

Research Paper

مقاله پژوهشی

**Investigating the Effects of Management Scenarios
Against Climate Change on River-Aquifer
Interaction, Case Study: Lenjanat Sub-Basin**

**بررسی اثرات سناریوهای مدیریتی در برابر تغییرات اقلیمی بر
اندرکنش رودخانه و آبخوان، مطالعه موردی: زیرحوضه لنجانات**

Mohammad Alizadeh¹, Mohammad Hossein Gol Mohammadi² and Hamid Reza Safavi^{3*}

محمد علیزاده^۱، محمدحسین گل محمدی^۲ و حمیدرضا صفوی^{۳*}

1- M.Sc. of Water Resources Management, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

3- Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*Corresponding Author, Email: hasafavi@iut.ac.ir

*نویسنده مسئول، ایمیل: hasafavi@iut.ac.ir

Received: 25/05/2021

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۷

Revised: 01/12/2021

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۱۲/۲۷

Accepted: 30/12/2021

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۳

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

Nowadays with regard to the climate change issue and also the scarcity of available and usable water, the conjunctive use of surface and groundwater resources is regarded as one of the critical approaches in water resources management. In this respect, the surface water-groundwater interaction is one of the prominent and fundamental components in conducting appropriate analysis of water resources balance and finally their management. In this paper, the Lenjanat sub-basin considered as a study area that is located in the Ghavkhouni Basin in Iran. The weighting method of GCM models under the fifth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was employed to investigate the precipitation and temperature changes due to climate change and the LARS-WG model was hired to provide the microscale output of GCM models. Investigating the surface water-groundwater interaction was carried out through the connection of WEAP and MODFLOW models. Thereafter, through the usage of climate results from the climate change scenarios of RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 and also implementing the management policies in the form of management scenarios in the future, along with the reduction of 20% and 40% in the area under cultivation, the system performance is assessed for the near future. The findings reveal increasing in temperature and precipitation in the future. The rate of surface water-groundwater interaction will be increased in the future under disparate management and climate change scenarios. Moreover, the maximum rate of the surface water-groundwater interaction is observed for the scenario following the current trend and also the scenario of climate change RCP4.5. Based on the outcomes, the higher the river flow and the groundwater abstraction, the more the aquifer drains the river and consequently increases the interaction of surface and groundwater. Therefore, the results indicated that the recharge effect of the river on the aquifer in the study area and on the other hand uncontrolled pumping of groundwater resources, conjunctive management of water resources can reduce the negative effects of groundwater scarcity, but it is necessary to reduce of cultivated areas and cultivation pattern prevented uncontrolled abstraction of groundwater in this sub-basin.

امروزه با توجه به اهمیت مسئله تغییرات اقلیم و کمبود منابع آب در دسترس و قابل استفاده، یکی از رویکردهای اساسی در مدیریت منابع آب، بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی است. در این راستا اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی یکی از مؤلفه‌های مهم و اساسی در تحلیل درست بیلان منابع آب و در نهایت مدیریت تلفیقی آن‌ها است. در این مقاله زیرحوضه لنجانات از حوضه آبریز گاوخونی که در آن اندرکنش بین رودخانه زاینده‌رود با آبخوان آن زیاد است انتخاب و برای بررسی تغییرات بارش و دما ناشی از پدیده تغییرات اقلیم از روش وزن‌دهی مدل‌های GCM تحت گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیم و برای ریزمقیاس‌سازی خروجی مدل‌های GCM از مدل LARS-WG استفاده شد. برای بررسی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی از اتصال مدل‌های WEAP و MODFLOW استفاده شد و در ادامه با استفاده از نتایج اقلیمی حاصل از سناریوهای تغییرات اقلیم RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و اعمال سیاست‌های مدیریتی در آینده نزدیک در قالب ۳ سناریوی مدیریتی ادامه روند موجود (پایه)، کاهش ۲۰ درصدی و ۴۰ درصدی سطح زیرکشت، عملکرد سیستم تلفیقی منابع آب در آینده نزدیک بررسی شد. نتایج نشان داد که در دوره آینده نزدیک، افزایش دما و بارش اتفاق خواهد افتاد. میزان اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی در آینده تحت سناریوهای مدیریتی و تغییرات اقلیم مختلف افزایش می‌یابد که تحت سناریوی ادامه روند موجود (پایه) و سناریوی تغییرات اقلیم RCP4.5، تبادلات بیشتر آب‌های سطحی و زیرزمینی اتفاق خواهد افتاد. با توجه به نتایج به‌دست آمده به‌دلیل اثرات تغذیه‌ای زیاد رودخانه بر آبخوان در محدوده مورد مطالعه و از طرف دیگر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، مدیریت تلفیقی منابع آب می‌تواند اثرات منفی کمبود منابع آب زیرزمینی را کاهش دهد. ولی نیاز است با کاهش سطوح زیرکشت و گوی کشت مناسب، مانع از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی این محدوده شود.

Keywords: Climate change, Management scenarios, Surface and groundwater interaction, WEAP-MODFLOW model.

کلمات کلیدی: تغییرات اقلیم، مدل WEAP-MODFLOW، اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی، سناریوهای مدیریتی، زیرحوضه لنجانات.

هرکدام از اجزا می‌تواند بر دیگری تاثیر بگذارد (Saha et al., 2017). درک فعل و انفعال آب‌های سطحی و زیرزمینی برای اهدافی مانند استفاده و مدیریت منابع آب، ارزیابی کیفیت آب و بررسی و تحلیل اکولوژی بسیار مهم است (Zhang et al., 2020). در طول چند دهه گذشته با توجه به نیازهای روزافزون به منابع آب و افزایش عدم اطمینان در تامین آب، نیاز به مدیریت آب سطحی و زیرزمینی به‌عنوان یک منبع واحد به‌طور پیوسته افزایش یافته است. از این‌رو، یک برنامه‌ریزی دقیق در زمینه مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی مستلزم آگاهی از نحوه و مقدار اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی است.

بررسی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی توسط Hubbert (1940) آغاز شد. تحقیقات اخیر صورت‌گرفته نشان‌دهنده این موضوع است که تغییرات اقلیم الگوهای زمانی و مکانی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Guevara et al., 2020). در چند دهه اخیر به‌دلیل وقوع پدیده تغییرات اقلیم و اثرات نامطلوب آن بر منابع آب، بیش از پیش به اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی توجه شده است. در جدول ۱ به‌طور خلاصه تعدادی از مطالعات اخیر انجام شده در زمینه اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی و تغییرات اقلیم ارائه شده است.

در این مقاله برخلاف تحقیقات گذشته که برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی از مدل‌های GCM¹ به‌صورت تکی استفاده شده است، از ترکیب مدل‌های GCM و وزن‌دهی آن‌ها که عدم قطعیت کمتری دارد استفاده شد. همچنین برای بررسی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی از اتصال مدل‌های MODFLOW و WEAP² استفاده شد.

۲- منطقه مورد مطالعه

براساس تقسیم‌بندی هیدرولوژیکی ایران، حوضه آبریز درجه دو گاوخونی با مساحت ۴۱۵۵۲ کیلومتر مربع در حوضه آبریز درجه یک فلات مرکزی که بزرگترین حوضه آبریز درجه یک ایران است، واقع شده است. حوضه آبریز گاوخونی دارای اقلیم خشک است که ۳۶ درصد سطح آنرا مناطق کوهستانی، ۶۳ درصد سطح آنرا دشت و کوهپایه و حدود ۱ درصد سطح حوضه گاوخونی را تالاب گاوخونی تشکیل می‌دهد. حوضه گاوخونی خود به ۲۱ زیرحوضه تقسیم می‌شود که منطقه مورد مطالعه در این تحقیق زیرحوضه لنجانان با مساحت ۳۳۶۵ کیلومتر مربع است.

شواهد نشان می‌دهد بشر در دوره‌ای از تغییرات آب و هوایی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو قرار گرفته است و ادامه این وضعیت ممکن است شرایط آب و هوا را در مناطق مختلف به‌طور قابل توجهی تغییر دهد (Xu, 2000). تغییرات اقلیم، منابع آب سطحی و زیرزمینی را در سطح منطقه‌ای و جهانی تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. مطابق گزارشات متعدد هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیم، (IPCC³) تغییرات اقلیم باعث افزایش دما، ذوب گسترده یخچال‌های طبیعی، بالا آمدن سطح آب دریاها و ایجاد خشکسالی و سیلاب با تواتر کمتر و شدت بیشتر می‌شود. تغییرات اقلیم غالباً به‌طور چشمگیری باعث کاهش آب در دسترس می‌شود. به‌همین دلیل نیاز است که روش‌های مدیریتی موثر برای کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیم بر منابع آب تدوین شود. امروزه استفاده تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی برای مدیریت یکپارچه منابع آب امری ضروری است. روش بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای تأمین نیاز مصرف‌کنندگان آب و مقابله با کمبود آب روشی موثر است (Zhang, 2015). در این رویکرد از هر دو منبع آب سطحی و زیرزمینی می‌توان به‌صورت هم‌زمان استفاده بهینه کرد. منابع آب سطحی و زیرزمینی در بخش‌های کمی و کیفی دچار کمترین تلفات می‌شوند و تقاضای آب را با این رویکرد می‌توان به‌صورت پایدار برآورده کرد (Harmancioglu et al., 2013).

از سوی دیگر آب‌های سطحی و زیرزمینی، دو جزء مجزا از یک منبع واحد هستند و تأثیرات بر هر یک از این دو مولفه بر میزان یا کیفیت دیگری تاثیر می‌گذارد (Abdelhalim et al., 2020). در طول چند دهه گذشته با توجه به نیازهای روزافزون به منابع آب و افزایش عدم اطمینان در تامین آب با توجه به تغییرات اقلیمی، نیاز به مدیریت آب سطحی و زیرزمینی به‌عنوان یک منبع واحد به‌طور پیوسته افزایش یافته است (Fleckenstein et al., 2010). آب‌های سطحی و زیرزمینی در پاسخ به عوامل توپوگرافی، خاک، زمین‌شناسی و اقلیم تعامل دارند (Sulis et al., 2010). تبادلات آب‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین مدیریت پایدار منابع آب نقش حیاتی در اکوسیستم رودخانه‌ای دارد. تعامل آب سطحی و زیرزمینی یک پدیده قابل مشاهده در طبیعت است. در طول فصل سیلاب، جریان سطحی باعث تغذیه آب‌های زیرزمینی شده و در فصل خشک آب‌های زیرزمینی باعث تغذیه جریان سطحی می‌شود. در نتیجه آب سطحی و آب زیرزمینی اجزای مرتبط با هم در سیستم هیدرولوژیکی هستند. در این تعامل

جدول ۱- مروری بر مطالعات صورت گرفته در زمینه اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی

نویسنده	موضوع	نتیجه
Saha et al. (2017)	اثر تغییر اقلیم بر اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت گزارش چهارم تغییر اقلیم با استفاده از مدل GSSHA	در دوره آینده نسبت به دوره پایه تغذیه رودخانه توسط آبخوان تحت سناریوی تغییر اقلیم کاهش می‌یابد.
Yang et al. (2017)	شبیه‌سازی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل TopNet	در قسمت بالای دشت رودخانه باعث تغذیه آبخوان و در قسمت پائین دشت آبخوان باعث تغذیه رودخانه می‌شود.
Chunn et al. (2019)	اثر تغییر اقلیم و برداشت آب زیرزمینی بر اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و سناریوی تغییر اقلیم RCP8.5 با استفاده از مدل لینک شده SWAT-MODFLOW	در ماه‌های مرطوب و خشک تبادل رودخانه و آبخوان بیشترین مقدار خود را دارد و فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بیش از حد از آبخوان، نسبت به تغییر اقلیم اثرات شدیدی‌تر بر تبادل رودخانه و آبخوان دارد.
Guevara et al. (2020)	تأثیر تغییر اقلیم بر الگوهای زمانی و مکانی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و سناریوهای تغییر اقلیم RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از مدل لینک شده SWAT-MODFLOW	تغییر اقلیم باعث تغییر الگوهای زمانی و مکانی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود و در آینده تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم میانگین تخلیه سالانه از آبخوان به رودخانه افزایش می‌یابد.

به دلیل استفاده در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به آزمایش‌های پمپاژی که در آبخوان لنجان صورت گرفته، ضرایب هیدرودینامیک این لایه آبدار آزاد، شامل قابلیت انتقال از ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ مترمربع در روز و میانگین آبدهی ویژه حدود ۶ درصد است. آبخوان لنجان به‌طور عمده از ارتفاعات غرب، جنوب‌غربی و جنوب محدود تغذیه و به آبخوان نجف‌آباد تخلیه می‌شود. در زیرحوضه لنجان عمده مصارف با توجه به گستردگی سطح زیر کشت و روش‌های سنتی آبیاری مربوط به بخش کشاورزی است که حدود ۸۱ درصد از کل مصارف زیرحوضه را شامل می‌شود. پس از بخش کشاورزی، بیشترین مصرف مربوط به بخش صنعت است که حدود ۱۲ درصد از کل مصارف منطقه را شامل می‌شود. کمترین مصرف مربوط به بخش شرب است که در حدود ۷ درصد از کل مصارف را شامل می‌شود. در زیرحوضه لنجان ۸۲ درصد از مساحت کشت منطقه به محصولات زراعی و مابقی آن به محصولات باغی اختصاص دارد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در کشور نشان می‌دهد.

زیرحوضه لنجان در پایین‌دست سد زاینده‌رود واقع شده است. این محدوده زیر نظر شرکت آب منطقه‌ای اصفهان قرار دارد و شهرهای مهمی هم‌چون زرین‌شهر، مبارکه، سده لنجان، زاینده‌رود، باغ بهادران و طالخنچه را در برمی‌گیرد. میانگین بارش سالانه محدوده لنجان تقریباً ۱۷۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه این محدوده ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد است. این زیرحوضه از شمال شرقی به زیرحوضه نجف‌آباد، از شرق به زیرحوضه مهیار شمالی و مهیار جنوبی، از شمال غربی به زیرحوضه بن-سامان و از جنوب به قمشه متصل است. زیرحوضه لنجان به دلیل تبادل آبخوان و رودخانه و وجود صنایع مهمی هم‌چون ذوب آهن اصفهان و فولاد مبارکه اصفهان و هم‌چنین وجود فعالیت‌های کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. مهم‌ترین رودخانه محدوده لنجان رودخانه زاینده‌رود است، این رودخانه از جهت شمال غربی وارد محدوده لنجان می‌شود و پس از طی مسافتی حدوداً ۲۴ کیلومتری از مرز شرقی خارج و وارد زیرحوضه نجف‌آباد می‌شود. آبخوان لنجان با مساحتی حدود ۱۱۹۸ کیلومترمربع

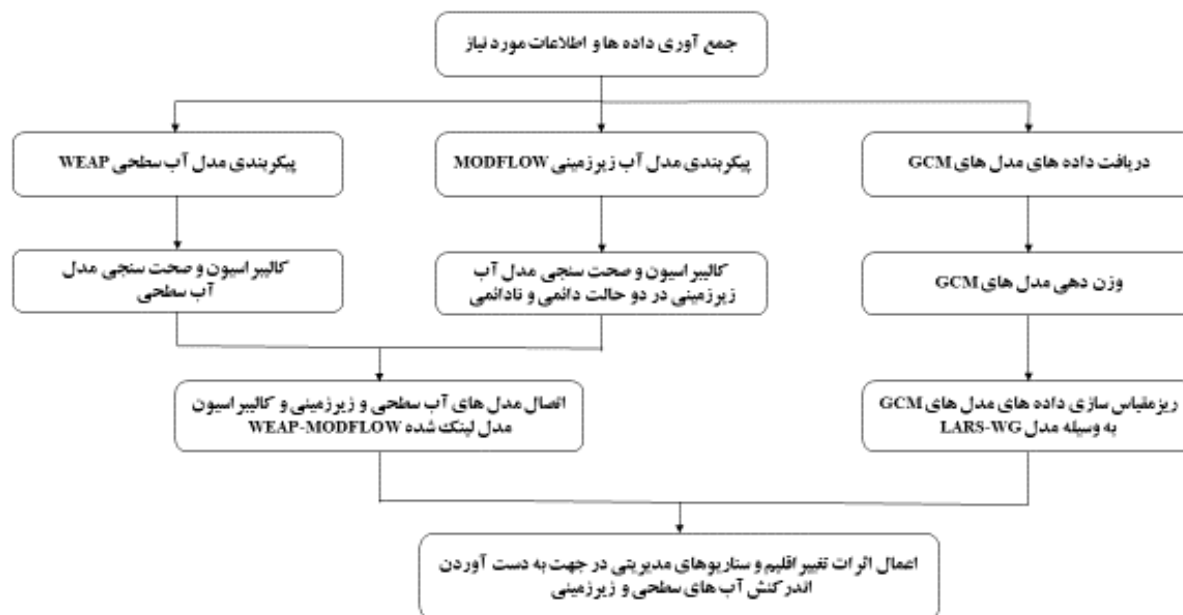


شکل ۱- موقعیت زیرحوضه لنجان و رودخانه زاینده‌رود در کشور

۳- مواد و روش‌ها

اثرات تغییر اقلیم بر اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی از ابتدای سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا پایان سال آبی ۱۴۰۴-۱۴۰۳ است. شکل ۲ روند کلی تحقیق را نشان می‌دهد.

دوره شبیه‌سازی در این تحقیق از ابتدای سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ تا پایان سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۱ است و دوره پیش‌بینی



شکل ۲- روند انجام تحقیق

۳-۱- تغییر اقلیم

(حد بالا) استفاده شد. همچنین با توجه به این‌که سناریوی RCP4.5 (حد وسط) اقلیم منطقه خاورمیانه را بیشتر پوشش می‌دهد (Fooladi et al., 2021) از این سناریو نیز استفاده شد. خروجی مدل‌های GCM مورد استفاده در این تحقیق برای دوره زمانی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) به‌عنوان دوره پایه و برای دوره زمانی (۲۰۲۰-۲۰۴۹) به‌عنوان دوره آینده دریافت شد. به‌دلیل عدم قطعیت‌های زیاد در مدل‌سازی و مدیریت آب‌های زیرزمینی نمی‌توان اقدام به ارایه سناریوهای با دوره زمانی زیاد نمود و حداکثر برای دوره زمانی ۵ ساله آتی می‌توان برنامه‌ریزی کرد. البته هرچند این دوره برای بررسی اثرات تغییر اقلیم کوتاه به‌نظر می‌رسد ولی در مجموع اثرات خود را در میزان اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی و نیز سناریوهای مدیریتی بهره‌برداری از منابع آب نشان خواهد داد.

اکثر کارشناسان آب و هوا معتقد هستند که خروجی همه مدل‌های شناخته شده توسط IPCC محتمل هستند و هرکدام از این مدل‌ها دارای نقاط ضعف و قوتی هستند. عملکرد مدل‌های GCM از نظر مکانی متفاوت بوده و عملکرد این مدل‌ها دارای عدم قطعیت هستند (Chen et al., 2017). به‌همین دلیل برای کاهش تأثیر مدل‌هایی که عملکرد ضعیفی دارند و کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی تغییرات اقلیم در آینده از روش وزن‌دهی مدل‌های GCM استفاده می‌شود (Murphy et al., 2004). در این مطالعه از ۹ مدل GCM مربوط به گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (AR5) استفاده شد که در جدول ۲ جزئیات مدل‌های مورد استفاده ارائه شده است. برای به‌دست آوردن خروجی این مدل‌ها یعنی بارش و دما در ایستگاه‌های پل‌کله و لنج، با توجه به اقلیم منطقه از سناریوهای حدی RCP2.6 (حد پایین) و RCP8.5

جدول ۲- مدل‌های اقلیمی مورد استفاده

نام مدل	قدرت تفکیک (درجه)	نام مدل	قدرت تفکیک (درجه)
CanESM2	2.8°×2.8°	IPSL-CM5A-MR	2.5°×1.25°
CCSM4	1.25°×0.94°	MPI-ESM-MR	1.875°×1.875°
CSIRO-Mk3.6.0	1.875°×1.875°	MRI-CGCM3	1.1°×1.1°
GISS-E2-R	2°×2.5°	NorESM1-M	2.5°×1.875°
HadGEM2-ES	1.25°×1.875°		

میانگین دمای خروجی هریک از مدل‌های GCM در آینده هستند. همچنین ΔAP : تغییرات بارش در آینده، ΔAP_G : میانگین ۳۰ ساله تغییرات بارش پیش‌بینی شده به‌وسیله هرکدام از مدل‌های GCM و P_{FG} : میانگین بارش خروجی هر یک از مدل‌های GCM در آینده هستند. مقادیر ΔT و ΔP محاسبه شده به‌دلیل استفاده از تمامی مدل‌ها دارای بالاترین دقت در پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم هستند.

یکی از ویژگی‌های مدل‌های GCM خاصیت بزرگ مقیاس بودن آن‌ها است، از این‌رو نتایج به‌دست آمده از خروجی آن‌ها فقط تغییرات دما و بارش را نشان می‌دهد (Semenov, 2007). بنابراین برای استفاده از خروجی GCM در تحقیقات منابع آب، باید با استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌سازی به سری‌های زمانی روزانه یا ماهانه تبدیل شوند (Hashmi et al., 2011). در این تحقیق برای ریزمقیاس‌سازی از مولد آب و هوایی LARS-WG استفاده شد. مدل LARS-WG یک مولد آب و هوایی تصادفی است که برای شبیه‌سازی سری زمانی آب و هوایی توسعه داده شده است (Semenov et al., 1997). این مدل داده‌های مشاهداتی دوره پایه و همچنین الگوهای تغییر اقلیم را به‌عنوان ورودی دریافت کرده و سری زمانی داده‌های هواشناسی شامل بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و تابش خورشید را به‌صورت روزانه تولید می‌کند. این مدل برای پیش‌بینی دوره‌های خشک و مرطوب در آینده از یک‌سری توزیع‌های نیمه تجربی استفاده می‌کند (Semenov, 2008). در این تحقیق برای بررسی کارایی مدل LARS-WG مطابق رابطه‌های (۹) و (۱۰) از ضرایب کارایی، ضریب تبیین (R^2) و ضریب ناش-ساتکلیف (E) مربوط به پارامترهای دما و بارش بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل، در هر دو ایستگاه پل کله و لنج استفاده شد.

$$R^2 = \left(\frac{cov(O,P)}{\sigma_O \sigma_P} \right)^2 \quad (9)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

که $cov(O,P)$: کواریانس داده‌های مشاهداتی نسبت به داده‌های محاسباتی، σ_O : انحراف معیار داده‌های مشاهداتی، σ_P : انحراف معیار داده‌های محاسباتی، O : داده مشاهداتی، P : داده محاسباتی و \bar{O} : میانگین داده‌های مشاهداتی هستند.

۲-۳- کالیبراسیون مدل آب زیرزمینی MODFLOW

برای کالیبراسیون مدل آب زیرزمینی به‌روش سعی و خطا ابتدا پارامترهای اولیه در مدل وارد شدند. پس از اجرای مدل، بین

برای تعیین دقت هرکدام از مدل‌های GCM در پیش‌بینی داده‌های دما و بارش از روابط (۱) و (۲) استفاده شد. این روابط نشان می‌دهند که بین خروجی مدل‌های GCM و داده‌های مشاهداتی در هر ایستگاه و در هر ماه خاص از سال چه‌قدر اختلاف وجود دارد (Zareian et al., 2017)

$$TE_G = |T_{BG} - T_{BO}| \quad (1)$$

$$PE_G = |P_{BG} - P_{BO}| \quad (2)$$

که TE_G و PE_G : مقدار خطای مطلق هر کدام از مدل‌های GCM در پیش‌بینی دما و بارش، T_{BG} و P_{BG} : مقدار خروجی دما و بارش هریک از مدل‌ها در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۷۶) و T_{BO} و P_{BO} : مقادیر میانگین ۳۰ ساله دما و بارش هستند که از داده‌های ثبت شده ایستگاه‌های هواشناسی منطقه استخراج شده‌اند.

با به‌دست آمدن خطای مدل‌های GCM و مقایسه آن‌ها، وزن این مدل‌ها از روابط (۳) و (۴) محاسبه شد.

$$WT_G = \frac{\frac{1}{TE_G}}{\sum_{i=1}^9 \frac{1}{TE_G}} \quad (3)$$

$$WP_G = \frac{\frac{1}{PE_G}}{\sum_{i=1}^9 \frac{1}{PE_G}} \quad (4)$$

که WT_G و WP_G : به‌ترتیب وزن مدل‌های GCM برای پیش‌بینی تغییرات دما و بارش هستند. وزن‌های محاسبه شده برای هر ماه به‌صورت جداگانه محاسبه شدند. به‌عبارت دیگر، به‌جای استفاده از یک وزن در طول سال، وزن‌ها به‌صورت ماهانه محاسبه شدند تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش یابد (Tao et al., 2010).

مقادیر کلی تغییرات دما و بارش در آینده تحت هرکدام از سناریوهای مورد استفاده و برای هر دو ایستگاه لنج و پل کله از روابط (۵) تا (۸) محاسبه شد.

$$\Delta T = \sum_{i=1}^9 (WT_G \times \Delta T_G) \quad (5)$$

$$\Delta T_G = T_{FG} - T_{BG} \quad (6)$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^9 (WP_G \times \Delta P_G) \quad (7)$$

$$\Delta P_G = \frac{P_{FG}}{P_{BG}} \quad (8)$$

که ΔT : تغییرات دما در آینده، ΔT_G : میانگین ۳۰ ساله تغییرات دما، پیش‌بینی شده به‌وسیله هریک از مدل‌های GCM و T_{FG} :

مشاهداتی هستند.

۴-۳- اتصال مدل‌های WEAP و MODFLOW

مدل WEAP آب زیرزمینی را به صورت یک مخزن در نظر می‌گیرد و سایر جزئیات آب زیرزمینی مانند تراز آب زیرزمینی در هر قسمت آبخوان، در مدل WEAP دیده نمی‌شوند. مدل WEAP نمی‌تواند بدون در نظر گرفتن یک مدل آب زیرزمینی جزئیات مربوط به آبخوان را مدل‌سازی کند. از سوی دیگر یکی از قابلیت‌های مدل WEAP امکان اتصال آن به مدل آب زیرزمینی MODFLOW است و با اتصال این مدل‌ها به هم می‌توان یک آبخوان را با تمام جزئیات در مدل آب سطحی WEAP مدل‌سازی نمود. هدف از اتصال این مدل‌ها این است زمانی که آب‌های سطحی و زیرزمینی به مصارف مختلف تخصیص داده می‌شوند بتوان اثر این تخصیص را بر روی اندرکنش آب‌های سطحی و زیرزمینی مشاهده نمود. پل ارتباطی که باعث لینک شدن دو مدل آب سطحی و زیرزمینی می‌شود یک Shape file است. برای این کار اقدام به تهیه یک Shape file در محیط GIS شد که در آن با هم‌پوشانی شبکه مدل آب زیرزمینی بر محدوده مطالعاتی هریک از لایه‌های تعریف شده در مدل WEAP به سلول متناظر که آن سطح را پوشش می‌دهد، متصل می‌شود. در این Shape file سلول متناظر با کاربری اراضی، سلول چاه‌ها، سلول نیازهای موجود، سلول‌های متناظر با محدوده آبخوان، سلول‌های رودخانه‌ای و ... همگی تعریف شدند. با اتصال صحیح دو مدل آب سطحی و زیرزمینی، داده‌ها و نتایج به صورت پویا بین دو مدل با هم گردش می‌کنند. شکل ۳ نحوه گردش داده‌ها و نتایج بین دو مدل را نشان می‌دهد (Sieber et al., 2011).

۵-۳- کالیبراسیون مدل WEAP-MODFLOW

پس از اتصال این دو مدل، مدل لینک شده در محل ایستگاه‌های هیدرومتری پل کله و دیزیچه واقع در ابتدا و انتهای بازه رودخانه در این محدوده مطالعاتی در محیط WEAP از مهر ۱۳۸۶ تا شهریور سال ۱۳۹۲ مورد کالیبراسیون قرار گرفت. کالیبراسیون مدل لینک شده از این رو اهمیت دارد که که مقادیر رواناب، ارتباط متقابل آبخوان و رودخانه، مقادیر برگشت آب، تلفات و نفوذ به خوبی مدل می‌شوند. پس از لینک شدن مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی برای ارزیابی نتایج کالیبراسیون و تطابق آنها با داده‌های مشاهداتی از ضرایب خطای ضریب تبیین (R^2)، ضریب تاثیر ناش-ساتکلیف (E) و شاخص تطابق (d) استفاده شد که روابط آن‌ها در بخش ۳-۱ و ۳-۳ ارائه شد استفاده شد.

مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تراز آب مقایسه انجام می‌شود. در صورتی که اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی وجود داشته باشد پارامترها اصلاح شده و مدل مجدداً اجرا می‌شود. این روند تا جایی که مقادیر مشاهداتی و محاسباتی تراز آب اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای نداشته باشند ادامه می‌کند. مدل آب زیرزمینی در این تحقیق با استفاده از داده‌های ثبت شده پیرومتری مربوط به ۳۲ چاه مشاهداتی، برای پارامترهای اصلی مدل یعنی هدایت هیدرولیکی و آبدی ویژه کالیبره شد. از ضرایب خطای؛ متوسط خطا ME^4 ، متوسط خطای مطلق MAE^5 و مجذور میانگین مربعات خطا $RMSE^6$ برای ارزیابی عملکرد مدل آب زیرزمینی استفاده شد.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i \quad (11)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)_i| \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2} \quad (13)$$

که h_m : بار هیدرولیکی مشاهداتی، h_s : بار هیدرولیکی محاسباتی و n : تعداد چاه‌های مشاهداتی است.

۳-۳- کالیبراسیون مدل آب سطحی WEAP

مدل WEAP به دو روش اتوماتیک و دستی قابل کالیبراسیون است. در روش اتوماتیک برای کالیبراسیون از ابزار تخمین پارامتر PEST در مدل WEAP مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ابزار برای کاربر این امکان را فراهم می‌کند تا به طور اتوماتیک و ضمن تعریف پارامترها به دو صورت جداگانه و تجمعی کالیبراسیون مدل را انجام دهد (Sieber et al., 2011). کالیبراسیون مدل به روش دستی با استفاده از تخمین داده‌های ورودی و خروجی رودخانه‌ها بین ایستگاه‌های هیدرومتری مختلف پس از در نظر گرفتن مصارف، ورودی‌ها و خروجی‌های ثبت شده با استفاده از تعادل جرمی آب انجام می‌شود (Lane et al., 2015). برای ارزیابی نتایج کالیبراسیون و تطابق آن‌ها با داده‌های مشاهداتی علاوه بر ضرایب خطای ضریب تبیین R^2^7 و ضریب تاثیر ناش-ساتکلیف E^8 از شاخص تطابق d^9 نیز استفاده شد.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (14)$$

که O : داده مشاهداتی، P : داده محاسباتی و \bar{O} : میانگین داده‌های



شکل ۳- چرخش داده‌ها در مدل لینک شده

۴- نتایج

۴-۱- نتایج تغییر اقلیم

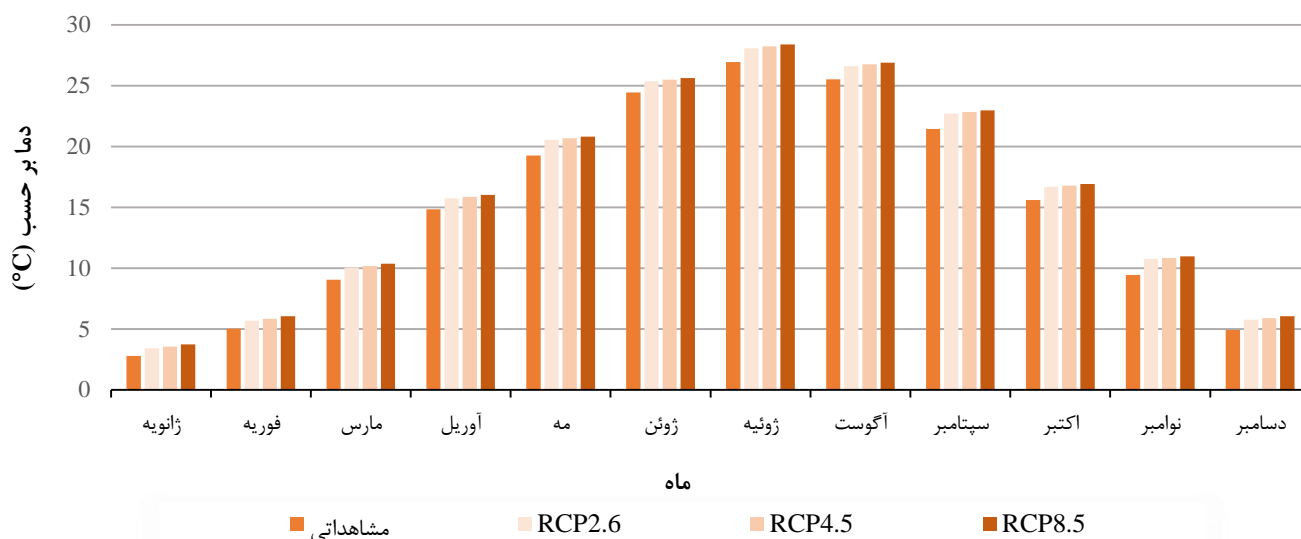
است که در دوره آینده نسبت به دوره پایه، تحت سناریوهای اقلیمی مورد استفاده، افزایش دما و بارش اتفاق خواهد افتاد. روند تغییرات دمای میانگین در محدوده مورد مطالعه در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۷۶) و دوره آینده (۲۰۴۹-۲۰۲۰) تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است بیشترین افزایش دما تحت سناریو RCP8.5 و کمترین افزایش دما تحت سناریو RCP2.6 اتفاق می‌افتد. میانگین دمای دوره آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب حدود ۱/۳، ۱/۱۵ و ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش میانگین دمای ماهانه دوره آینده نسبت به دوره پایه در ماه مه تحت سناریو RCP8.5 رخ می‌دهد در این ماه میانگین دما حدود ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. روند تغییرات بارش در دوره پایه نسبت به دوره آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم در شکل ۵ نشان داده شده است، همان‌طور که از شکل مشخص است تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب بیشترین و کمترین افزایش بارش مشاهده می‌شود. میانگین بارش دوره آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای RCP4.5، RCP8.5 و RCP2.6 به ترتیب حدود ۵، ۱۰ و ۶ درصد افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش میانگین بارش ماهانه دوره آینده در ماه دسامبر تحت سناریو RCP4.5 رخ می‌دهد. در این ماه بارش حدود ۳/۶ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

قبل از اعمال سناریوهای تغییر اقلیم برای آینده، عملکرد مدل LARS-WG از طریق مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت که برای این کار از ضرایب تبیین (R^2) و ناش-ساتکلیف (E) استفاده شد. همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است، مقادیر به‌دست آمده برای ضرایب تبیین (Santhi et al., 2001) و تاثیر ناش-ساتکلیف (Moriasi et al., 2007) حاکی از این است که مدل عملکرد بسیار خوبی دارد.

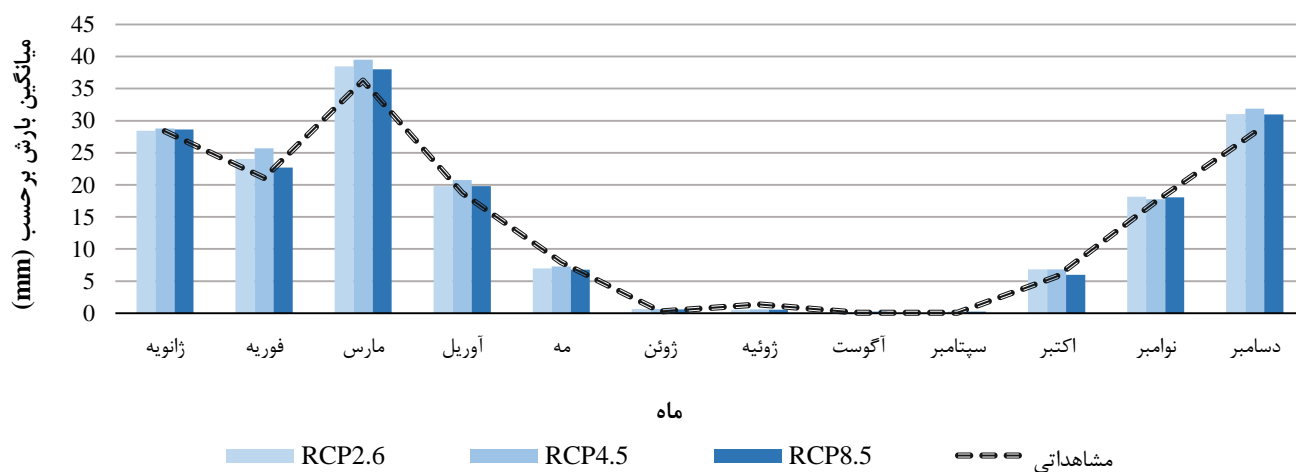
جدول ۳- نتایج ارزیابی عملکرد مدل ریزمقیاس‌سازی LARS-WG

نام ایستگاه	ضرایب خطا		پارامتر هواشناسی
	R^2	E	
پل کله	۰/۹۹۵	۰/۹۹۸	دما
	۰/۹۸۶	۰/۹۸۸	بارش
لنج	۰/۹۹۸	۰/۹۹۶	دما
	۰/۹۸۵	۰/۹۸۷	بارش

پس از پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در ایستگاه‌های پل کله و لنج، به‌دلیل این که دو ایستگاه اختلاف مقادیر و نیز اختلاف ارتفاع اندکی نسبت به هم داشتند از روش میانگین‌گیری ریاضی استفاده شد. نتایج به‌دست آمده در بخش تغییر اقلیم حاکی از آن



شکل ۴- تغییرات میانگین دما تحت اثر تغییر اقلیم



شکل ۵- تغییرات میانگین بارش تحت اثر تغییر اقلیم

۳-۴- نتایج کالیبراسیون مدل آب سطحی WEAP

در بخش ۳-۳ عملکرد مدل در مرحله کالیبراسیون براساس ضرایب خطای تبیین (R^2)، ضریب ناش-ساتکلیف (E) و شاخص تطابق (d) بررسی شد. کالیبراسیون مدل در محل ایستگاه‌های هیدرومتری پل کله و دیزیچه به صورت دستی انجام شد. مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های R^2 ، E و d در جدول ۵ ارائه شده است. مقادیر به دست آمده برای ضرایب خطای ضریب تبیین (Santhi et al., 2001)، ضریب تاثیر ناش-ساتکلیف (Moriasi et al., 2007) و شاخص تطابق (Willmott, 1981)، حاکی از عملکرد بسیار خوب مدل در مرحله کالیبراسیون است.

جدول ۵- نتایج عملکرد مدل WEAP در مرحله کالیبراسیون

ضرایب خطا			نام ایستگاه
d	R^2	E	
۰/۹۵	۰/۸۸	۰/۹۶	پل کله
۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۹۱	دیزیچه

۲-۴- نتایج کالیبراسیون مدل آب زیرزمینی MODFLOW

مدل آب زیرزمینی برای پارامترهای اصلی آن یعنی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، کالیبره شد. برای نمایش دقت کالیبراسیون انجام شده و هم‌چنین قابل قبول بودن کارکرد مدل آب زیرزمینی از ضرایب خطای متوسط خطا (ME)، متوسط خطای مطلق (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. مقادیر این پارامترها در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده کالیبراسیون به درستی انجام شده است و نتایج به دست آمده از مدل آب زیرزمینی قابل قبول است.

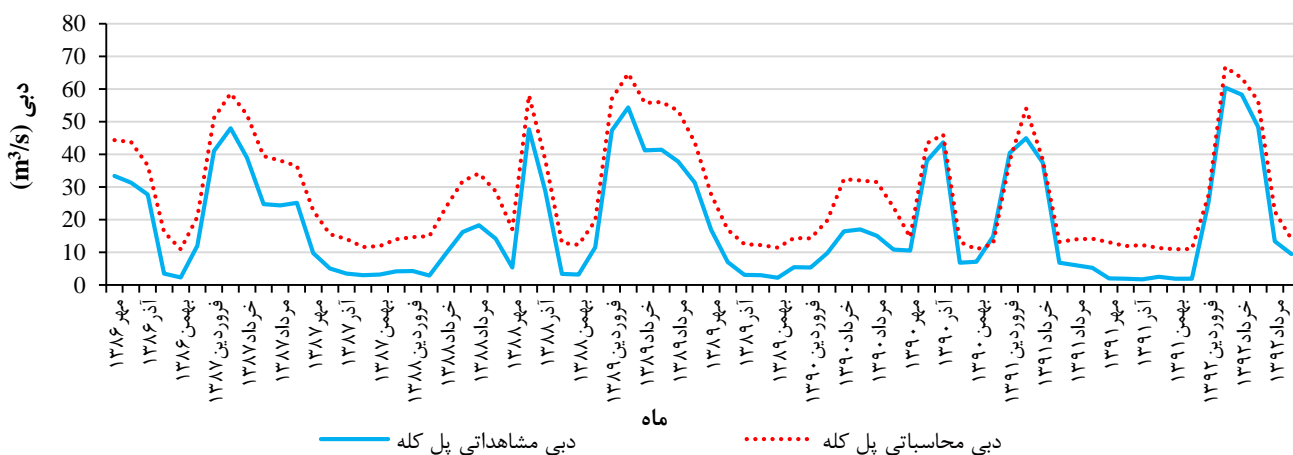
جدول ۴- نتایج عملکرد مدل MODFLOW در مرحله کالیبراسیون

ضرایب خطا		
RMSE	MAE	ME
۲/۰۱	۱/۳۲	-۰/۳

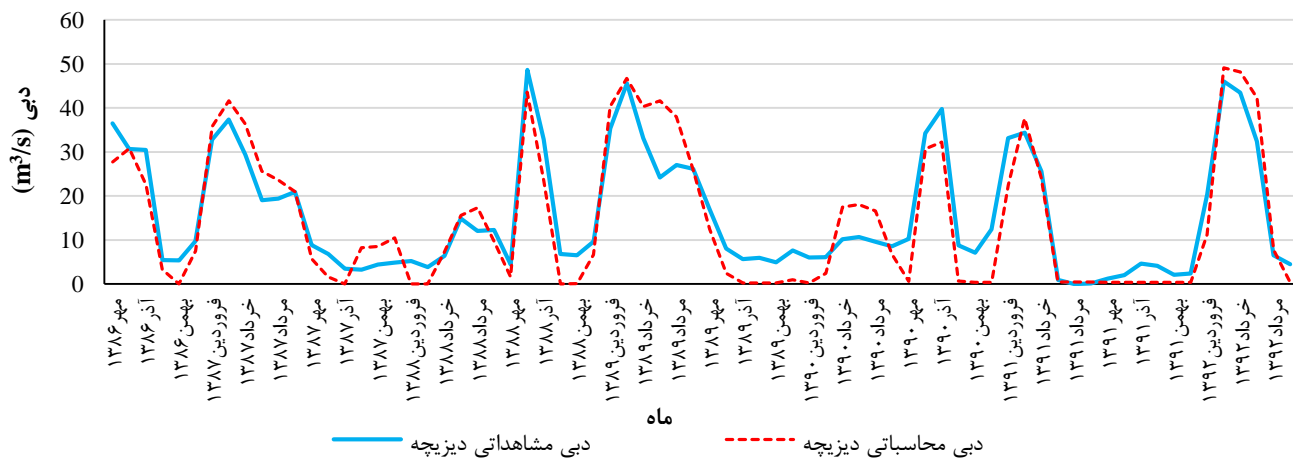
۴-۴- نتایج کالیبراسیون مدل WEAP-MODFLOW

پس از اطمینان از عملکرد قابل قبول مدل‌های آب زیرزمینی و آب سطحی و اتصال مدل WEAP و MODFLOW، به منظور اطمینان از نتایج مدل WEAP-MODFLOW از مقایسه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های هیدرومتری پل کله و دیزبچه با استفاده از ضرایب خطای ضریب تبیین (R^2)، ضریب تاثیر ناش-ساتکلیف (E) و شاخص تطابق (d) استفاده شد. نتایج

این ضرایب در جدول ۶ ارائه شده است. در شکل‌های ۶ و ۷ مقدار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در ایستگاه‌های پل کله و دیزبچه مشخص شده است. با توجه به مقادیر به دست آمده برای ضرایب خطای، ضریب تبیین (Santhi et al., 2001)، ضریب تاثیر ناش-ساتکلیف (Moriassi et al., 2007) و شاخص تطابق (Willmott, 1981) عملکرد مدل مناسب و نتایج مدل قابل اعتماد است.



شکل ۶- دبی مشاهداتی و محاسبه شده ایستگاه پل کله



شکل ۷- دبی مشاهداتی و محاسبه شده ایستگاه دیزبچه

جدول ۶- نتایج عملکرد مدل WEAP-MODFLOW در مرحله

کالیبراسیون

نام ایستگاه	ضرایب خطا		
	d	R^2	E
پل کله	۰/۹۲	۰/۶۷	۰/۹۵
دیزبچه	۰/۹۶	۰/۸۳	۰/۸۶

۴-۳- نتایج اندرکنش رودخانه و آبخوان

پس از اتصال مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی و اطمینان از کالیبره بودن مدل، بررسی و محاسبه اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی انجام شد. اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی به عوامل

مختلفی مانند جریان رودخانه، سطح ایستابی آب زیرزمینی، الگوی کشت به‌ویژه در حاشیه رودخانه و نوع آبیاری زمین‌های کشاورزی بستگی زیادی دارد. آبخوان لنجانان از طریق عواملی هم‌چون نفوذ از بارش، نفوذ از رودخانه زاینده‌رود و نفوذ از آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی، صنعت و شرب تغذیه می‌شود. نتایج به دست آمده حاکی از این است که بیشترین تبادل رودخانه زاینده‌رود و آبخوان لنجانان در سال پنجم دوره شبیه‌سازی و کمترین تبادل رودخانه زاینده‌رود و آبخوان لنجانان در سال اول دوره شبیه‌سازی اتفاق افتاده است. در بررسی میزان اندرکنش رودخانه و آبخوان به‌صورت ماهانه مشخص شد که در فصل بهار

رودخانه و آبخوان به صورت سالانه برحسب میلیون مترمکعب ارائه شده است.

که رودخانه بیشترین حجم از جریان را دارد مقدار اندرکنش نسبت به سایر فصول بیشتر است. در جدول ۷ مقدار اندرکنش

جدول ۷- میزان اندرکنش رودخانه و آبخوان در دوره شبیه سازی (میلیون مترمکعب)

سال آبی	۱۳۸۶-۱۳۸۷	۱۳۸۷-۱۳۸۸	۱۳۸۸-۱۳۸۹	۱۳۸۹-۱۳۹۰	۱۳۹۰-۱۳۹۱	۱۳۹۱-۱۳۹۲
حجم اندرکنش	۳۴/۹۹	۵۵/۰۶	۷۵/۴۵	۹۴/۷۳	۹۵/۸۳	۸۱/۳۳

کاهش یافتند. همان طور که در جدول ۸ مشخص است در آینده میزان اندرکنش آب های سطحی و زیرزمینی نسبت به دوره گذشته افزایش می یابد. عمده مصارف در زیرحوضه لنجان، در بخش کشاورزی هستند که بخش اعظم نیاز خود را از آب زیرزمینی دریافت می کنند. به همین دلیل تحت سناریوی ادامه روند موجود بیشترین افت آبخوان اتفاق خواهد افتاد. از طرفی هرچه افت آب زیرزمینی بیشتر باشد مقدار تخلیه رودخانه توسط آبخوان بیشتر خواهد بود. هم چنین با توجه به این که مقدار بارش در آینده تحت سناریوی RCP4.5 بیشترین افزایش را دارد، جریان رودخانه تحت این سناریو حداکثر مقدار خود را خواهد داشت. بنابراین تحت سناریوی مدیریتی ادامه روند موجود و سناریوی تغییر اقلیم RCP4.5 بیشترین حجم اندرکنش رودخانه و آبخوان رخ می دهد. با توجه به مطالب بیان شده حداکثر مقدار اندرکنش سالانه در سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۴ تحت سناریوی ادامه روند موجود و سناریوی RCP4.5 اتفاق می افتد که مقدار آن ۱۳۲ میلیون مترمکعب است. براساس نتایج مشخص شد که اندرکنش در فصل بهار که جریان رودخانه بیشترین مقدار خود را دارد، حداکثر مقدار خود را دارد.

۴-۴- پیش بینی وضعیت اندرکنش رودخانه و آبخوان در آینده

پس از تدوین مدل شبیه سازی، می توان از پیش بینی اندرکنش رودخانه و آبخوان و روند تغییرات آن در آینده تحت تاثیر تغییر اقلیم و نیز عوامل مؤثر دیگر هم چون مصارف مختلف، الگوی کشت و سیاست های محتمل در آینده و در نهایت برای اتخاذ تصمیم های مدیریتی بهتر برای استفاده تلفیقی مناسب از منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده کرد. در این تحقیق از سه سناریوی ادامه روند موجود، کاهش ۲۰ درصدی سطح زیرکشت و کاهش ۴۰ درصدی سطح زیرکشت در زیرحوضه لنجان استفاده شد. در سناریوی ادامه روند موجود فرض بر آن است که میزان برداشت مصارف و همچنین سطح زیر کشت و الگوی کشت منطقه بدون تغییر باقی می ماند و فقط ورودی های حوضه تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 تغییر می یابند. در سناریوهای بعدی که مورد بررسی قرار گرفتند سطح زیر کشت به ترتیب ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش یافت. به تبع آن به طور میانگین مصارف نیازهای کشاورزی موجود در منطقه که بخش عمده آب موجود در منطقه را مصرف می کنند نیز ۲۰ و ۴۰ درصد

جدول ۸- مقادیر اندرکنش سالانه در دوره پیش بینی تحت سناریوهای مختلف (میلیون مترمکعب)

سناریوی مدیریتی					
۱- ادامه روند موجود					
سال آبی	۱۳۹۹-۱۴۰۰	۱۴۰۰-۱۴۰۱	۱۴۰۱-۱۴۰۲	۱۴۰۲-۱۴۰۳	۱۴۰۳-۱۴۰۴
سناریوهای اقلیمی					
RCP2.6	۱۱۸/۸	۱۲۲/۲	۱۲۵/۹	۱۲۹/۸	۱۳۱/۵
RCP4.5	۱۱۹/۲	۱۲۲/۵	۱۲۶/۴	۱۳۰/۴	۱۳۲
RCP8.5	۱۱۸/۷	۱۲۲	۱۲۵/۷	۱۲۹/۶	۱۳۱/۳
۲- کاهش ۲۰ درصدی سطح زیرکشت					
RCP2.6	۱۱۶/۴	۱۱۶/۹	۱۲۳/۴	۱۲۶/۶	۱۲۸/۴
RCP4.5	۱۱۷/۱	۱۱۷/۴	۱۲۴/۱	۱۲۷/۸	۱۲۹/۴
RCP8.5	۱۱۶/۳	۱۱۶/۸	۱۲۳/۱	۱۲۶/۴	۱۲۸/۱
۳- کاهش ۴۰ درصدی سطح زیرکشت					
RCP2.6	۱۱۴/۴	۱۱۵	۱۲۱/۷	۱۲۴/۳	۱۲۶/۸
RCP4.5	۱۱۵/۲	۱۱۵/۸	۱۲۲/۷	۱۲۵/۸	۱۲۷/۲
RCP8.5	۱۱۴/۳	۱۱۴/۸	۱۲۱/۶	۱۲۴/۲	۱۲۶/۴

- Abdelhalim, A., Sefelnasr, A., and Ismail, E., (2020), "Response of the interaction between surface water and groundwater to climate change and proposed megastructure", *Journal of African Earth Sciences*, 162(2), 103723.
- Chen, J., Brissette, F.P., Lucas-Picher, P., and Caya, D., (2017), "Impacts of weighting climate models for hydro-meteorological climate change studies", *Journal of Hydrology*, 549(6), 534-546.
- Chunn, D., Faramarzi, M., Smerdon, B., and Alessi, D. S., (2019), "Application of an integrated SWAT-MODFLOW model to evaluate potential impacts of climate change and water withdrawals on groundwater-surface water interactions in West-Central Alberta", *Water*, 11(1), 110.
- Fleckenstein, J.H., Krause, S., Hannah, D.M., and Boano, F., (2010), "Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics", *Advances in Water Resources*, 33(11), 1291-1295.
- Fooladi, M., Golmohammadi, M.H., Safavi, H.R., and Singh, V.P., (2021), "Fusion-based framework for meteorological drought modeling using remotely sensed datasets under climate change scenarios: Resilience, vulnerability, and frequency analysis", *Journal of environmental management*, 297(21), 113283.
- Guevara-Ochoa, C., Medina-Sierra, A., and Vives, L., (2020), "Spatio-temporal effect of climate change on water balance and interactions between groundwater and surface water in plains", *Science of the Total Environment*, 722(24), 137886.
- Harmancioglu, N.B., Barbaros, F., and Cetinkaya, C.P., (2013), "Sustainability issues in water management", *Water Resources Management*, 27(6), 1867-1891.
- Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., and Melville, B.W., (2011), "Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(4), 475-484.
- Hubbert, M.K., (1940), "The theory of ground-water motion", *The Journal of Geology*, 48(8, Part 1), 785-944.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L., (2007), "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations", *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Murphy, J.M., Sexton, D.M., Barnett, D.N., Jones, G.S., Webb, M.J., Collins, M., and Stainforth, D.A., (2004), "Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations", *Nature*, 430(7001), 768-772.
- Saha, G.C., Li, J., Thring, R.W., Hirshfield, F., and Paul, S.S., (2017), "Temporal dynamics of groundwater-surface water interaction under the effects of climate

بدلیل عدم قطعیت‌های زیاد در زمینه شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی که منشا آن عدم وجود داده‌های کافی در تعیین ضرایب هیدرودینامیکی و نیز میزان دقیق تغذیه و تخلیه از این منابع و همچنین عدم قطعیت‌های مدیریتی ناشی از برداشت‌های بدون مجوز و یا بیش از پروانه بهره‌برداری از چاه‌ها است، نمی‌توان در دوره‌های بلند مدت بیش از حداکثر ۵ سال اقدام به برنامه‌ریزی نحوه مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی نمود. لذا در این مقاله دوره ۵ ساله آبی را مبنای بررسی‌ها قرار داده، هرچند این دوره برای بررسی اثرات تغییر اقلیم کوتاه به نظر می‌رسد، ولی در مجموع اثرات خود را در میزان اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی و نیز سناریوهای مدیریتی بهره‌برداری از منابع آب نشان داده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که در آینده نزدیک در محدوده مطالعاتی افزایش تبادل رودخانه و آبخوان رخ می‌دهد و هرچه که تراز آب زیرزمینی به‌دلیل برداشت‌های بی‌رویه از آبخوان بیشتر افت کند، میزان آبی که از رودخانه به آبخوان نشت پیدا می‌کند افزایش می‌یابد. کاهش جریان رودخانه به‌سمت پایین‌دست باعث به‌وجود آمدن مشکلاتی از جمله عدم تأمین نیازهای پایین‌دست، عدم تأمین نیاز محیط‌زیستی رودخانه و تالاب بین‌المللی گاوخونی و نیز فرونشست زمین در اراضی پایین دست این زیرحوضه خواهد شد. بنابراین، با توجه به افزایش حجم اندرکنش سالانه در آینده و همچنین برای جلوگیری از به‌وجود آمدن مشکلات ذکر شده و جلوگیری از افت بیش از حد تراز آبخوان، باید در زمینه کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی با تغییر الگوهای کشت و نیز سطوح زیر کشت برنامه‌ریزی و اقدام نمود.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- General Circulation Model
- 2- Water Evaluation and Planning System
- 3- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 4- Mean Error
- 5- Mean Absolute Error
- 6- Root Mean Squared Error
- 7- Coefficient of Determination
- 8- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)
- 9- Index of Agreement



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.

- change: A case study in the Kiskatinaw River Watershed, Canada”, *Journal of Hydrology*, 551(24), 440-452.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., and Hauck, L.M., (2001), “Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources 1”, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169-1188.
- Semenov, M.A., (2007), “Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 144(1-2), 127-138.
- Semenov, M.A., & Barrow, E.M., (1997), “Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios”, *Climatic change*, 35(4), 397-414.
- Semenov, M.A., (2008), “Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator”, *Climate Research*, 35(3), 203-212.
- Sieber, J., and Purkey, D., (2011), *Weap: Water evaluation and planning system*, User guide, Somerville, MA: Stockholm Environment Institute, US Center”, http://weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf.
- Sulis, M., Meyerhoff, S.B., Paniconi, C., Maxwell, R.M., Putti, M., and Kollet, S.J., (2010), “A comparison of two physics-based numerical models for simulating surface water-groundwater interactions”, *Advances in Water Resources*, 33(4), 456-467.
- Tao, F., and Zhang, Z., (2010), “Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: quantify the relative contributions of adaptation options”, *European Journal of Agronomy*, 33(2), 103-116.
- Willmott, C.J., (1981), “On the validation of models”, *Physical Geography*, 2(2), 184-194.
- Xu, C. Y., (2000), “Modelling the effects of climate change on water resources in central Sweden”, *Water Resources Management*, 14(3), 177-189.
- Yang, J., McMillan, H., and Zammit, C., (2017), “Modeling surface water-groundwater interaction in New Zealand: model development and application”, *Hydrological Processes*, 31(4), 925-934.
- Zareian, M.J., Eslamian, S., and Safavi, H.R., (2015), “A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale”, *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3-4), 497-516.
- Zhang, D., Han, D., and Song, X., (2020), “Impacts of the Sanmenxia dam on the interaction between surface water and groundwater in the lower Weihe River of Yellow River watershed”, *Water*, 12(6), 1671.
- Zhang, X., (2015), “Conjunctive surface water and groundwater management under climate change”, *Frontiers in Environmental Science*, 3(1), 59.