بررسی عددی نوسانات آب‌زیرزمینی متأثر از تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد

سید یحیی میرزایی[۱*]، رقیه امیری[۲]، منوچهر چیت‌سازان[۳]

۱. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲. دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳. استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱

چکیده

تغییر اقلیم می‌تواند اثرات قابل توجهی بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه‌ای و جهانی داشته باشد. گرم شدن آب و هوا بزرگ‌ترین چالش آینده برای هیدروسفر و جامعه انسانی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است. این مطالعه اثر تغییر اقلیم را بر روی آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین منظور متغیرهای اقلیمی دما و بارش با استفاده از مدل‌های GCM و LARS-WG برای یک دوره پایه ۴۵ ساله (سال آبی ۱۳۵۱-۱۳۵۰ تا ۱۳۹۴-۱۳۹۵) بررسی و ریز مقیاس نمایی شد. سپس مقادیر دما و بارش برای یک دوره ۳۰ ساله (۱۴۰۴-۱۴۰۳ تا ۱۴۳۲-۱۴۳۳) تحت سناریوهای اقلیمی ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 پیش‌بینی شد. شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبریز خرم‌آباد با استفاده از مدل IHACRES انجام شد. مدل جریان آب‌زیرزمینی دشت مرکزی خرم‌آباد نیز با استفاده از کد MODFLOW برای یک دوره ۱۲۰ ماهه (مهر ۱۳۸۹- شهریور ۱۳۹۹) واسنجی و برای یک دوره ۳۶ ماهه (مهر ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۲) صحت‌سنجی شد. با توجه به نتایج میزان بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه در سناریوهای ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 به ترتیب ۴۲/۶، ۴۷ و ۶۱/۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد. مقدار میانگین سالانه دماهای حداقل و حداکثر نیز در هر سه سناریو افزایش می‌یابد. پس از واسنجی مدل IHACRES، NSE=۰/۷۴ ، RMSE=۱/۴۶ و R^2=۰/۶۴ به دست آمد. طبق نتایج میزان دبی پیش‌بینی‌شده برای رودخانه خرم‌آباد در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت سناریوی ssp1.2.6 ۲/۳۸ مترمکعب بر ثانیه افزایش و در سناریوهای ssp2.4.5 و ssp5.8.5 به ترتیب ۰/۴۲و ۰/۹۴ مترمکعب بر ثانیه کاهش می‌یابد. میانگین بیلان ۳۰ ساله آبخوان تحت سناریوهای ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 به ترتیب ۲۷۴۹۴/۵، ۱۲۳۳۵/۳- و ۴۱۸۲۳/۳- مترمکعب به دست آمد. سطح آب‌زیرزمینی آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد نیز در دوره آتی کاهش خواهد یافت.

کلید واژه‌ها: دشت مرکزی خرم‌آباد، تغییر اقلیم، CMIP6، مدل IHACRES، مدل MODFLOW.

* نویسنده مسئول: Yahyamirzaee@scu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.4.1019262

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

مقدمه

آب‌های زیرزمینی بخشی از اجزای تشکیل‌دهنده هیدروسفر سیاره ما هستند و تقریباً ۹۷٪ از منابع آب شیرین مایع قاره را تشکیل می‌دهند (Hatch-Kuri and Carrillo-Rivera, 2021). منابع آب‌زیرزمینی برای حفظ محیط‌زیست، جوامع انسانی، کشاورزی و توسعه صنعت ضروری است (Gu et al, 2018; Adimalla, 2019; Li et al, 2019; Zhang et al, 2021a). بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب‌زیرزمینی منجر به کاهش منابع آب‌زیرزمینی، تخریب اکولوژیکی و مخاطرات زمین در بسیاری از مناطق در سراسر جهان شده است (Antonellini et al, 2019; Huang et al, 2020; Zhang et al, 2021b). این امر در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با کمبود آب‌های سطحی مواجه هستند عامل مهم‌تری است (Mookiah et al, 2021; Qu et al, 2021; Liu et al, 2022). آب‌های زیرزمینی و شناخت رفتارهای آن جهت مدیریت علمی منابع آب‌زیرزمینی بسیار ضروری است. علاوه بر اختلالات انسانی، تغییرات چشمگیر اقلیمی عامل دیگری است که چالش‌ها و تهدیدهای بی‌سابقه‌ای را برای ایمنی و پایداری آب در سطح جهانی ایجاد کرده است و به این روند ادامه خواهد داد (Ghimire et al, 2021). تغییر اقلیم به تغییرات طولانی‌مدت در دما، بارش، باد و سایر عناصر آب و هوایی اطلاق می‌شود. گرم شدن آب‌وهوا به‌طور قابل‌توجهی وضعیت تعادل منابع آب روی زمین را تغییر خواهد داد. آب‌های زیرزمینی به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی بالاتر در بیشتر موارد، نسبت به آب‌های سطحی در واکنش به تغییرات آب و هوایی مقاوم‌تر هستند (Zhang, 2015). تغییر اقلیم عمدتاً از طریق تغییر تغذیه آب‌زیرزمینی، منجر به تغییر سطح ایستابی آب‌زیرزمینی می‌شود (Allen et al, 2010; Taylor et al, 2013). بنابراین، آب‌های زیرزمینی و رفتارهای آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت شرایط تغییر اقلیم باید موردتوجه ویژه قرار گیرد. اولین مقاله تحقیقاتی در مورد اثرات تغییرات آب‌وهوا بر منابع آب‌زیرزمینی به دهه ۱۹۹۰ برمی‌گردد. به‌عنوان‌مثال، واکارو تأثیر تغییر اقلیم بر تغذیه آبخوان در ایالات‌متحده را با استفاده از یک مولد آب‌وهوا (WGEN) و سه مدل آب‌وهوای جهانی (GCM) موردمطالعه قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که جهت مشاهده تغییرات اقلیمی بر میزان تغذیه آب‌زیرزمینی باید میانگین تغذیه برای حداقل دوره‌های پنج تا ده ساله محاسبه شود (Vaccaro, 1992). شرستا و همکاران تأثیرات تغییر اقلیم را بر منابع آب‌زیرزمینی در دلتای Mekong در کشور ویتنام موردبررسی قراردادند. نتایج نشان داد که میانگین سالانه دما در آینده ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. بارش نیز در آینده در فصل‌های مرطوب افزایش و در فصل‌های خشک کاهش خواهد یافت(Shrestha et al, 2016). حدد و همکاران در مقاله‌ای به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روی آبخوان زئوس کوتین در جنوب شرقی تونس از طریق برقراری پیوند دینامیکی بین نرم‌افزار WEAP وMODFLOW پرداختند. نتایج نشان داد که آبخوان به‌شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار دارد که این امر ممکن است باعث کاهش سطح آب‌های زیرزمینی نسبت به سناریوهای مرجع تا پایان سال ۲۰۳۰ شود (Hadded et al, 2018). جیا-وی و همکاران برای شناسایی واکنش تغییر سطح آب‌زیرزمینی به تغییرات آب‌وهوای جهانی حوضه رودخانه گلمود در شمال غرب چین را موردمطالعه قراردادند. نتایج تحقیق نشان داد که درجه حرارت در حوضه آبریز رودخانه گلمود هر ۱۰ سال یک‌بار ۰،۵۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (Jia-wei et al, 2021). میرزایی و همکاران آبخوان دشت میداوود-دالون را با استفاده از مدل ریاضی GMS تحت سناریوهای مختلف مدیریتی موردبررسی قراردادند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که بیلان آبخوان میداوود-دالون همانند دوره پایه همواره مثبت است اما در شرایط خشک‌سالی حدود ۰/۸

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد (Mirzaee et al, 2023). رستگار و پایمزد در مطالعه‌ای جریان آب‌زیرزمینی دشت کرمان را با استفاده از مدلهای GMS و LARS-WG تحت تأثیر سناریوهای B1، A1B و A2 در دوره آتی (۲۰۳۰) مدل‌سازی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تراز آب‌زیرزمینی در تمامی سناریوها در دوره‌های آتی به‌شدت افت می‌کند (رستگار و پایمزد، ۱۳۹۸). احمدی‌فر و همکاران اثرات تغییر اقلیم را بر منابع آب‌زیرزمینی آبخوان دشت سراب تحت تأثیر مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی (AOGCM) تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 بررسی کردند. نتایج نشان داد تحت هر دو سناریوی A2 و B1 سطح ایستابی نسبت به سال مبنا از ۰ تا ۱۰ متر دچار افت شده است (احمدی‌فر و همکاران، ۱۳۹۸). با توجه به کاهش منابع آب سطحی در حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد و استفاده از منابع آب‌زیرزمینی در بخش‌های مختلف و همچنین افت تراز آب‌زیرزمینی در دشت‌های موجود به دلیل برداشت بی‌رویه از آبخوان لازم است اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب این حوضه بررسی شود. بنابراین هدف از این مطالعه شبیه‌سازی و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب‌زیرزمینی دشت مرکزی خرم‌آباد با استفاده از مدل عددی GMS و سری ششم گزارشات (6th Coupled Model Intercomparison Project/ CMIP6) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change/ IPCC) می‌باشد. ازآنجایی‌که مَطالعات تغییر اقلیم بر منابع آب‌زیرزمینی در اکثر دشت‌های استان لرستان محدود است و شبیه‌سازی آب‌زیرزمینی عمدتاً برای دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت صورت می‌گیرد، در این مطالعه شبیه‌سازی آب‌زیرزمینی برای دوره طولانی‌مدت صورت گرفت تا اثرات تغییر اقلیم را بر منابع آب‌زیرزمینی به‌صورت دقیق‌تری نشان دهد.

مواد و روش‌ها

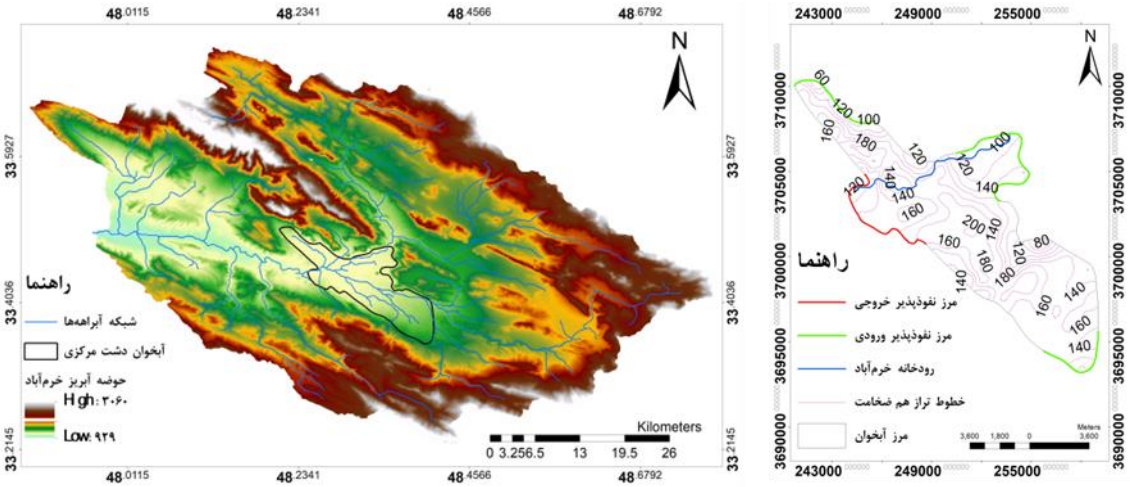
جمع‌آوری آمار و اطلاعات از اقدامات اولیه مهم و ضروری در انجام هر تحقیق به شمار می‌رود. اطلاعات موردنیاز این تحقیق از سازمان جهاد کشاورزی استان لرستان، شرکت آب منطقه‌ای لرستان، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان، اداره کل هواشناسی استان لرستان و سازمان هواشناسی کشور دریافت شده است.

منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه حوضه آبریز خرم‌آباد است که درواقع بخشی از حوضه‌ی رود دائمی خرم‌آباد است. این حوضه که یکی از زیر حوضه‌های رود کرخه است، شامل یک دشت اصلی (دشت مرکزی) و تعدادی دشت پراکنده کوچک ازجمله دشت ده‌پیر، کمالوند و خرم‌آباد است. دشت مرکزی به شکل یک بیضی به طول حدود ۲۵ کیلومتر در جهت شمال غرب– جنوب شرق با مختصات طول شرقی ′۲۱ °۴۸ تا ′۸ °۴۹ و عرض شمالی ′۱۳ °۳۳ تا ′۴۴ °۳۳ در محدوده‌ی جنوب و جنوب غرب شهرستان خرم‌آباد واقع‌شده است. متوسط ارتفاع منطقه ۱۹۰۳ متر، مساحت محدوده حوضه آبریز ۲۵۱۷ کیلومترمربع و مساحت آبخوان مرکزی دشت خرم‌آباد حدود ۱۳۳ کیلومترمربع می‌باشد (شکل ۱). خروجی حوضه آبریز خرم‌آباد رودخانه چم‌انجیر است. متوسط بارش سالانه محدوده مطالعاتی خرم‌آباد ۵۰۸ میلی‌متر و متوسط دمای آن ۱۷/۲ درجه سانتی‌گراد است (آمار ۵۰ ساله، ۲۰۲۰-۱۹۷۱). سازندهای زمین‌شناسی حوضه آبریز خرم‌آباد متعلق به اواخر دوران دوم تا عهد حاضر هستند. این سازندها شامل: تله‌زنگ، امیران، کشکان، آسماری-شهبازان، گچساران، آغاجاری، بختیاری و آبرفت‌ها هستند. سازندهای امیران و کشکان با نفوذپذیری کم در بخش شرقی رخنمون دارند و سازندهای آسماری و گروه بنگستان تاقدیس بزرگ سفیدکوه که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

از قابلیت نفوذ بسیار خوبی برخوردار است را می‌پوشانند. همچنین سازند بختیاری در بخش شمال شرقی و سازندهای کشکان، گچساران و آهک‌های آسماری در بخش جنوب شرقی برون‌زد دارند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و محدوده موردمطالعه

Fig. 1. Geographical location and study area

شبیه‌سازی تغییر اقلیم

جهت شبیه‌سازی تغییر اقلیم ابتدا داده‌های تاریخی مربوط به ۶ مدل GCM (General Circulation Models) بر اساس گزارشات سری ششم تغییر اقلیم (CMIP6) دانلود و با داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. به این منظور در مرحله اول، متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) برای دوره تاریخی و برای هر ۶ مدل GCM انتخابی از سایت ESGF استخراج شد. سپس این داده‌ها با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند. جهت انجام این مقایسه و انتخاب بهترین مدل GCM از معیارهای ضریب نش ساتکلیف (NSE)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد (روابط ۱، ۲ و ۳).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}\sqrt{(M_i-\bar{M})^2}}\right]^2 \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$NSE = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{n}} \quad (۳)$$

در روابط بالا O_i، P_i، $\bar{O}$، $\bar{P}$، و n به ترتیب داده‌های مشاهداتی، داده‌های محاسباتی، میانگین داده‌های مشاهداتی، میانگین داده‌های محاسباتی و تعداد داده‌ها می‌باشند (Nassery et al, 2021). پس از مقایسه و انتخاب بهترین مدل از سه سناریوی ssp1.2.6 (حالت خوش‌بینانه)، ssp2.4.5 (حالت حد واسط) و ssp5.8.5 (حالت بدبینانه) برای تولید داده‌های بارش و دما در آینده (۲۰۵۵-۲۰۲۵) استفاده شد. برای تحلیل تغییرات اقلیمی از اطلاعات هواشناسی ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد به دلیل برخورداری از سری زمانی مناسب استفاده شد. درنهایت، نتایج شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره آینده با استفاده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

از مدل LARS-WG (Long Ashton Research Station Weather Generator) و روش عامل تغییر (دلتا) ریز مقیاس‌نمایی شد. با استفاده از روش دلتا یا عامل تغییر، می‌توان تغییرات متغیر اقلیمی موردنظر را در دوره‌های آتی نسبت به دوره قبل محاسبه کرد و سناریوی تغییر اقلیم آن متغیر را با استفاده از روش عامل تغییر به دست آورد (Diaz-Nieto and Wilby 2005; Raju et al. 2018) در این روش از اختلاف بین دو متغیر برای دما و از نسبت بین آن‌ها برای بارندگی استفاده می‌شود (Hulme and Jones 1994; Lipczynska-Kochany 2018).

$$\Delta P = \frac{P_{future} - P_{base}}{P_{base}} \quad (۴)$$

$$\Delta T = T_{future} - T_{base} \quad (۵)$$

ΔP و ΔT به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم بارندگی و دما در دوره بعدی در هرماه هستند. T_{future} میانگین دمای ۲۰ ساله آینده شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره بعدی برای هرماه، T_{bases}، میانگین دمای ۲۰ ساله شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM در دوره مشاهده‌ای در هرماه است. P_{future} و P_{base} نیز به ترتیب میانگین ۲۰ سال بارش شبیه‌سازی‌شده در آینده و خط پایه مشاهده‌شده را نشان می‌دهند (Simin Sheikha-BagemGhaleh1 et al, 2023).

مدل‌سازی بارش-رواناب

جهت مدل‌سازی بارش-رواناب و پیش‌بینی رواناب از مدل IHACRES (Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow Data) استفاده شد. IHACRES یک مدل یکپارچه مفهومی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب است که برای اولین بار توسط جیکمن و همکاران توسعه یافت (Lotfirad et al, 2019. احمدی و همکاران ، ۱۳۹۹). این مدل جهت شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه به داده‌های کمی نیاز دارد. مدل IHACRES شامل دو ماژول خطی و غیرخطی است (زارعی و همکاران، ۱۳۸۸). ماژول غیرخطی بارندگی مشاهده‌شده را به بارندگی اضافی تبدیل می‌کند سپس ماژول خطی بارندگی اضافی تخمینی را به دبی رودخانه تبدیل می‌کند. ماژول اول یک مدل مفهومی یکپارچه است درحالی‌که ماژول دوم اساساً یک روش داده محور است (Jakeman and Hornberger, 1993. Croke and Jakeman, 2004. Lotfirad et al, 2019). در IHACRES، بارندگی اضافی (u_k) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Hansen et al, 1996):

$$u_k = \begin{cases} s_k^p r_k, & r_k > l \\ 0, & r_k \le l \end{cases} \quad (۶)$$

در رابطه بالا r_k میزان بارندگی مشاهده‌شده در زمان k، p پارامتر تلفات نمایی، l مقدار آستانه جریان برای بارش و s_k یک شاخص رطوبتی است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$s_k = \frac{r_k}{c} + \left[1 - \frac{1}{\tau_w exp[(20 - t_k)f]}\right] s_{k-1} \quad (۷)$$

که در آن c یک پارامتر پاسخ است که برای اطمینان از حفظ تعادل جرم حوضه انتخاب‌شده است. τ_w یک پارامتر زمانی برای کاهش s_k است. t_k دمای مشاهده‌شده در زمان k برحسب درجه سانتی‌گراد و f پارامتری برای مدولاسیون دما است. ماژول

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

خطی IHACRES برای یک حوضه، ترکیبی از دو جزء موازی یکی برای جریان سریع (ذخیره) ($xk(q)$) و دیگری برای جریان آهسته است ($xk(s)$) (Kim, 2015). بنابراین، جریان در زمان k را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$q_k = x_k^{(q)} + x_k^{(s)} \quad (۸)$$

$$x_k^{(q)} = exp\left(\frac{-\Delta}{\tau_q}\right) x_{k-1}^{(q)} + v_q \left[1 - exp\frac{-\Delta}{\tau_q}\right] u_k \quad (۹)$$

$$x_k^{(s)} = exp\left(\frac{-\Delta}{\tau_s}\right) x_{k-1}^{(s)} + v_s \left[1 - exp\frac{-\Delta}{\tau_s}\right] u_k \quad (۱۰)$$

در روابط بالا Δ گام زمانی است. τ_q و τ_s به ترتیب ثابت‌های زمان فروپاشی برای جریان‌های سریع و آهسته و v_q و v_s به ترتیب، گذردهی حجمی نسبی برای اجزای سریع و آهسته جریان هستند. در مطالعه حاضر، IHACRES بر اساس میانگین‌های ماهانه‌ی دما، بارندگی و داده‌های دبی کالیبره شد.

مدل‌سازی جریان آب‌زیرزمینی

در این تحقیق به‌منظور مدل‌سازی جریان آب‌زیرزمینی از نرم‌افزار GMS و کد MODFLOW استفاده‌شده است. MODFLOW برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی شرایط آب‌های زیرزمینی و اندرکنش آب زیرزمینی-آب سطحی استفاده می‌شود. اولین گام در مطالعات مدل‌سازی آب‌زیرزمینی، ساخت مدل مفهومی است. مدل مفهومی شامل تعریف مرزهای مدل، واحدهای هیدرواستراتیگرافی، سیستم جریان و مهیا نمودن بیلان است (Mirzaee et al, 2023; Mirzaee et al, 2022). مرحله بعدی تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی است، این مرحله ورودی‌های مختلف داده را در قالب یک کد کامپیوتری مناسب به یک مدل عددی MODFLOW مبتنی بر شبکه تبدیل می‌کند. پس از ساخت مدل مفهومی و انتخاب کد کامپیوتری مناسب، ساخت مدل آغاز می‌شود. ساخت و طراحی مدل شامل شبکه‌بندی مکانی، تعیین گام‌های زمانی، مشخص کردن شرایط مرزی و مقداردهی به پارامترهای آبخوان و تنش‌های هیدرولوژیکی است در اکثر موارد پس از ساخت و طراحی مدل به‌منظور افزایش کیفیت نتایج مدل باید اصلاحاتی در پارامترهای ورودی به مدل صورت گیرد تا مدل بتواند رابطه نزدیکی را بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده تخمین بزند، به این فرآیند واسنجی می‌گویند. (Patil et al, 2020). پس از مرحله واسنجی، مدل باید مورد صحت‌سنجی قرار گیرد. در این شرایط اگر صحت و قابلیت پیش‌بینی در محدوده‌های قابل قبولی از آزمون‌های مستقل از داده‌ها به اثبات برسد آنگاه صحت‌سنجی مدل با موفقیت انجام‌گرفته است. در مرحله بعد حساسیت مدل به تغییرات پارامترها مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در مرحله آخر نیز به‌منظور ارزیابی و سنجش دقت مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده از سه پارامتر میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) که بیانگر عملکرد مدل در برآورد متغیرهای شبیه‌سازی‌شده نسبت به مقدار مشاهداتی است استفاده می‌شود.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_0 - h_s)_i}{n} \quad (۱۱)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|(h_0 - h_s)_i|}{n} \quad (۱۲)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

در روابط بالا: h_s مقدار بار هیدرولیکی شبیه‌سازی‌شده توسط نرم‌افزار، h_0 مقدار بار هیدرولیکی چاه‌های مشاهداتی دشت و n تعداد پیزومترها می‌باشد.

نتایج و بحث

شبیه‌سازی تغییر اقلیم

به‌منظور شبیه‌سازی تغییر اقلیم ابتدا داده‌های تاریخی مربوط به دو متغیر بارش و دما برای ۶ مدل GCM بر اساس گزارشات سری ششم تغییر اقلیم (CMIP6) از سایت ESGF دانلود شد. در مرحله بعد داده‌های دانلود شده از فایل‌های NC از طریق نرم‌افزار GIS استخراج شد. سپس میانگین بلندمدت ماهانه متغیرهای اقلیمی حاصل از مدل‌های GCM با مقادیر متناظر داده‌های مشاهداتی مقایسه شد. جهت انجام این مقایسه از معیارهای ارزیابی عملکرد شامل NSE، RMSE و R^2 استفاده شد (جدول ۱). درنهایت از بین مدل‌های GCM، مدل MRI-ESM2 به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. پس از انتخاب بهترین مدل GCM، به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن سلول محاسباتی این مدل ازنظر مکانی نتایج حاصل به ریزمقیاس‌نمایی نیاز دارند. در این مطالعه جهت ریزمقیاس‌نمایی و تولید داده‌های اقلیمی در آینده از مدل LARS-WG7 استفاده شد. شبیه‌سازی توسط مدل LARS-WG شامل سه مرحله واسنجی مدل، ارزیابی مدل و تولید داده‌های اقلیمی برای دوره آینده است (رزمخواه و همکاران، ۱۴۰۲). جهت واسنجی مدل LARS-WG از داده‌های مشاهداتی ۴۵ ساله ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد (سال آبی ۱۳۵۱-۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵-۱۳۹۴) به‌عنوان دوره پایه استفاده شد. معیارهای ارزیابی حاصل از مقایسه متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهداتی نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول مدل LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی می‌باشد جدول (۲). میانگین و انحراف معیار ماهانه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده نیز طی دوره پایه به ترتیب در شکل‌های (۲a)، (۳a) و (۳b) نشان داده‌شده است.

جدول ۱. مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد برای مدل MRI-ESM2

Table 1. Performance evaluation criteria values for MRI-ESM2 model

متغیرهای اقلیمی	NSE	RMSE	R^2
بارش	0.26	5.505	0.32
دمای حداقل	0.49	3.94	0.54
دمای حداکثر	0.44	6.43	0.501

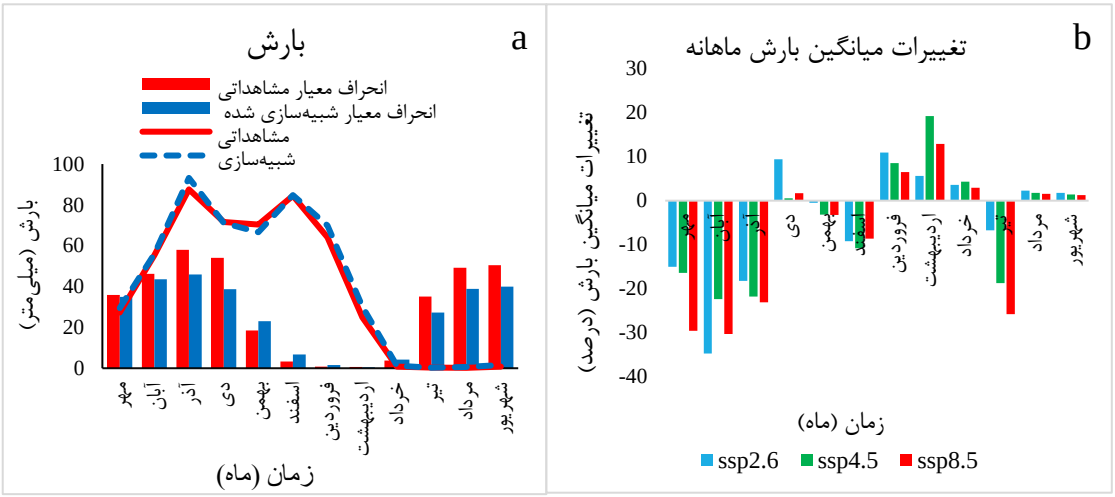
جدول ۲. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل حاصل از مقایسه متغیرهای اقلیمی مشاهداتی و شبیه‌سازی

Table 2. Model performance evaluation criteria resulting from the comparison of observation and simulation climate parameters

متغیرهای اقلیمی	NSE	RMSE	R^2
میانگین بارش ماهانه	.0989	1.130	0.983
میانگین دمای حداقل ماهانه	0.999	0.064	0.999
میانگین دمای حداکثر ماهانه	0.999	0.070	0.999
میانگین تابش آفتابی ماهانه	0.999	0.089	0.998

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

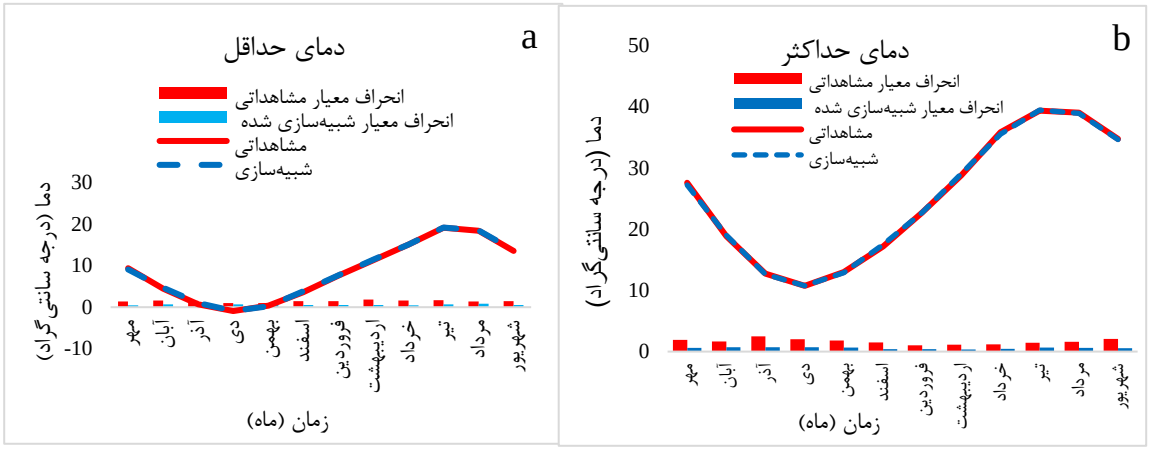
پس از اثبات کارایی مدل LARS-WG متغیرهای اقلیمی برای یک دوره ۳۰ ساله (سال آبی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ تا ۱۴۳۳-۱۴۳۲) تحت سه سناریوی ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 پیش‌بینی شد. سناریوهای ssp مجموعه‌ای از سناریوهای اقلیمی با توجه به سری ششم گزارشات IPCC هستند. این سناریوها ترکیبی از سناریوهای انتشار RCP و مسیرهای مشترک اقتصادی-اجتماعی هستند که از آن‌ها برای استخراج سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای باسیاست‌های مختلف آب و هوایی استفاده می‌شود (احمدی و کمانگر، ۱۴۰۲). شکل‌های (۲a)، (۴a) و (۴b) به ترتیب نمودار درصد تغییرات میانگین‌های ماهانه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را در دوره آتی نسبت به دوره پایه نشان می‌دهند. همان‌طور که نمودارها نشان می‌دهند در هر سه سناریوی موردبررسی میزان بارندگی در دوره آتی در سه‌ماهه پاییز و ماه‌های بهمن و اسفند کاهش و در فصل بهار افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده روند کلی میانگین بارش سالانه در هر سه سناریو در دوره آتی نسبت به دوره پایه (۵۰۸/۸ میلی‌متر) کاهش نشان می‌دهد. مقدار میانگین بارش سالانه طی دوره آتی در سناریوهای ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 به ترتیب ۴۶۶/۲، ۴۶۱/۱ و ۴۴۶/۹ به دست آمد. شکل (۵) نمودار میانگین بارش سالانه را در هر سه سناریو طی دوره آتی نشان می‌دهد. مقدار میانگین دمای حداقل و حداکثر ماهانه و سالانه نیز طی دوره آتی در سناریوهای ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 روند افزایشی نشان می‌دهد. در سناریوهای فوق به ترتیب میانگین دمای حداقل ۱/۹، ۲ و ۲/۴ درجه افزایش نشان می‌دهد (شکل ۶). مقدار میانگین دمای حداکثر سالانه نیز برای سناریوهای ذکرشده به ترتیب ۱/۸، ۱/۹ و ۲/۳ درجه افزایش خواهد یافت (شکل ۷).



شکل ۲. a) میانگین و انحراف معیار بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده طی دوره پایه b) درصد تغییرات میانگین ماهانه بارش در دوره آتی

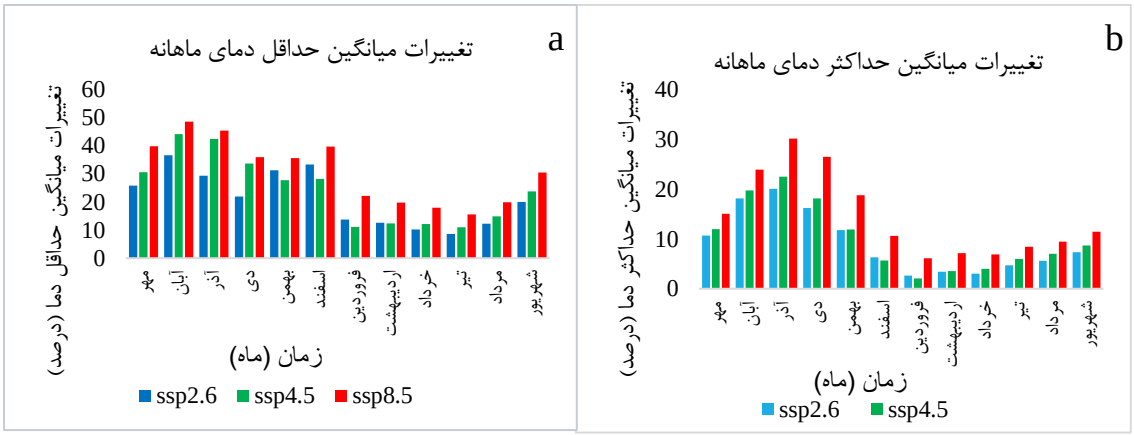
Fig. 2. a) Average and standard deviation of observed and simulated monthly precipitation during the base period, b) The percentage of monthly average precipitation changes in the future period

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]



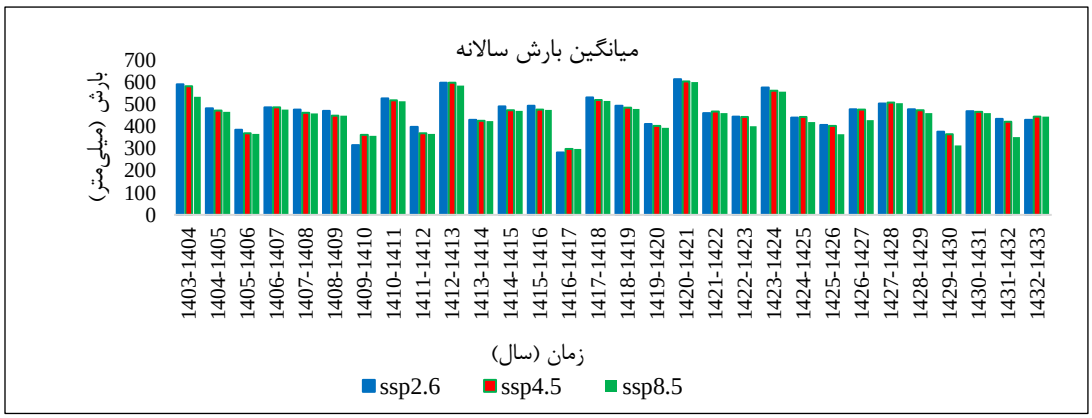
شکل ۳. میانگین و انحراف معیار دمای ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده طی دوره پایه، a) دمای حداقل، b) دمای حداکثر

Fig. 3. Average and standard deviation of monthly observed and simulated temperature during the base period, a) minimum temperature b) maximum temperature



شکل ۴. درصد تغییرات میانگین ماهانه در دوره آتی، a) دمای حداقل b) دمای حداکثر

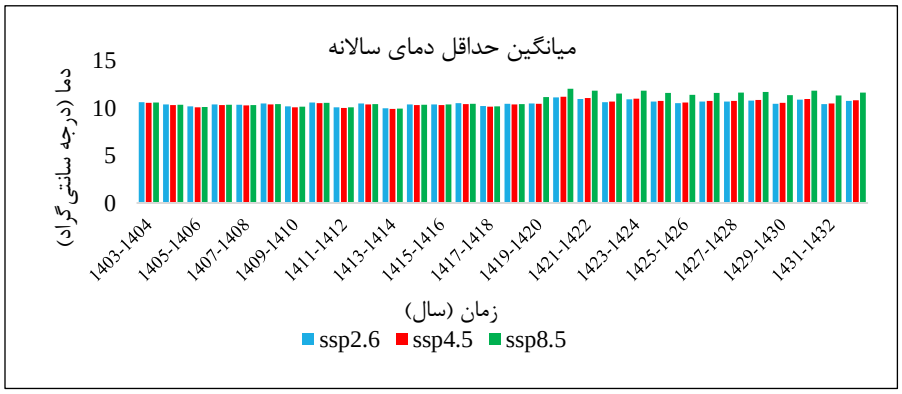
Fig. 4. The percentage of monthly average changes in the future period, a) minimum temperature b) maximum temperature



شکل ۵. میانگین بارش سالانه طی دوره آتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم

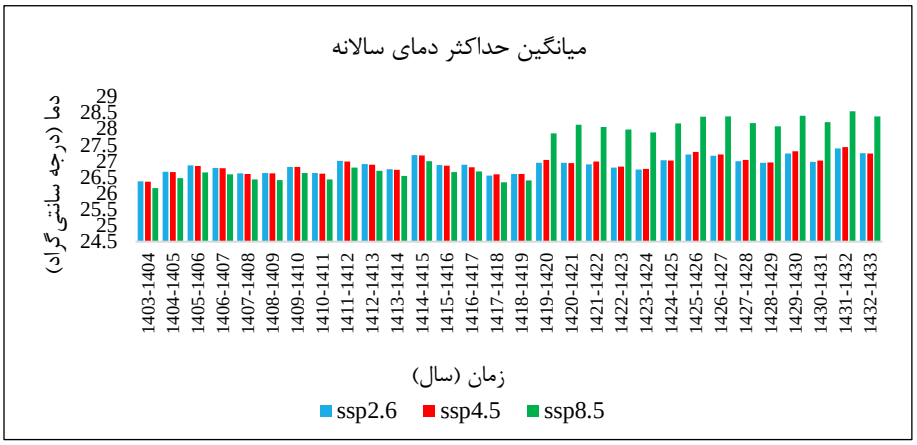
Fig. 5. Average annual precipitation during the future period in climate change scenarios

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]



شکل ۶. میانگین دمای حداقل سالانه طی دوره آتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم

Fig. 6. Average annual minimum temperature during the future period in climate change scenarios



شکل ۷. میانگین دمای حداکثر سالانه طی دوره آتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم

Fig.7. Average annual maximum temperature during the future period in climate change scenarios

شبیه‌سازی بارش-رواناب

داده‌های موردنیاز جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب توسط مدل IHACRES شامل داده‌های بارش، میانگین دما و دبی مشاهداتی ماهانه می‌باشد. دوره آماری استفاده‌شده در مدل‌سازی از سال ۱۹۷۱ تا ۲۰۲۰ می‌باشد. در مدل IHACRES به‌منظور واسنجی مدل دوره‌های مختلفی در نظر گرفته شد که بهترین نتایج از واسنجی دوره آماری اکتبر ۲۰۱۰ تا سپتامبر ۲۰۲۰ به دست آمد. سپس مدل برای دوره آماری اکتبر ۲۰۲۰ تا آگوست ۲۰۲۳ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی و معیارهای ارزیابی عملکرد مدل، مدل IHACRES توانایی قابل قبولی در مدل‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبریز موردمطالعه دارد. مقادیر بهینه حاصل از واسنجی پارامترهای مدل IHACRES و همچنین مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب در جداول (۳) و (۴) نشان داده‌شده است. شکل (۸) نیز برازش دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده طی دوره واسنجی را نشان می‌دهد که تأییدی بر عملکرد قابل‌قبول مدل IHACRES در پیش‌بینی رواناب در حوضه موردمطالعه است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

جدول ۳. مقادیر بهینه پارامترهای مدل IHACRES

Table 3. Optimal values of IHACRES model parameters

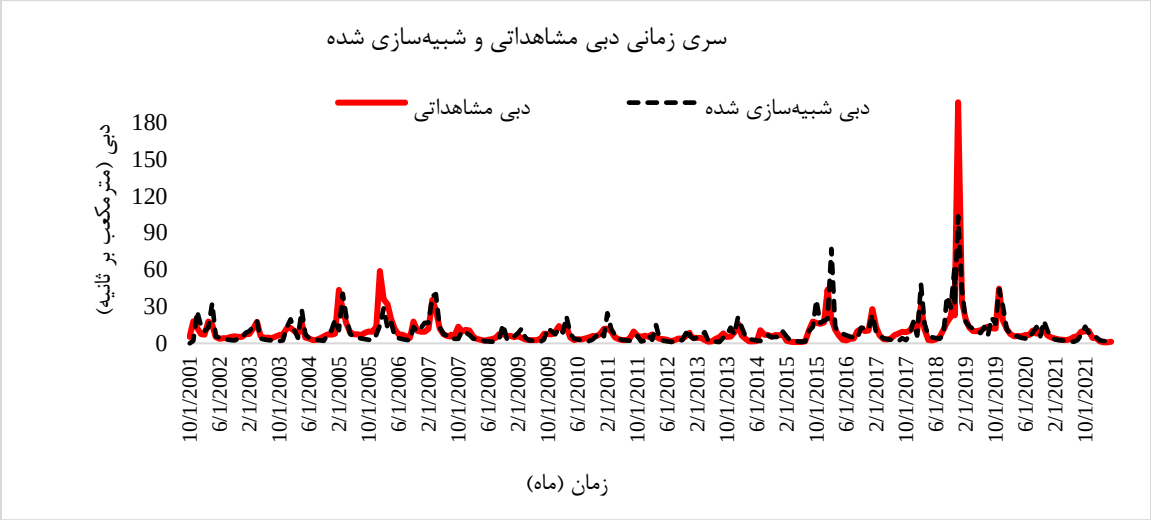
گام زمانی	$V^{(S)}$	$\tau^{(S)}$ (day)	$\tau^{(q)}$ (day)	1/c(mm)	f(□C)	τ_w(day)
ماهانه	0.415	5.759	0.99	1111	2.5	1.3

جدول ۴. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل IHACRES در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی

Table 4. Performance evaluation criteria of IHACRES model in two periods of calibration and validation

دوره مدل‌سازی	NSE	RMSE	R^2
واسنجی	0.74	1.46	0.64
اعتبارسنجی	0.52	3.23	0.58

در جدول (۳)، $V^{(S)}$ حجمی از جریان آهسته که در ایجاد رودخانه نقش دارد، $\tau^{(S)}$: ثابت زمانی کاهش پاسخ جریان آهسته، $\tau^{(q)}$: ثابت زمانی کاهش پاسخ جریان سریع، 1/c: ظرفیت ذخیره رطوبت حوضه، f: فاکتور تعدیل دما و τ_w: ثابت زمانی خشک شدن حوضه است (موجرلو و همکاران، ۱۳۹۸).



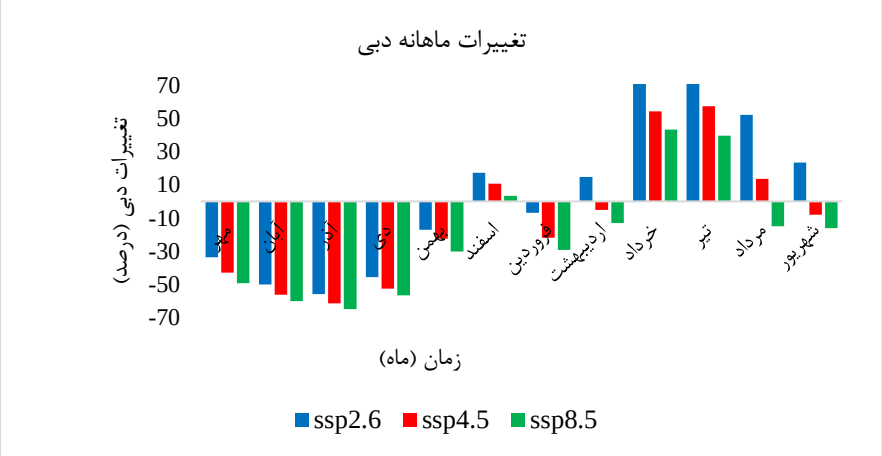
شکل ۸. برازش دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده طی دوره واسنجی مدل IHACRES

Fig. 8. Fit of observed and simulated discharge during the calibration period of IHACRES model

پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل IHACRES دبی برای یک دوره زمانی ۳۰ ساله (سال آبی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ تا ۱۴۳۳-۱۴۳۲) تحت سه سناریوی ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 پیش‌بینی شد. طبق نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های انجام‌شده میانگین دبی ماهانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه در فصول پاییز و زمستان در هر سه سناریوی مورداستفاده کاهش و در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد افزایش نشان می‌دهد شکل(۹). میزان میانگین دبی سالانه نیز در سناریوی ssp1.2.6 نسبت به دوره پایه افزایش و در دو سناریوی ssp2.4.5 و ssp5.8.5 کاهش نشان می‌دهد. میانگین دبی سالانه شکل (۱۰) در دوره

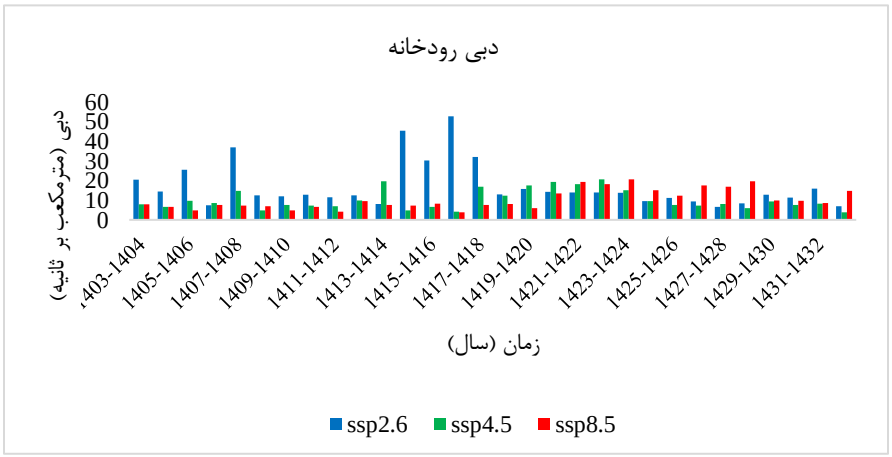
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

پایه ۱۰،۰۸ مترمکعب بر ثانیه است که مقدار آن در سناریوی‌های ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 به ترتیب ۱۲/۴۶، ۹/۶۶ و ۹/۱۴ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد.



شکل ۹. درصد تغییرات میانگین دبی ماهانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه

Fig 9. The percentage of average monthly discharge changes in the future period compared to the base period



شکل ۱۰. میانگین دبی سالانه پیش‌بینی‌شده در دوره آتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم

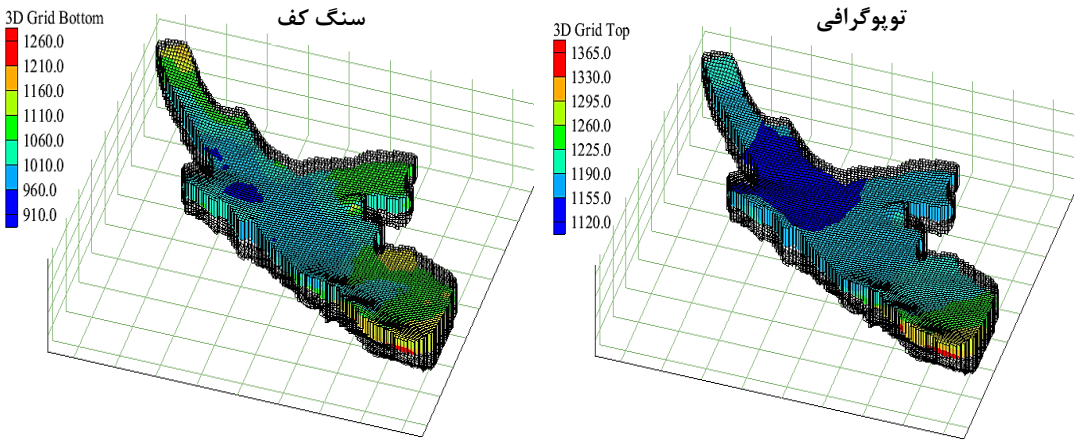
Fig10. Average annual discharge predicted in the future period under climate change scenarios

مدل‌سازی جریان آب‌زیرزمینی

جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب‌زیرزمینی آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد از کد MODFLOW موجود در نرم‌افزار GMS استفاده شد. در ابتدا مدل مفهومی آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد به لحاظ مکانی و زمانی شبکه‌بندی شد. در این راستا ازنظر مکانی شبکه‌ای سه‌بعدی شامل ۱۲۲ (بعد x) ردیف و ۱۱۴ ستون (بعد y) و با اندازه سلولی ۱۵۰×۱۵۰ متر تهیه شد. ازنظر زمانی مدل مفهومی به ۱۲۰ گام زمانی در مقیاس ماهانه تفکیک شد. سپس اطلاعات سه پارامتر توپوگرافی، سنگ کف و بار هیدرولیکی اولیه به مدل مفهومی داده شد (شکل ۱۱). سایر اطلاعات از طریق بسته‌های مناسب به مدل مفهومی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

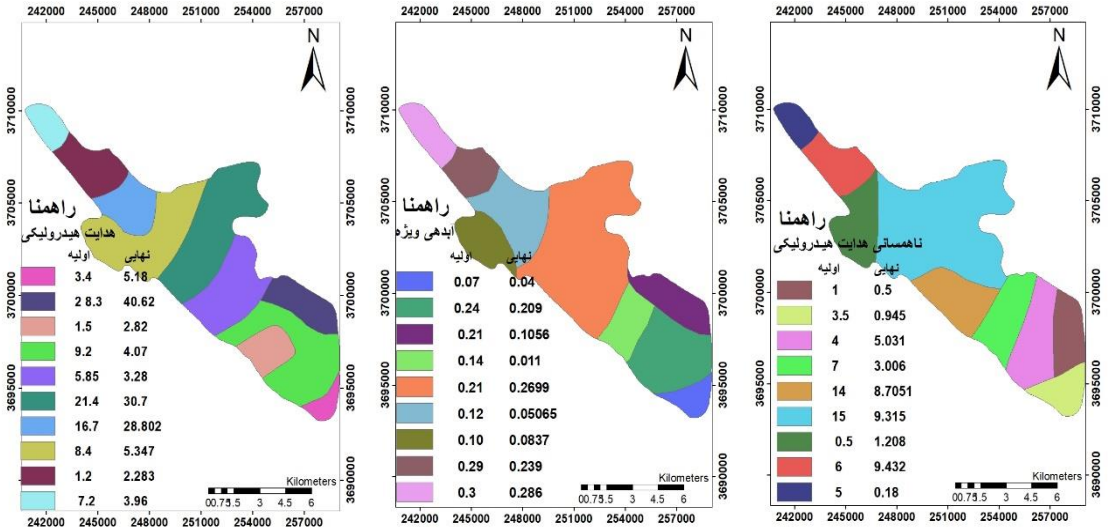
اعمال شد. مدل آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد برای دو حالت پایدار و ناپایدار واسنجی شد. در حالت پایدار مهرماه ۱۳۹۰ به‌عنوان ماه پایدار در نظر گرفته شد. در حالت ناپایدار مدل‌سازی جریان آب‌زیرزمینی برای یک دوره ۱۲۰ ماهه (۱۰ ساله) از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۹ انجام شد.



شکل ۱۱. اطلاعات اولیه(توپوگرافی و سنگ کف) در مدل‌سازی آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد

Fig. 11. Basic information (topography and bottom) in the modeling of the Khorramabad central plain aquifer

پس از واسنجی مدل در حالت پایدار، مدل برای حالت ناپایدار اجرا شد. در شرایط ناپایدار تمامی ورودی‌ها به مدل که وابسته به زمان هستند شامل اطلاعات سطح ایستابی، چاه‌های مشاهداتی، تغذیه، پمپاژ از چاه‌های بهره‌برداری، سطح آب بسته مرزی GHB و کنداکتانس رودخانه برای ۱۲۰ ماه آماده و به مدل ناپایدار اعمال شد. واسنجی مدل به دو صورت دستی (سعی و خطا) و خودکار (PEST) انجام گرفت. در هر دو روش مقادیر هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و جریان‌های ورودی و خروجی به مدل تصحیح شد (شکل ۱۲).

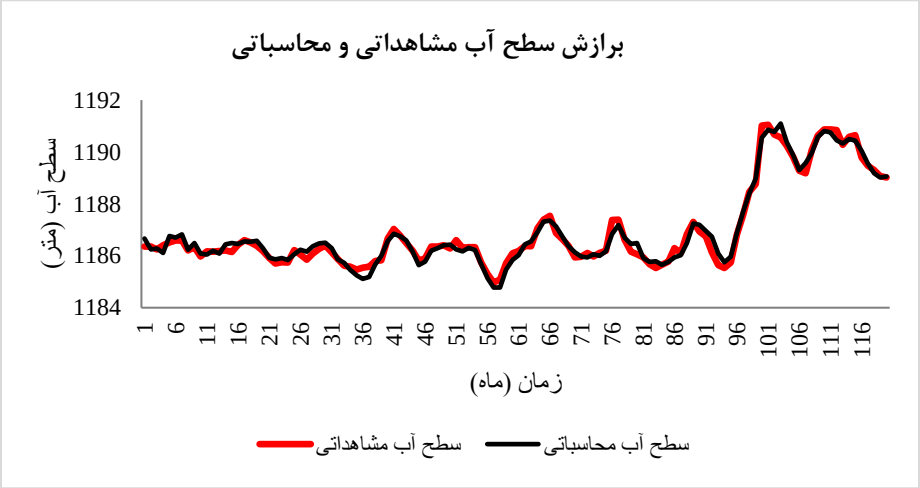


[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

شکل ۱۲. مقادیر اولیه و نهایی هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه و ناهمسانی هدایت هیدرولیکی
Fig .12. Initial and final values of hydraulic conductivity, specific yield and anisotropy of hydraulic conductivity

مقادیر انواع خطا بعد از واسنجی مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار در جدول (۵) آورده شده است. شکل (۱۳) نیز نشان‌دهنده برازش مقادیر سطح آب مشاهداتی و محاسباتی در دوره مدل‌سازی است. پس از انجام واسنجی به‌منظور تأیید کارایی مدل جهت انجام فرآیند پیش‌بینی، مدل برای یک دوره ۳۶ ماهه از مهرماه ۱۳۹۹ تا شهریورماه ۱۴۰۲ مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از صحت‌سنجی مدل آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد صحت مدل ساخته‌شده را تأیید می‌کند (جدول ۵).



شکل ۱۳. برازش سطح آب مشاهداتی و محاسباتی طی دوره واسنجی
Fig. 13. Fit of observed and computed water table during the calibration period

جدول ۵. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل MODFLOW مربوط به مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در حالت‌های پایدار و ناپایدار
Table 5. MODFLOW model performance evaluation criteria related to calibration and verification stages in steady and transient states

RMSE	MAE	ME	
0.53	0.47	0.015	نتایج واسنجی پایدار
0.57	0.47	−0.04	نتایج واسنجی ناپایدار
0.96	0.81	−0.03	نتایج صحت‌سنجی

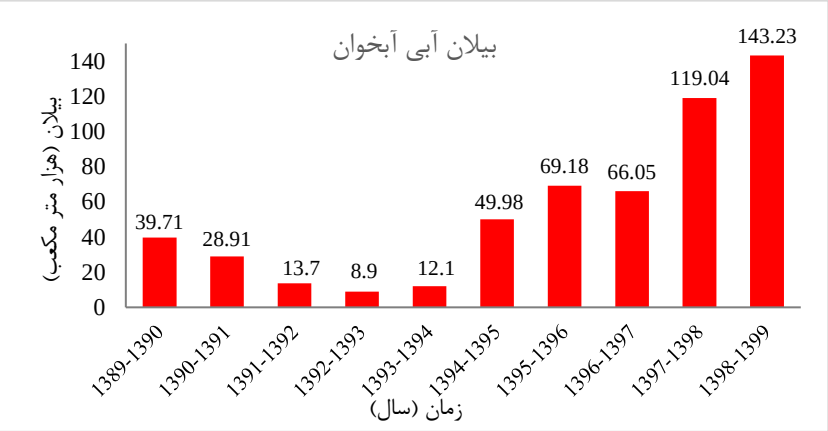
ارزیابی بیلان و سطح آب‌زیرزمینی

مدیریت مناسب آبخوان به‌منظور استحصال و تأمین آب امری ضروری در مطالعات منابع آب است. ازجمله مواردی که می‌تواند نقش مهمی در مدیریت منابع آب داشته باشد بررسی بیلان آبی آبخوان است. معادله کلی بیلان آب‌های زیرزمینی برای هر دوره تنش با استفاده از رابطه ۱۴ قابل‌محاسبه می‌باشد:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

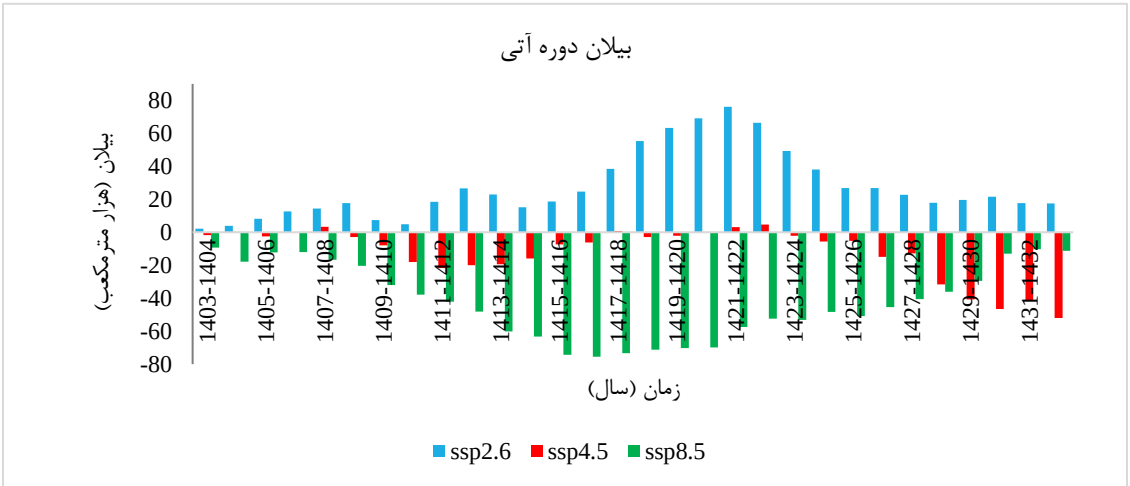
$$[(Q_{in} + Q_p) - (Q_{out} + Q_w + Q_e)t = \mp \Delta S] \quad (۱۴)$$

در این معادله Q_{in} جریان ورودی زیرزمینی از طریق مرز GHB، Q_p آب نفوذی از ریزش‌های جوی از طریق مرز تغذیه، Q_{out} جریان خروجی زیرزمینی از طریق مرز GHB، Q_w آب خروجی از چاه‌ها، Q_e تبخیر و تعرق از آبخوان، t طول دوره بیلان (سال آبی) و $\mp \Delta S$ تغییرات حجم آب ذخیره‌شده در آبخوان می‌باشد (Mirzaee et a, 2023). بیلان آبی آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد برای یک دوره ۱۲۰ ماهه (مهرماه ۱۳۸۹ تا شهریورماه ۱۳۹۹) با استفاده از کد MODFLOW محاسبه شد. شکل (۱۴) نشان‌دهنده نوسانات و مقادیر بیلان سالانه آب‌زیرزمینی آبخوان موردمطالعه طی دوره مدل‌سازی است.



شکل ۱۴. بیلان آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد در دوره مدل‌سازی
Fig. 14. The aquifer balance of the central Khorramabad plain during the modeling period

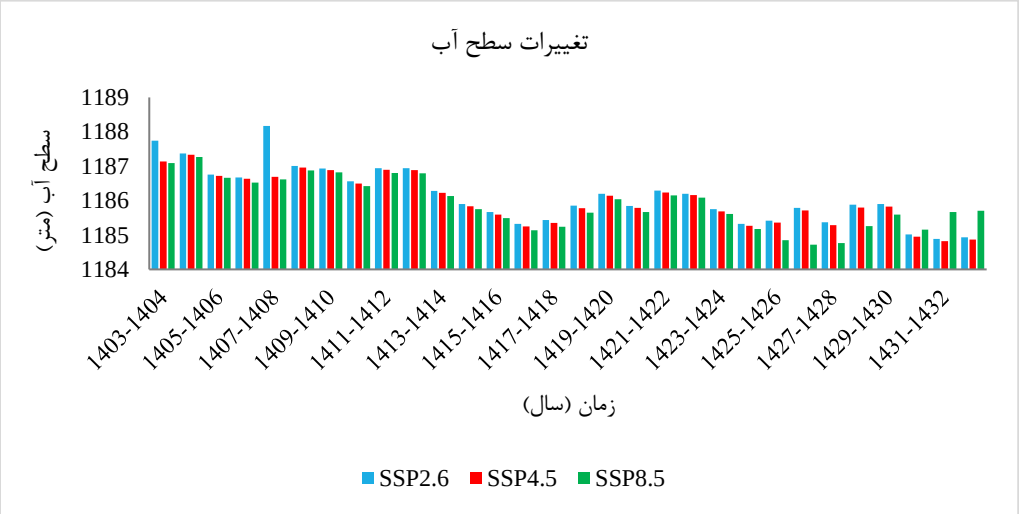
به‌منظور انجام پیش‌بینی گام‌های زمانی ۱۲۰ ماهه مدل MODFLOW به ۴۸۰ ماه افزایش یافت و به‌طور جداگانه برای هر سناریو به تمام بسته‌های مدل MODFLOW اعمال شد. طبق پیش‌بینی‌های انجام‌شده در هر سه سناریوی اقلیمی بیلان و سطح آب‌زیرزمینی طی ۳۰ سال آینده دارای نوسان بوده و روند کلی کاهشی نسبت به سال آخر دوره مدل‌سازی (سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۹) نشان می‌دهند (شکل‌های ۱۵ و ۱۶).



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

شکل ۱۵. تغییرات بیلان سالانه آبخوان طی دوره آتی تحت سناریوهای اقلیمی

Fig. 15. Changes in the annual balance of the aquifer during the future period under climate scenarios



شکل ۱۶. تغییرات میانگین سطح آب سالانه آبخوان طی دوره آتی تحت سناریوهای اقلیمی

Fig. 16. The average annual water table changes of the aquifer during the future period under climate scenarios

روند نوسانی در بیلان آبی و سطح آب‌زیرزمینی در دوره آتی تقریباً مطابق با روند بارش پیش‌بینی‌شده می‌باشد. در سناریوی ssp1.2.6 بیلان آب‌زیرزمینی مثبت(۲۷۴۹۴/۵) اما در دو سناریوی ssp2.4.5 و ssp5.8.5 منفی(۱۲۳۳۵/۳- و۴۱۸۲۳/۳-) خواهد بود. با توجه به نتایج، میانگین سطح آب‌زیرزمینی در دوره آتی نسبت به آخرین سال دوره مدل‌سازی تحت سناریوهای ssp1.2.6، و ssp5.8.5 به ترتیب ۳/۸، ۴ و ۴/۶ متر کاهش می‌یابد. ازنظر مکانی میزان کاهش سطح آب‌زیرزمینی در هر سه سناریوی اقلیمی در قسمت‌های شمالی و مرکزی بیشتر و در قسمت جنوبی کمتر از سایر مناطق دشت است.

نتیجه‌گیری

در زمینه مطالعات تغییر اقلیم با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش از میان مدل‌های GCM در حوضه آبریز خرم‌آباد مدل MRI-ESM2 بیشترین دقت را در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر دارد. پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 نشان‌دهنده کاهش بارندگی و افزایش دماهای حداقل و حداکثر در ۳۰ سال آینده نسبت به دوره پایه است. بر این اساس میانگین بارندگی ۳۰ ساله در سناریوی ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 نسبت به دوره پایه به ترتیب ۴۲/۶، ۴۷ و ۶۱/۹ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. میزان دمای حداقل و حداکثر نیز در سناریوهای فوق به ترتیب ۱/۹، ۲/۱، ۲/۴ درجه سانتی‌گراد و ۱/۸، ۱/۹، ۲/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش نشان می‌دهد. با توجه به میزان درصد تغییرات متغیرهای اقلیمی در دوره آتی نسبت به دوره پایه شاهد کاهش میزان بارش در فصول پاییز و زمستان و افزایش آن در فصل بهار و به مقدار کمتر در فصل تابستان هستیم. درصد تغییرات دمای حداقل و حداکثر نیز نشان‌دهنده افزایش دما در تمامی فصول است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

در زمینه مدل‌سازی بارش-رواناب با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل پس از واسنجی، مدل IHACRES توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی بارش رواناب در حوضه آبریز خرم‌آباد نشان داد. با توجه به نتایج واسنجی مدل IHACRES مقدار NSE برابر ۰/۷۴، RMSE برابر ۱/۴۶ و R^2 برابر ۰/۶۴ به دست آمد. طبق نتایج تحت سناریوی‌های ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 میانگین دبی ماهانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه در فصول پاییز و زمستان در هر سه سناریو کاهش و در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد افزایش نشان می‌دهد. میانگین دبی سالانه نیز در سناریوی ssp1.2.6 نسبت به دوره پایه افزایش و در دو سناریوی ssp2.4.5 و ssp5.8.5 کاهش نشان می‌دهد. میانگین دبی سالانه در دوره پایه ۱۰/۰۸ مترمکعب بر ثانیه است که مقدار آن در سناریوی‌های ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 به ترتیب ۱۲/۴۶، ۹/۶۶ و ۹/۱۴ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد.

در زمینه مدل‌سازی جریان آب‌زیرزمینی با توجه به نتایج مدل در حالت ناپایدار میزان خطای RMSE برای دوره واسنجی برابر با ۰/۵۷ متر و برای دوره صحت‌سنجی ۰/۹۶می‌باشد. بر اساس نتایج اجرای مدل MODFLOW، بیلان آبخوان دشت مرکزی خرم‌آباد در دوره مدل‌سازی مثبت می‌باشد. سال آبی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ بیشترین مقدار بیلان را در دوره مدل‌سازی به میزان ۱۴۳۲۳۰ مترمکعب دارد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌بینی‌های انجام‌شده میانگین ۳۰ ساله بیلان طی دوره آتی تحت سناریوی‌های ssp1.2.6، ssp2.4.5 و ssp5.8.5 به ترتیب ۲۷۴۹۴/۵، ۱۲۳۳۵/۳- و ۴۱۸۲۳/۳- به دست آمد. بر این اساس در سناریوی ssp1.2.6 بیلان مثبت و در سناریوهای ssp2.4.5 و ssp5.8.5 منفی است. با توجه به روند کلی کاهشی تغییرات سالانه بیلان در هر سه سناریوی اقلیمی می‌توان گفت میزان بیلان آبخوان طی دوره آتی کاهش خواهد یافت. سطح آب‌زیرزمینی نیز با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در هر سه سناریوی تغییر اقلیم روند کلی کاهشی نشان می‌دهد. طبق نتایج قسمت‌های شمالی و مرکزی دشت نسبت به سایر قسمت‌ها بیشترین کاهش و قسمت جنوبی کمترین کاهش سطح آب را نشان می‌دهند. به‌طورکلی می‌توان گفت که با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش تغییر اقلیم در دوره آتی در حوضه آبریز خرم‌آباد رخ خواهد داد. این تغییر اقلیم به‌صورت کاهش بارش و افزایش دما نمایان شده و بر منابع آب سطحی و زیرزمینی اثرگذار است به‌طوری‌که باعث کاهش رواناب سطحی و دبی رودخانه و نهایتاً کاهش بیلان و سطح آب‌زیرزمینی خواهد شد.

منابع

احمدی، م.، کمانگر، م.، ۱۴۰۲. پیش‌نگری دماهای حدی فصل سرد ایران با استفاده از یک سامانه همادی چند مدلی و سناریوهای اجتماعی-اقتصادی مدل‌های CIMP6. مجله نیوار، دوره ۴۷، شماره ۱۲۱-۱۲۰، بهار و تابستان ۱۴۰۲، صفحات ۷۱-۸۸.

احمدی، م.، معتمد وزیری، ب.، احمدی، ح.، معینی، ا.، زهتابیان، غ.ر.، ۱۳۹۹. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب آبریز کن در دوره آینده. مجله پژوهش‌های آبخیزداری. دوره ۳۳، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۲۷، تابستان ۱۳۹۹، صفحات ۸۱-۶۶.

احمدی‌فر، ر.، موسوی، س.م.، و رحیم‌زادگان.، ۱۳۹۸. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب‌زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دشت سراب). نشریه دانش آب‌وخاک، جلد ۳۰، شماره ۱، ص ۱۶۶-۱۵۳، سال ۱۳۹۹.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

رزمخواه، ه.، مسعودی، ع.، رستمی راوری، ا.، فراورویی، ع.، ۱۴۰۲، ارزیابی اثرات تغیر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی با استفاده از مدل LARS-WG، مطالعه موردی ایستگاه: آباده. مدیریت مجتمع حوضه‌های آبریز، سال سوم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، صفحات (۲۹-۱۶).

رستگار، ا.، پایمزد، ش.، ۱۳۹۸. شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر افت سطح آب‌های زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از مدل GMS، مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان، سال نهم، شماره بیست‌وششم، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۶۰ـ۴۳.

زارعی، م.، قنبرپور، م.ر.، حبیب نژاد روشن، م.، شاهدی، ک.، ۱۳۸۸. شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES (مطالعه موردی: حوضه آبریز کسیلیان). مجله علمی-پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. جلد سوم، شماره ۸.

موجرلو، ف.، فضل‌اولی، ر.، عمادی، ع.، ۱۳۹۷. کاربرد مدل IHACRES برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دبی حوضه آبریز تجن. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۱، جلد ۱۳، اردیبهشت ۱۳۹۸، ص.۱۴۱-۱۲۹.

Adimalla, N., 2019. Groundwater quality for drinking and irrigation purposes and potential health risks assessment: A case study from semi-arid region of South India. Expo. Health 11 (2), 109–123. doi:10.1007/s12403-018-0288-8.

Allen, D. M., Cannon, A. J., Toews, M. W., and Scibek, J., 2010. Variability in simulated recharge using different GCMs. Water Resour. Res. 46, W00F03. doi: 10.1029/2009WR008932

Antonellini, M., Giambastiani, B. M. S., Greggio, N., Bonzi, L., Calabrese, L., Luciani, P., 2019. Processes governing natural land subsidence in the shallow coastal aquifer of the Ravenna coast, Italy. CATENA 172, 76–86. doi:10.1016/j. catena.2018.08.019

Croke, B.F.W., Jakeman, A.J., 2004. A catchment moisture deficit module for the IHACRES rainfall-runoff model. Environ. Model. Softw. 19, 1–5. Doi:10.1016/j.envsoft.2003.09.001

Diaz-Nieto, J., Wilby, RL., 2005. A comparison of statistical down-scaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames United Kingdom. Clim Change 69(2):245–268

Ghimire, U., Shrestha, S., Neupane, S., Mohanasundaram, S., and Lorphensri, O., 2021. Climate and land-use change impacts on spatiotemporal variations in groundwater recharge: A case study of the bangkok area, Thailand. Sci. Total Environ. 792, 148370. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148370

Gu, X., Xiao, Y., Yin, S., Hao, Q., Liu, H., Hao, Z., 2018. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater in a long-term reclaimed water irrigation area, north China plain. Water 10 (9), 1209. doi:10.3390/ w10091209

Hadded, R., BenAbdelmalek, M., Nouiri, I., Tarhouni, J., 2018. ASSESMENT OF THE CLIMATE CHANGE IMPACT ON THE ZEUSS KOUTINE AQUIFER (TUNISIA) USING A WEAP-MODFLOW DSS. 3rd International Conference on Integrated Environmental Management for Sustainable Development. ISSN:1737-3638.

Hansen, D.P., Ye, W., Jakeman, A.J., Cooke, R., Sharma, P., 1996. Analysis of the effect of rainfall and streamflow data quality and catchment dynamics on streamflow prediction using the rainfall-runoff model IHACRES. Environ. Softw. 11, 193–202. doi:10.1016/S02669838(96)00048-2

Hatch-Kuri, G., and Carrillo-Rivera, J. J., 2021. Groundwater flow systems and their importance in the assessment of transboundary groundwater: The Mexico–U.S.A. Case, in Intensified land and water use: A holistic perspective of local to regional integration. Editor M. M. Alconada-Magliano (Cham: Springer International Publishing), 141.

Huang, F., Chunyu, X., Zhang, D., Chen, X., Ochoa, C. G., 2020. A framework to assess the impact of ecological water conveyance on groundwater dependent terrestrial ecosystems in arid in land river basins. Sci. Total Environ. 709, 136155. doi:10.1016/j.scitotenv. 2019.136155

Hulme, M., Jones, PD., 1994. Global climate change in the instrumental period. Environ Pollut 83(1–2):23–36

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

Jakeman, A.J., Hornberger, G.M., 1993. How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model?. Water Resources Research 29 (8), 2637-49.

Jia-wei, W., Jin-ting, H., Tuo, F., Ge, S., Fang-qiang, S., 2021, Relationship of underground water level and climate in Northwest China's inland basins under the global climate change: Taking the Golmud River Catchment as an example, Journal homepage: http://chinageology.cgs.cn.

Kim, H. S., 2015. Application of a baseflow filter for evaluating model structure suitability of the IHACRES CMD. Journal of Hydrology, 521, 543-555.

Kim, H. S., 2015. Application of a baseflow filter for evaluating model structure suitability of the IHACRES CMD. Journal of Hydrology, 521, 543-555.

Li, P., He, X., Li, Y., Xiang, G., 2019. Occurrence and health implication of fluoride in groundwater of loess aquifer in the Chinese loess plateau: A case study of tongchuan, northwest China. Expo. Health 11(2), 95–107. doi:10.1007/s12403-0180278-x

Lipczynska-Kochany, E., 2018. Effect of climate change on humic sub-stances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: a review. Sci Total Environ 640:1548–1565

Liu, J., Ma, Y., Gao, Z., Zhang, Y., Sun, Z., Sun, T., 2022. Fluoride contamination, spatial variation, and health risk assessment of groundwater using GIS: A high-density survey sampling in weifang city, north China. Environ. Sci. Pollut. Res. 29 (23), 34302–34313. doi:10.1007/s11356-021-18443-w

Lotfirad, M., Salehpoor, J., Ashrafzadeh, A., 2019. Using the IHACRES model to investigate the impacts of changing climate on streamflow in a semi-arid basin in north-central Iran. Journal of Hydraulic Structures. 2019; 5(1):27-41. DOI: 10.22055/JHS.2019. 27816.1090.

Mirzaee; S.Y., Sheikhy, P.; Chitsazan, M., 2022. The vulnerability evaluation of groundwater level rising and development of irrigation network in Mian-Ab aquifer through Analytical Hierarchical Process method and groundwater modeling, Desalination and Water Treatment, 269(269):33-46, DOI:10.5004/dwt.2022.28722

Mirzaee; S.Y., Amiri, R., Chitsazan, M., Nadri, A., 2023.Evaluation of Maydavood_Dallan Aquifer in Various Management Scenarios Using a Mathematical Model, 52(4):308-328, DOI:10.22125/IWE.2023.173303

Mookiah, M., Jha, S. K., Biswas, A., 2021. Assessment of groundwater mass balance and zone budget in the semi-arid region: A case study of palar sub-basin, Tamil nadu, India. J. Earth Syst. Sci. 130 (4), 187. doi:10.1007/s12040-021-01691-2

Nassery, H. R., Zeydalinejad, N., Alijani, F., Shakiba, A., 2021. A proposed modelling towards the potential impacts of climate change on a semi‐arid, small‐scaled aquifer: a case study of Iran. Environ Monit Assess (2021) 193:182. https://doi.org/10.1007/s10661-021-08955-w.

Qu, S., Shi, Z., Liang, X., Wang, G., Jin, X., 2021. Origin and controlling factors of groundwater chemistry and quality in the Zhiluo aquifer system of northern Ordos Basin, China. Environ. Earth Sci. 80 (12), 439. doi:10.1007/s12665021-09735-y

Raju, KS., Kumar, DN., 2018 Impact of climate change on water resources. Springer, Singapore

Sheikha‐BagemGhaleh, S., Babazadeh, H., Rezaie, H., Sarai‐Tabrizi, M., 2023. The effect of climate change on surface and groundwater resources using WEAP‐MODFLOW models. Applied Water Science (2023) 13:121. https://doi.org/10.1007/s13201-023-01923-4.

Shrestha, S., Bach, T.V., Pandey, V.P., 2016. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. Environmental Science & Policy. 61:1–13.

Taylor, R. G., Scanlon, B., Doll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., 2013. Ground water and climate change. Nat. Clim. Change 3, 322–329. doi: 10.1038/nclimate1744

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

Vaccaro, J.J., (1992). Sensitivity of groundwater recharge estimates to climate variability and change Columbia Plateau Washington, J. Geophys. Res. 97 (D3) (1992) 2821–2833.

Zhang, X., 2015. Conjunctive surface water and groundwater management under climate change. Environ. Sci. 3:59. doi: 10.3389/fenvs.2015.00059.

Zhang, Y., Dai, Y., Wang, Y., Huang, X., Xiao, Y., Pei, Q., 2021a. Hydrochemistry, quality and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater in the Nanchong area, southwestern China. Sci. Total Environ. 784, 147186. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147186

Zhang, Y., He, Z., Tian, H., Huang, X., Zhang, Z., Liu, Y., 2021b. Hydrochemistry appraisal, quality assessment and health risk evaluation of shallow groundwater in the Mianyang area of Sichuan Basin, southwestern China. Environ. Earth Sci. 80 (17), 576. doi:10.1007/s12665-021-09894-y.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

Numerical investigation of groundwater fluctuations affected by climate changes in Khorramabad River watershed

Seyed Yahya Mirzaee[1*], Roghayeh Amiri [2], Manouchehr Chitsazan [3]

1. Associate Professor, Department of Geology, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2. PhD Student, Department of Geology, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Professor, Department of Geology, Earth Sciences Faculty, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Received: 23 Oct 2023 Accepted: 22 Dec 2023

Abstract

This study investigates the effects of climate change on the Khorramabad Central Plain aquifer. The climatic variables of temperature and precipitation were studied and downscale using GCM and LARS-WG models for a 45-year base period (October 1971 to September 2015). Temperature and precipitation values were then projected for a 30-year period (October 2024 to September 2054) under the climate scenarios SSP1.2.6, SSP2.4.5 and SSP5.8.5. The rainfall runoff simulation was carried out in the Khorramabad basin using the IHACRES model. The groundwater flow in the central plain of Khorramabad was calibrated using MODFLOW code for a period of 120 months (October 2010 to September 2020). This model was validated for a period of 36 months (October 2020 to September 2023). According to the results, the values of precipitation in the future period compared to the base period will decrease by 42.6, 47 and 61.9 mm in the scenarios SSP1.2.6, SSP2.4.5 and SSP5.8.5 respectively. The annual mean of minimum and maximum temperatures increases in all three scenarios. After calibration of the IHACRES model, NSE=0.74, RMSE=1.46 and R2=0.64 were obtained. According to the results, the predicted discharge of the Khorramabad River in the future period will increase by 2.38 m3.sec in the SSP1.2.6 scenario and decrease by 0.42 and 0.94 m3.sec in the SSP2.4.5 and SSP5.8.5 scenarios, respectively, compared to the base period. The average 30-year aquifer balance under the SSP1.2.6, SSP2.4.5 and SSP5.8.5 scenarios was 27494.5, -12335.3 and -41823.3 m3, respectively. The groundwater level of the Khorramabad Central Plain aquifer will decrease in the future period.

Keywords: Central Plain of Khorramabad, Climate Change, CMIP6, IHACRES model, MODFLOW model.

Introduction

Climate change is the greatest future challenge to the hydrosphere and human society, especially in arid and semi-arid regions. Climate change can have significant impacts on regional and global surface and groundwater resources. Global climate change studies investigate and model the effects of climate change on water resources and the interactions between unconfined aquifers and the

*Corresponding author: yahyamirzaee@scu.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.4.1019262

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

atmosphere. Globally, 60% of the population depends on groundwater resources (Gintamo et al, 2021). Demand for groundwater is likely to increase as events such as floods and droughts become more frequent. According to IPCC modelling, more than 80 to 100 million people in the Middle East region will suffer from water shortages by 2050, and groundwater will also decline rapidly.Therefore, it is necessary to study the effects of climate change on groundwater resources, especially in arid and semi-arid regions. The purpose of this study is to simulate and evaluate the effects of climate change on the groundwater resources in the central Khorramabad plain using the GMS and CMIP6.

Materials and Methods

This study was carried out in three steps. The first step was to simulate climate change. To simulate climate change, first, the appropriate model was selected from among the GCM models. Then the climate data were extracted and downscaled with the LARS-WG7 model. Finally, the climatic parameters were predicted for a period of 30 years (September 254-October 2024). In the second step, the rainfall-runoff modelling was carried out with the IHACRES model. Modeling includes three steps of calibration (September 2020-October 2010), validation (September 2023-October 2020) and forecasting (September 2054-October 2024). Groundwater flow modeling, using MODFLOW, includes conceptual model preparation, numerical model selection, model design (selection of time steps, determination of boundaries and initial conditions, and selection of appropriate values for aquifer parameters and hydrological stresses), calibration in two steady and transient states (September 2020-October 2010), sensitivity analysis and validation (September 2023-October 2020). To evaluate the accuracy of the prepared models, NSE, RMSE, R^2, ME and MAE performance evaluation criteria were used.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})(P_i-\bar{P})}{\sqrt{\sum_{1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}\sqrt{(M_i-\bar{M})^2}}\right]^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i-O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}(h_0-h_s)_i}{n} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|(h_0-h_s)_i|}{n} \quad (5)$$

Results and Discussion

In the simulation of climate change, the MRI-ESM2 model was selected as the best model for predictor of climate parameters among the GCM models. The predictions were made under the climate scenario ssp1.2.6, ssp2.4.5 and ssp5.8.5 using the LARS-WG model for 30 years. According to the results, under all three climate change scenarios, the average minimum and maximum temperature in the future period will increase compared to the base period, and the average annual precipitation will decrease. In the rainfall-runoff simulation, according to the values of the model's performance criteria (table 1), the IHACRES model has an acceptable performance in predicting runoff. According to the results of applying the climate scenarios, the amount of runoff increases in the ssp1.2.6 scenario compared to the base period and decreases in the SSP2.4.5 and SSP5.8.5 scenarios. In the groundwater flow modeling after the construction of the conceptual model, different packages were defined and quantified in 120 time steps for the model. After calibration and

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]

verification, the values of the performance evaluation criteria of the model indicate the accuracy of the model (table 1). According to the results of sensitivity analysis, the Khorramabad central plain aquifer model shows the most sensitivity to the parameters of hydraulic conductivity, hydraulic conductivity heterogeneity (HANI) and river conductance. After ensuring the accuracy of the model, the prediction of watertable and water balance of the aquifer under climate scenarios for the next 30 years was carried out. According to the results, the average of water table in the future will decrease by 3.8, 4 and 4.6 meters respectively under scenarios SSP1.2.6, and SSP5.8.5 compared to the last year of the modeling period. According to the results obtained from forecasts, the 30-year average balance during the future period under SSP1.2.6, SSP2.4.5 and SSP5.8.5 scenarios was obtained as 27494.5, -12335.3 and -41823.3 m^3 respectively.

Table 1. Performance evaluation criteria of IHACRES and MODFLOW models in two periods of calibration and validation

	MODFLOW model		**IHACRES model**	
	Calibration	**Validation**	**Calibration**	**Validation**
R^2	-	-	.64	0.58
NSE	-	-	0.74	0.52
RMSE	0.52	0.92	1.46	3.23
ME	-0.01	-0.84	-	-
MAE	0.44	1.08	-	-

Conclusions

The prediction of climate variables under the SSP1.2.6, SSP2.4.5 and SSP5.8.5 scenarios show a decrease in precipitation and an increase in minimum and maximum temperatures in the next 30 years compared to the base period. The average annual runoff in the base period is 10.08 cubic meters per second, and its value in the scenarios SSP1.2.6, SSP2.4.5 and SSP5.8.5 was 12.46, 9.66 and 9.14 m3, respectively. According to the results obtained from the forecasts, the 30-year average balance during the future under the SSP1.2.6, SSP2.4.5 and SSP5.8.5 scenarios was obtained as 27494.5, -12335.3 and -41823.3 respectively. According to the results obtained in all three climate change scenarios, the water table shows a general decreasing trend. According to the results, the northern and central parts of the plain show the greatest decrease and the southern part the least decrease in water level compared to other parts.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.4.1019262]