

## بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دشت سراب)

رقیه احمدی فر<sup>۱\*</sup>، سید مرتضی موسوی<sup>۲</sup>، مجید رحیم‌زادگان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۲/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۰۱

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

۲- استادیار گروه مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: RogaiehAhmadifar@gmail.com

### چکیده

در سال‌های اخیر پدیده تغییر اقلیم منجر به تغییرات قابل توجهی در منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است. با توجه به این‌که آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین در هر منطقه می‌باشد بررسی اثرات تغییر اقلیم در آب‌های زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، اثر تغییر اقلیم بر نوسانات آبخوان دشت سراب در آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰ میلادی)، تحت تأثیر مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی (AOGCM) بررسی شده است. بدین منظور، داده‌های تغییر اقلیم حاصل از ۱۶ مدل جفت شده جوی - اقیانوسی تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 در دو دوره زمانی ۱۹۸۶-۲۰۱۵ و ۲۰۲۱-۲۰۵۰ برای منطقه مورد مطالعه وزن‌دهی شدند. سپس بر مبنای وزن مدل‌های اقلیمی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط آن‌ها در دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰، تغییرات بارندگی و دما در سطوح احتمال مختلف ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد محاسبه گردید. برای ریزمقیاس‌نمایی مقادیر بارش و دما در دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰، از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری مدل مولد آب و هوا (LARS-WG) استفاده شد. با استفاده از شبکه عصبی NARX و مدل MODFLOW مقادیر رواناب روزانه و نوسانات سطح ایستابی آبخوان نیز تخمین زده شد. نتایج نشان داد، در بیشتر نقاط آبخوان، تحت هر دو سناریو سطح ایستابی نسبت به سال مبنا (۲۰۰۱) از ۰ تا ۱۰ متر کاهش خواهد یافت که این روند کاهشی، تحت سناریوی B1 بیشتر از سناریوی A2 است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان، تغییر اقلیم، شبکه عصبی، مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی، MODFLOW

## Investigating the Effects of Climate Change on Groundwater (Case Study: Sarab Plain)

R Ahmadifar<sup>\*1</sup>, SM Mousavi<sup>2</sup>, M Rahimzadegan<sup>2</sup>

Received: 12/03/2018 Accepted: 22/05/2019

<sup>1</sup>M.Sc. Graduate, Water Resources Management, Civil Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Assist. Prof., Water Resources Department, Civil Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* Corresponding Author, Email: RogaiehAhmadifar@gmail.com

### Abstract

Climate change phenomenon has caused considerable changes in surface water and groundwater resources during the recent years. Groundwater is one of the important resources of the fresh water in every region and it is very important to investigate the effect of climate change on it. In this study, the effect of climate change on water table changes in Sarab plain aquifer in the future time period of 2021-2050 was investigated using Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM). For this means, the climate change data resulted from 16 models of AOGCM-AR4 under the emission scenarios of A2 and B1 during two time periods of 1986-2015 and 2021-2050 were weighted for the studied area. Based on the weights of the climatic models and the amounts forecasted data by them for the future time period, the variations of the precipitation and air temperature were calculated with the probabilities of 10, 50 and 90 percent. The statistical model of LARS-WG was used to downscale the amounts of precipitation and temperature for the future time period. Using the precipitation-runoff models of NARX and MODFLOW the daily magnitudes of the runoff and water table fluctuations were estimated too. According to the results, water table will be declined about 0.0 to 10 meters comparing to the year 2001 in most of the aquifer areas under both scenarios. This decreasing trend is more visible under the scenario B1 comparing to the scenario A2.

**Keywords:** Aquifer, Atmosphere-Ocean General Circulation Model, Climate change, MODFLOW, Neural Network

### مقدمه

در زمینه تاثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی انجام شده است (ناصری و سلامی ۲۰۱۶). پدیده تغییر اقلیم اثرات قابل توجهی بر سامانه‌های مختلف نظیر منابع آب، کشاورزی، بهداشت و صنعت دارد. افزایش پیوسته گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت‌های بشر باعث گرم‌تر شدن هوا، تغییر در الگوی بارش و ذوب برف می‌شود که نتیجه آن تغییر در دسترسی به آب شرب و کشاورزی است (آی پی سی سی ۲۰۰۷).

آب زیرزمینی یکی از منابع طبیعی ارزشمند بوده که پشتیبان سلامت بشر، توسعه اقتصادی و تنوع زیست‌محیطی است. این منابع آبی با توجه به دلایل متعددی مانند در دسترس بودن گسترده و مستمر، آسیب‌پذیری کمتر، کیفیت طبیعی عالی و همچنین ظرفیت ذخیره زیاد نسبت به آب‌های سطحی به عنوان یک منبع مهم آب در سراسر جهان مورد توجه می‌باشد (تاد و لاری ۲۰۰۵). طبق گزارش چهارم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۱</sup> بسیار ناامید کننده است که هنوز مطالعات محدودی

<sup>1</sup> - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

به صورت قابل توجهی کاهش، دما به اندازه ۰/۳۸ درجه سلسیوس افزایش و تغذیه منابع آب زیرزمینی از طریق نفوذ به طور متوسط ۳۰ درصد کاهش یافته است. گودمیاکس و همکاران (۲۰۰۹)، جهت ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی از مدل هیدرولوژیکی سطحی و زیرسطحی در مقیاس بزرگ استفاده کردند. در این تحقیق، شبیه‌سازی تغییر اقلیم از سناریوهای شش مدل اقلیم منطقه‌ای<sup>۳</sup> از سناریو انتشار A2 برگرفته شده است. برای سناریوی تغییر اقلیم مورد نظر، شبیه‌سازی جریان‌های سطحی و زیرسطحی نشان می‌دهد که افزایش چشمگیری در سطوح آب‌زیرزمینی صورت می‌گیرد و میزان آب سطحی تا سال ۲۰۸۰ بین ۹ تا ۳۳ درصد افزایش می‌یابد. اویباندو و ادونگا (۲۰۱۰)، با بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر عمق سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی در آفریقای غربی نشان دادند که خشکسالی‌های اخیر، تاثیر معنی‌داری بر سطح آب زیرزمینی حوضه رودخانه‌های سنگال، نیجر و ولتای باسین داشته است. علاوه بر این، اکوسیستم و اقتصاد حداقل ۱۳ تا ۱۶ کشور منطقه از تاثیرات منفی این پدیده مصون نمانده‌اند. کاهش بارندگی در این مناطق موجب کاهش تغذیه رودخانه‌ها و در نتیجه کاهش میزان آب شیرین شده که این شرایط، موجب پایین آمدن سطح سفره آب‌های زیرزمینی و تشدید فرایند خشکسالی گردیده است. دوگان و ازگینک آکسیو (۲۰۱۳) ارتباط بین روند عناصر اقلیمی (تغذیه متاثر از بارش، دما و شاخص نوسانات اقیانوس اطلس شمالی<sup>۴</sup>) با تراز آب در ناحیه تربعلی ترکیه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که عناصر اقلیمی با روند مشابهی سطح آب‌زیرزمینی را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

ناصری و سلامی (۲۰۱۶) به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر آبخوان دشت همدان در ایران، از مدل‌های مختلف اقلیمی تحت دو سناریوی A2 و B1 استفاده و تغییرات بارش و دما را در سطوح احتمال ۱۰، ۵۰، ۹۰

پیش‌بینی‌های اخیر نشان می‌دهد که ترکیب اثرات افزایش جمعیت، گرم شدن زمین و تغییر کاربری اراضی<sup>۱</sup> در آینده‌ای نزدیک باعث وابستگی بیشتر مردم جهان به منابع آب‌های زیرزمینی در تأمین نیازهای عمومی می‌شود (هال و همکاران ۲۰۰۸). منابع آب زیرزمینی از طریق تعامل مستقیم با منابع آب‌های سطحی و غیرمستقیم به وسیله‌ی روند تغذیه با پدیده تغییر اقلیم در ارتباط است. تغییرات دما و بارش در آینده، مقدار تغذیه آبخوان‌ها را تحت تاثیر قرار خواهد داد. همچنین تغییر در تراز سطح آب‌های زیرزمینی، اولین واکنش آبخوان‌های آزاد به تغییرات میزان دما و بارندگی است (گرین و همکاران ۲۰۱۱).

تشخیص رفتار آبخوان به‌ازای تغییر در پارامترهای موثر بر آن مانند بارندگی، دما، جریان آب سطحی، تبخیر-تعرق و برداشت آب به مدیران این امکان را می‌دهد تا بتوانند در شرایط خاص تصمیمات موثری را اتخاذ کنند (معروف‌پور و همکاران ۲۰۱۸). در سال‌های اخیر، مطالعات انجام‌شده در زمینه بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی رشد چشمگیری داشته است. اکارت و آلبریچ (۲۰۰۲) اثرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب‌های زیرزمینی و جریان آبراهه‌ای در مرکز اروپا را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، تاثیرات تغییر اقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی و جریان آبراهه‌ای در محدوده ارتفاعات پایین اروپا توسط مدل SWAT<sup>۲</sup> تحت دو سناریوی تغییر اقلیم مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه نشان داده شد که در دوره زمانی ۲۰۹۰-۲۰۷۰ در فصل تابستان میانگین تغذیه ماهانه آب زیرزمینی و جریان آبراهه‌ای تا ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. داسی و ترنفلیا (۲۰۰۸) به بررسی اثر تغییر اقلیم در رژیم هیدرولوژیکی منطقه کامپانیا در جنوب ایتالیا، در اثر تغییرات بارش و دما پرداختند. در این پژوهش نشان داده شد که در یک دوره بیست ساله، بارش منطقه

4 - North Atlantic Oscillation Index (NAO)

1 - Land Use

2 - Soil and Water Assessment Tool

3 - Regional Climate Model (RCM)

شمالی و  $۴۷^{\circ}۵۴' - ۴۷^{\circ}۱۵'$  طول شرقی در دامنه جنوبی توده آتشفشانی سبلان و دامنه شمالی رشته کوه بزقوش قرار گرفته است. منابع آب سطحی دشت را رودخانه‌های بیوک چای، تاجیارچای، رازلیق چای و وانق چای تشکیل می‌دهند که از ارتفاعات اطراف سرچشمه می‌گیرند و سپس به هم پیوسته و با نام آجی چای از شرق به غرب جریان یافته و به دریاچه ارومیه می‌ریزند (شکل ۱). میانگین بارندگی درازمدت سالانه در دشت سراب  $۳۰۱/۶$  میلی‌متر و نوع اقلیم دشت، براساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، نیمه خشک سرد برآورد شده است. با توجه به نتایج مطالعات انجام شده، مقدار مصرف آب در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی در منطقه  $۲۹۰/۲$  میلیون مترمکعب در سال می‌باشد که از این مقدار  $۱۴۵/۲$  میلیون مترمکعب در سال از منابع آب زیرزمینی و  $۱۴۵$  میلیون مترمکعب از منابع آب سطحی برداشت می‌شود (شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی ۲۰۰۹).

#### داده‌های مورد استفاده

اطلاعات هواشناسی شامل باران‌سنجی، داماسنجی از ایستگاه سینوپتیک سراب، اطلاعات مربوط به آبدهی رودخانه آغیمون چای از ایستگاه هیدرومتری سهزاب، لاگ پیزومترها و لاگ حفاری چاه‌های اکتشافی در منطقه، ضریب انتقال‌پذیری<sup>۲</sup>، ضخامت اشباع آبخوان، آمار سطح آب در ۱۰ چاه مشاهده‌ای موجود در منطقه و اطلاعات مربوط به چاه‌های پمپاژ دشت از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی تهیه گردید. مقادیر دما و بارش ماهانه مربوط به مدل‌های AOGCM انتخابی، تحت دو سناریوی انتشار A1 و B2، مربوط به چهارمین گزارش ارزیابی آی پی سی سی، در سال ۲۰۰۷، از مرکز توزیع داده (<http://www.ipcc-data.org>) استخراج گردید.

درصد محاسبه کردند. مقدار تغییرات بارش و دما در سطح احتمال ۹۰ درصد برای سناریوی انتشار A2، به دلیل ایجاد افت حداکثر سطح آب زیرزمینی به‌عنوان بحرانی‌ترین شرایط استفاده شد. نتایج نشان داد که در دوره آتی (۲۰۴۵-۲۰۱۵)، سطح ایستابی آبخوان منطقه به میزان ۲۸ متر افت خواهد داشت. انصاری و همکاران (۲۰۱۵)، به منظور بررسی اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی، در سفید دشت چغاور واقع در استان چهارمحال و بختیاری از مدل‌های سه بعدی جفت شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو<sup>۱</sup> تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 استفاده کردند. نتایج نشان داد که بارندگی در دوره آتی تحت سناریوهای A2 و B1 به ترتیب ۳۳ و ۲۶ درصد افزایش و میزان تجمعی تغذیه آب‌های زیرزمینی سناریوی A2 نسبت به B1 حدود ۱۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش خواهد داشت.

با توجه به اهمیت اثرات تغییر اقلیم بر منابع تامین آب شیرین به خصوص منابع آب زیرزمینی، هدف این مطالعه، بررسی تغییر اقلیم و اثرات آن بر تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی در دشت سراب است.

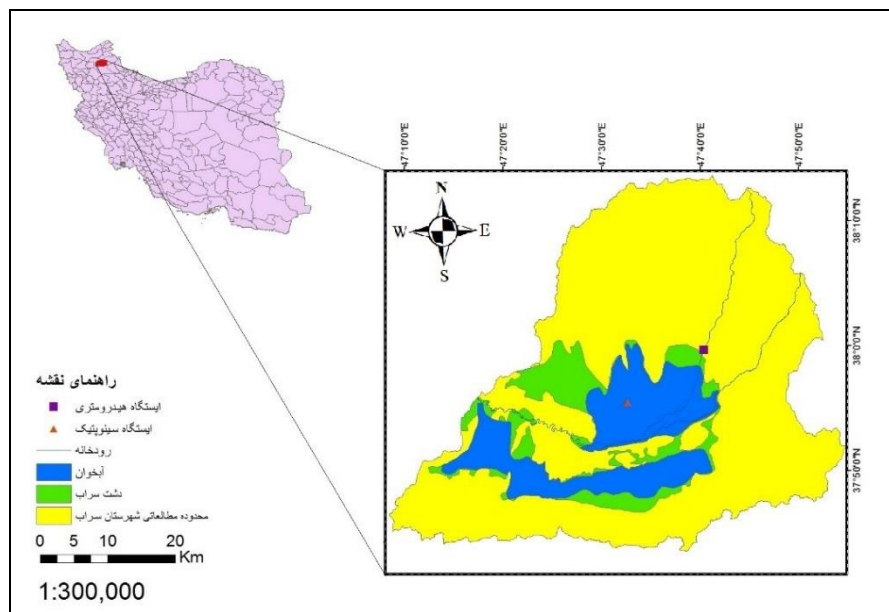
#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، منطقه مورد مطالعه، آبخوان دشت سراب واقع در استان آذربایجان شرقی می‌باشد. آب‌زیرزمینی دشت سراب در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت شهرستان سراب مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدوده مطالعاتی سراب که همان حوضه آبریز دشت سراب می‌باشد  $۲۲۴۲$  کیلومتر مربع وسعت دارد که  $۱۱۴۷$  کیلومتر مربع آن مناطق کوهستانی و  $۱۰۹۵$  کیلومتر مربع آن مربوط به دشت‌های منطقه سراب می‌باشد. دشت سراب با مختصات جغرافیایی  $۳۸^{\circ}۱۲' - ۳۷^{\circ}۴۴'$  عرض

<sup>2</sup> - Transmissivity

<sup>1</sup> - Atmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM)



شکل ۱- موقعیت دشت و آبخوان مورد مطالعه (منطقه سراب).

## روش تحقیق

اولین گام در مطالعات تغییر اقلیم، انتخاب مدل عمومی جو می‌باشد. مطابق بررسی‌های انجام شده برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی، استفاده از چندین مدل اقلیمی و سناریوی انتشار، مناسب‌تر است (هولمن و همکاران ۲۰۱۲). نتایج مطالعات روشن و همکاران (۲۰۱۳) نشان می‌دهد که در ایران، هیچ کدام از مدل‌های اقلیمی، به خوبی نمی‌توانند شرایط واقعی تغییرات دما و بارش را شبیه‌سازی نمایند و با قاطعیت نمی‌توان ادعا کرد که کدام یک از مدل‌ها از قابلیت بهتری در شبیه‌سازی مولفه‌های دما و بارش برخوردار است، ولی استفاده ترکیبی از مدل‌ها، نسبت به استفاده از خروجی تک تک مدل‌های GCM موثرتر است. در بیشتر مطالعات، از تعداد اندکی از مدل‌های اقلیمی استفاده شده و این به دلیل تعداد زیاد مدل‌های اقلیمی (حدود ۲۵ مدل)، سناریوهای انتشار و روش‌های متعدد ریزمقیاس نمای داده‌های اقلیمی است (کانن ۲۰۰۸). در این مطالعه، به

منظور تخمین عمق آب زیرزمینی در دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) تحت تاثیر سناریوهای تغییر اقلیم، از اطلاعات ۱۶ مدل سه بعدی تلفیقی جو - اقیانوس چرخشی جو (AOGCM) استفاده شد. مشخصات مدل‌های انتخابی در جدول ۱ آمده است. مراحل اصلی جهت تحقق این مهم عبارتند از:

- ۱- تعیین مدل‌های اقلیمی مناسب برای منطقه مورد مطالعه و تجزیه و تحلیل تغییرات ماهانه دما و بارندگی منطقه با استفاده از خروجی مدل‌های GCM تحت سناریوهای A2 و B1
- ۲- ریز مقیاس‌نمایی تصادفی<sup>۱</sup> به منظور تولید سری زمانی روزانه داده‌های بارش و دما توسط مدل مولد آب و هوای LARS-WG
- ۳- پیش‌بینی رواناب سطحی در منطقه به وسیله شبکه عصبی مصنوعی<sup>۲</sup>
- ۴- پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه با مدل MODFLOW

<sup>1</sup> - Stochastic Downscaling

<sup>2</sup> - Artificial Neural Network (ANN)

جدول ۱- مشخصات مدل‌های AOGCM استفاده شده در مطالعه حاضر.

| نام مدل          | قدرت تفکیک در جو       | قدرت تفکیک در اقیانوس  | نام مدل         | قدرت تفکیک در جو        | قدرت تفکیک در اقیانوس |
|------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| BCCR-BCM2.0,2005 | T63(1.9° × 1.9°), L31  | 0.5°- 1.5° × 1.5°, L35 | GFDL-CM2.1      | 2.0° × 2.5°, L24        | 0.3°-1.0° × 1.0° L50  |
| CCSM3            | T85(1.4° × 1.4°), L26  | 0.3°- 1° × 1°, L40     | GISS-ER         | 4° × 5°, L20            | 4° × 5°, L13          |
| CGCM3(T63)       | T63(~1.9° × 1.9°), L31 | 0.9° × 1.4°, L29       | HadCm3          | 2.5° × 3.75°, L19       | 1.25° × 1.25°, L20    |
| CNRM-CM3         | T63(~1.9° × 1.9°), L45 | 0.5°-2° × 2°, L31      | IPSL-CM4        | 2.5° × 3.75°, L19       | 2° × 2°, L31          |
| CSIRO-MK3.5      | T63(~1.9° × 1.9°), L18 | 0.8° × 1.9°, L31       | INMCM3.0        | 5.0° × 4.0°, L21        | 2.5° × 2°, L33        |
| ECHAM5/MPI-OM    | T63(~1.9° × 1.9°), L31 | 1.5° × 1.5°, L40       | MRI-CGM2.3.2a   | T42(~2.8° × 2.8°), L30  | 0.5°-0.7° × 1.1°, L40 |
| ECHO-G           | T30(~3.9° × 3.9°), L19 | 0.5°- 2.8° × 2.8°, L20 | MIROC3.2 medres | T106(~1.1° × 1.1°), L56 | 0.2° × 0.3°, L47      |
| GFDL-CM2.0       | 2.0° × 2.5°, L24       | 0.3°-1.0° × 1.0°       | NCARPCM         | 5.0° × 4.0°, L21        | 2.5° × 2°, L33        |

## تولید سناریوهای تغییر اقلیم

در ابتدا مقادیر دما و بارش ماهانه برای دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۸۶) و دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) استخراج گردید. مقادیر «اختلاف» برای دما و «نسبت» برای بارندگی بین میانگین ماهانه ۳۰ ساله در دوره آتی و دوره شبیه‌سازی شده پایه توسط همان مدل مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شود. این مقادیر، بیانگر میانگین درازمدت ۳۰ ساله تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه می‌باشند (گوهری و همکاران ۲۰۱۵). در اینجا سناریوی تغییر اقلیم دوره آتی نسبت به دوره پایه برای هر مدل AOGCM تحت دو سناریوی انتشار A2 و B1 به طور جداگانه ایجاد شد.

$$\Delta T_i = (\bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base, i}) \quad [1]$$

$$\Delta P_i = \frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}} \quad [2]$$

در روابط فوق  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای میانگین ۳۰ ساله برای هر ماه  $1 \leq i \leq 12$  و  $\bar{T}_{GCM, fut, i}$  میانگین ۳۰ ساله دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و  $\bar{T}_{GCM, base, i}$  میانگین ۳۰ ساله دما و بارش شبیه‌سازی

شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هر ماه می‌باشد.

## تحلیل عدم قطعیت و تعیین احتمال

در مطالعات منابع آب و مباحث تغییر اقلیم، نتایج نهایی می‌تواند از منابع مختلف عدم قطعیت، نظیر عدم قطعیت خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو، روش‌های ریزمقیاس نمایی و سناریوهای انتشار و یا عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی متأثر شود. برای بیان عدم قطعیت، روش‌های متفاوتی وجود دارد و تابع توزیع چگالی احتمال، یکی از این روش‌ها است. پس از تعیین محدوده سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش ماهانه، هر یک از سناریوها بر مبنای روش میانگین دما یا بارش، مطابق رابطه ۳ اندازه‌گیری و وزن دهی می‌شوند (سلامی و همکاران ۲۰۱۵).

$$W_{ij} = \frac{\left( \frac{1}{\Delta d_{ij}} \right)}{\sum_{j=1}^{16} \left( \frac{1}{\Delta d_{ij}} \right)} \quad [3]$$

در این رابطه،  $W_{ij}$  وزن یا احتمال رخداد GCM شماره  $j$  ام در ماه  $i$  ام و  $\Delta d_{ij}$  اختلاف بین مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل  $j$  ام در دوره پایه و مقدار اندازه‌گیری شده در ایستگاه مشاهداتی در ماه  $i$  ام است.

توزیع احتمال، تابع توزیع تجمعی<sup>۱</sup> تهیه گردید. با استفاده از این تابع، مقدار متغیرهای اقلیمی دما و بارش ( $\Delta P$ ) و ( $\Delta T$ ) در سه سطح احتمال ۱۰، ۵۰، ۹۰ درصد استخراج شد.

### ریز مقیاس نمایی داده‌های دما و بارش

یکی از مشکلات عمده در استفاده از مدل‌های AOGCM در مطالعات اقلیمی در سطوح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی و قدرت تفکیک پایین این مدل‌هاست. از این رو باید خروجی این مدل‌ها قبل از استفاده در مطالعات اقلیمی، ریز مقیاس شوند. روش ریزمقیاس نمایی آماری مدل مولد آب و هوا (LARS-WG)، یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی آب و هوا است که برای تولید بارش روزانه، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود (سمنو و همکاران ۲۰۰۲). در مطالعه حاضر، به منظور واسنجی و ارزیابی مدل LARS-WG از داده‌های روزانه مشاهداتی مربوط به دوره زمانی ۲۰۰۷-۱۹۸۷ استفاده شد و در ادامه برای ریز مقیاس نمایی داده‌های دما و بارش منطقه مورد مطالعه، سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش، سطح ریسک ۵۰ درصد (به‌عنوان یک سطح ریسک متوسط) در قالب سناریوهای خاص مدل LARS-WG در اختیار این مدل قرار گرفت و سری‌های زمانی دما و بارش برای منطقه در دوره آینده به دست آمد.

### پیش‌بینی رواناب سطحی در منطقه به‌وسیله شبکه عصبی مصنوعی

با توجه به این‌که سیستم آبخوان-رودخانه دو جز لاینفک محسوب می‌شوند و رودخانه‌ها در مسیر حرکت خود با منابع آب زیرزمینی در ارتباط هستند (عصری و همکاران ۲۰۱۷)، بنابراین جهت بررسی تراز ایستابی آب زیرزمینی، پیش‌بینی رواناب لازم است. فرآیند بارش-رواناب در یک حوضه، پدیده‌ای پیچیده و غیرخطی است.

به منظور تولید سری‌های زمانی دما و بارش برای دوره آتی، میانگین ماهانه بلندمدت دما و بارش مورد نیاز است؛ بنابراین تابع توزیع احتمال گسسته سناریوهای تغییر اقلیم، باید به تابع توزیع پیوسته تبدیل شود (گوهری و همکاران ۲۰۱۵). با توجه به تعداد محدود  $\Delta P$  و  $\Delta T$  (۱۶ عدد برای هر ماه) نمی‌توان توزیع مناسبی برای آن‌ها برازش داد؛ بنابراین با توجه به خصوصیات تابع توزیع بتا، روشی با استفاده از این توزیع، به‌کاررفته است که با در نظر داشتن محدودیت‌های موجود بتواند تحلیل مناسب و قابل قبولی ارائه دهد. تابع توزیع بتا توسط دو پارامتر شکل و نیز حد بالا و پایین داده‌ها تعریف و با تغییر دادن دو پارامتر شکل براساس چولگی داده‌ها تعیین می‌شود. فرم عمومی تابع بتا به صورت رابطه ۴ است (سلامی و همکاران ۲۰۱۵).

$$f(x) = \frac{(x-a)^{p-1}(b-x)^{q-1}}{\beta(p,q)(b-a)^{p+q-1}} \quad p, q > 0 \quad [4]$$

در این رابطه،  $p$  و  $q$  پارامترهای شکل و مقیاس،  $a$  و  $b$  به ترتیب حد پایین و بالای داده‌ها،  $x$  مقدار متغیر و  $\beta(p,q)$  تابع بتا است. مقادیر  $p$  و  $q$  از طریق روش حداکثر درست‌نمایی جهت رسیدن به بهترین توزیع، تغییر داده می‌شوند و همچنین می‌توان از طریق مقدار مجموع مربعات خطا (SSE) برای تعیین چگونگی برازش‌های تابع توزیع بتا استفاده کرد (رابطه ۵).

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad [5]$$

در این رابطه  $y_i$  مقدار واقعی داده و  $\hat{y}_i$  مقدار تخمین زده‌شده توسط تابع بتا و  $n$  تعداد مدل‌های اقلیمی است که در این تحقیق، برابر ۱۶ است. اندازه کوچک مجموعه داده‌ها می‌تواند بر چگونگی برازش تابع توزیع بتا اثر بگذارد که

در واقع یک محدودیت برای این نوع ارزیابی که ناشی از دسترسی به تعداد محدود مدل‌های GCM است، محسوب می‌شود (گوهری و همکاران ۲۰۱۵). بعد از تهیه تابع‌های

1- Cumulative Distribution Function (CDF)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_e - \bar{Q}_e)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_o)^2 (Q_e - \bar{Q}_e)^2}} \quad [6]$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_e)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - \bar{Q}_e)^2} \quad [7]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_e)^2}{N}} \quad [8]$$

### مدل آب زیرزمینی MODFLOW

در میان برنامه‌های مختلف مدل‌سازی، برنامه‌ای که بیش‌ترین کاربرد را در زمینه کمیت آب زیرزمینی داشته است، برنامه MODFLOW می‌باشد که بر دو معادله اساسی داری و بقای جرم استوار بوده و از ترکیب این دو معادله می‌تواند به حل عددی دست یابد. این برنامه، معادلات دیفرانسیل حاکم را به صورت تفاضل محدود مرکز - بلوک براساس شرایط اولیه، شرایط مرزی، تنش‌های وارد بر سیستم و پارامترهای تعریف‌شده، در قالب بسته‌های نرم‌افزاری مختلف، برای آبخوان‌های محصور، نیمه محصور و آزاد در حالت ماندگار و ناماندگار حل می‌کند (مک دونالد و هر باق ۱۹۸۸). در این تحقیق، برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی از مدل MODFLOW در نرم‌افزار PMWIN 5.3 استفاده و معادله حاکم بر جریان، در محیط متخلخل اشباع در فرم سه بعدی به صورت رابطه ۹ نوشته شد.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [9]$$

در معادله فوق،  $K_x$ (m/day)،  $K_y$ (m/day) و  $K_z$ (m/day) مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهات سه‌گانه مختصات کارتیزین،  $h$ (m) بار هیدرولیکی،  $S_s$ ( $m^{-1}$ ) ضریب نخیره ویژه، و  $t$ (day) زمان است. طول زمان مدل‌سازی، یک دوره ۱۳ ساله از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۳

مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی تأثیرگذار در میزان رواناب یک منطقه، میزان بارش، دمای هوا، فشار هوا، سرعت و جهت باد و رطوبت هوا است. به علل مختلفی نظیر کمبود اطلاعات ثبت‌شده و عدم دانش کافی در مورد فرایند فیزیکی، تبدیل و تأثیر این پارامترها به مقادیر جریان، مورد توجه‌ترین متغیرهای هواشناسی در پیش‌بینی‌های بلندمدت مقادیر بارش و دمای هوا بوده‌اند (کارآموز و عراقی‌نژاد ۲۰۱۴). در این راستا از داده‌های بارش و دما (به دلیل موثر بودن این پارامترها بر میزان رواناب)، برای شبیه‌سازی رواناب با استفاده از شبکه عصبی دینامیکی در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. در این تحقیق، پس از بررسی انواع مدل‌های شبکه عصبی، شبکه عصبی NARX (ایجاد اتصالات برگشتی از خروجی لایه میانی و اعمال آن با تاخیر در ورودی‌ها) به دلیل بیشتر بودن ضریب همبستگی<sup>۲</sup> و پایین بودن ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> به عنوان بهترین نوع شبکه جهت ساخت مدل بارش-رواناب انتخاب شد. برای آموزش شبکه از داده‌های دما، بارش و رواناب مربوط به سال‌های ۲۰۰۷-۱۹۸۷ به صورت روزانه استفاده و بهترین ورودی‌ها با استفاده از نتایج آزمون‌های آماری و برقراری رگرسیون تعیین شد. پس از آموزش و ساخت مدل بارش-رواناب، خروجی‌های مدل LARS-WG (بارش و دمای پیش‌بینی‌شده برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱) تحت سناریوهای اقلیمی A2 و B1 به عنوان ورودی به مدل، معرفی و رواناب آتی در ایستگاه هیدرومتری سه‌زاب واقع در رودخانه آغیمون‌چای با استفاده از مدل، شبیه‌سازی شد. برای سنجش عملکرد مدل شبکه عصبی با داده‌های مشاهده‌ای، می‌توان از معیارهای ضریب همبستگی، نش-ساتکلیف<sup>۴</sup> و RMSE استفاده کرد (روابط ۸-۶). در این روابط،  $Q_o$ ( $m^3/s$ ) نشان‌دهنده مقدار رواناب مشاهداتی،  $Q_e$ ( $m^3/s$ ) مقدار رواناب پیش‌بینی‌شده و  $N$  تعداد کل داده‌ها هست.

<sup>3</sup> - Root Mean Square Error (RMSE)

<sup>4</sup> - Nash-Sutcliffe (NS)

<sup>1</sup> - Nonlinear autoregressive network with exogenous inputs

<sup>2</sup> - Correlation Coefficient (r)



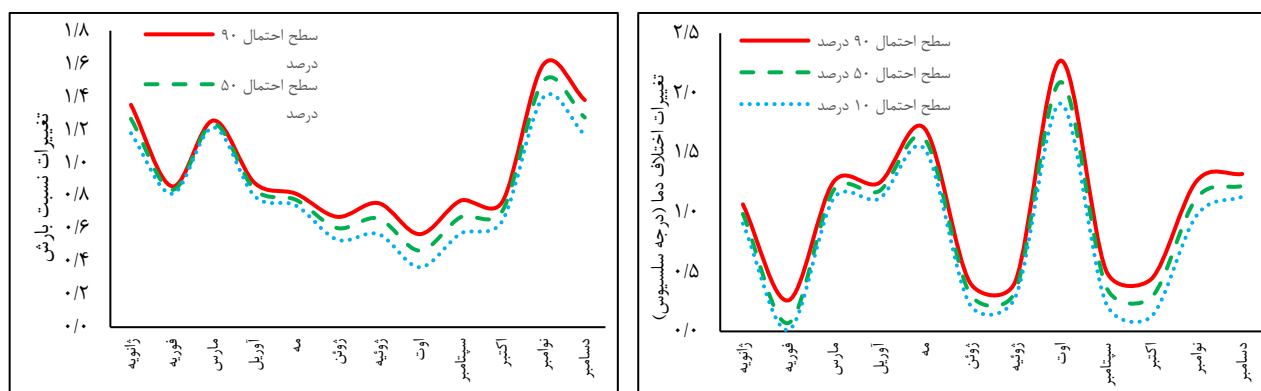
صحت‌سنجی و تأیید مدل، برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر سطح آب زیرزمینی در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱، داده‌های حاصل مربوط به رواناب سطحی و بارش تحت دو سناریوی A2 و B1 به مدل اعمال و اجرا گردید.

### نتایج و بحث

#### نتایج آنالیز عدم قطعیت و تعیین احتمال

ابتدا مقدار وزن‌های مربوط به ۱۶ مدل GCM تحت هر دو سناریوی A2 و B1 برای تغییرات ماهانه بارش و دما در ایستگاه سراب، محاسبه و تابع توزیع احتمال گسسته برای هر ماه تهیه شد. توابع توزیع احتمال گسسته از طریق روش تخمین پارامتری به توابع پیوسته تبدیل شدند. مقدار کوچک SSE نشان دهنده مناسب بودن تابع بتا برای تبدیل توابع توزیع احتمال گسسته به پیوسته است. بعد از اینکه توابع توزیع احتمال، محاسبه شد، توابع توزیع تجمعی طبق توضیحات ارائه شده، تحت هر دو سناریو مطابق شکل تهیه گردید و در ادامه، مقدار متغیرهای اقلیمی دما و بارش ( $\Delta P$  و  $\Delta T$ ) در سه سطح احتمال ۱۰، ۵۰، ۹۰ درصد برای هر دو سناریو استخراج شد. مطابق شکل ۲، تغییرات دما و بارش پیش‌بینی شده در سطوح مختلف در همه ماه‌ها افزایشی است. تغییرات افزایش دما در سناریوی A2 غالباً بیشتر از سناریوی B1 می‌باشد و تنها در ماه اکتبر، تغییرات دما تحت سناریوی B1 بیشتر از سناریوی A2 پیش‌بینی شده است. تغییرات نسبت بارش برای هر ماه در سطوح احتمالی مختلف برای دوره آتی نشان داد که در سناریوی A2 بیش‌ترین تغییرات در بارش متعلق به ماه اکتبر و در سناریوی B1 متعلق به ماه نوامبر می‌باشد.

(دوره‌ای که اطلاعات مورد نیاز در دسترس است) انتخاب شد. یکی از شرایط حل معادلات دیفرانسیل جزئی در آب‌های زیرزمینی، وجود شرایط اولیه است تا مدل بتواند از یک نقطه، محاسبات را شروع کند؛ برای این منظور، سطح ایستابی آبخوان در سال ۲۰۰۱ به عنوان بار هیدرولیکی اولیه به صورت میان‌یابی کریجینگ به مدل اعمال گردید. میزان تغذیه آبخوان از داده‌های مربوط به بارندگی، آب برگشتی از کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و صنعتی در واحد حجم، محاسبه و با تقسیم بر مقدار مساحت منطقه در دوره‌های زمانی مختلف بر حسب واحد طول بر زمان، وارد بسته تغذیه شد. برای محاسبه مقادیر برداشت از آب زیرزمینی منطقه، از اطلاعات مربوط به چاه‌های پمپاژ دشت استفاده گردید. اطلاعات مربوط به رواناب و تبخیر از منطقه به ترتیب از طریق بسته‌های رودخانه و تبخیر در مدل اعمال گردید. پس از ساخت و طراحی مدل، برای اینکه مدل ساخته شده قابلیت تولید داده‌های مشاهده شده را داشته باشد، لازم است واسنجی گردد. داده‌های مختلفی برای تهیه مدل، محاسبه و گردآوری می‌شود که با تغییر داده‌های مذکور در حد مجاز، می‌توان به مقادیری دست پیدا کرد که امکان شبیه‌سازی آبخوان توسط آن‌ها میسر گردد (اندرسون و ویسنر ۱۹۹۲). پس از اجرای اولیه مدل در صورت وجود اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، مقادیر پارامترهایی که شناخت آن‌ها تقریبی بوده، در چارچوب حدود مجاز با سعی و خطا تغییر می‌یابد و مدل مجدداً اجرا می‌گردد. این فرایند تا زمانی که مدل، نتایج قابل قبولی ارائه دهد تکرار می‌شود. برای ارزیابی قابلیت مدل، می‌توان از معیار ضریب همبستگی استفاده کرد. پس از



شکل ۲- مقدار تغییرات دما (راست) و بارش (چپ) در سطوح احتمالی مختلف تحت سناریوی B1.

آماري توسط مدل را نشان می‌دهد. پس از اثبات کارایی مدل و ارزیابی آن، برای ریزمقیاس نمایی داده‌های دما و بارش، سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش در سطح ریسک ۵۰ درصد به مدل، معرفی و سری‌های زمانی دما و بارش روزانه در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) شبیه‌سازی شد. میزان بارندگی در منطقه برای دوره آتی، تحت دو سناریوی اقلیمی به صورت روزانه پیش‌بینی شد. در شکل ۳، میانگین ماهانه بارش برای سی سال آتی آمده است.

### ریز مقیاس نمایی داده‌های دما و بارش

مدل LARS-WG در اصل، یک مولد آب و هوا است. در ابتدا برای ارزیابی کارایی مدل در تولید داده‌های هواشناسی، از آمار تاریخی دماهای بیشینه و کمینه و بارندگی منطقه مورد مطالعه مربوط به سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ استفاده گردید. علت انتخاب این بازه زمانی، قرار داشتن آن در محدوده زمان پایه و دسترسی به اطلاعات روزانه مربوط به دماهای بیشینه و کمینه، و بارش در ایستگاه سینوپتیک سراب بود. جدول ۲، نتایج آزمون‌های

جدول ۲- آزمون آماری مربوط به صحت سنجی کارایی مدل LARS-WG

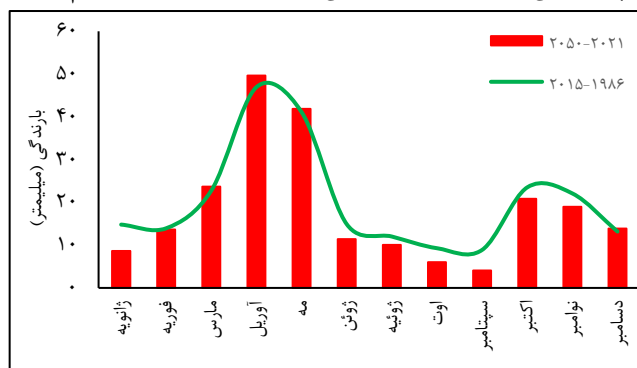
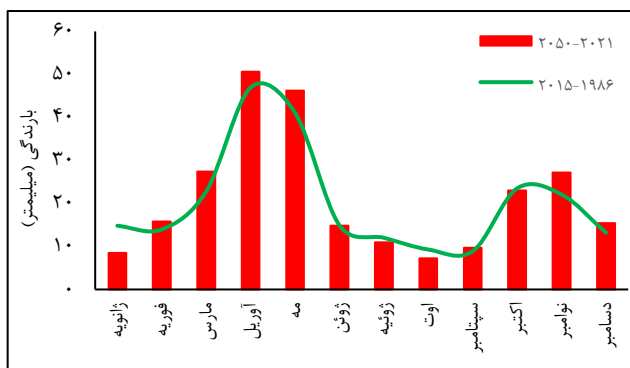
| دمای حداقل |       |        | دمای حداکثر |       |        | میانگین بارش ماهانه |       |        | ماه     |
|------------|-------|--------|-------------|-------|--------|---------------------|-------|--------|---------|
| P-value    | Ks    | t      | P-value     | Ks    | t      | P-value             | Ks    | t      |         |
| ۰/۹۹۸۹     | ۰/۱۰۶ | -۰/۰۷۴ | ۰/۹۹۸۹      | ۰/۱۰۶ | ۰/۴۴   | ۰/۹۹۹۶              | ۰/۱۰۰ | ۰/۹۷۷  | ژانویه  |
| ۰/۹۹۸۹     | ۰/۱۰۶ | ۰/۳۲   | ۰/۹۹۸۹      | ۰/۱۰۶ | -۱/۳۱۹ | ۱/۰۰۰               | ۰/۰۳۲ | -۰/۱۰۱ | فوریه   |
| ۱/۰۰۰۰     | ۰/۰۵۳ | ۱/۶۰۳  | ۱/۰۰۰۰      | ۰/۰۵۳ | -۰/۰۲۳ | ۱/۰۰۰۰              | ۰/۰۶۲ | ۰/۶۶۹  | مارس    |
| ۰/۹۹۸۹     | ۰/۱۰۶ | ۱/۱۴   | ۰/۹۹۹۱      | ۰/۱۰۵ | ۰/۱۱۶  | ۱/۰۰۰۰              | ۰/۰۵۸ | -۰/۱۲  | آوریل   |
| ۱/۰۰۰۰     | ۰/۰۵۳ | ۰/۱۴۷  | ۰/۹۹۸۹      | ۰/۱۰۶ | -۰/۱۹۳ | ۱/۰۰۰۰              | ۰/۰۵۷ | ۰/۴۵۲  | مه      |
| ۱/۰۰۰۰     | ۰/۰۵۳ | ۰/۱۱۶  | ۰/۹۹۸۹      | ۰/۱۰۶ | -۰/۳۴۳ | ۱/۰۰۰۰              | ۰/۰۲۷ | -۰/۰۶۷ | ژوئن    |
| ۱/۰۰۰۰     | ۰/۰۵۳ | ۰/۱۱   | ۰/۹۹۸۹      | ۰/۱۰۶ | -۰/۵۰۶ | ۱/۰۰۰۰              | ۰/۰۸۴ | -۰/۰۱۸ | ژوئیه   |
| ۰/۹۹۸۹     | ۰/۱۰۶ | ۰/۶۴۷  | ۰/۹۱۲۵      | ۰/۱۵۸ | ۰/۸۵۳  | ۰/۹۷۰۵              | ۰/۱۳۸ | -۰/۳۳۸ | اوت     |
| ۱/۰۰۰۰     | ۰/۰۳۳ | -۰/۷۶۲ | ۰/۹۹۸۹      | ۰/۱۰۶ | ۰/۲۵۵  | ۰/۷۴۹۴              | ۰/۱۹۱ | ۰/۰۳۶  | سپتامبر |
| ۱/۰۰۰      | ۰/۰۵۳ | ۰/۵۲۹  | ۱/۰۰۰۰      | ۰/۰۵۳ | -۰/۰۶۶ | ۰/۹۹۹۹              | ۰/۰۹۳ | -۰/۳۶۱ | اکتبر   |
| ۱/۰۰۰۰     | ۰/۰۵۳ | -۰/۸۹۶ | ۱/۰۰۰۰      | ۰/۰۵۳ | -۱/۵۸۸ | ۰/۹۹۱۳              | ۰/۱۲۳ | ۰/۴۷۲  | نوامبر  |
| ۰/۹۹۸۹     | ۰/۱۰۶ | ۰/۳۸۴  | ۰/۹۹۸۹      | ۰/۱۰۶ | -۰/۵۸۸ | ۱/۰۰۰۰              | ۰/۰۴۴ | -۰/۵۳۲ | دسامبر  |

دمای منطقه برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ تحت هر دو سناریو به صورت روزانه محاسبه گردید. در شکل ۴، میانگین دمای ماهانه منطقه در سی سال آتی نشان داده شده

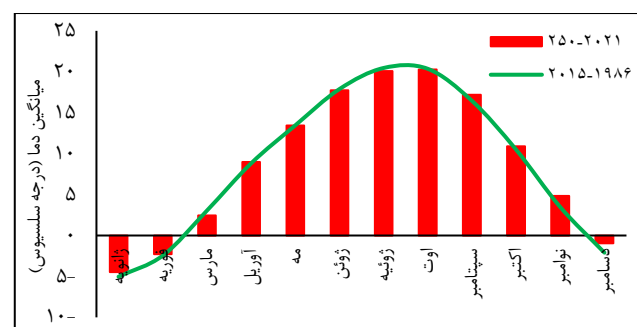
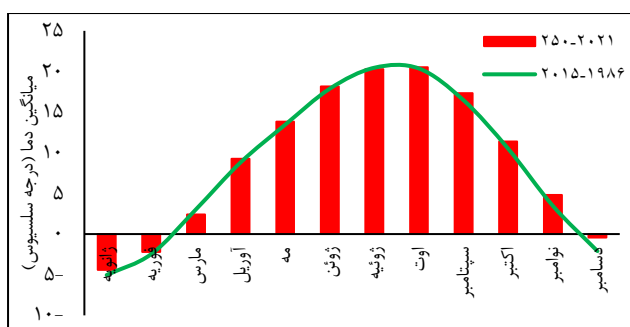
در مورد تغییرات بارش منطقه در دوره آتی می‌توان نتیجه گرفت که تحت هر دو سناریو بارش‌های بهاره، افزایش و بارش‌های تابستانه کاهش خواهند یافت.

دوره آتی دما افزایش خواهد یافت که این افزایش، تحت سناریوی A2، ۰/۵۱ و تحت سناریوی B1، ۰/۳۰ درجه سلسیوس خواهد بود.

است. میانگین دمای منطقه در دوره پایه، ۸/۷۴ درجه سلسیوس است که تحت سناریوی A2، ۹/۲۵ درجه سلسیوس و تحت سناریوی B1، ۹/۰۴ درجه سلسیوس پیش‌بینی شد. در حالت کلی، تحت تأثیر تغییر اقلیم در



شکل ۳- مقایسه میانگین بارش ماهانه کاهش مقیاس یافته برای دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و مشاهداتی دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) تحت سناریوی A2 (سمت چپ) و سناریوی B1 (سمت راست).



شکل ۴- مقایسه میانگین دمای ماهانه کاهش مقیاس یافته برای دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و مشاهداتی دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۵) تحت سناریوی A2 (سمت چپ) و سناریوی B1 (سمت راست).

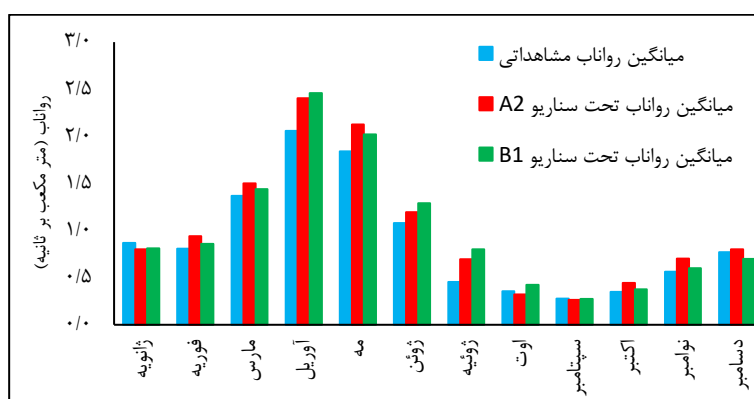
است. برای ارزیابی عملکرد مدل پس از اجرا، معیارهای  $r$ ، NSE و RMSE محاسبه شد (جدول ۳). شکل ۵ مقادیر میانگین ماهانه رواناب مشاهداتی و دوره آتی تحت سناریوهای انتشار در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. رواناب تولیدی تحت سناریوی A2 نسبت به دوره پایه افزایش و تحت سناریوی B1 کاهش می‌یابد.

### نتایج پیش‌بینی رواناب سطحی

بهترین ترکیب ورودی برای مدل شبکه عصبی NARX جهت پیش‌بینی رواناب، در مراحل تست، آموزش و شبیه‌سازی به صورت بارش روز حاضر، دمای کمینه و بیشینه روز حاضر و دبی تخمینی روز قبل ( $R(t)$ ،  $T_{min}(t)$ ،  $T_{max}(t)$ ،  $Q(t-1)$ ) انتخاب گردید. انتخاب بهترین شبکه از بین شبکه‌ها با آزمون‌های پیاپی، با رسیدن به بالاترین  $R$ ، کمترین RMSE و مقدار ضریب NSE نزدیک به یک، برای مرحله صحت‌سنجی انجام گردید. داده‌های انتخاب شده برای آموزش، صحت‌سنجی و تست مدل به ترتیب ۷۰، ۱۰ و ۲۰ درصد از داده‌های دوره پایه بوده

جدول ۳- نتایج ارزیابی عملکرد مدل شبکه عصبی.

| دوره     | $r$  | NSE  | RMSE( $m^3/s$ ) |
|----------|------|------|-----------------|
| آموزش    | ۰/۹۱ | ۰/۹۰ | ۰/۲۹            |
| تست      | ۰/۸۱ | ۰/۶۴ | ۱/۲۲            |
| صحت‌سنجی | ۰/۸۵ | ۰/۷۲ | ۰/۳۷            |

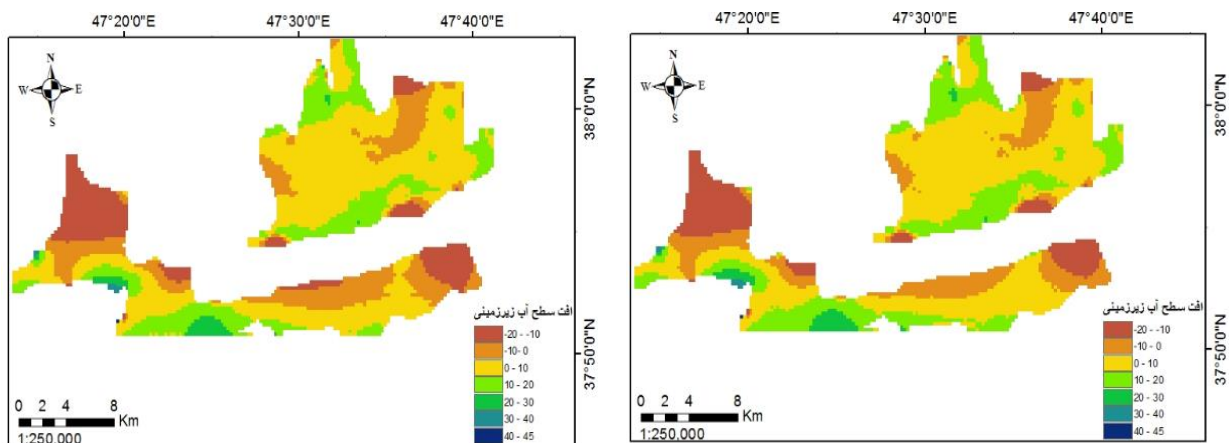


شکل ۵- مقایسه میانگین ماهانه رواناب مشاهده‌ای (۲۰۱۵-۱۹۸۶) و پیش‌بینی شده تحت سناریوهای A2 و B1 برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱.

### نتایج مدل آب زیرزمینی MODFLOW

دشت سراب از شمال و جنوب به ترتیب، به ارتفاعات سبلان و بزقوش مشرف شده است؛ جریان آب زیرزمینی از دامنه‌های این ارتفاعات وارد آبخوان می‌شود و همچنین تخلیه طبیعی لایه آبدار، از طریق آبراهه‌های مختلف انجام و به آبی‌چای می‌ریزد. پس از ساخت مدل و اعمال پارامترهای موردنیاز، برای اولین بار، مدل در حالت جریان پایدار اجرا گردید. سپس واسنجی دستی انجام و با اجرای متوالی مدل به ازای مقادیر مختلفی از ضریب هدایت هیدرولیکی (۰/۰۵ تا ۱۵ متر در روز)، واسنجی مدل انجام شد به گونه‌ای که بهترین تطابق بین سطوح ایستابی مشاهده‌ای و محاسباتی در چاه‌های مورد نظر به دست آمد. سپس، مدل برای حالت ناپایدار در سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۰۲ برای چاه‌های مشاهده‌ای در گام زمانی یک ساله به ازای مقادیر متفاوت آبدهی ویژه (۰/۳۲ تا ۰/۳) واسنجی شد. برای

اعتبارسنجی مدل، از داده‌های مربوط به تراز هیدرولیکی چاه‌های مشاهده‌ای در سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۱ استفاده گردید. از مدل صحت‌سنجی شده به‌عنوان ابزار مناسبی جهت پیش‌بینی پاسخ آبخوان به تغییر اقلیم در دوره آبی استفاده گردید. به منظور تخمین سطح آب زیرزمینی در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ داده‌های مربوط به بارش و رواناب تخمینی تحت سناریوهای A2 و B1 وارد مدل گردیدند. در این دوره، پمپاژ از چاه‌ها ثابت و مطابق با پمپاژ دوره پایه فرض شد (با توجه به سیاست‌های اتخاذ شده در مورد دریاچه ارومیه و جلوگیری از برداشت‌های بیش از اندازه و غیرمجاز). در شکل ۶ پیش‌بینی افت سطح آب زیرزمینی برای سال ۲۰۵۰ (انتهای دوره آبی) نسبت به سال آبی مبنا نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در بیشتر نقاط آبخوان، تحت هر دو سناریو، افت سطح آب زیرزمینی افزایش پیدا می‌کند که در نواحی کشاورزی بیشتر از سایر نواحی می‌باشد.



شکل ۶- پیش‌بینی افت سطح ایستابی برای سال ۲۰۵۰ تحت سناریوی A2 (سمت چپ) و سناریوی B1 (سمت راست).

### نتیجه‌گیری کلی

برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما و بارش، سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارش در سطح ریسک ۵۰ درصد به مدل معرفی و سری‌های زمانی دما و بارش روزانه در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) شبیه‌سازی شد. برای محاسبه مقادیر رواناب روزانه دشت از مدل شبکه عصبی NARX استفاده گردید و در نهایت، میزان تغذیه آب زیرزمینی ناشی از پارامترهای مختلف که مستقیم و/یا غیرمستقیم بر آبخوان این دشت تاثیر می‌گذارند برای دوره آتی در مدل MODFLOW وارد و نوسانات سطح ایستابی آبخوان تخمین زده شد. نتایج نشان می‌دهد تحت تاثیر تغییر اقلیم، در دوره آتی دما افزایش خواهد یافت که این افزایش، تحت سناریوی A2، ۰/۵۰۸ و تحت سناریوی B1، ۰/۲۷۳ درجه سلسیوس خواهد بود. بارش سالیانه نسبت به دوره پایه، تحت سناریوی A2 به میزان ۱۶ درصد افزایش و در سناریوی B1 به میزان ۳ درصد کاهش خواهد یافت و در بیشتر نقاط آبخوان، تحت هر دو سناریو سطح ایستابی نسبت به سال مبنا (۲۰۰۱) از ۰ تا ۱۰ متر کاهش می‌یابد که این روند کاهش، تحت سناریوی B1 بیش‌تر از سناریوی A2 است.

تغییرات دما و بارش در آینده، مقدار تغذیه آبخوان‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد و تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی، اولین واکنش آبخوان‌های آزاد به تغییرات میزان دما و بارندگی است. اگر چه مطالعات نشان داده است که در حال حاضر توانایی پیش‌بینی میزان و جهت تاثیر تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی به صورت کمی و با اعتمادپذیری بالایی وجود ندارد، ولی نمی‌توان از این مهم غافل شد (بریت و همکاران ۲۰۱۳). تمرکز بسیاری از مصارف کشور بر پایه استحصال آب زیرزمینی بوده و رشد روزافزون این مصرف، آبخوان‌ها را با مشکل جدی مواجه نموده است. لذا بررسی تاثیر درازمدت سناریوهای تغییر اقلیم در کشور خشکی چون ایران از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه، اثرات تغییر اقلیم بر سطح ایستابی منابع آب زیرزمینی در دشت سراب واقع در استان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفت. برای نیل به این هدف، دو متغیر بارش و دما با استفاده از ۱۶ مدل اقلیمی تحت سناریوهای A2 و B1 تحت سطوح احتمالی ۱۰، ۵۰ و ۹۰ درصد محاسبه شد. جهت ریزمقیاس‌نمایی این سناریوها از مدل LARS-WG استفاده شد. پس از اثبات کارایی این مدل و ارزیابی آن،

### منابع مورد استفاده

Anonymous, 2009. Groundwater studies in Sarab plain, Regional Water Organization (RWO) in East Azarbaijan, Tabriz. (In Persian)

- Ansari S, Massah Bavani AR and Roozbahani A, 2015. Effects of climate change on groundwater recharge (Case Study: Sefid Dasht Plain). *Journal of Water and Soil* 30(2): 416-431. (In Persian)
- Anderson MP and Woessner WW, 1992. *Applied Groundwater Modeling*. Academic, San Diego.
- Asry A, Fakheri-Fard A and Dinpashoh Y, 2017. Instantaneous runoff coefficient and water table relationship and stream flow reduction mechanism along river (Case Study: Ajabshir Basin). *Water and Soil Science, University of Tabriz* 27(4): 79-90. (In Persian)
- Barret L, Kurylyk Kerry T and Mac Quarrie B, 2013. The uncertainty associated with estimating future groundwater recharge: A summary of recent research and an example from a small unconfined aquifer in a northern humid-continental climate. *Journal of Hydrology* 492: 244–253.
- Cannon AJ, 2008. Probabilistic multisite precipitation downscaling by an expanded Bernoulli-gamma density network. *Journal of Hydrometeorology* 9(6): 1284–1300.
- Dogan M, and Ozgenc Aksoy A, 2013. Investigation of the relation between meteorological parameters, North Atlantic Oscillation and Groundwater levels in Torbali Region, Turkey. *Water and Environment Journal* 27: 138–145.
- Ducci D and Tranfaglia G, 2008. Effects of climate change on groundwater resources in Campania (southern Italy). *Geological Society, London, Special Publications*, 288(1): 25-38.
- Eckhardt K and Ulbrich U, 2002. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology* 284: 244–252.
- Goderniaux P, Brouyère S, Fowler HJ, Blenkinsop S, Therrien R, Orban P and Dassargues A, 2009. Large scale surface–subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology* 373(1): 122-138.
- Gohari A, Zareian MJ and Eslamian S, 2015. A Multi-model Framework for Climate Change Impact Assessment. *Handbook of Climate Change Adaptation*.
- Green TR, Taniguchi M, Kooi H, Gurdak JJ, Allen DM, Hiscock, KM and Aureli A, 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology* 405(3): 532-560.
- Hall ND, Stuntz BB and Abrams RH, 2008. Climate change and freshwater resources. *Natural Resources and Environment* 22(3): 30-35.
- Holman IP, Allen DM, Cuthbert MO and Goderniaux P, 2012. Towards best practice for assessing the impacts of climate change on groundwater. *Hydrogeology Journal* 20(1):1-4.
- IPCC 2007. Summary for Policymakers in Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, 2007. *The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Karamouz M and Araghinejad Sh, 2014. *Advanced Hydrology*. Amirkabir University of Technology Publication, Tehran. (In Persian)
- Maroofpour S, Fakheri-Fard A and Shiri J, 2018. Modeling the groundwater system response to variations of the consumption and surface discharge. *Water and Soil Science, University of Tabriz* 28(4): 169-181. (In Persian)
- McDonald MG and Harbaugh AW, 1988. *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. USGS open-file report, US Geological Survey, Reston.
- Nassery H and Salami H, 2016. Identifying vulnerable areas of aquifer under future climate change (case study: Hamadan aquifer, West Iran). *Arabian Journal of Geosciences* 9(8): 1-16.
- Oyebande L and Odunuga S, 2010. Climate change impact on water resources at the transboundary level in West Africa: the cases of the Senegal, Niger and Volta Basins. *Open Hydrology Journal* 4(1): 163-172.
- Roshan GhR, Khoshakhlagh F, Azizi Gh, 2013. assessment of suitable general atmosphere circulation models for forecasting temperature and precipitation amounts in Iran under condition of global warming. *Geography and Development Iranian Journal* 10(27): 19-36. (In Persian)
- Salami H, Nassery H and Massah Bavani AR, 2015. Probabilistic forecast of climate change effects on Hamadan-Bahar aquifer. *Journal of Water and Irrigation Management* 5(1): 27-41. (In Persian)
- Semenov MA, Barrow EM and Lars-Wg A, 2002. *A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies*. User Manual, Version 3, Hertfordshire, UK.
- Todd DK and Larry W, 2005. *Groundwater Hydrology*. John Wiley and Son, Inc, New Jersey.