

فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۶۱، تابستان ۱۴۰۱، صص ۲۱۷-۲۳۳

## بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی حوضه آبخیز حبله‌رود با

### استفاده از مدل گردش عمومی جو HADCM3 و نمایه‌های SPI و DI

افشین اشرف‌زاده<sup>۱</sup>

جابر صالح‌پور<sup>۲</sup>

آرزو شریفی<sup>۳\*</sup>

[Arezoo\\_sha62@yahoo.com](mailto:Arezoo_sha62@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۹۷/۶/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۱۹

#### چکیده

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که بخش‌های مختلف زندگی انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم می‌توان به تأثیر بر منابع آب و وقوع خشکسالی‌ها اشاره کرد. در این پژوهش به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی حوضه آبخیز حبله‌رود طی سه دهه آینده از شاخص خشکسالی دهک (DI) و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) پرداخته شد. در ابتدا داده‌های ماهانه خروجی مدل گردش عمومی جو (GCM) HADCM3، تحت سناریوی A2 در مدل آماری LARS-WG5 ریزمقیاس شده و توانایی این مدل در شبیه‌سازی اقلیم گذشته (دوره ۲۰۱۰-۱۹۹۵) ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه حوضه آبخیز حبله‌رود مورد تأیید قرار گرفت. سپس پارامترهای اقلیمی دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعات آفتابی برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ برای ایستگاه مورد مطالعه شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست آمده از ایستگاه نشان داد میانگین سالانه دمای بیشینه به میزان ۰/۴۷ درجه سلسیوس و دمای کمینه ۰/۵۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. نوسانات بارش سالانه اختلاف معنی‌داری با بارش در دوره پایه ندارد به طوری که بارش در دوره آتی ۰/۰۶ میلی‌متر تغییر خواهد کرد. سپس با استفاده از داده‌های بارش، وضعیت خشکسالی حوضه به کمک دو شاخص خشکسالی ذکر شده در مقیاس سالانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که این دو شاخص هم‌خوانی خوبی با هم دارند. همچنین نتایج بیان‌گر کاهش وقوع خشکسالی‌های شدید در بیشتر سال‌های سه دهه آینده می‌باشد. به‌طور کلی طی دوره‌های آتی وضعیت نرمال افزایش خواهد یافت.

**واژگان کلیدی:** تغییر اقلیم، GCM، ریزمقیاس نمایی، خشکسالی، HADCM3، LARS-WG، شاخص DI، شاخص SPI

۱- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۳- دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. \* (مسئول مکاتبات)

## Investigating the Effects of Climate Change on Meteorological Drought Characteristics of Hablehrood Basin Using the HADCM3 General Circulation Model and the SPI and DI Index

Afshin Ashrafzade <sup>1</sup>

Jaber Salehpoor <sup>2</sup>

Arezoo Sharifi <sup>3\*</sup>

[Arezoo\\_sha62@yahoo.com](mailto:Arezoo_sha62@yahoo.com)

Received: April 8, 2018

Accepted: September 5, 2019

### Abstract

Climate change is one of the most important challenges that affect different parts of human life. One of the most important consequences of climate change is the impact on water resources and the occurrence of droughts. In this research, the effects of climate change on the drought condition of Hablehrood watershed during the next three decades were evaluated using Decile Drought Index and Standardized Precipitation Index (SPI). Initially, the monthly data of the output of the HADCM3 General Circulation Model (GCM), under the A2 scenario were Downscaled in the LARS-WG5 statistical model and the ability of this model to simulate the past climate (1995-1995 period) Firoozkooh synoptic stations basin Hablehrood watershed was approved. Then, climatic parameters of the minimum temperature, maximum temperature, precipitation and sunshine for the period 2040-2011 were simulated for the station studied. The results obtained from the station showed that the average annual maximum temperature would increase to 0.47 degrees Celsius, and the minimum temperatures would be 0.56 degrees Celsius. Annual precipitation fluctuations are not significantly different with rainfall during the base period, so that precipitation 0.06mm will be changed in the future period. Then, using rainfall data, the drought condition of the basin was studied using the two droughts Index mentioned in the annual scale. The results showed that these two Index are well-matched

**Keywords:** Climate Change, GCM, Downscaling, Drought, HADCM3, LARS-WG, DI Index, SPI Index.

---

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

2- M.Sc. Graduated of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

3- PHD student in soil physic and conservation, University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran <sup>\*</sup>(Corresponding author)

## مقدمه

تغییر اقلیم، گرمایش جهانی و خشکسالی از چالش‌های مهم حال حاضر جهان به‌شمار می‌آیند و می‌توانند باعث وقوع نوسان‌های گسترده‌ای در شرایط آب و هوایی کره زمین شوند (۱). این نوسان‌ها تغییرات وسیعی را در الگوهای آب و هوایی از قبیل توزیع بارش و رخداد پدیده‌های حدی جوی ایجاد می‌کنند که اثرات منفی گسترده‌ای را بر منابع آب، محیط زیست، کشاورزی، صنعت و بهداشت گذاشته و گسترش و تداوم خشکسالی، فرسایش خاک، بیابان‌زایی، وقوع ریزگرد و تخریب‌های زیست‌محیطی را در پی دارد (۲ و ۳).

تغییر اقلیم به پدیده‌ای گفته می‌شود که در اثر آن الگوی آب‌وهوای جهانی یا منطقه‌ای در درازمدت تغییر کرده و بر اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای میانگین دمای سطح زمین در حال افزایش است (۴ و ۵). براساس سناریوهای اخیر هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم<sup>۱</sup> در سال‌های ۲۰۰۵-۱۹۰۶ به ازای هر سال، میانگین جهانی دما ۰/۷۶ درجه سانتی‌گراد زیاده‌تر شده (۴) و پیش‌بینی می‌شود که در قرن حاضر نیز ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سلسیوس افزایش یابد (۶). علت‌های تغییر اقلیم به دو دسته طبیعی و تحت‌تأثیر انسان تقسیم می‌شوند. عوامل طبیعی شامل آتشفشان، رانش قاره‌ای، جریان‌های اقیانوسی، شهاب سنگ‌ها و عوامل انسانی زباله‌های صنعتی، استفاده از منابع طبیعی برای سکونت‌گاه‌ها و مصارف انسانی، افزایش جمعیت و استفاده از سوخت‌های فسیلی هستند (۵).

خشکسالی وضعیتی از کمبود بارش و افزایش دما در طول یک دوره مشخص و در سطحی وسیع است (۵) که اثرات آن به نواحی خشک و نیمه‌خشک محدود نمی‌شود و می‌تواند در نواحی با بارندگی زیاد و یا در هر فصلی از سال رخ دهد (۷). ویلیت و گلانتز (۸) بیان می‌کنند که خشکسالی‌ها به چهار دسته هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و اقتصادی - اجتماعی

طبقه‌بندی می‌شوند. خشکسالی هواشناسی زمانی روی می‌دهد که بارندگی سالانه، فصلی و یا ماهانه کمتر از میانگین دراز مدت آن باشد. ادامه خشکسالی هواشناسی به مدت طولانی سبب بروز خشکسالی هیدرولوژی می‌شود که در این نوع خشکسالی سطح آب رودخانه‌ها، مخازن آب، دریاچه‌ها و آب‌های زیرزمینی به پایین‌تر از میانگین درازمدت افت می‌کند. خشکسالی کشاورزی نیز زمانی آغاز می‌شود که مقدار رطوبت موجود در محیط ریشه گیاه به حدی کاهش یابد که موجب پژمردگی و در نهایت کاهش محصولات کشاورزی گردد. هرگاه میزان تقاضای آب برای تولید برخی کالاهای اقتصادی بیشتر از عرضه آن شود، خشکسالی اقتصادی - اجتماعی روی می‌دهد. بنابراین به دلیل تاثیراتی که خشکسالی در بخش‌های مختلف کشاورزی و منابع آب می‌گذارد ارزیابی و پایش آن از موارد مهم محسوب می‌شود. تغییر اقلیم جهانی و افزایش وقوع خشکسالی از مسائل مهم زیست‌محیطی است که در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در مورد آن‌ها صورت گرفته است (۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲). اقلیم‌شناسان برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم و بررسی رابطه گردش عمومی جو با خشکسالی و علت وقوع خشکسالی با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو<sup>۲</sup> و متغیرهای اقلیمی را شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها پارامترهای مختلف هواشناسی را برای دهه‌های آینده تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم پیش‌بینی می‌نمایند (۴). خروجی مدل‌های GCM دارای قدرت تفکیک مکانی بسیار پایینی است، به این دلیل که شرایط آب و هوایی، پوشش گیاهی و شرایط توپوگرافی مناطق نسبتاً وسیعی را یکسان در نظر می‌گیرند. بنابراین برای استفاده از نتایج این مدل‌ها لازم است که ریزمقیاس<sup>۳</sup> شوند. مدل LARS-WG<sup>۴</sup> که در این پژوهش از آن استفاده شده است، به عنوان یکی از روش‌های آماری ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی جو کاربرد زیادی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده و مدل‌سازی آن

<sup>۲</sup> General Circulation Model (GCM)

<sup>۳</sup> Down scaling

<sup>۴</sup> Long Ashton Research Station Weather Generator (LARS-WG)

<sup>۱</sup> International panel of climate change (IPCC)

ایجاد شده است. این نرم‌افزار غالباً نمایه‌های خشکسالی هواشناسی را محاسبه کرده و سری‌های زمانی آن‌ها را در مقیاس زمانی مختلف ایجاد می‌کند. از این نمایه‌ها می‌توان SPI<sup>۲</sup> و DI<sup>۳</sup> را نام برد. نمایه بارش استاندارد شده SPI که به‌منظور محاسبه احتمال وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استفاده می‌شود در سال ۱۹۹۳ توسط مک‌کی و همکاران ارائه شد. نمایه SPI در مرکز اقلیمی کلرادو و مرکز ملی کاهش خشکسالی ایالات متحده آمریکا با هدف تعریف و پایش وضعیت خشکسالی ایجاد گردید. این نمایه برای مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه محاسبه می‌شود. با توجه به ارزش حاصل از این نمایه و با تکیه بر خصوصیات آن مک‌کی و همکاران (۲۰) شدت دوره‌های خشک را طبقه‌بندی کردند (جدول ۱). در این طبقه‌بندی برای یک دوره زمانی خشکسالی وقتی ظاهر می‌شود که نمایه SPI به طور مستمر منفی و زمانی پایان می‌یابد که نمایه SPI مثبت شود. تغییرپذیری SPI باعث می‌شود که در مقیاس‌های کوتاه مدت برای اهداف کشاورزی و در مقیاس‌های بلند مدت برای اهداف هیدرولوژی مثل منابع آب زیرزمینی، جریان‌های رودخانه‌ای، سطح دریاچه‌ها و منابع سطحی استفاده شود (۲۱). یکی دیگر از شاخص‌های خشکسالی، شاخص بارش استاندارد تبخیر و تفرق (SPEI) می‌باشد، که اثر تبخیر و تفرق مرجع را بر شدت خشکسالی در نظر می‌گیرد. روش محاسباتی SPEI شبیه SPI است با این تفاوت که شاخص SPI منحصرأ بر اساس داده‌های بارش می‌باشد و بر دو فرض استوار است الف) تغییر پذیری بارش خیلی بیشتر از متغیرهای دیگر است و ب) متغیرهای دیگر ایستا و مانا هستند و اهمیت متغیرهای دیگر بجز بارش در این چارچوب ناچیز است و خشکسالی به‌طور عمده بر اساس تغییرات زمانی بارش کنترل می‌شوند. نمایه دهک (DI) نمایه هواشناسی به‌منظور پایش خشکسالی است و توسط گیبس و ماهر (۲۲) از سیستم مراقبت خشکسالی استرالیا ارائه شد. این نمایه با مرتب

دارد. دقت بالای آن در مدل‌سازی داده‌های آب و هوایی در ایستگاه‌های مختلف اقلیمی توسط پژوهشگران مختلف از جمله ماروماتیس و هانسن (۱۳)، سیمونوف (۱۴)، اشرف و همکاران (۳)، خلیلی اقدم و همکاران (۱۵)، و خورانی و همکاران (۱۶) تایید شده است.

مدل LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های آماری است که برای تولید روزانه بارش، تابش، بیشینه و کمینه درجه حرارت در شرایط اقلیم حاضر و آینده یک ایستگاه به کار می‌رود (۴ و ۱۰). اولین نسخه LARS-WG در سال ۱۹۹۰ و در بوداپست مجارستان برای ارزیابی ریسک کشاورزی در این کشور توسعه یافت و سپس در سال ۱۹۹۸ توسط سیمونوف بازنگری و تعدیل شد (۱۷). مدل LARS-WG برای پیش‌بینی و تولید داده از سه سناریوی A1B، A2 و B1 به ترتیب به عنوان نماینده دیدگاه بدبینانه، متوسط و خوش‌بینانه استفاده می‌نماید. سناریو A1B توصیفی از جهانی با رشد سریع اقتصادی، بیشینه رشد جمعیت در نیمه قرن و پس از آن روند کاهشی، و رشد سریع فناوری‌های نوین و مؤثر خواهد بود. سناریو A2 توصیفی از جهان بسیار ناهمگن است که به طور مداوم با رشد سریع جمعیت جهان، اقتصاد ناهمگن و هم‌سو با شرایط منطقه‌ای در سراسر جهان همراه می‌باشد. سناریو B1 نیز توصیفی از هم‌گرایی جمعیت در سطح جهان، تغییر در ساختار اقتصادی، کاهش مواد آلاینده و معرفی منابع فناوری پاک و مؤثر است (۳). مدل گردش عمومی جو HADCM3، نیز یکی از مدل‌های جفت شده اقیانوسی - جوئی است که توسط مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیمی هادلی در بریتانیا طراحی شده است. قدرت تفکیک جوی این مدل شبکه‌ای با ابعاد ۲/۷۵ درجه عرض جغرافیایی و ۳/۷۵ درجه طول جغرافیایی، و قدرت تفکیک اقیانوسی ۱/۲۵ درجه طول جغرافیایی است (۱۸). نرم‌افزار DIC<sup>۱</sup> که به‌منظور پایش و محاسبه نمایه‌های خشکسالی استفاده می‌شود توسط حجازی‌زاده و جوی‌زاده (۱۹)

<sup>۲</sup> The Standardized Precipitation Index (SPI)

<sup>۳</sup> Decile Index (DI)

<sup>۱</sup> Drought Indices Calculator

دهک دهم که مقدار آن برابر بزرگ‌ترین مقدار بارش رخ داده در طول دوره آماری ثبت شده است. دهک‌ها در پنج طبقه مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند که طبقات آن در جدول ۲ مشخص شده است.

کردن داده‌های بارندگی ماهانه از کمترین تا بیشترین مقدار در دهک‌ها (ده درصد رویدادها) است. اولین طبقه دهک‌ها بیان‌گر مقادیری است که بارندگی آنها ۱۰ درصد کمترین مقادیر بارندگی را شامل می‌شود. دومین دهک مقدار بارندگی‌هایی است که ۲۰ درصد کمترین مقادیر را دارد، و به همین ترتیب مقدار مربوط به

**جدول ۱. طبقات شدت دوره‌های خشک بر اساس مقادیر SPI**

طبقه	نرمال	دوره خشک ضعیف	دوره خشک متوسط	دوره خشک شدید	دوره خشک بسیار شدید
مقدار SPI	بزرگ‌تر از ۰	از ۰ تا ۰/۹۹-	از ۱- تا ۱/۴۹-	از ۱/۵- تا ۱/۹۹-	کوچک‌تر و مساوی ۲-

**جدول ۲. طبقه‌بندی نمایه دهک (DI)**

وضعیت دهک‌ها	درجه خشکسالی
دهک‌های ۱-۲	خیلی کمتر از نرمال
دهک‌های ۳-۴	کمتر از نرمال
دهک‌های ۵-۶	نرمال
دهک‌های ۷-۸	بیشتر از نرمال
دهک‌های ۹-۱۰	خیلی بیشتر از نرمال

HADCM3 تحت سناریوی A2 با استفاده از مدل کوچک مقیاس کننده آماری SDSM و محاسبه نمایه استاندارد شده بارش (SPI) مورد استفاده قرار گرفت. زیرک‌زاده و بذرافشان (۱۳۹۲) شدت خشکسالی را در شرایط اقلیم فعلی نسبت به تغییر اقلیم آتی در ایستگاه‌های منتخب استان اصفهان با هم مقایسه کردند. برای این کار ابتدا داده‌های بارندگی برای دوره‌های آتی با استفاده از مدل گردش عمومی جو (CGCM3) و تحت سناریوی A2 به کمک روش ضریب تغییر ریزمقیاس‌نمایی شد. سپس برای پایش خشکسالی در دوره پایه و دوره آتی از نمایه SPI در دو مقیاس زمانی سه و شش ماهه استفاده شد. زارعیان و همکاران (۴) برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر جریان آب طبیعی رودخانه زاینده رود از مدل IHACRES استفاده کردند. پیش‌بینی‌ها نشان از کاهش مداوم جریان سطحی در اثر تغییر اقلیم داشت که با وجود این

در زمینه پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی اقلیمی مطالعات زیادی انجام شده که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

عزیزآبادی و همکاران (۲۳) در حوضه آبخیز قره‌سر استان گلستان با استفاده از سری زمانی میانگین بارش و دمای حوضه سال‌های ۱۹۸۳-۲۰۱۲ اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی را برای سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۴۸ پیش‌بینی کردند. این کار با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت سه سناریو ۲.۶ RCP، ۴.۵ RCP و ۸.۵ RCP و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM و با استفاده از نمایه شناسایی خشکسالی (RDI) انجام شد. صالح‌پور و همکاران (۲) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر ویژگی‌های خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب سینوپتیکی شمال غرب ایران پرداختند. به‌این منظور مدل گردش عمومی جو

حبله‌رود در سال‌های اخیر (۳۰)، هدف از این مطالعه بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی دما و بارش و شدت وقوع خشکسالی حوضه آبخیز حبله‌رود با استفاده از مدل گردش عمومی جو HADCM3 و دو نمایه SPI و DI می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

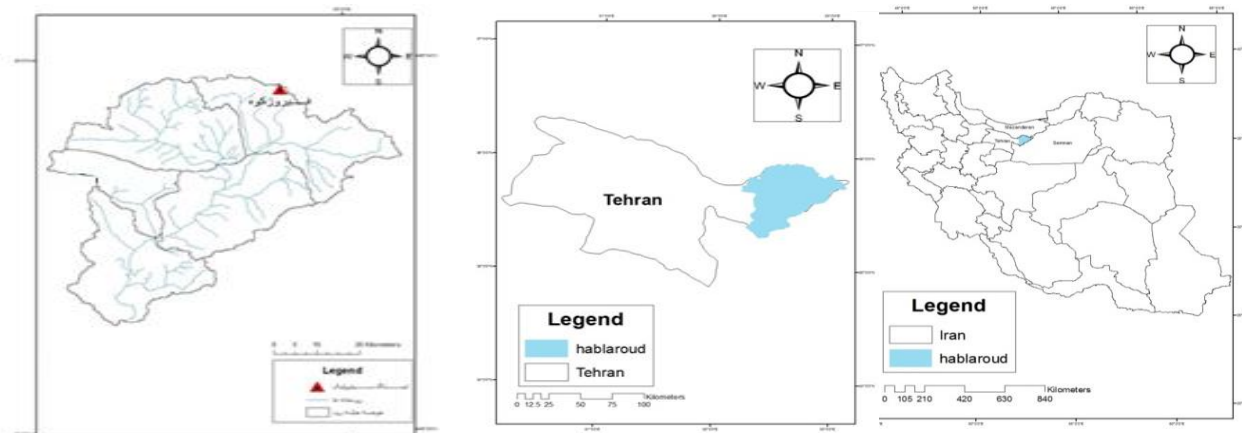
حوضه آبریز حبله‌رود در بخش شرقی استان تهران واقع شده و از شمال به مرز استان‌های تهران و مازندران و از شرق و جنوب به مرز استان‌های تهران و سمنان محدود است. این حوضه آبریز در محدوده جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (۳۱). مساحت این حوضه ۳۲۶۱/۹ کیلومترمربع و کمینه و بیشینه ارتفاع به ترتیب ۹۸۵ و ۴۰۵۷ متر می‌باشد که از نظر تقسیمات هیدرولوژیک کشوری بخشی از حوضه آبریز کویر مرکزی محسوب می‌شود (شکل ۱). رودخانه حبله‌رود تنها منبع تأمین آب و عامل حیات این حوضه و کشاورزی دشت گرمسار در پایین دست حوضه می‌باشد. کاهش آبدهی رودخانه حبله‌رود در ایستگاه هیدرومتری بنکوه در محل خروجی حوضه آبخیز حبله‌رود و ورودی دشت گرمسار در سالیان اخیر کاملاً مشهود است. این کاهش می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله تغییرات آب و هوایی، وقوع خشکسالی‌های اخیر و توسعه برداشت از آب‌های سطحی در حوضه بالادست در فصول زراعی باشد که باعث کاهش آبدهی رودخانه در ماه‌های گرم سال (به‌ویژه ماه‌های خرداد تا پایان ماه مرداد) شده و این منطقه را با بحران کمبود آب مواجه نموده است (۳۰).

به‌منظور داده‌سازی و پیش‌بینی داده‌های اقلیمی حوضه از مقادیر روزانه داده‌های بارش، دمای کمینه و بیشینه و ساعات آفتابی ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۹۵ به عنوان دوره دیده‌بانی و دوره آماری ۲۰۴۰-۲۰۱۱ به‌عنوان دوره پیش‌بینی استفاده شد (جدول ۳)

کاهش، تقاضای آب برای کشاورزی، صنعت، و دامداری افزایش می‌یابد که منجر به عدم تعادل آب می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان داد که منابع آب سطحی تنها بخش کوچکی از نیازهای آینده را تأمین خواهد کرد و تغییر اقلیم باعث کمبود آب شدید در آینده خواهد شد. در استرالیا کیم (۲۴) نشان داد که احتمال افزایش شدت، فراوانی و تداوم خشکسالی‌ها در دوره آتی در منطقه ویکتوریا تحت تأثیر تغییر اقلیم وجود دارد. حق‌طلب و همکاران (۲۵) از مدل WG LARS- برای مدل‌سازی اقلیم استان‌های تهران و مازندران و مقایسه تغییرات آن در جبهه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که احتمال افزایش بارندگی‌های سیل‌آسا و رگباری در هر دو دامنه وجود دارد. هم‌چنین کویرزایی در هر دو استان با توجه به افزایش دما و کاهش بارندگی در آینده سرعت بیشتری خواهد یافت. گل‌محمدی و مستاح‌بوانی (۲۶) اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی حوضه قره‌سو را در دوره آتی ۲۰۶۹-۲۰۴۰ تحت مدل HADCM3 و سناریوی A2 با استفاده از نمایه خشکسالی بارش استاندارد ارزیابی کردند. نتایج نشان دهنده کاهش شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه است. در بریتانیا ویدال و وید (۲۷) با استفاده از نمایه SPI خشکسالی‌های تحت تأثیر تغییر اقلیم را بررسی کردند. نتایج نشان از افزایش تعداد خشکسالی‌های بسیار شدید با تداوم کم و کاهش تعداد خشکسالی‌های بلند مدت دارد. لوکاس و همکاران (۲۸) در مطالعه‌ای با بررسی آثار تغییر اقلیم بر شدت خشکسالی در یونان، با بهره‌گیری از مدل CGCM2 و نمایه استاندارد شده بارش، افزایش شدت خشکسالی را در نتیجه تحقیقات خود بیان نمودند. به دلیل اینکه خشکسالی در مقایسه با سایر بلاای طبیعی از نظر میزان، شدت، طول مدت واقعه، گسترش منطقه‌ای، تلفات جانی و خسارت‌های اقتصادی-اجتماعی از اهمیت زیادی برخوردار است و بر بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت، محیط زیست، بهداشت و منابع آب تأثیرات مخرب می‌گذارد (۲۹). هم‌چنین به‌دلیل کاهش آبدهی رودخانه حبله‌رود به عنوان منبع تأمین آب و عامل حیات در حوضه آبخیز

جدول ۳. اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)
فیروزکوه	۵۲/۸۳	۳۵/۹۱	۱۹۷۶



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز حبله‌رود و ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه

آب و هوایی دوره‌های آینده با استفاده از دو فایل رفتار اقلیم در گذشته (\*). (WG و سناریوی تغییر اقلیم \* (Sce) تولید می‌شود. (۳). پس از پردازش و مرتب‌سازی داده‌ها و تهیه فایل‌های ورودی، مدل برای دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۹۵ اجرا شده و به این ترتیب مرحله واسنجی به پایان می‌رسد. در این مرحله به منظور ارزیابی داده‌های تولید شده با مدل لارس و داده‌های مشاهده‌ای در دوره پایه از چهار نمایه ضریب تعیین ( $R^2$ )، ناش - ساتکلیف<sup>۱</sup> (NS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) مطابق روابط ۱ تا ۴ استفاده شده است (جدول ۴):

در روابط پایین X مقدار داده مشاهده شده،  $\bar{X}$  متوسط مقدار داده مشاهده شده، Y مقدار داده شبیه‌سازی شده،  $\bar{Y}$  متوسط مقدار شبیه‌سازی شده و n تعداد مشاهدات است. لازم به ذکر است که اگر مقدار نمایه NS بیشتر از ۰/۷۵ باشد مدل عالی و کامل است. همچنین اگر بین ۰/۳۶ - ۰/۷۵ باشد، رضایت‌بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد غیر قابل قبول فرض می‌شود (۳۲). نتایج این بخش در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین به منظور ارزیابی

شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی با استفاده از مدل

### LARS-WG

در مدل LARS-WG فرایند تولید داده‌های مصنوعی آب و هوایی در سه بخش کلی واسنجی مدل (کالیبره کردن مدل)، صحت‌سنجی مدل و تولید و شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی برای دوره‌های آینده انجام گرفت.

در مرحله واسنجی مدل اطلاعات روزانه داده‌های هواشناسی (مشاهداتی) (\*). (dat و اطلاعات جغرافیایی منطقه) (\*). (St). دریافت شد. سپس با استفاده از این آمار فایل‌های پارامتر (\*). (WG) و آماری (\*). (Sta). ساخته شد که در فرآیند ارزیابی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. فایل پارامتر رفتار اقلیم منطقه در گذشته را مشخص می‌کند و فایل آماری شامل توزیع‌های آماری طول سری‌های خشک و تر و سایر داده‌های اقلیمی مشاهداتی است. در مرحله ارزیابی با تولید داده‌های آب و هوایی مصنوعی برای دوره مشاهده‌ای منطقه و مقایسه مشخصات داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده‌ای، توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نهایت داده‌های

<sup>1</sup> Nash Satclif

ایستگاه و برای هر سال برآورد می‌شود. در مرحله بعد، از پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  برای بدست آوردن تابع چگالی احتمال تجمعی بارندگی برای ماه مورد نظر و مقیاس زمانی معین در ایستگاه تحت بررسی استفاده می‌شود. پس از محاسبه تابع تجمعی کل، تغییر شکل هم احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد  $z$  (یا  $spi$ ) با میانگین صفر و واریانس ۱ صورت می‌گیرد (۳۳).

جدول ۴. طبقات نمایه خشکسالی SPI

مقادیر نمایه	ویژگی بارشی
بزرگتر از ۱/۵	بسیار تر
۱ تا ۱/۵	تر
۱ تا -۱	نرمال
-۱/۵ تا -۱	خشک
کمتر از -۱/۵	بسیار خشک

### نتایج

بر اساس نتایج عملکرد مدل LARS-WG در مرحله ارزیابی (جدول ۵)، شبیه‌سازی بارندگی در ایستگاه فیروزکوه با نمایه NS و  $R^2$  بزرگ‌تر از ۰/۹۵ نشان از تطابق بسیار خوب مدل با داده‌های مشاهده‌ای دارد (شکل ۲). مقدار  $p$ -value این آزمون نشان می‌دهد که در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای وجود ندارد و مدل LARS-WG توانمندی لازم را برای شبیه‌سازی متغیرهای بارندگی و دمای ایستگاه مورد نظر دارد. لازم به ذکر است که مقادیر  $p$ -value آزمون کای - اسکوور ( $\chi^2$ ) برای دمای حداقل و حداکثر مقادیر نزدیک به یک دارند، که نشان از توانمندی بالای مدل LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای ذکر شده دارد. همچنین مقادیر  $p$ -value آزمون کای - اسکوور ( $\chi^2$ )، برای پارامتر بارش برای بعضی از ماه‌ها کمتر از یک می‌باشد و علت آن به این دلیل می‌باشد که در این ماه‌ها مقدار بارندگی کمتر بوده و داشتن چنین مقادیری برای  $p$ -value در این ماه‌ها دور از انتظار

توانایی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در مرحله واسنجی و ارزیابی، از آزمون آماری  $t$  مجذور کای-اسکوور ( $\chi^2$ ) نیز استفاده شد که نتایج آن در جدول ۶ آمده است (۱۲). پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی و قابلیت مدل در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی، در مرحله بعد این مدل برای ریزمقیاس کردن داده‌های مدل گردش عمومی جو HADCM3 و تولید داده‌های اقلیمی برای دوره آتی تحت سناریو A2 اجرا و مقادیر روزانه پارامترهای اقلیمی تولید شد. سپس داده‌های شبیه‌سازی شده اقلیمی برای پایش خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_s)^2} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{رابطه ۴}$$

### پایش خشکسالی و محاسبه نمایه‌های خشکسالی

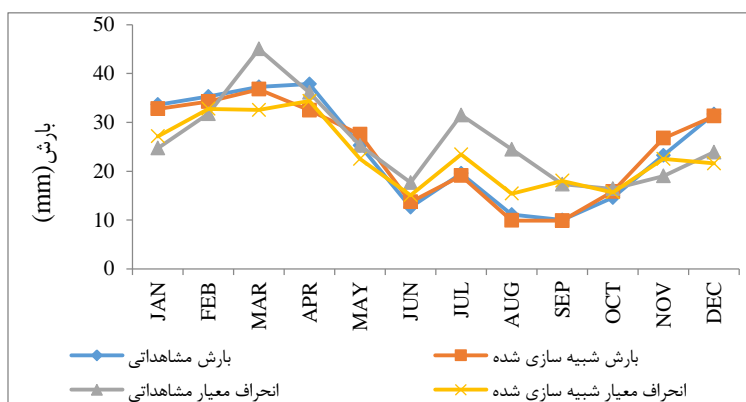
داده‌های اقلیمی دوره پایه به همراه داده‌های شبیه‌سازی شده اقلیمی دوره آتی برای محاسبه نمایه‌های SPI و DI و پایش خشکسالی و ترسالی با استفاده از نرم‌افزار  $^1$ DIC مورد استفاده قرار گرفت. برای محاسبه هر یک از این نمایه‌ها از داده‌های اقلیمی دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۵) به همراه داده‌های شبیه‌سازی شده اقلیمی دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) استفاده شد. محاسبه مقدار نمایه SPI شامل برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی کل برای یک ایستگاه معین می‌باشد. سپس پارامترهای  $\alpha$  و  $\beta$  مربوط به تابع چگالی احتمال گاما برای هر

<sup>1</sup> Drought Indices Calculator

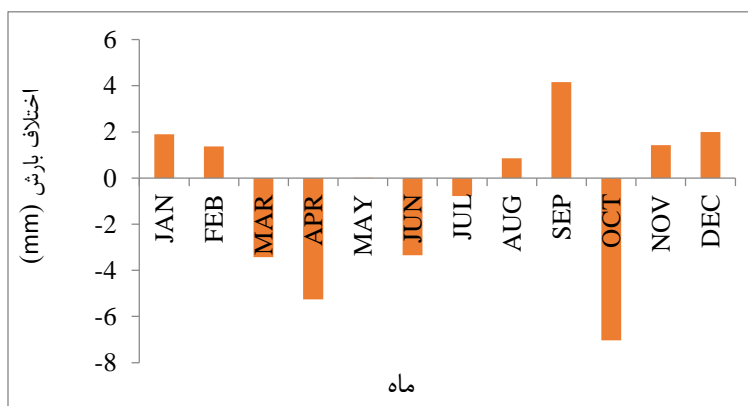


ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه مربوط به ماه سپتامبر است. مقدار افزایش در این ایستگاه برابر ۱/۲۹ میلی‌متر است. همچنین بیش‌ترین میزان کاهش بارش در ایستگاه فیروزکوه در ماه اکتبر و برابر ۸/۶۱ میلی‌متر است (شکل ۳). همچنین نتایج تغییرات فصلی بارش در دوره پایه نشان می‌دهد در ایستگاه فیروزکوه بیش‌ترین مقدار افزایش بارش در فصل تابستان و بیش‌ترین میزان کاهش بارش در فصل بهار و به ترتیب به میزان ۱/۴۱ و ۲/۸۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین میانگین تغییرات بارش سالانه نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که بارش در ایستگاه فیروزکوه به میزان ۰/۵۸ میلی‌متر افزایش خواهد یافت. نمایه SPI و DI سالانه و کلاسه‌بندی خشکسالی برای دوره پایه و دوره آتی نیز در جدول ۷ و ۸ آمده است.

نمی‌باشند. نتایج مقایسه توزیع‌های احتمال متغیرهای بارندگی، دمای حداقل و دمای حداکثر در جدول ۶ آورده شده است. در ادامه برای ارزیابی نوسانات اقلیمی در حوضه حبله‌رود مدل LARS-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو HADCM3 و تولید داده‌های مصنوعی در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ تحت سناریو A2 اجرا شد. به این ترتیب مقادیر روزانه پارامترهای بارش، دمای کمینه و بیشینه تولید شد. سپس برای بررسی تغییرات بارش مقادیر میانگین ماهانه، فصلی و سالانه بارش در دوره پایه و آتی محاسبه و با هم مقایسه شد. نمودار تغییرات بارش نسبت به دوره پایه در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج برآورد مدل تحت سناریوی A2 نشان می‌دهد که در دوره پایه ۲۰۱۱-۲۰۴۰ بیش‌ترین میزان افزایش بارش در



شکل ۲. نتایج عملکرد مرحله واسنجی و ارزیابی مدل LARS-WG در تولید داده‌های بارش



شکل ۳. تغییرات ماهانه بارش در دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۴۰) تحت سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه

## جدول ۵. نتایج عملکرد مرحله واسنجی و ارزیابی مدل LARS

WG-

پارامترهای آماری	بارش (mm)	دمای بیشینه (°C)	دمای کمینه (°C)
R <sup>2</sup>	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۹
MBE	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۱
RMSE	۲/۱	۰/۲	۰/۱۲
NS	۰/۹۵	۰/۹۹	۰/۹۹

جدول ۶. نتایج آزمون کای - اسکوور ( $\chi^2$ ) برای توزیع‌های احتمال داده‌های بارندگی، دمای حداقل و دمای حداکثر مشاهده شده و تولید شده توسط مدل LARS-WG در ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه

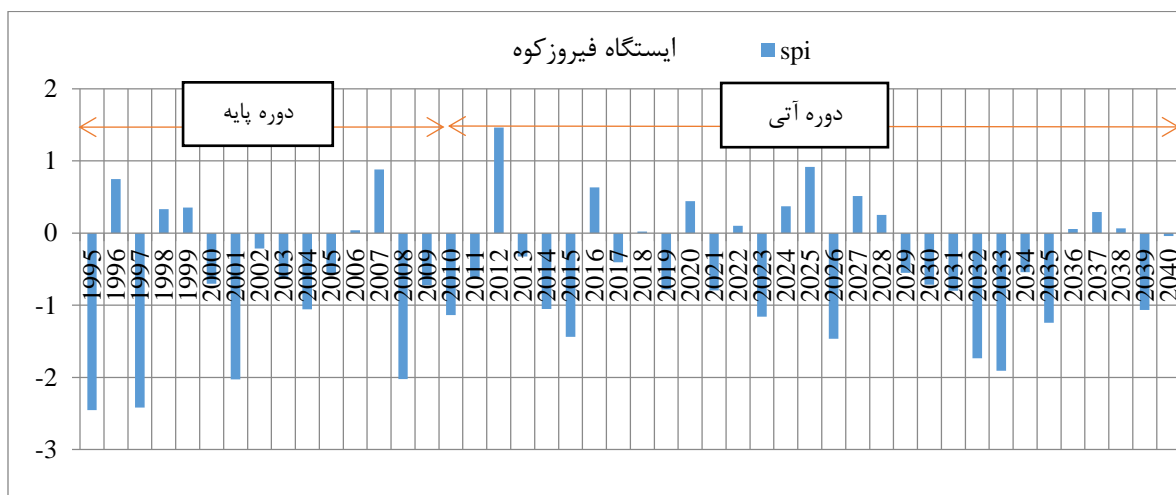
پارامترهای اقلیمی	آزمون	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
بارش	$\chi^2$	۰/۱	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۱	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۵
	p-value	۰/۹۹	۱	۱	۱	۱	۰/۹۸	۱	۰/۹۹	۰/۵۵	۰/۸۹	۱	۱
دمای حداقل	$\chi^2$	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱
	p-value	۰/۹۹	۰/۹۹	۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۱	۱	۰/۹۹	۱	۱	۱	۰/۹۹
دمای حداکثر	$\chi^2$	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵
	p-value	۰/۹۹	۰/۹۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱	۰/۹۹	۱	۰/۹۹	۱	۱

## جدول ۷. فراوانی هر یک از طبقات خشکسالی بر اساس نمایه دهک‌ها (DI)

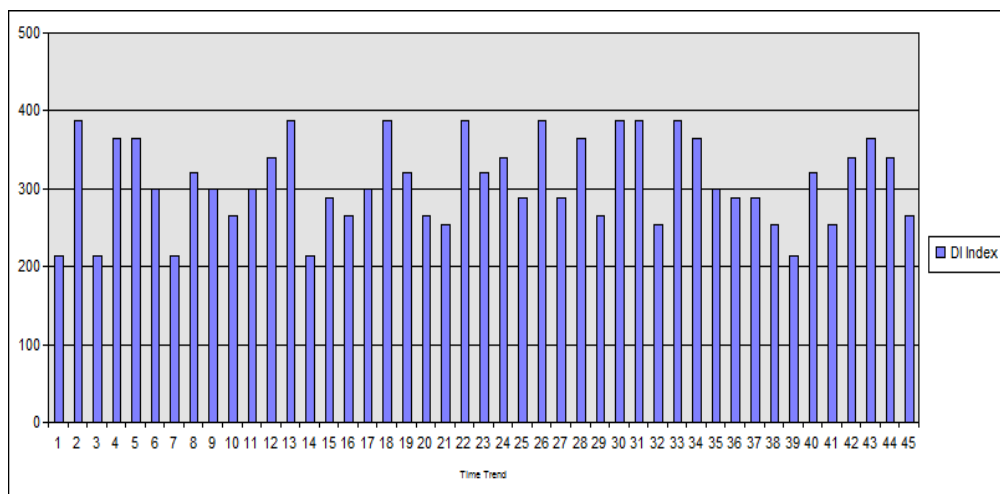
نمایه DI	خیلی بالاتر از نرمال (دهک ۱-۹)	بالاتر از نرمال (دهک ۷-۸)	نرمال (دهک ۵-۶)	کمتر از نرمال (دهک ۳-۴)	خیلی کمتر از نرمال (دهک ۱-۲)
دوره پایه	۲	۳	۴	۳	۴
دوره آبی	۶	۷	۵	۷	۵

## جدول ۸. فراوانی هر یک از طبقات خشکسالی بر اساس نمایه SPI

نمایه SPI	خیلی مرطوب	نسبتاً مرطوب	نزدیک نرمال	نسبتاً خشک	شدیداً خشک	بسیار خشک
دوره پایه	۰	۰	۱۰	۲	۰	۴
دوره آبی	۰	۱	۲۱	۶	۲	۰



شکل ۴. سری زمانی نمایه SPI سالانه محاسبه شده



شکل ۵. سری زمانی نمایه DI سالانه محاسبه شده

جدول ۹. نمایه SPI و DI سالانه و کلاسه‌بندی خشکسالی برای دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۰) - ایستگاه فیروزکوه

سال	مقدار SPI	مقدار DI	طبقه‌بندی خشکسالی براساس SPI	طبقه‌بندی خشکسالی براساس DI
۱۹۹۵	-۲/۴۵	DI(1):۲۱۴	Extremely dry	Very much below normal
۱۹۹۶	-۰/۷۴	DI(10):>۳۸۷/۸	Near normal	Very much above normal
۱۹۹۷	-۲/۴۱	DI(1):۲۱۴	Extremely dry	Very much below normal
۱۹۹۸	-۰/۳۳	DI(8):۳۶۳/۷۲	Near normal	Above normal
۱۹۹۹	-۰/۳۵	DI(8):۳۶۳/۷۲	Near normal	Above normal
۲۰۰۰	-۰/۷	DI(5):۲۹۸/۹	Near normal	Normal
۲۰۰۱	-۲/۰۲	DI(1):۲۱۴	Extremely dry	Very much below normal
۲۰۰۲	-۰/۲۱	DI(6):۳۲۰/۰۵	Near normal	Normal
۲۰۰۳	-۰/۶۳	DI(5):۲۹۸/۹	Near normal	Normal
۲۰۰۴	-۱/۰۵	DI(3):۲۶۵	Moderately dry	Below normal

Normal	Near normal	DI(5):۲۹۸/۹	-۰/۵۶	۲۰۰۵
Slightly above normal	Near normal	DI(7):۳۴۰/۴	۰/۰۳	۲۰۰۶
Very much above normal	Near normal	DI(10):>۳۸۷/۸	۰/۸۸	۲۰۰۷
Very much below normal	Extremely dry	DI(1):۲۱۴	-۲/۰۲	۲۰۰۸
Slightly below normal	Near normal	DI(4):۲۸۷/۵	-۰/۷۲	۲۰۰۹
Below normal	Moderately dry	DI(3):۲۶۵	-۱/۱۳	۲۰۱۰

جدول ۱۰. نمایه SPI و DI سالانه و کلاسه‌بندی خشکسالی برای دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) - ایستگاه فیروزکوه

سال	مقدار SPI	مقدار DI	طبقه‌بندی خشکسالی براساس SPI	طبقه‌بندی خشکسالی براساس DI
۲۰۱۱	-۰/۶	DI(۵):۲۹۸/۹	Near normal	Normal
۲۰۱۲	۱/۵	DI(۱۰):>۳۸۷/۸	Moderately wet	Very much above normal
۲۰۱۳	-۰/۳	DI(۶):۳۲۰/۰۵	Near normal	Normal
۲۰۱۴	-۱/۱	DI(۳):۲۶۵	Moderately dry	Below normal
۲۰۱۵	-۱/۴	DI(۲):۲۵۲/۹	Moderately dry	Much below normal
۲۰۱۶	۰/۶	DI(۹):۳۸۷/۸	Near normal	Much above
۲۰۱۷	-۰/۴	DI(۶):۳۲۰/۰۵	Near normal	Normal
۲۰۱۸	۰	DI(۷):۳۴۰/۴	Near normal	Slightly above normal
۲۰۱۹	-۰/۸	DI(۴):۲۸۷/۵	Near normal	Slightly below normal
۲۰۲۰	۰/۴	DI(۹):۳۸۷/۸	Near normal	Much above
۲۰۲۱	-۰/۸	DI(۴):۲۸۷/۵	Near normal	Slightly below normal
۲۰۲۲	۰/۱	DI(۸):۳۶۳/۷۲	Near normal	Above normal
۲۰۲۳	-۱/۲	DI(۳):۲۶۵	Moderately dry	Below normal
۲۰۲۴	۰/۴	DI(۹):۳۸۷/۸	Near normal	Much above
۲۰۲۵	۰/۹	DI(۱۰):>۳۸۷/۸	Near normal	Very much above normal
۲۰۲۶	-۱/۵	DI(۲):۲۵۲/۹	Moderately dry	Much below normal
۲۰۲۷	۰/۵	DI(۹):۳۸۷/۸	Near normal	Much above
۲۰۲۸	۰/۳	DI(۸):۳۶۳/۷۲	Near normal	Above normal
۲۰۲۹	-۰/۵	DI(۵):۲۹۸/۹	Near normal	Normal
۲۰۳۰	-۰/۷	DI(۴):۲۸۷/۵	Near normal	Slightly below normal
۲۰۳۱	-۰/۸	DI(۴):۲۸۷/۵	Near normal	Slightly below normal
۲۰۳۲	-۱/۷	DI(۲):۲۵۲/۹	Severely dry	Much below normal
۲۰۳۳	-۱/۹	DI(۱):۲۱۴	Severely dry	Very much below normal
۲۰۳۴	-۰/۵	DI(۶):۳۲۰/۰۵	Near normal	Normal
۲۰۳۵	-۱/۲	DI(۲):۲۵۲/۹	Moderately dry	Much below normal
۲۰۳۶	۰/۱	DI(۷):۳۴۰/۴	Near normal	Slightly above normal
۲۰۳۷	۰/۳	DI(۸):۳۶۳/۷۲	Near normal	Above normal
۲۰۳۸	۰/۱	DI(۷):۳۴۰/۴	Near normal	Slightly above normal
۲۰۳۹	-۱/۱	DI(۳):۲۶۵	Moderately dry	Below normal
۲۰۴۰	۰	DI(۷):۳۴۰/۴	Near normal	Slightly above normal

## بحث

نتایج به دست آمده از نرم‌افزار DIC و دو نمایه DI و SPI به منظور پایش خشکسالی هواشناسی در دوره آتی و تغییرات آن نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که در طول دوره آماری در منطقه مورد مطالعه در ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه به صورت کاملاً مشابه خشکسالی با شدت و تداوم متفاوت اتفاق افتاده است (شکل ۴ و ۵). نتایج پیش‌بینی حاصل از نمایه SPI براساس سناریو A2 نشان می‌دهد که در ایستگاه فیروزکوه در سال‌های ۲۰۳۲ و ۲۰۳۳ حادثترین خشکسالی رخ خواهد داد و این در حالی است که در دوره پایه این اتفاق در سال‌های ۱۹۹۵، ۱۹۹۷، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ افتاده است. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که در دوره آتی از تعداد خشکسالی‌های حاد که منجر به تأثیر نامطلوب بر منابع آب زیرزمینی می‌شود کاسته خواهد شد. در خراسان شمالی محمدیان و همکاران (۳۴) با بهره‌گیری از شاخص‌های SPI و DI نتیجه گرفتند که وسیع‌ترین و شدیدترین خشکسالی‌ها در سال‌های ۱۹۹۰ و ۲۰۰۱ رخ داده است. به طور کلی در دوره آتی در ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه نسبت به دوره پایه از شدت و تداوم خشکسالی کاسته می‌شود. نتایج نمایه DI نیز تقریباً با نتایج نمایه SPI هم‌خوانی دارد که البته به دلیل گسترده بودن طبقه‌بندی نمایه SPI و تفکیک بیشتر آن تفاوت‌های ناشی از محدوده‌های طبقه بندی دو نمایه نمایان گردید (جدول ۷ و ۸).

جدول ۷ و ۸ فراوانی طبقات مختلف نمایه خشکسالی DI و SPI سالانه را در دوره پایه و سه دهه آتی برای ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه مورد بررسی قرار می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد دوره‌های بسیار خشک نسبت به دوره پایه روند کاهشی داشته و دوره‌های به شدت خشک، متوسط خشک و نزدیک نرمال روند افزایشی پیدا کرده است که نتایج به دست آمده با نتایج نصرتی (۳۵) و فرج‌زاده و احمدیان (۳۶) مطابقت دارد. بنابراین تغییر اقلیم باعث تکرار خشکسالی‌های شدید که خسارات جبران ناپذیری بر منابع آبی وارد می‌کند نمی‌شود. نصرتی و همکاران (۳۷) در ایستگاه‌های فیروزکوه و لتیان استان تهران با استفاده از

شاخص‌های SPI و SPEI نشان دادند که در مقیاس‌های کوتاه مدت فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد اما تداوم آنها افزایش پیدا می‌کند. در هر دو ایستگاه هم‌چنین در اکثر موارد هماهنگی در دوره‌های خشک و مرطوب در هر دو شاخص دیده می‌شود. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نیز امکان رخداد خشکسالی‌هایی با شدت، مدت و فراوانی بیشتر در دوره‌های شبیه‌سازی آتی را نشان می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، توان‌مندی مدل LARS-WG جهت بازتولید داده‌های روزانه متغیرهای اقلیمی با استفاده از سناریوهای A2 در حوضه آبخیز حبله‌رود تهران در سال‌های ۲۰۱۰-۱۹۹۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های بارش شبیه‌سازی شده با مدل LARS-WG با نمایه‌های ارزیابی NS و  $R^2$  بزرگ‌تر از ۰/۹۵ تطابق بسیار خوبی با داده‌های مشاهده‌ای دارد و این مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی در این حوضه دارد. سپس نتایج ریزمقیاس‌سازی مدل گردش عمومی HADCM3 تحت سناریوی A2 برای دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) نشان داد که در ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه، بارش در دوره آتی تفاوت معنی‌داری با بارش در دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۵) ندارد. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج تحقیقات بابائیان و نجفی نیک (۳۸) مطابقت دارد. در زمینه پیش‌بینی دمای کمینه و بیشینه در ایستگاه سینوپتیک فیروزکوه، افزایش دما برای دوره مورد بررسی پیش‌بینی شد. با توجه به اینکه تغییرات دمای کمینه نسبت به دمای بیشینه بیشتر خواهد بود، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات (افزایش) دمای متوسط هوا در دوره آتی بیشتر تحت تأثیر افزایش دمای کمینه خواهد بود. هم‌چنین به علت غلبه عامل دما در تبخیر، در مجموع میزان تبخیر افزایش خواهد یافت. افزایش دما و تبخیر حرکات همرفتی در خشکی را تشدید می‌کند و سبب بارش‌های شدید و کوتاه مدت خواهند شد. یکی از پیامدهای افزایش گازهای گلخانه‌ای

پارامترهای اقلیمی در ۲۰ سال آتی با استفاده از ریز  
مقیاس نمایی آماری داده های مدل HADCM3  
(مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، آب و خاک،  
دوره ۲۵، شماره ۴، صص ۹۴۵-۹۵۷.

- 4- Zareeian, M.J., Eslamian, S., Gohari, A., and Adamowski, J. 2017. The Effect of Climate Change on Watershed Water Balance, in *Mathematical Advances Towards Sustainable Environmental Systems*, Ed. by Furze, J.N., Swing, K., Gupta, A.K., McClatchey, R., Reynolds, D., Springer International Publishing, Switzerland, 215-238.
- 5- Maleksaeidi, H., Keshavarz, M., Karami, E., Eslamian, S., 2017, *Climate Change and Drought: Building Resilience for an Unpredictable Future*, Ch. 9 in *Handbook of Drought- and Water Scarcity*, Vol. 2: *Environmental Impacts and Analysis of Drought and Water Scarcity*, Ed. by Eslamian S. and Eslamian F., Francis and Taylor, CRC Press, USA, 163-186.
- 6- IPCC (2010) Meeting Report IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model IPCC (2007) Climate change, the physical science basis, Cambridge University Press, Cambridge.

افزایش دما می‌باشد. در صورتی که تولید گازهای گلخانه‌ای در طول قرن ۲۱ افزایش یابد به تبع آن دمای کره زمین نیز افزایش می‌یابد (هیئت بین دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۰۷). درجه حرارت زیاد رطوبت خاک را بیشتر تبخیر می‌کند و موجب بحران می‌شود. با توجه به اینکه بخش وسیعی از حوضه مورد نظر دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است، بنابراین اثرات گرم‌تر شدن هوا بر زیستگاه‌های آن مخرب‌تر خواهد بود. نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج تحقیقات کمال و مستاح بوانی (۳۹)، سلیمانی و همکاران (۴۰)، اشرف و همکاران (۳)، و آشفته و مستاح بوانی (۴۱) در سایر مناطق کشور مطابقت دارد. به‌طورکلی با توجه به این نتایج و با توجه به تغییراتی که در پارامترهای اقلیمی موجود در منطقه رخ خواهد داد، مسئولان و برنامه‌ریزان در بخش‌های کشاورزی، منابع آب، محیط زیست، صنعت و اقتصاد بایستی توجه دقیق‌تری را اعمال کنند تا راه‌کارهای لازم برای کاهش پیامدها و سازگاری با شرایط آب و هوایی جدید اتخاذ گردد.

#### منابع

- 1- Khazaneh dari, L., Zabol Abbasi, F., Ghandhari, S. H., Kohi. M. (2009) the Perspective of Drought Conditions over the Next Thirty Years, *Journal of Geography and Regional Development*, 12, pp. 83-98.
- ۲- صالح‌پور جم، امین؛ محسنی ساروی، محسن؛ بذرافشان، جواد؛ خلیقی سیگارودی، شهرام (۱۳۹۳) بررسی اثر تغییر اقلیم بر ویژگی‌های خشکسالی دوره آتی با کاربرد مدل گردش عمومی جو HadCM3 (مطالعه موردی: شمال غربی ایران)، نشریه مرتع و آبخیزداری، دوره ۶۷، شماره ۴، صص ۵۴۸-۵۳۷.
- ۳- اشرف، بتول؛ موسوی بایگی، محمد؛ کمالی، غلامعلی؛ داوری، کامران (۱۳۹۰) پیش بینی تغییرات فصلی

- Agricultural and Forest Meteorology, 109(4), pp. 283-296
- 14- Semenov, M. A. (2008) Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator, *Climate Research*, 35, pp. 203-212.
- ۱۵- خلیلی اقدم، نبی؛ مساعدی، ابولفضل؛ سلطانی، افشین؛ کامکار، بهنام (۱۳۹۱) ارزیابی توانایی مدل LARS-WG در پیش‌بینی برخی از پارامترهای جوی سندج، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، دوره ۱۹ شماره ۴، صص ۱۰۲-۸۵.
- ۱۶- خورانی، اسداله؛ مرودشتی، منجذب شهربانو (۱۳۹۳) بررسی آثار تغییر اقلیم بر میزان بازدید از جزیره هنگام، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، صص ۱۲۲-۱۰۹.
- 17- Racsko, P., Szeidl, L., Semenov M. (1991) A serial approach to local stochastic weather models, *Ecol Model*, 57, pp. 27-41.
- 18- Climate Projections, (2007) National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado, USA, pp. 115.
- ۱۹- حجازی‌زاده، زهرا؛ جوی‌زاده، سعید (۱۳۸۸) محاسبه اتوماتیک شاخص‌های رایج خشکسالی با استفاده از نرم افزار DIC (نرم افزار تولید شده توسط نویسندگان این مقاله)، ششمین کنفرانس اقتصاد کشاورزی ایران، کرج انجمن اقتصاد کشاورزی ایران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- 20- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. (1993) The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales.
- ۷- قاسمی نژاد، سعیده؛ سلطانی، سعید؛ سفیانیان، علیرضا (۱۳۹۳) ارزیابی ریسک خشکسالی استان اصفهان، مجله علوم آب و خاک، ۱۸ (۶۸)، صص ۲۱۳-۲۲۶.
- 8- Wilhite, D.A., Glantz. M.H. (1985) Understanding the drought phenomenon: the role of definitions, *Water International*, 10, pp. 111-12.
- 9- Tramblay, Y., Badi, W., Driouech, F., Adlouni, S. El., Neppel, S., Servat, E. (2012) Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco, *Global and Planetary Change*, 82: pp.104-114.
- ۱۰- هادی‌نیا، حسین؛ پیرمردیان، نادر؛ اشرف‌زاده، افشین (۱۳۹۲) اثر تغییر اقلیم بر نیاز آبی برنج در منطقه رشت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته مهندسی کشاورزی، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشگاه گیلان.
- ۱۱- زرغامی، مهدی؛ بابائیان، ایمان؛ حسن‌زاده، یوسف؛ کنعانی، رضا (۱۳۹۱) مطالعه تغییر اقلیم و اثرات آن بر خشکی (مطالعه موردی: استان آذربایجان شرقی)، فصلنامه علوم و مهندسی آبخیزداری، شماره ۱۸، صص ۶۱-۷۶.
- ۱۲- مشکواتی، امیر حسین؛ کردجزی، محمد؛ بابائیان، ایمان (۱۳۸۹) بررسی و ارزیابی مدل لارس در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی استان گلستان در دوره ۲۰۰۷-۱۹۹۳ میلادی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، جلد ۱۶، شماره ۱۹، صص ۸۱-۹۶.
- 13- Mavromatis, T., Hansen, J. W. (2001) Inter annual variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators,

- جبهه‌های شمالی و جنوبی البرز مرکزی، علوم و تکنولوژی محیط زیست، شماره ۱، صص ۳۷-۴۹.
- ۲۶- گل محمدی، مریم؛ مستاح بوانی، علیرضا (۱۳۹۰) بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره سو در دوره های آتی تحت تاثیر تغییر اقلیم، نشریه آب و خاک (۲)، ۲۵، صص ۳۱۵-۳۲۶.
- 27- Vidal, J. P., Wade. S. (2009) A multi model assessment of future climatological droughts in the United Kingdom, *International Journal of Climatology*, 29, pp. 2056-2071.
- 28- Loukas, A., Vasiliades, L., Tzabiras, J. (2008) Climate change effects on drought severity, *Advances in Geosciences*, 17, pp. 23-29.
- ۲۹- محمدیان، آزاده؛ کوهی، منصوره؛ آدینه بیگی، آرمان؛ رسولی، سید جواد؛ بذرافشان، بهاره (۱۳۸۹) مقایسه پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI، DI و PNI و پهنه‌بندی آن‌ها (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۷، شماره ۱، صص ۱۸۴-۱۷۷.
- ۳۰- گزارش مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوضه‌های آبریز دریاچه نمک، گاوخونی، سیاه کوه - ریگ زرین و کویر مرکزی - مهندسين مشاور یکم، (۱۳۹۲) وزارت نیرو، معاونت آب و آبفا، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا.
- ۳۱- دستورانی، محمد تقی، حبیبی پور، اعظم، اختصاصی، محمد رضا، طالبی، علی، محجوبی، جواد (۱۳۹۲) بررسی کارایی مدل درخت تصمیم در پیش بینی بارش (مطالعه موردی ایستگاه سینوپتیک یزد)، فصلنامه In Proc, 8th Conf. on Applied Climatology, January 17-22, American Meteorological Society, Massachusetts, pp. 179-184.
- 21- Edward, D. C., Mckee, T. B. (1997) Characteristics of 20th century drought in the United States and multiple time scales, pp. 155. In: *Climatology Report*, Colorado State University.
- 22- Gibbs, W. J., Maher, J. V. (1967) Rainfall deciles as drought indicators, *Bureau of Meteorology Bulletin*, No. 48, Commonwealth of Australia, Melbourne.
- ۲۳- عزیزآبادی فراهانی، مسعود؛ بختیاری، بهرام؛ قادری، کورش؛ رضاپور، محسن (۱۳۹۵) بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر منحنی‌های سختی- مدت- فراوانی خشکسالی حوضه آبریز قره‌سو با استفاده از توابع مفصل، تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۷، شماره ۴، صص ۷۵۴-۷۴۳.
- 24- Kiem, A. S. (2013) Drought and water policy in Australia: Challenges for the future illustrated by the issues associated with water trading and climate change adaptation in the Murray-Darling Basin, *Global environmental change*, 23(6), pp. 1615-1626.
- ۲۵- حق‌طلب، نفیسه؛ گودرزی، محسن؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ یآوری، احمدرضا؛ جعفری، حمیدرضا (۱۳۹۲) مدل‌سازی اقلیم استان‌های تهران و مازندران با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG و مقایسه آن در



- در ایران، مجله مخاطرات محیط طبیعی، سال سوم، شماره چهارم، صص ۱۵-۲.
- ۳۷- نصرتی، کاظم (۱۳۹۳) ارزیابی شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشکسالی در اقلیم‌های مختلف ایران، فصلنامه علوم محیطی، دوره دوازدهم، شماره ۴، صص ۷۴-۶۳.
- ۳۸- بابائیان، ایمان؛ نجفی نیک، زهرا؛ زابل عباسی، فاطمه؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ ادب، حامد؛ ملبوسی، شراره (۱۳۸۷) ارزیابی تغییر اقلیم شمال ایران در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو -G ECHO، مجله جغرافیایی و توسعه، شماره ۱۶، صص ۱۵۲-۱۳۵.
- ۳۹- کمال، علیرضا؛ مساح بوانی، علیرضا (۱۳۸۹) تأثیر تغییر و نوسانات اقلیمی بر رواناب حوضه با دخالت عدم قطعیت دو مدل هیدرولوژی، مجله آب و خاک، دوره ۲۴، شماره ۵، صص ۹۳۲-۹۲۰.
- ۴۰- سلیمانی ساردو، فرشاد؛ سلطانی کویایی، سعید؛ سرحدی، علی (۱۳۸۷) پهنه‌بندی و تحلیل خشکسالی با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI) در استان کرمان، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز- دانشکده عمران.
- ۴۱- آشفته، پریسا سادات؛ مساح بوانی، علیرضا (۱۳۸۶) تأثیر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی سیلاب در دوره‌های آبی مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی، مجموعه مقالات کارگاه فنی اثر تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب، صص ۴۸-۳۲.
- تحقیقات منابع آب ایران، سال هشتم، دوره ۸، شماره ۳، صص: ۱۴-۲۳
- 32- Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel and T. L. Veith, (2007), "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations", Transactions of the ASABE, Volume. 50, No. 3: pp 885-900.
- ۳۳- قربانی، خلیل؛ خلیلی، علی؛ علوی پناه، سیدکاظم؛ نخعی زاده، غلامرضا (۱۳۸۹) مطالعه تطبیقی نمایه های هواشناسی خشکسالی، SIAP SPI به روش داده کاوی (مطالعه موردی استان کرمانشاه)، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، دوره ۲۴، شماره ۳، صص ۴۱۷-۴۲۶.
- ۳۴- محمدیان، آزاده؛ کوهی، منصوره؛ آدینه‌بیگی، آرمان؛ رسولی، سیدجواد؛ بذرافشان، بهاره (۱۳۸۹). مقایسه پایش خشکسالی با استفاده از شاخصهای DI، SPI و PNI و پهنه‌بندی آنها (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی)، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد هفدهم، شماره اول، صص ۱۸۴-۱۷۷.
- ۳۵- نصرتی، کاظم؛ محسنی ساروی، محسن؛ شهبازی، رضا (۱۳۹۳) مقایسه و کاربرد دو شاخص بارش استاندارد شده و بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده برای ارزیابی وضعیت خشکسالی هواشناسی در استان تهران، نشریه مدیریت بیابان شماره ۳، صص ۹۰-۷۷.
- ۳۶- فرج‌زاده، منوچهر؛ احمدیان، کلثوم (۱۳۹۳) تحلیل زمانی و مکانی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI