹
	صحت‌سنجی	۰/۸۲	۶/۸۸	۰/۸۰	۰/۹۹	۰/۴۰	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۶۱	۰/۹۰

در اکثر ماه‌های سال، مقادیر دمای حداقل ماهانه دوره پایه از سایر دوره‌ها کمتر یا برابر آن است؛ این امر نشان‌دهنده افزایش مقدار دمای حداقل سالیانه در دوره‌های آتی می‌باشد. مقادیر متوسط دمای حداکثر ماهیانه برای دوره پایه و آتی (طی سناریوهای A1B، A2 و B1) در ایستگاه کرمان نیز در شکل (۲) مورد مقایسه قرار گرفت. در اکثر ماه‌های سال، مقادیر دمای حداکثر ماهانه برای دوره پایه از سایر دوره‌ها کمتر یا برابر آن است؛ این امر نشان‌دهنده آن است که مقدار دمای حداکثر در دوره‌های آتی افزایش خواهد یافت.



شکل (۲): متوسط بارش درازمدت ماهانه، متوسط دمای حداقل و حداکثر دما برای دوره پایه و دوره آتی (طی سناریو A1B، A2 و B1)
 Figure (2): Average monthly precipitation, minimum temperature and maximum temperature for the base and the future periods (during the scenario of A1B, A2 and B1)

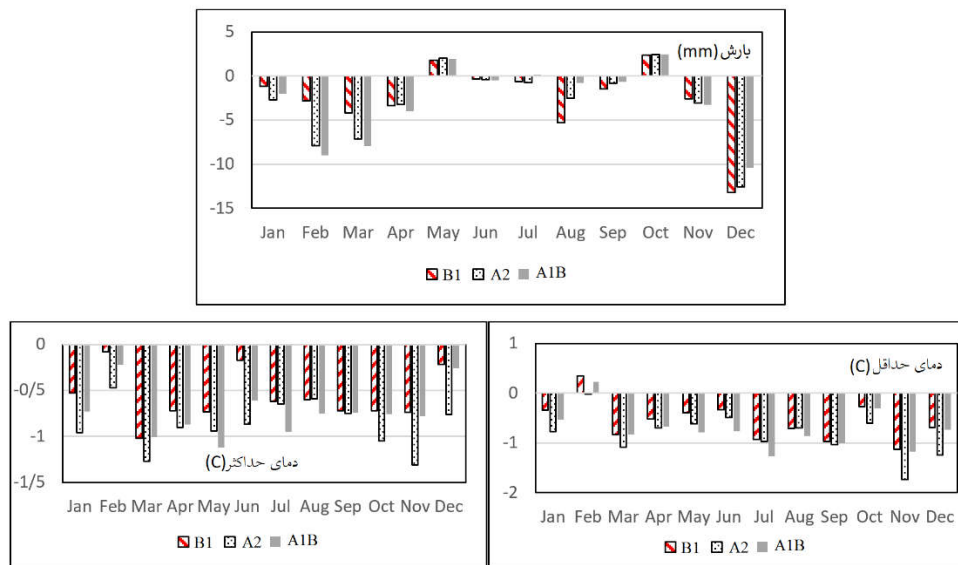
کمترین مقدار بارش طی سناریو B1 در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ اتفاق خواهد افتاد که معادل ۱۰/۰۲ میلی‌متر بیشتر از بارش دوره پایه خواهد بود. این در حالی است که بیشترین مقدار بارش با افزایش ۱۵/۸۰ میلی‌متری در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ طی سناریو A2 اتفاق خواهد افتاد. در شکل (۳) نیز نتایج حاصل از تغییرات دمای حداقل و حداکثر را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. نتایج حاکی از افزایش دمای حداقل در تمامی ماه‌ها به جز می و اکتبر و دمای حداکثر در تمامی ماه‌ها در هر سه سناریو می‌باشد.

متوسط درازمدت متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش سالیانه برای دوره پایه و دوره آتی طی سناریوهای A1B، A2 و B1 برای ایستگاه کرمان در جدول (۲) ارائه شده است. با مقایسه مقادیر متوسط دمای حداقل و حداکثر مشخص است که دمای حداقل در دوره آتی بیشتر از دوره پایه خواهد بود (افزایش دما بین ۰/۵۹ تا ۰/۸۶ درجه سانتی‌گراد). همچنین در دوره مورد بررسی و طی سناریو A1B، A2 و B1 دمای حداکثر بیشتر از دوره پایه است (افزایش دما بین ۰/۵۶ تا ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد است) (جدول ۲). مقایسه بارش سالیانه درازمدت نشان می‌دهد که

جدول (۲): متوسط درازمدت متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش سالیانه برای دوره پایه و دوره‌های آتی

Table (2): The long - term average of the minimum temperature variables, the maximum temperature and annual precipitation for the base and future periods

دوره	سناریو	متوسط درازمدت دمای حداقل	متوسط درازمدت دمای حداکثر	متوسط درازمدت بارش
پایه	-	۷/۴۶	۲۵/۰۳	۱۴۲/۱
۲۰۱۱-۲۰۳۰	A1B	۸/۲۲	۲۵/۷۴	۱۵۵/۳۷
	A2	۸/۳۲	۲۵/۸۸	۱۵۷/۹۰
	B1	۸/۰۵	۲۵/۵۹	۱۵۲/۱۲



شکل (۳): تغییرات بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در دوره آتی نسبت به دوره پایه

Figure (3): Changes in precipitation, minimum temperature and maximum temperature in the future than the base period

و تبخیر از آبخوان به دلیل پایین بودن سطح آب صفر در نظر گرفته شده است.

برای تخمین مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی، مقادیر قابلیت انتقال بر مقدار تراز آب تقسیم می‌شود. سپس مقادیر هدایت هیدرولیکی وارد مدل می‌گردد. سپس در مرحله واسنجی، مقادیر هدایت هیدرولیکی به گونه‌ای اصلاح می‌شود تا بهترین تطابق بین مقادیر بار هیدرولیکی محاسبه شده توسط مدل و مشاهده شده در چاه‌های مشاهده‌ای انجام گیرد. بدین منظور، واسنجی مدل به وسیله واسنجی خودکار (PEST) و واسنجی دستی (سعی و خطا) در سال آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲ انجام شد و مقادیر هدایت هیدرولیکی بهینه گردید (شکل ۴). مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی مدل در حالت ماندگار با تغییر در مقادیر ضرایب هدایت هیدرولیکی و تغذیه، بر

نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی GMS

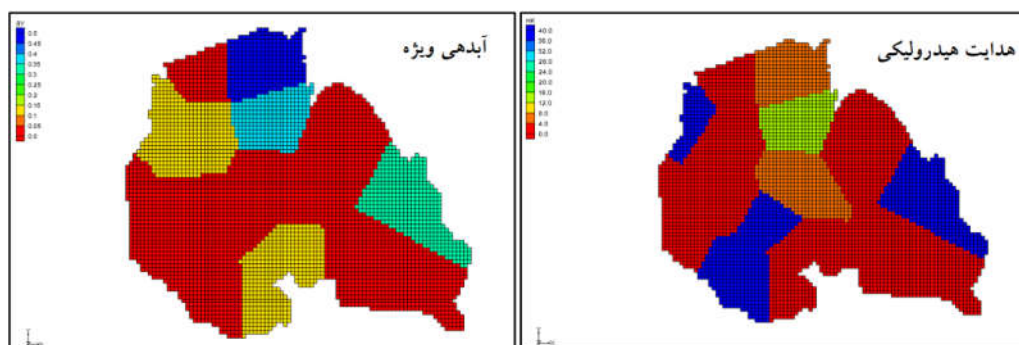
پس از ساخته شدن مدل مفهومی و آماده شدن آن برای اجرا، ابتدا مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی وارد مدل شد. سپس مشخصات سال آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲ برای اجرای مدل در حالت ماندگار تهیه شد. بدین منظور نقشه متوسط تراز سطح آب در سال آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲ با استفاده از آمار روزانه ۱۴ چاه مشاهداتی در محدوده مورد نظر تهیه شده و از آن برای وارد کردن شرایط اولیه و مقادیر حد مرزهای ورودی و خروجی آب زیرزمینی مدل استفاده گردید. همچنین مقادیر تغذیه به آبخوان، شامل (بارندگی، شرب و صنعت) و مقادیر تخلیه از آبخوان شامل چاه‌های بهره‌برداری (۲۰ چاه بهره‌برداری) در سال مذکور برای اجرا در حالت ماندگار وارد مدل شد. در تحقیق حاضر، میزان تغذیه بابت شرب و صنعت ۰/۰۰۰۶۱ و بارندگی ۰/۰۰۰۰۱۶۷ (M/Day) می‌باشد

1. Automatic Calibration
2. Trial and Error Calibration

و متناسب با تغییرات آب در آن پیژومتر، مقادیر مرزها بر این اساس وارد مدل شده است. همچنین برای وارد کردن مقادیر اولیه به مدل از نقشه متوسط تراز در اولین ماه سال آبی یعنی مهر ۱۳۸۱ استفاده شد.

برای نشان دادن تطابق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی پس از واسنجی (۱۳۸۱ تا ۱۳۹۱) و صحت‌سنجی (۱۳۹۱ تا ۱۳۹۲)، از معیارهای آماری نیز برای محاسبه خطای شبیه‌سازی مطابق با جدول (۳) استفاده شده است. مقادیر خطا در نرم‌افزار (GMS) محاسبه شده است. به‌منظور صحت‌سنجی مدل آبخوان دشت کرمان، مقادیر مرزی، مقادیر تخلیه چاه‌ها و تغذیه از سطح آبخوان برای سال آبی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۲ که در واسنجی مدل از آن استفاده نشده است، به مدل وارد شده و سطح آب مربوط به این دوره شبیه‌سازی می‌شود و سپس مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی مقایسه می‌شود. با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت مدل واسنجی شده از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و مدل ریاضی می‌تواند به‌خوبی شرایط طبیعی حاکم بر آبخوان دشت کرمان را شبیه‌سازی کند. بنابراین می‌توان از این مدل برای شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر نوسانات سطح آب زیرزمینی در دوره‌های آبی استفاده کرد.

اساس معیارهای عملکرد مدل شامل خطای میانگین، خطای میانگین مطلق و جذر میانگین مربعات خطا بین رقوم مشاهده‌ای و محاسبه شده از طریق واسنجی انجام گرفت. در مرحله بعد با تغییر در هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره، واسنجی در حالت غیرماندگار (شکل ۴) صورت گرفته است. معیارهای عملکرد مدل حاکی از صحت پارامترهای هیدرودینامیکی به دست آمده طی واسنجی می‌باشد. مقادیر خطای میانگین، خطای میانگین مطلق و جذر میانگین مربعات خطا بعد از واسنجی در حالت ماندگار به ترتیب برابر ۰/۲۰- متر، ۰/۲۱ متر و ۰/۳۸ متر است که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل‌سازی در حالت ماندگار است. برای شبیه‌سازی تراز سطح آب در شرایط غیرماندگار در مرحله اول، مدل غیرماندگار برای سال‌های آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲ ساخته شده و مورد واسنجی قرار گرفت. سپس مدل برای سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۱ ساخته و مورد واسنجی قرار گرفت. خروجی مدل در حالت ماندگار مبنای حالت غیرماندگار قرار می‌گیرد. در حالت غیرماندگار توزیع ماهانه مقادیر تخلیه و چاه‌های مشاهده‌ای و شرایط مرزی آبخوان در مدل وارد می‌شود. برای تعیین مقادیر مرزی برای سال‌های آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۱، با توجه به مقدار نزدیک‌ترین پیژومتر نسبت به آن



شکل (۴): مقادیر واسنجی هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) و آبدهی ویژه

Figure (4): values of hydraulic conductivity (m / day) and storage coefficient

جدول (۳): مقادیر خطا در دوره‌های مختلف در دوره واسنجی

Table (3): Error values in different periods during the validation period

دوره	سال آبی	ME	MAE	RMSE
واسنجی	۸۱-۸۲	-۰/۲۲	۱/۰۳	۱/۲۹
واسنجی	۸۱-۹۱	-۰/۴۰	۱/۵۰	۲/۷۰
صحت‌سنجی	۹۱-۹۲	۰/۹۷	۳/۶	۴/۳

شکل افت سطح آب طی سناریوهای A2، A1B و B1 به ترتیب ۱۱/۹، ۱۲/۳۲ و ۱۶/۵۲- خواهد بود.

سناریوی سوم: افزایش نرخ بهره‌برداری از چاه‌ها به میزان ۱۲/۵٪

در این سناریو فرض شده است که روند بهره‌برداری از چاه‌ها در دوره آتی نسبت به سال پایه، ۱۲/۵٪ افزایش یابد. سایر شرایط از قبیل بار در مرزها مانند سناریو قبل در نظر گرفته شده است. شکل (۷) تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در دوره آتی را نسبت به سال آبی پایه (۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲) نشان می‌دهد. مطابق این سناریو افت سطح آب طی سناریوهای A2، A1B و B1 به ترتیب ۱۶/۴۱، ۱۶/۶۶ و ۱۷/۳۰- خواهد بود.

سناریوی چهارم: افزایش نرخ بهره‌برداری از چاه‌ها به میزان ۱۵٪

در این سناریو فرض شده است که روند بهره‌برداری از چاه‌ها در دوره آتی نسبت به سال پایه، ۱۵٪ افزایش یابد. شکل (۸) تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در دوره آتی را نسبت به سال آبی پایه (۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲) نشان می‌دهد. مطابق این شکل افت سطح آب طی سناریوهای A2، A1B و B1 به ترتیب ۱۶/۶۵، ۱۶/۹۰ و ۱۸/۱۷- خواهد بود.

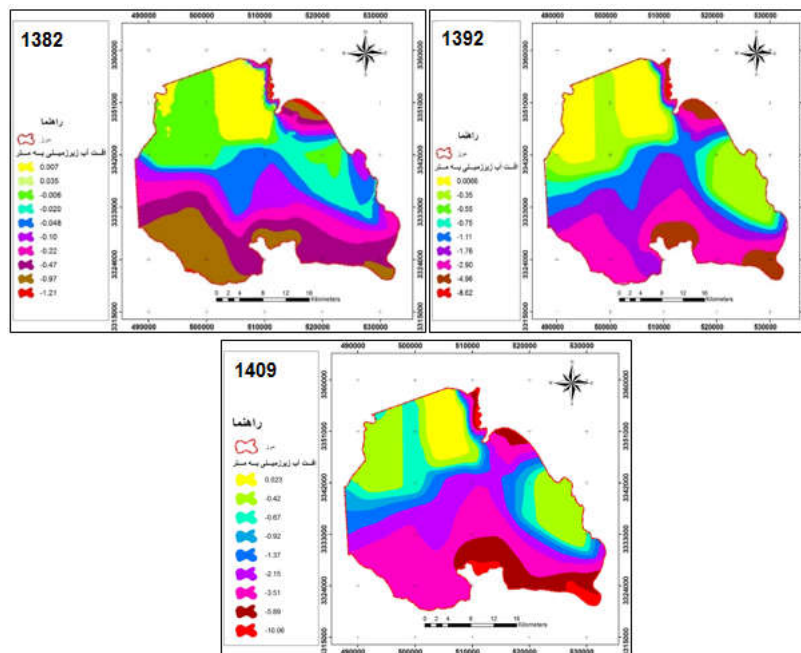
شبیه‌سازی وضعیت آبخوان در دوره آتی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم

سناریوی اول: ادامه بهره‌برداری با وضع موجود

به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم در دوره آتی بر سطح آبخوان دشت کرمان، مدل تهیه‌شده در دوره پایه تا سال آبی ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۲ بهنگام شد. سپس با توجه به مقادیر بارش به‌دست‌آمده در هر دوره و در نظر گرفتن درصد افزایش بارندگی سالانه، اقدام به تهیه مدل در دوره آتی ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ گردید. در این مدل، مقادیر بهره‌برداری از چاه‌ها نسبت به حالت پایه، ثابت در نظر گرفته شد. تراز سطح آب در سال‌های آتی، نسبت به سال پایه (۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲) مطابق با شکل (۵) به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تحت این شرایط، افت سطح آب به ۱۰- متر طی سال ۱۴۰۹ خواهد رسید.

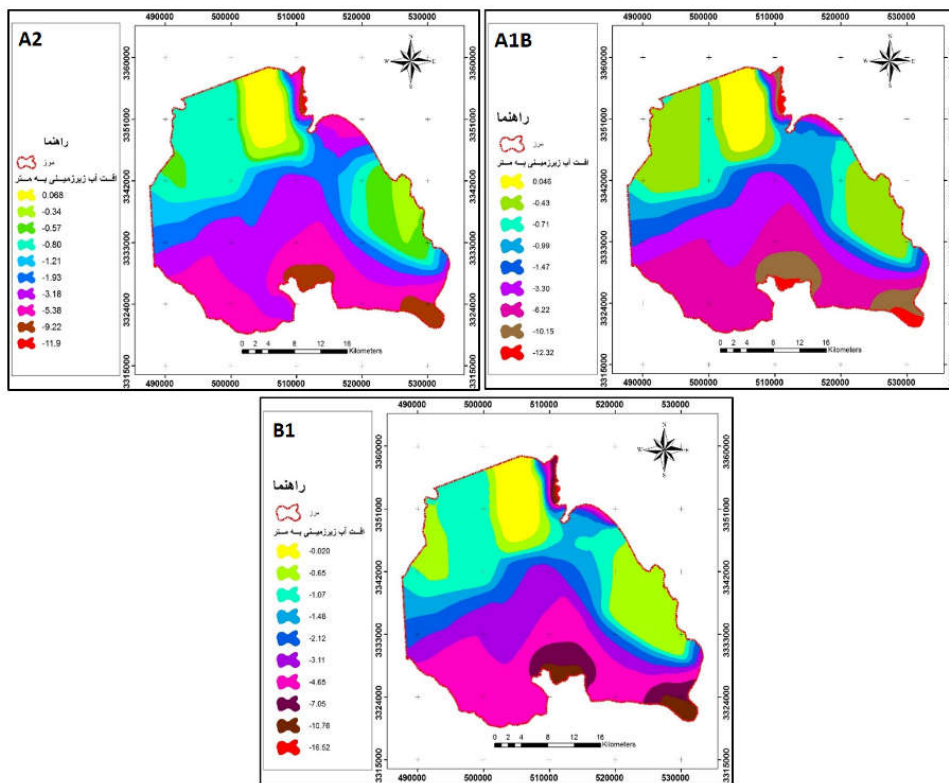
سناریوی دوم: افزایش نرخ بهره‌برداری از چاه‌ها به میزان ۱۰٪

در این سناریو فرض شده است که روند بهره‌برداری از چاه‌ها در دوره آتی نسبت به سال پایه، ۱۰٪ افزایش یابد. سایر شرایط از قبیل بار در مرزها مانند سناریو قبل در نظر گرفته شده است. شکل (۶) تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی در دوره آتی را نسبت به سال آبی پایه ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۲ نشان می‌دهد. مطابق این

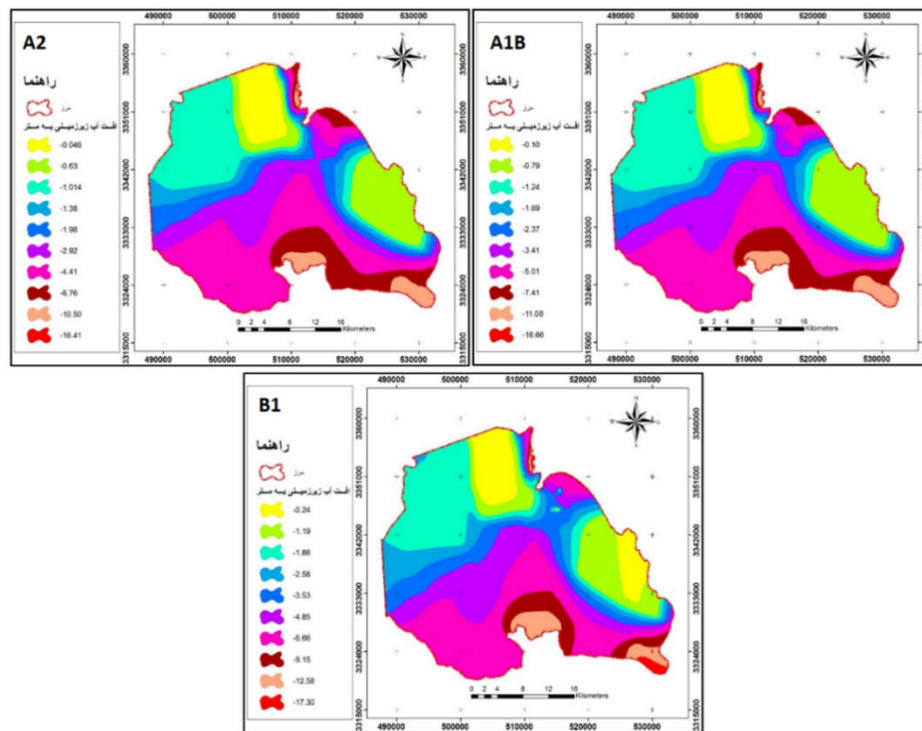


شکل (۵): تغییرات تراز سطح آب در سال‌های آتی (سناریوی اول)

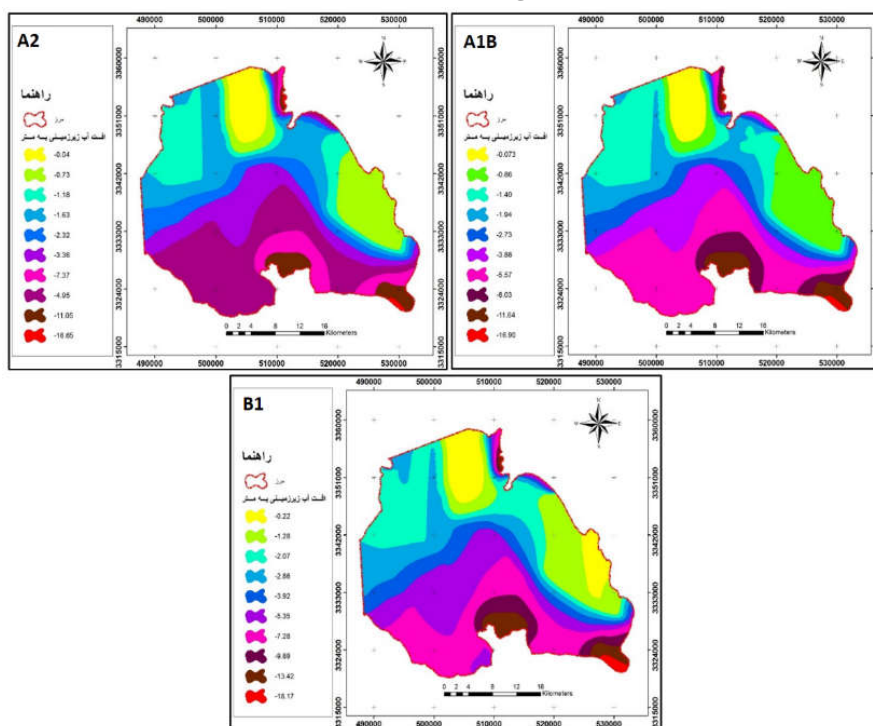
Figure (5): The variation of water surface in future years (first scenario)



شکل (۶): تغییرات تراز سطح آب در سال ۱۴۰۹ طبق شرایط سناریوی دوم
 Figure (6): The variation of water surface in 1409 according to second scenario



شکل (۷): تغییرات تراز سطح آب مطابق شرایط سناریوی سوم
 Figure (7): The variation of water surface in 1409 according to third scenario



شکل (۸): تغییرات تراز سطح مطابق شرایط سناریوی چهارم

Figure (8): The variation of water surface in 1409 according to the fourth scenario

تغییر بوده و روند افزایش دما و گرم شدن نسبی (به‌علت افزایش گازهای گلخانه‌ای) را سپری می‌کند.

ب. شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی (دما و بارش) مدل LARS-WG ابزاری است که قادر به تولید داده‌های روزانه اقلیمی تحت سناریوهای مختلف در دوره حاضر و آینده بوده است. در پژوهش حاضر، بعد از انجام واسنجی و ارزیابی مدل، پارامتر بارندگی و دما توسط مدل LARS-WG برای دوره آتی در دشت کرمان شبیه‌سازی شده و با داده‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. بالا بودن ضریب کارایی ناش (NSE) و ضریب تبیین (R^2) برای هر سه پارامتر اقلیمی در ایستگاه مورد مطالعه، نشان‌دهنده این است که مدل، دقت مدل‌سازی بالایی دارد.

مقایسه مقادیر متوسط دمای حداقل و حداکثر سالیانه نشان داد که دمای حداقل در تمامی سناریوها در دوره آتی بیشتر از دوره پایه خواهد بود (افزایش دما بین ۰/۵۹ تا ۰/۸۶ درجه سانتی‌گراد). همچنین در دوره مورد بررسی و طی سناریو A2، A1B و B1 دمای حداکثر بیشتر از دوره پایه است (افزایش دما بین ۰/۵۶ تا ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد است). نتایج مقایسه مقادیر متوسط دمای حداقل و حداکثر ماهیانه برای

نتیجه‌گیری و بحث

در این مطالعه سعی بر آن شد تا ارتباط بین اقلیم و تراز آب زیرزمینی برای دشت کرمان تا دوره ۲۰۳۰ پیش‌بینی شود. برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی دما، بارش، تبخیر و ساعات آفتابی از مدل گردش عمومی جو (HadCm3) و سناریوهای A2 و B1، A1B و همچنین برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از نرم‌افزار مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی (GMS) استفاده شد. نتایج در بخش‌های مختلف تحقیق به تفکیک در ذیل آمده است.

بخش اقلیم

الف. آزمون من-کندال

نتایج حاصل از آزمون من-کندال نشان‌دهنده این است که پارامتر دما دارای روند افزایشی و معنی‌دار است که با نتایج برومند و همکاران (۲۰۱۴) در اصفهان، و ضیایی و همکاران (۲۰۱۷) که در مطالعات خود روند افزایشی معنی‌دار بودن دما را تأیید کردند، مطابقت دارد. درباره پارامتر بارش نیز روند با نتایج ضیایی و همکاران (۲۰۱۷) و بابایی و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. نتایج حاصل از آزمون روند من کندال و به‌طور کلی، آنالیز روند تغییرات دما نشان داد که اقلیم منطقه در حال

با نتایج هاشمی نسب و همکاران (۲۰۱۳) که در استان کرمان تحقیقات خویش را انجام داده و افزایش بارش‌ها را پیش‌بینی کرده‌اند، مطابقت دارد.

تغییر در میانگین دما در دشت کرمان منجر به اثرگذاری بر روی جنبه‌های مختلفی از اکوسیستم و باعث آسیب به منابع پایه می‌شود؛ از جمله این منابع آسیب‌پذیر، خاک و آب زیرزمینی است.

بخش آب زیرزمینی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل GMS با توجه به مقادیر RMSE، MAE و ME که به ترتیب برابر ۰/۳۸ متر، ۰/۲۱ متر و ۰/۲۰- متر است، نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل‌سازی می‌باشد. این خطا در مرحله واسنجی ۱۰ ساله یعنی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۱ به ترتیب برابر با ۲/۷۰، ۱/۵ و ۰/۴۰- بود. با توجه به نتایج فوق، می‌توان گفت مدل واسنجی شده از دقت قابل قبولی برخوردار بوده است. بعد از اطمینان از عملکرد مناسب مدل GMS، برای شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر تراز سطح ایستابی، از چهار سناریو مختلف استفاده و تغییرات آن نسبت به دوره پایه بررسی شد. در بررسی تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر بیلان آبخوان دشت کرمان، نتایج نشان داد که میزان کسری مخزن همچنان منفی بوده است و با افزایش بهره‌برداری ۱۰ درصد کسری مخزن در سناریو B1 و A2 به ترتیب برابر با ۵۷/۸۳- و ۵۷/۰۶- میلیون مترمکعب در سال به دست می‌آید. همچنین با افزایش بارندگی نسبت کسری مخزن نسبت به حالت پایه بیشتر از ۱ است که با نتایج مسامریان و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. از طرفی، افت سطح آب مطابق سناریوی اول معادل ۱۰/۰۶- خواهد بود. مقادیر افت سطح آب طی سناریوهای تغییر اقلیم A2، A1B و B1 به ترتیب برای سناریوی دوم ۱۱/۹-، ۱۲/۳۲- و ۱۶/۵۲- متر، سناریوی سوم ۱۶/۴۱-، ۱۶/۶۶- و ۱۷/۳۰- متر و در نهایت برای سناریوی چهارم ۱۶/۶۵-، ۱۶/۹۰- و ۱۸/۱۷- متر خواهد بود. در پایان توصیه می‌شود که با توجه به مقادیر بالای افت سطح آب در آینده، با انجام شیوه‌های مدیریتی درست و افزایش راندمان سیستم‌های آبیاری برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در آینده کنترل شده و تا حد قابل قبولی کاهش یابد.

دوره پایه و آتی (طی سناریو A1B، A2 و B1) در ایستگاه کرمان نشان داد که در اکثر ماه‌های سال، مقادیر دمای حداقل ماهانه دوره پایه از سایر دوره‌ها کمتر یا برابر آن است؛ این امر نشان‌دهنده افزایش مقدار دمای حداقل سالیانه در دوره‌های آتی می‌باشد. همچنین در اکثر ماه‌های سال، مقادیر دمای حداکثر ماهانه برای دوره پایه از سایر دوره‌ها کمتر یا برابر آن است؛ این امر نشان‌دهنده آن است که مقدار دمای حداکثر در دوره‌های آتی افزایش خواهد یافت. افزایش دمای حداقل و حداکثر در دوره آتی با نتایج مطالعات ژانگ و نیرینگ^۱ (۲۰۰۵)، مساح بوانی و مرید^۲ (۲۰۰۶)، خورشید دوست و قویدل رحیمی (۲۰۰۶)، کوچکی و همکاران (۲۰۰۶)، یانو^۳ و همکاران (۲۰۰۷) و بابائیان و همکاران (۲۰۰۹) که در مطالعاتشان افزایش دما را پیش‌بینی کرده بودند، همخوانی دارد. بارش سالانه نیز در منطقه مورد مطالعه به ترتیب میزان ۱۵/۸، ۱۰/۲ و ۱۳/۲ درصد در سناریوهای A2 و B1 و A1B افزایش خواهد یافت. نتایج نشان داد که طی سناریوهای A2، B1 و A1B در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ بارش بیشتر از بارش دوره پایه خواهد بود و طی سناریوی A2 بیشترین میزان بارش و طی سناریوی B1 کمترین میزان بارش در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ رخ خواهد داد. در تحقیق حاضر، کمترین مقدار بارش طی سناریو B1 در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ اتفاق خواهد افتاد که معادل ۱۰/۲ میلی‌متر بیشتر از بارش دوره پایه خواهد بود. این در حالی است که بیشترین مقدار بارش با افزایش ۱۵/۸۰ میلی‌متری در دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ طی سناریو A2 اتفاق خواهد افتاد.

در ماه‌های اکتبر و می، مقادیر بارش دوره پایه کمتر از سایر دوره‌های مورد بررسی بوده و این امر نشان‌دهنده آن است که بارش در این ماه‌ها بیشتر شده و در سایر ماه‌ها کاهش خواهد یافت. نکته حائز اهمیت این است که در مواجهه با تغییر اقلیم به موازات افزایش دما، کاهش بارندگی‌ها قابل انتظار است. لیکن در تحقیق حاضر، مقایسه بارش سالیانه درازمدت نشان می‌دهد که بارش‌ها افزایش خواهند داشت. این پیش‌بینی

1. Zhang, Nearing
2. Masah Bavani, Morid
3. Yano

1. Abdar Esfahani, S., Kalantari, N. and Mohammadi Ahmad Abadi, R., 2014. Survey of Recent Drought on Groundwater Resources of Sharif Abad, Qom. Proceedings of the Conference on Water Challenges and Crises in the Salt Lake Basin. Chamber of Commerce of Industries and Mines of Qom Province.
2. Babaei, O., Ghasemi, E. and Fatahi, E., 2014. Investigating the Impact of Climate Change on the Trend of Iran Land Limit Rainfall Profiles. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 3: 85-103.
3. Babaian, A. and Najafi Nik, Z., 2007. Assessment of LARS-WG model for modeling of meteorological parameters in khorasan province in 1961-2003, *Nivar Magazine*, 63: 24-30.
4. Babaian, A., Najafi Nik, Z., Zabol Abbasi, F., Nowkhandan, M. and Malbosi, Sh., 2009. Assessment of climate changing in 2010-2039 using downscaling data GCM (ECHO-G), *Geograph and Dev. J.* 16: 34-41.
5. Bromand, S., Fatemi Nia, F. and Hoseini, M., 2014. Estimating the Future Climate Change in Isfahan Province Using BCM2 and HADCM3 Models in LARS-WG Refractive Environment, *Geographical studies of arid regions*, 16: 55-71.
6. Eftekhari, B., 2010. Simulation of groundwater resources of Qom plain using a finite difference mathematical model. Master's thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz.
7. Hasheni Nasab, F.A., Mosavi baygi, M., Bakhtiari, B. and Davari, K., 2013. Forecast for the next 20 years by using downscaling changes in rainfall and General Circulation Model (Case Study Mashhad and Kerman station). The first national conference on water and weather. Kerman
8. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment. IPCC. 2007.
9. IPCC. Summary for policymakers in climate change. The physical science basis contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change Cambridge university press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY, USA. 2013:1-33.
10. Khorshiddoust, A.M. and Ghavidel Rahimi, Y., 2006. Simulate the effects of a doubling of atmospheric carbon dioxide on climate change Tabriz, *Journal of Environmental Studies*, 39: 1-10.
11. Kochaki, A.M., Nassiri, G.A., Kamali, A. and Shahandeh, H., 2006. "Potential impacts of climate change on agrometeorological indicators in Iran". *Arid Land Research and Management*. 20: 245-259.
12. Mani, A., T.C.Tsai, F., Kao, S., Naz, B., Ashfaq, M. and Rastogi, D. 2016. Conjunctive management of surface and groundwater resources under projected future climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 540: 397-411.
13. Massah Bavani, A.R. and Morid, S., 2006. Impact of climate change on the water resources of zayandeh rud basin, *J. Sci. and Technol. Agric. and Natur. Resour.* 9: 4. 28-34.
14. Mazadeh, J., 2013. Quantitative modeling of groundwater using GMS software in Quchan plain. Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.
15. McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1998. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. geological survey techniques of water resources investigations, book 6, chap. A1, 586 p.
16. Mesmarian, A., MasahBavani, A. and Javadi, S., 2016. Impact of Climate Change on Shahrekord Plain Subterranean Wastewater in Future. *Eco Hydrology*. vol 2. Pp. 233-242.
17. Report on water resources and consumption. 2011. Ministry of Energy.
18. Richardson, C.W. and Wright, D.A., 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. Report No. ARS8, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
19. Sapriza-Azuri Gonzalo, Jódar Jorge, Carrera Jesús and Gupta, Hoshin V., 2015. Toward a comprehensive assessment of the combined impacts of climate change and groundwater pumping on catchment dynamics. *Journal of Hydrology*. 529: 1701-1712.
20. Semenov M.A. and Stratonovitch, P., 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41: 1-14.
21. Shokouhi, F., Abdelahi, A., Majidi, A., Yaghoubi, B. and Bakhshi Pour Azar, A., 2013. Modeling Groundwater Flow in Tuyserkhan Plain Using GMS Mathematical

- Model, First National Conference on Architecture, Civil and Environmental Environment, Hamedan, Hegmataneh Environmental Assessors Association.
22. Shrestha, S., Viet, B. and Prasad, P., 2016. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science & Policy* 61: 1–13
23. Water Balance Update Studies of Kerman Study Area, 2010.
24. Yano, T., Aydin, M. and Haraguchi, T., 2007. "Impact of Climate change on Irrigation Demand and Crop Growth in a Mediterranean Environment of Turkey", *J. Sensors*, 7, 2297-2315.
25. Yoshioka, Y., Nakamura, K., Horino, H. and Kawashima, S., 2016. Numerical assessments of the impacts of climate change on regional groundwater systems in a paddy-dominated alluvial
26. Ziaee, N., Ownegh, M., Asgari, H.R., Massah Bavani, A., Salman Mahini, A. and Hosseinalizadeh, M., 2017. Comparison of climate change scenarios on the desertification hazard intensity and risk of Hablehroud basin, Tehran province. *Journal of Desert Ecosystem Engineering Research*.16:105-118.
27. Zhang, X.C. and Nearing, M.A., 2005. Impact of climate change on soil erosion, runoff and wheat productivity in central Oklahoma, *Catena*, 61: PP.185-195.

Investigating Climate Change Effects on Groundwater-Level Decline in Kerman Plain via GMS Model

Asma Rastegar¹, Shahla Paimozd^{2*}

Received: 03/06/2019

Accepted: 21/09/2019

Extended Abstract

Introduction: Groundwater is considered as one of the main resources for drinking water, agriculture and industry. While groundwater is taken as a reserve resource in some areas, in other areas it may be used for supplying potable water due to their easy availability. Moreover, groundwater analysis is an essential factor in maintaining its access. In fact, modeling and predicting the groundwater level play a significant role in preserving the environment, maintaining the balance of the groundwater system, controlling changes in groundwater levels and preventing the escalation of land subsidence. On the other hand, climate change and the decline in groundwater table have been proved to be one of the main causes of land degradation in the past decades. According to Iranian Ministry of Energy, about 7 billion cubic meters of groundwater reservoirs are declining annually. Also, from among 609 plains in Iran, approximately 350 of them are known as the forbidden ones. The increasing number of prohibited plains from 15 wells in 1968 to 199 ones in 2001, and rising the dried plains into 350 ones in 2015 indicate the inappropriate status of water resources in Iran. Meanwhile, the highest amount of water scarcity in underground reservoirs belongs to the second grade Salt Lake as well as the Kerman Plain which has attracted more attentions in recent years as one of the most important plains of this area due to the large decline in its groundwater.

Materials and methods: This study set out to model the flow of groundwater in the Kerman plain aquifer under the influence of climate change for the upcoming period, using the GMS model. To this end, HADCM3 model, LARS model and A1B, B1 and A2 scenarios were applied for the investigation of the effects of climate change on aquifer volume and groundwater declines. Finally, having applied four different scenarios, the performance of each management options and the effects of different climate scenarios on the decline of the aquifer were examined.

Results: The results of the exponential microscopy indicated a minimum increase in the temperature between 0.59 to 0.86 degrees Celsius and a maximum temperature increase of between 0.56 to 0.85 degrees Celsius. The reported increase in minimum and maximum temperature in the upcoming period is consistent with the results of the studies carried out by Zhang and Nyinger (2005), Mosheh Boani and Merid (2006), Khorshid Doost and Ghavidel Rahimi (2006), Kukchi et al (2006), Yano et al. (2007), and Babayan et al. (2009), where temperature increases have been predicted.

Comparison of long-term annual precipitations suggested prospective increase in the rainfall which is consistent with the results of the study conducted by Steel Dani et al. (2008). Moreover, according to the findings of the current study, the lowest amount of precipitation in scenario B1 would occur from 2011 to 2030, which is 10.22 mm more than the base period rainfall. This is while the highest rainfall was expected to occur with a rise of 80/15 mm within the time period of 2011-2030 in scenario A2. As found by the simulation of the groundwater model (GMS), there was an acceptable accuracy for simulating the aquifer of Kerman Plain. In terms of Kerman

1. MSc Graduated, Arak University, Arak, Iran

2. Assistant professor, Water science Department, Arak University, Arak, Iran; Corresponding Author: Paimozd.ar@hotmail.com
DOI: 10.22052/deej.2020.9.26.25

aquifer quantity, the results suggested, after a steady-state calibration, that RMSE, MAE and ME values were 0.38 m, 0.21 m, and 0.20 m, respectively, showing acceptable accuracy of modeling in the mode was lasting. Having set the proper performance of GMS model, four different scenarios were used to simulate the effect of climate change on the station's level, and its changes were compared with the base period. On the other hand, the decline in water level would be 10.6 -10 in the first scenario. The levels of water decline within climate change scenarios A2, A1B and B1 for were 11.9, 12.36 and 16.22 for the second scenario, 16.41, 16.66 and 17.30 for the third scenario, and 16.65, 16.9 and 18.15 meters for the fourth scenario respectively.

Discussion & conclusion: Although climate change directly affects surface water resources changes in major long-term variables such as rainfall, temperature, evapotranspiration and transpiration, it is difficult to determine the relationship between climate change variables and underground water. This study, therefore, attempted to predict the relationship between climate and groundwater levels for the upcoming period. Comparison of long-term annual precipitation indicate in increase in precipitation which is consistent with the results found by Steel Dani et al. (2008). According to the findings of the current study, the calibrated model has acceptable accuracy and the mathematical model can simulate the normal conditions governing the aquifer of Kerman Plain. Having obtained the proper performance of GMS model, four different scenarios were used to simulate the effect of climate change on the station's level, and its changes were compared with the base period. The results showed that an 18-meter water decline would not be expected in such a situation.

Keywords: Climate Change, GMS Model, Groundwater, Kerman Plain.