

Variations and Sensitivity Analysis on Aridity Index (AI) in Some Climate Samples in Iran

B. Bakhtiari^{1*}, N. Mahdavi², and N. Sayari³

Abstract

As the ratio of evapotranspiration to precipitation, Aridity Index (AI) is used to quantify the value of aridity. In this study, sensitivity analysis was performed on AI using the partial derivative method based on 7 meteorological variables including Pre, T_{Max} , T_{Min} , e_a , U_2 and R_s in 5 different climates based on De Martonne's classification method during the period 1990-2019 on annual time scale. Mann-Kendall test and Sen's slope estimation method were employed for the purpose of trend detection of AI variations. CanESM2 atmospheric circulation method under two scenarios including RCP4.5 and RCP8.5 and Statistical Downscaling Model (SDSM) were used to predict AI variations in the future period of 2020-2050. The Results of AI trend analysis indicated increased aridity in all stations excluding Mashhad. The Results of sensitivity coefficient showed that precipitation, among all other climate variables, contributed the most to AI variations, as 10% increase in precipitation resulted in a decrease in AI in Rasht, Ilam, Yasouj, Mashhad and Kerman by 10.72%, 11.81%, 12.48%, 11.14% and 12.82%, respectively. AI had then the highest sensitivity to T_{Max} and T_{Min} in Ilam and Rasht stations, to e_a in Kerman and Mashhad stations, and to R_s in Yasouj station. Throughout the next 30-year period, it is expected that AI values increase in all observed stations except Yasouj. The highest and lowest annual AI increase rates throughout this period would take place in Rasht station under scenario RCP8.5, and in Mashhad station under scenario RCP4.5.

Keywords: Aridity Index (AI), Sensitivity Coefficients, Climate Change Scenarios, Trend Test.

Received: December 19, 2020

Accepted: March 17, 2021

تحلیل حساسیت و بررسی تغییرات شاخص خشکی (AI) در چند نمونه اقلیمی ایران

بهرام بختیاری^{۱*}، نکیسا مهدوی^۲ و نسرين سياري^۳

چکیده

شاخص خشکی (AI) به عنوان نسبت تبخیر-تعرق به بارش برای کمی‌سازی مقدار خشکی به کار می‌رود. در این مطالعه، تحلیل حساسیت AI براساس ۷ متغیر هواشناسی شامل بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل، فشار بخار هوا، سرعت باد و تابش ورودی در ۵ نمونه اقلیمی متفاوت بر اساس طبقه‌بندی دومارتون طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹ در مقیاس زمانی سالانه با استفاده از روش مشتقات جزئی محاسبه شد. برای روندیابی تغییرات AI، از آزمون من-کندال و روش تخمین گر شیب خط سن استفاده شد. به منظور پیش‌نگری تغییرات AI در دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۵۰، از مدل گردش عمومی جو (canESM2) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و مدل ریزمقیاس‌نمایی (SDSM) استفاده شد. نتایج تحلیل روند، حاکی از افزایش خشکی در همه ایستگاه‌ها به جز مشهد بود. نتایج ضریب حساسیت نشان داد، در بین متغیرهای اقلیمی، بارش بیش‌ترین سهم را در تغییرات AI داشته است. به طوری که ۱۰٪ افزایش در بارش، باعث کاهش AI در ایستگاه‌های رشت، ایلام، یاسوج، مشهد و کرمان به ترتیب ۱۰/۷۲٪، ۱۱/۸۱٪، ۱۲/۴۸٪، ۱۱/۱۴٪ و ۱۲/۸۲٪ می‌شود. بعد از بارش، بیشترین حساسیت AI به متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های ایلام و رشت به ترتیب دمای حداکثر و حداقل، در ایستگاه‌های کرمان و مشهد، فشار بخار هوا، و در ایستگاه یاسوج مقدار تابش ورودی است. طی دوره ۳۰ سال پیش‌رو، انتظار می‌رود مقادیر AI در همه ایستگاه‌های مطالعاتی به جز یاسوج افزایش یافته و بیشترین و کمترین نرخ افزایش AI سالانه به ترتیب در ایستگاه‌های رشت تحت سناریوی RCP8.5 و مشهد تحت سناریوی RCP4.5 رخ دهد.

کلمات کلیدی: شاخص خشکی، ضرایب حساسیت، سناریوهای تغییر اقلیم، آزمون روند.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۹/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۲/۲۷

1- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: drbakhtiari@uk.ac.ir

2- M. Sc. in Water Resources Engineering, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

3- Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.1.1.2](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.1.1.2)

۱- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۳- استادیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

موضوع تغییر اقلیم از ابتدای دهه هشتاد میلادی مطرح شد. از دلایل آن می‌توان به تغییر محور چرخش زمین، افزایش گازهای گلخانه‌ای، فعالیت‌های انسانی، موقعیت جغرافیایی، نزدیک بودن به محیط‌های بزرگ اقیانوسی و باد غالب اشاره کرد که در این بین افزایش گازهای گلخانه‌ای نقش مؤثرتری را ایفا کرده است (Dehghani, 2017). از نیمه قرن بیستم، افزایش چشمگیر غلظت گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسیدکربن به دلیل استفاده بی‌رویه از سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی و فعالیت‌های کشاورزی، منجر به تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی زمین شده است (IPCC, 2014). تا آنجایی که در گزارش‌های چهارم (AR4)^۱ و پنجم (AR5)^۲ ارزیابی ارائه شده توسط هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)^۳ بیان شد، وضعیت آب و هوایی جهانی در قرن بیست و یکم و دفعات وقوع شرایط حدی آب و هوایی با سرعت بی‌سابقه‌ای تغییر خواهد کرد (Li et al., 2020). در نتیجه تغییرات اقلیمی، یک پدیده طبیعی و تکرارشده در یک دوره زمانی مشخص به نام خشکسالی و یا دوره‌های خشکی اتفاق می‌افتد (Sharma and Samakhti, 2004). شاخص خشکی مفهوم خشکی را به یک عدد خلاصه می‌کند (Park et al., 2018). از جمله شاخص‌های معتبر ابداع شده طی سال‌های ۱۹۸۰-۱۹۰۰ میلادی، می‌توان به شاخص‌های Koppen, De Martonne, Ivanova, Reichel و Lang, Meyer, Emberger, UNESCO, Budyko Martonne اشاره کرد (Hejazizadeh and Javizadeh, 2017). در این بین شاخص خشکی (AI)^۴ با در نظر گرفتن تحولات هم‌زمان نیاز آبی (ET_o) و تأمین آبی حاصل از بارش (Pre)، شاخص مناسبی برای بررسی وضعیت اکوهیدرولوژیک یک منطقه است و بررسی روند AI می‌تواند به خوبی نمایانگر تأثیرات تغییرات اقلیمی باشد (Liu et al., 2013). از این شاخص در بسیاری از مطالعات به عنوان نسبت تبخیرتفرق مرجع به بارش (Cao and Zhou, 2019; Grave et al., 2019; Li et al., 2017; Huang et al., 2016; Liu et al., 2013) و گاهی اوقات از معکوس آن به عنوان شاخص رطوبت استفاده می‌گردد (Greve et al., 2019; Kaviani, 2001). تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه تأثیرات تغییرات اقلیمی بر شاخص‌های خشکسالی انجام شده است که نتایج حاکی از افزایش روند خشکی در طول قرن بیست و یکم است (Marvel et al., 2019; Lin et al., 2018; Huang et al., 2016; Zhao and Dai, 2015; Sherwood and Fu, 2014; Dai, 2013).

Khazanedari et al. (2009) داده‌های بارش طی دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ را برای ۴۷ ایستگاه سینوپتیک شبیه‌سازی کردند و وضعیت

خشکی را با استفاده از شاخص بارش نرمال تخمین زدند. نتایج این مطالعه نشان داد که طی ۳۰ سال آینده، شرایط خشکی در ایران رو به افزایش خواهد بود و بیشتر مناطق ایران در سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۵، ۲۰۳۲، ۲۰۳۵، ۲۰۳۹ خشکی شدیدی را تجربه خواهند کرد که در این بین سال ۲۰۳۹ وضعیت خشکی بحرانی دارد. Abarghouei et al. (2011) در مطالعه‌ای به تغییرات روند خشکی با استفاده از شاخص بارش استاندارد SPI و آزمون آماری من-کندال در نقاط مختلف ایران پرداختند. نتایج به دست آمده حاکی از روند منفی قابل توجه خشکی در بسیاری از مناطق ایران به ویژه مناطق جنوب‌شرق، غرب و جنوب‌غرب کشور است. اگرچه برخی از مناطق ایران (حوالی دریای خزر) و شمال‌شرقی روند قابل توجهی را نشان نمی‌دهد اما در سایر نقاط کشور شدت خشکی طی ۳۰ سال گذشته افزایش یافته است. Nouri et al. (2016) به بررسی روند تغییرات شاخص خشکی، تبخیرتفرق مرجع و بارش طی دوره ۲۱۰۰-۱۹۹۶ با خروجی‌های مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوهای A2 و B2 به روش ریزمقیاس‌نمایی SDSM^۵ در شمال‌غرب ایران پرداختند.

نتایج نشان داد که میانگین شاخص خشکی در تمام ایستگاه‌ها نسبت به دوره پایه، تحت دو سناریوی مورد بررسی کاهش خواهد یافت که بیانگر خشک‌تر شدن اقلیم این مناطق طی سده حاضر است. Zolfaghari and Mirzaei (2017) در تحقیق خود به تحلیل و پهنه‌بندی دوره‌های خشکی در ایران بر اساس شاخص روزهای خشک بعد از آخرین روز بارش (DDSLR)^۶ پرداختند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش احتمال از ۲۵ درصد (خوشبینانه) به ۹۰ درصد (بسیار بدبینانه) بر وسعت منطقه دارای دوره خشکی بلند در بخش‌های جنوب، جنوب‌شرق و شمال‌غرب کشور افزوده می‌شود. Amirrezaeieh et al. (2017) روند تغییرات دما و بارش را در شمال‌غرب کشور در مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه در نیم قرن گذشته مورد آزمون قرار دادند. نتایج نشان داد دما و بارش در مقیاس ماهانه به ترتیب روند افزایشی و کاهشی داشته است. در مقیاس فصلی، فصل‌های تابستان، زمستان و پاییز به ترتیب بیشترین افزایش دما را تجربه کرده‌اند و فصل‌های بهار و زمستان بیشترین نرخ کاهش بارندگی را داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد که در مقیاس سالانه، ۶۰ درصد ایستگاه‌ها روند افزایشی معنی‌دار در دما را تجربه کرده‌اند و این امر با تأثیر مستقیم بر بارش منطقه همراه بوده و باعث به وجود آمدن روند کاهشی بارش، در ۷۰ درصد از ایستگاه‌ها شده است. Tavousi (2018) در پژوهشی به بررسی روند تغییرات شاخص پیشنهادی برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد (UNEP)^۷ و بارش در گستره غرب و شمال‌غرب ایران در دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۱ پرداخت. نتایج حاکی از روند کاهش بارندگی و تغییر شرایط آب و هوایی از نیمه مرطوب به

(Bannayan and Hoogenboom, 2008). همچنین پاسخ به سؤالاتی از قبیل اینکه عامل اصلی تغییر در شاخص خشکی چیست؟ یا متغیرهای آب و هوایی مانند بارش، سرعت باد، تابش خورشید و فشار بخار چگونه می‌توانند در تغییر شاخص خشکی نقش داشته باشند؟، برای درک بیشتر تأثیر تغییرات آب و هوا در فرآیندهای هیدرولوژیک، مدیریت منابع آب و پیش‌نگری تغییرات تنش خشکی ضروری است (Li et al., 2017). بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون در اقلیم‌های مختلف ایران بررسی جامعی بر روی شاخص خشکی AI به عنوان نسبت تبخیرتقرق مرجع به بارش و به ویژه تحلیل حساسیت این شاخص نسبت به متغیرهای اقلیمی مختلف انجام نگرفته است. لذا در این مطالعه به بررسی میزان تأثیرگذاری و سهم عوامل مختلف اقلیمی در شاخص AI و تغییرات روند این شاخص در چند نمونه اقلیمی در ایران پرداخته شده است. همچنین تأثیر تغییرات اقلیمی بر میزان خشکی طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ براساس مدل گردش عمومی جو، و تحت دو سناریوی حدواسط و بدبینانه انجام پذیرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌ها

ایران با متوسط بارش سالانه ۲۴۱ میلی‌متر، بین دو نصف النهار ۴۴° و ۶۴° شرقی و دو مدار ۲۵° و ۴۰° شمالی واقع شده است و دارای اقلیم‌های متفاوتی می‌باشد. در این تحقیق پنج ایستگاه رشت، یاسوج، ایلام، مشهد و کرمان بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن در پنج نمونه اقلیمی متفاوت انتخاب شدند. مشخصات و نوع اقلیم ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. داده‌های مورد نیاز شامل دمای حداقل (T_{Min})، دمای حداکثر (T_{Max})، مقدار بارش (Pre)، تعداد ساعات آفتابی (n)، سرعت باد (U_2)، رطوبت نسبی (RH) و فشار بخار هوا (e_a) به صورت روزانه مربوط به دوره ۲۰۱۹-۱۹۹۰ از پایگاه داده سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. به منظور مطالعه اثرات تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای، از داده‌های اقلیمی شامل ۲۶ متغیر اتمسفری بزرگ مقیاس، محصول مشترک مرکز ملی پیش‌بینی محیط زیست و مرکز ملی تحقیقات اتمسفری NCEP/NCAR^۸ با دقت مکانی $2/5 \times 2/5$ از سایت (<https://sdsms.org.uk/data.html>) طی دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۴۸ استفاده شد. داده‌های خروجی مدل CanESM2 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 طی دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۶ و همچنین داده‌های تاریخی مدل بزرگ مقیاس در دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۱ از وب سایت شبکه سناریوهای تغییر اقلیم کانادا (CCCSN)^۹ دریافت شد.

سمت خشک‌تر شدن است و شدت خشکی از درجه خطر کم و متوسط به درجه شدید و بسیار شدید افزایش یافته است. (Li et al. (2017) به بررسی تغییرات AI و ویژگی‌های اقلیمی در جنوب‌غربی چین طی یک دوره ۲۳ ساله پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص خشکی به طور قابل توجهی در سال افزایش یافته است. همچنین آن‌ها دریافتند کاهش بارش و افزایش دما در منطقه از متغیرهای مهم در افزایش شاخص خشکی در دوره زمانی مورد بررسی بوده است. (Sarlak and Agha (2018) به بررسی تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های خشکی لانگ (Lang)، خشکی دومارتن (De Martonne)، برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد (UNEP) و شاخص خشکی Erinc به مدت ۳۱ سال با هدف تعیین اراضی خشک و تغییر شرایط خشکی در عراق پرداختند. نتایج تغییرات مکانی نشان داد، حدود ۹۷ درصد از کشور را مناطق خشک و نیمه خشک در بر گرفته و در مورد تغییرات زمانی، مشاهده شد که شاخص‌های خشکی برای کلیه ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد؛ به نظر می‌رسد کاهش بارندگی و افزایش دما برای این منطقه باعث بدتر شدن اوضاع در آینده خواهد شد. (Ahmed et al. (2019) از شاخص خشکی UNESCO برای تخمین میزان خشکی در پاکستان استفاده کردند.

نتایج نشان داد که آب و هوای این کشور بالای ۶۰٪ عمدتاً در مناطق جنوبی) خشک است و الگوهای مکانی و زمانی روند خشکی، گویای تأثیر زیاد تغییرات بارش در روند خشکی است و به مرور باعث تغییر اقلیم منطقه از نیمه خشک به خشک شده است. (Dehghan et al. (2020) در مطالعه خود به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو canESM2 تحت دو سناریوی میانه (RDP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۴۸ در استان فارس پرداختند. نتایج نشان داد که به طور کلی متغیر بارش و دما، عموماً در دوره آینده تحت سناریوهای مختلف افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج مدل پایش خشکسالی نشان داد که دوره‌های خشک در سه دهه آینده در مقایسه با دوره پایه افزایش می‌یابد در این میان بالاترین مقدار خشکسالی در ایستگاه‌های آباد و لار در طول دوره پیش‌نگری تحت هر دو سناریو مورد انتظار است. همچنین با توجه به نتایج دوره‌های اعتبار سنجی و معیارهای کارایی، دریافتند روش SDSM ابزاری مناسب برای پیش‌نگری خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک است. در ایران با توجه به اثرهای خشکی بر کشاورزی، امنیت غذایی و وضعیت اقتصادی اجتماعی مردم، پیش‌نگری وضعیت خشکی می‌تواند به تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران کشور در ارائه و اتخاذ راهکارهای جبرانی و سازگاری برای کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی کمک کند

Table 1- Geographical characteristics, mean climatic variables and climate types of the studied stations

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی، متوسط متغیرهای اقلیمی و نوع اقلیم ایستگاه‌های مورد مطالعه

Station	Longitude (E)	Latitude (N)	Elevation (m)	Mean annual Precipitation (mm)	Mean annual Evapotranspiration (mm)	Mean daily Temperature (°c)	Climate
Rasht	37°19'	49°37'	-8.6	1219.1	803.7	16.1	Very humid
Yasouj	51°56'	30°70'	1816.3	790.6	1866.0	15.1	Humid
Ilam	33°34'	46°23'	1337.0	476.6	1383.3	17.1	Mediterranean
Mashhad	36°9'	59°22'	999.2	245.0	2297.0	15.7	Semi-arid
Kerman	56°96'	30°26'	1753.8	133.5	2662.1	17.0	Arid

۲-۲-۲ روش‌ها

۱-۲-۲-۱ محاسبه شاخص خشکی

در این مطالعه شاخص AI بر اساس معادله (۱) محاسبه شد. در این شاخص، ET_0 مقدار تبخیر تعرق سالانه، Pre میزان بارندگی سالانه، هر دو بر حسب میلی‌متر است. طبقه‌بندی مناطق اقلیمی مختلف بر اساس شاخص خشکی در جدول ۲ آورده شده است.

$$AI = \frac{ET_0}{Pre} \quad (1)$$

برای برآورد تبخیر تعرق مرجع از روش پنمن-مانتیث-فائو ۵۶، بر اساس معادله (۲) استفاده شد:

$$ET_0 = \frac{0408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

که در آن ET_0 تبخیر تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگاژول بر متر مربع بر روز)، T میانگین دمای روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری از سطح زمین (درجه سلسیوس)، u_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و واقعی (کیلوپاسکال)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما در نقطه‌ای که دمای آن T باشد (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)، γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) و G شار گرمای خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز) است (Allen et al., 1998).

Table 2- Classification of aridity intensity based on AI (Zhang et al., 2013)

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشکی بر اساس شاخص AI

(Zhang et al., 2013)

Climate	AI Range
Humid	AI < 1
Semi humid	1 < AI < 1/5
Semi-arid	1/5 < AI < 4
Arid	AI > 4

۲-۲-۲ تحلیل روند شاخص خشکی

در این پژوهش با استفاده از آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن، تحلیل‌های مربوط به روند تغییرات بررسی گردید. آزمون ناپارامتری من-کندال ابتدا توسط Mann (1945) ارائه و سپس توسط Kendall (1975) بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت. این روش به طور متداول در تحلیل روند سری‌های اقلیمی به کار گرفته می‌شود (Hamed, 2008). فرضیه صفر (H_0) این است که، در نمونه‌ای از داده‌های $\{x_i, i=1,2,3,\dots,n\}$ به معنای توزیع مستقل و تصادفی بودن دارد و فرضیه مخالف (H_1) به معنای یک روند یکنواخت است. آماره S از کندال با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (3)$$

که در آن x مقدار داده پی در پی و n تعداد جملات سری است. تابع علامت نیز با استفاده از معادله (۴) به دست می‌آید:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

در مرحله بعد واریانس S در صورتیکه تعداد داده‌ها $n > 10$ باشد بر اساس معادله (۵) قابل محاسبه است:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (5)$$

که در آن m و n تعداد دنباله‌هایی است که حداقل یک داده تکراری دارند. t بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله است. در نهایت آزمون استاندارد Z با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

با فرض دو دامنه بودن آزمون روند، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که رابطه $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ برقرار باشد α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی دار α است. در بررسی حاضر این آزمون برای سطوح اعتماد ۹۰٪، ۹۵٪، ۹۹٪، ۹۹/۹٪ به کار گرفته شده است.

$$S(x) = \lim_{\Delta x/x} \left(\frac{\Delta AI/AI}{\Delta x/x} \right) = \frac{\partial AI}{\partial x} \frac{x}{AI} \quad (10)$$

تغییر در شاخص خشکی AI را تقریباً می‌توان به چندین متغیر اقلیمی طبق معادله (۱۱) نسبت داد و آن را به صورت $L(AI)$ (روند خطی شاخص) معادله (۱۲) نشان داد:

$$\begin{aligned} \frac{\partial AI}{dt} = & \frac{\partial AI}{\partial Pre} \frac{dPre}{dt} + \frac{\partial AI}{\partial T_{max}} \frac{dT_{max}}{dt} + \frac{\partial AI}{\partial T_{min}} \frac{dT_{min}}{dt} + \\ & \frac{\partial AI}{\partial R_s} \frac{dR_s}{dt} + \frac{\partial AI}{\partial U_2} \frac{dU_2}{dt} + \frac{\partial AI}{\partial ea} \frac{dea}{dt} + \varepsilon \\ L(AI) = & Cr(Pre) + Cr(T_{max}) + Cr(T_{min}) \\ & + Cr(R_s) + Cr(U_2) \\ & + Cr(ea) + \varepsilon \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن $Cr(x)$ توابعی هستند که بر اساس روند تغییرات نتایج AI بر اساس تغییرات متغیرهای X می‌باشند. همه شش متغیر به عنوان متغیرهای پیش فرض در $C(AI)$ استفاده می‌شود. مقدار ε خطای بین $L(AI)$ و $C(AI)$ است. نحوه محاسبه هر یک از متغیرها، طبق جدول ۳ قابل محاسبه است (Li et al., 2017).

ارتباط بین متوسط هر متغیر اقلیمی $Cr(xi)$ با AI می‌تواند بر اساس معادله (۱۳) محاسبه شود. $RC(xi)$ سهم نسبی هر متغیر اقلیمی به روند AI است.

$$RC(xi) = \frac{Cr(xi)}{L(AI)} \times 100 \quad (13)$$

۲-۲-۴- ریزمقیاس‌نمایی و بررسی کمی عملکرد مدل

در پژوهش حاضر به منظور شبیه‌سازی داده‌های آینده بارش و دما از مدل آماری SDSM جهت ریزمقیاس‌نمایی مدل بزرگ مقیاس CanESM2 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. پیش از ریزمقیاس‌نمایی لازم است فرآیندهای کنترل آماری نظیر نرمالیتی، ناریبی و استقلال داده‌ها در طول زمان مورد بررسی قرارگیرد. داده‌های دما نرمال بوده، دارای همبستگی معناداری اند و ناریبی کمی دارند. داده‌های بارش دارای چولگی اند و همبستگی معناداری ندارند از این رو، در تحلیل آماری و تصحیح اریبی از روش‌های ناپارامتری یا از مؤلفه جایگزین مانند تعداد روزهای خشک و تر استفاده می‌شود. به طور کلی ریزمقیاس‌نمایی یا شرطی است و یا غیر شرطی، به عنوان مثال مقدار بارش مشروط بر وقوع رویداد روز تر است اما دما یک رویداد غیر شرطی است. در فرآیند شرطی، ابتدا وقوع روز تر با استفاده از معادله (۱۴) تعیین می‌شود.

$$W_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j X_{ij} \quad (14)$$

Sen (1968) و Tail (1950) روش ناپارامتری آزمون تخمین گر شیب سن (Sen) را جهت تحلیل سری‌های زمانی ارائه نمودند. اساس این روش بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی و قضاوت نمودن در مورد معنی‌داری شیب بدست آمده در سطوح اعتماد مختلف استوار می‌باشد. محاسبه شیب بین هر جفت داده مشاهده‌ای مطابق معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{X_t - X_s}{t - s} \quad (7)$$

که در آن X_t و X_s به ترتیب داده‌های مشاهداتی در زمان‌های t و s اند. برای هر جفت داده مشاهده‌ای، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده طبق معادله (۸) بدست می‌آید که با محاسبه میانه این سری زمانی شیب خط روند (Q_{med}) محاسبه می‌شود. مقدار مثبت آن حاکی از روند صعودی و مقدار منفی آن نزولی بودن روند را نشان می‌دهد:

$$C_a = Z_{1-a/2} * \sqrt{\text{var}(s)} \quad (8)$$

که در آن Z آماره توزیع نرمال استاندارد می‌باشد و برای سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ به ترتیب برابر با ۱/۹۶ و ۲/۵۸ در نظر گرفته می‌شود. بعد از آن حدود اعتماد بالا و پایین (M_2 و M_1) با معادله (۹) قابل محاسبه است:

$$\begin{cases} M_1 = (N - C_a)/2 \\ M_2 = (N + C_a)/2 \end{cases} \quad (9)$$

از بین شیب‌های محاسبه شده در صورتی که عدد صفر در دامنه بین دو شیب مذکور قرار بگیرد فرض صفر پذیرفته شده و بر سری زمانی آزمون نمی‌توان هیچگونه روندی را در سطح اعتماد بکار گرفته شده نسبت داد. در غیر این صورت فرض صفر رد شده و می‌توان پذیرفت که سری زمانی دارای روند معنی‌داری در سطح اعتماد مورد آزمون می‌باشد (Rostamzadeh, 2019).

۲-۲-۳- تعیین ضریب حساسیت

روش‌های کلی تحلیل حساسیت با توجه به اینکه تغییرات خروجی به وسیله تغییرات مولفه‌های ورودی اطراف یک مقدار مرجع، یا در کل فضای ممکن به دست آید، به دو گروه تحلیل حساسیت محلی^{۱۰} و تحلیل حساسیت جهانی^{۱۱} تقسیم می‌شوند (Hamraz et al., 2016). از جمله شاخص‌هایی که برای تحلیل حساسیت محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به مشتقات جزئی یا روش‌های تفاضل محدود اشاره کرد (Hill et al., 2006). در این پژوهش از ضریب حساسیت، به عنوان نسبت تغییر متغیر وابسته به نرخ تغییر برخی از متغیرهای مستقل استفاده شده است. حساسیت شاخص خشکی AI نسبت به متغیرهای آب و هوایی را می‌توان با معادله (۱۰) محاسبه نمود که در آن X متغیر وابسته و $S(x)$ ضریب حساسیت بدون بعد AI به متغیر X است:

Table 3- Partial derivative equations of aridity index relative to the climate variables

جدول ۳- معادلات مشتقات جزئی شاخص خشکی نسبت به متغیرهای اقلیمی

Differential Items	Formula
$\frac{\partial AI}{\partial Pre}$	$\frac{ET_0}{Pre}$
$\frac{\partial AI}{\partial T_{max}}$	$\left[\frac{\partial(\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2))}{\partial T_{max}} - \left(\frac{\partial(0.408\Delta(R_n - G))}{\partial T_{max}} + \frac{\partial(\gamma \frac{900}{T_n + 273} U_2 (e_s - e_a))}{\partial T_{max}} \right) \right] - \left[\frac{\partial \Delta}{\partial T_{max}} \times (0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_n + 273} U_2 (e_s - e_a)) \right] \times \frac{1}{Pre}$
$\frac{\partial AI}{\partial T_{min}}$	$\left[\frac{\partial(\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2))}{\partial T_{min}} - \left(\frac{\partial(0.408\Delta(R_n - G))}{\partial T_{min}} + \frac{\partial(\gamma \frac{900}{T_n + 273} U_2 (e_s - e_a))}{\partial T_{min}} \right) \right] - \left[\frac{\partial \Delta}{\partial T_{min}} \times (0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_n + 273} U_2 (e_s - e_a)) \right] \times \frac{1}{Pre}$
$\frac{\partial AI}{\partial R_s}$	$\frac{0.408\Delta \frac{\partial(R_{ns} - R_{nl})}{\partial R_s}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \times \frac{1}{Pre}$
$\frac{\partial AI}{\partial U_2}$	$\frac{[(\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)) \times (\gamma \frac{900}{T_n + 273} U_2 (e_s - e_a))] - [0.34\gamma \times (0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_n + 273} U_2 (e_s - e_a))]}{(\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2))^2} \times \frac{1}{Pre}$
$\frac{\partial AI}{\partial ea}$	$\sigma \left[\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] \times 0.14 \left(\frac{1}{2\sqrt{ea}} \left[1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right] \right) \times \frac{1}{Pre}$

سناریوی اقلیمی (Wilby and Harris, 2006). مدل مورد استفاده CanESM2 یک مدل جامع، ترکیبی از دو مدل CanCM4^{v2}، CTEM^{v2} و چهارمین نسل از مدل‌های گردش عمومی جفت شده CGCM4^{v2} است و جزء سری مدل‌های CMIP5^{v5} و گزارش پنجم AR5 هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم IPCC می‌باشد که توسط مرکز مدل‌سازی و آنالیز اقلیم کانادا طراحی شد (Chylik et al., 2011). به منظور واسنجی و توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌ها، بهترین دوره واسنجی هر ایستگاه با سعی و خطا و معیارهای R²، SE^{v2} انتخاب شدند. با استفاده از داده‌های مشاهداتی دوره باقیمانده و پارامترهای مدل، صحت پیش‌نگری مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. برای آزمون کارایی مدل از ضریب تبیین (R²)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)^{v2}، میانگین خطای مطلق (MAE)^{v2} و ضریب نش-ساتکلیف (NSE)^{v2} استفاده شد (Taei Semiroimi et al., 2014).

۳- نتایج

۳-۱- روند شاخص خشکی در دوره پایه و تعیین سهم هر متغیر اقلیمی

بررسی روند تغییرات شاخص خشکی از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۱۹ نشان می‌دهد، در ایستگاه‌های ایلام و کرمان، به طور متوسط AI به ترتیب در هر سال ۴/۵٪ و ۲۳/۷٪ روند افزایشی داشته که تغییرات این روند در سطح ۹۵ درصد نیز از لحاظ آماری معنی‌دار بوده است. در ایستگاه ایلام مقدار کمینه شاخص خشکی در سطح معنی‌داری ۹۹٪ برابر با

که در آن W_i وقوع یا عدم وقوع روز تر می‌باشد. X_{ij}، ز امین متغیر پیش‌گو در روز i می‌باشد و α پارامترهای رگرسیون را نشان می‌دهد. در صورت وقوع روز تر، مقدار بارش با استفاده از معادله (۱۵) ریزمقیاس‌نمایی می‌شود.

$$P_i^k = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j X_{ij} + e_i \quad (15)$$

که در آن P_i مقادیر بارش، توان k برای انجام تبدیل بر مقادیر بارش و e_i خطای مدل می‌باشد. در رویداد غیر شرطی همچون دما، یک رابطه خطی مستقیم بین پیش‌بینی شونده U_i و پیش‌گوهای منتخب به صورت معادله (۱۶) وجود دارد.

$$U_i = \gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j X_{ij} + e_i \quad (16)$$

که در آن e_i مقدار باقیمانده است و فرض می‌شود از توزیع نرمال پیروی می‌کند (Wilby et al., 2014). در معادلات فوق، از روش حداقل مربعات معمولی برای بهینه‌سازی برازش مناسب‌ترین تابع رگرسیونی به نقاط مشاهده‌ای استفاده می‌شود. روش حداقل مربعات معمولی بر این اساس است که ضرایب مدل مقادیری اختیار کنند که مدل رگرسیون نمونه کم‌ترین انحراف را از مشاهدات فوق نشان دهد (Mahmood and Babel, 2014). عملکرد این مدل در هفت مرحله انجام می‌شود: ۱- کنترل کیفیت داده‌ها، ۲- انتخاب بهترین متغیرهای پیش‌بینی کننده، ۳- کالیبره کردن مدل، ۴- تولید داده‌های آب و هوایی، ۵- تحلیل آماری داده‌ها، ۶- خروجی گرفتن از مدل، ۷- تولید

میزان خشکی کاسته شده است. نتایج به دست آمده با یافته‌های (Tavousi, 2018; Zolfaghari and Mirzaei, 2017; Abarghouei et al., 2011) هم‌خوانی دارد.

۳-۲- ضریب حساسیت

میانگین مشتقات جزئی سالانه AI ($\frac{\partial AI}{\partial x_i}$) نشان می‌دهد که مقدار شاخص خشکی با افزایش مقادیر منفی کاهش می‌یابد و با افزایش مقادیر مثبت روند افزایشی را دارد. بدین ترتیب در ایستگاه رشت شاخص خشکی با افزایش بارش، دمای حداکثر و سرعت باد، در ایستگاه یاسوج با افزایش بارش و سرعت باد، در ایستگاه ایلام با افزایش بارش، دمای حداکثر و سرعت باد، در ایستگاه مشهد با افزایش بارش، دمای حداکثر و سرعت باد و در ایستگاه کرمان با افزایش بارش، سرعت باد، دمای حداکثر و دمای حداقل، کاهش می‌یابد.

این در حالی است که شاخص خشکی در ایستگاه رشت با افزایش دمای حداقل، فشار بخار هوا و تابش ورودی، در ایستگاه یاسوج با افزایش دمای حداقل، دمای حداکثر، فشار بخار هوا و تابش ورودی، در ایستگاه ایلام با افزایش دمای حداکثر، فشار بخار هوا و تابش ورودی، در ایستگاه مشهد با افزایش دمای حداقل، فشار بخار هوا و تابش ورودی و در ایستگاه کرمان با افزایش فشار بخار هوا و تابش ورودی افزایش می‌یابد. جدول ۵ نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی، بارش مهمترین متغیر اقلیمی است که با افزایش آن مقدار شاخص خشکی کاهش می‌یابد. این مهم با محاسبه میانگین ضریب حساسیت سالانه S(xi) تأیید می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که ۱۰ درصد افزایش در مقدار بارش می‌تواند شاخص خشکی را در اقلیم‌های رشت، ایلام، یاسوج، مشهد و کرمان به ترتیب تقریباً ۱۰/۷۲٪، ۱۱/۸۱٪، ۱۲/۴۸٪، ۱۱/۱۴٪ و ۱۲/۸۲٪ کاهش دهد. بعد از بارش، بیشترین حساسیت AI به متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های ایلام و رشت به ترتیب دمای حداکثر و دمای حداقل است.

۰/۱۱- و بیشترین مقدار آن ۰/۰۹۵ بوده است. در ایستگاه کرمان مقدار کمینه و بیشینه شاخص خشکی در سطح معنی‌داری ۹۹٪، مقدار ۰/۰۶۵- و ۰/۵۵۹ در سال است. در ایستگاه رشت به طور متوسط شاخص خشکی در هر سال در حدود ۰/۷٪ افزایش داشته است و شیب خط نیز روند افزایشی را نشان می‌دهد که در سطح احتمالاتی ۹۵ درصد نیز معنی‌دار است. در این ایستگاه مقدار کمینه شاخص خشکی در سطح معنی‌داری ۹۹٪ برابر با ۰/۰۰۲- و مقدار بیشینه آن ۰/۰۱۴ می‌باشد. در ایستگاه یاسوج نیز علی‌رغم عدم وجود روند، آماره‌های آزمون سن در سطوح مورد بررسی نشان داد که به طور متوسط در این ایستگاه در هر سال شاخص خشکی به مقدار ۲/۸٪ افزایش می‌یابد. در سطح معنی‌داری ۹۹٪ حداقل میزان آن به مقدار ۰/۰۳۴- و حداکثر ۰/۰۹۱ می‌رسد. ایستگاه مشهد تنها ایستگاهی است که روند شاخص خشکی در آن کاهش می‌یابد هر چند از نظر آماری معنی‌داری آن تأیید نشد، اما آماره‌های آزمون سن در سطوح اطمینان مورد بررسی نشان داد که شاخص خشکی به طور متوسط در سال در حدود ۲/۱٪ کاهش می‌یابد. ضمن اینکه کمینه شاخص خشکی در سطح معنی‌داری ۹۹٪، ۰/۱۵۹- و بیشینه مقدار آن ۰/۱۲۰ بوده است. بیشترین و کمترین مقدار تغییرات در روند شاخص خشکی در طی دوره مطالعاتی به ترتیب در ایستگاه‌های کرمان و مشهد اتفاق افتاده است. می‌توان بیان نمود که روندهای معنی‌دار اتفاق افتاده در ایستگاه کرمان در مقایسه با ایستگاه رشت و ایلام دارای شیب قابل توجهی بوده است. در شکل ۲ میانگین سالانه تغییرات AI نشان می‌دهد، مقدار شاخص در حدود ۵ تا ۱۴، در کل مناطق متفاوت است. کمترین میانگین شاخص خشکی با مقدار ۶/۳۵ قبل از سال ۲۰۰۰ مشاهده می‌شود و از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ به سرعت افزایش می‌یابد. خشک‌ترین سال، سال ۲۰۱۱ با شاخص خشکی سالانه ۱۴/۵۴ است. برای کل دوره، شاخص خشکی به میزان قابل توجهی ($p < 0.05$) با نرخ ۰/۰۶۷۳ در سال افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد اقلیم در سال‌های اخیر رو به طبقه خشکی نهاده است. با این حال، با افزایش میزان بارندگی در سال‌های اخیر از

Table 4- The results of AI variations trend analysis in the studied stations
جدول ۴- نتایج بررسی روند تغییرات شاخص خشکی در ایستگاه‌های مطالعاتی

Station	Z	Q	Q _{Max95}	Q _{Min95}	Q _{Max99}	Q _{Min99}
Rasht	+1.93	0.007	0.012	0.000	0.014	-0.002
Yasouj	1.21	0.028	0.074	-0.016	0.091	-0.034
Ilam	*2.00	0.045	0.079	0.000	0.095	-0.011
Mashhad	-0.29	-0.021	0.083	-0.121	0.120	-0.159
Kerman	*2.18	0.237	0.466	0.014	0.559	-0.065

Z: Mann-Kendall test statistic, Q: Sen's slope, Q_{Max99}, Q_{Min99}: Maximum and Minimum Sen's test statistics significance at 99%, Q_{Max95}, Q_{Min95}: Maximum and Minimum Sen's test statistics significance at 95%, +: Significant at 90%, *: Significant at 95%.

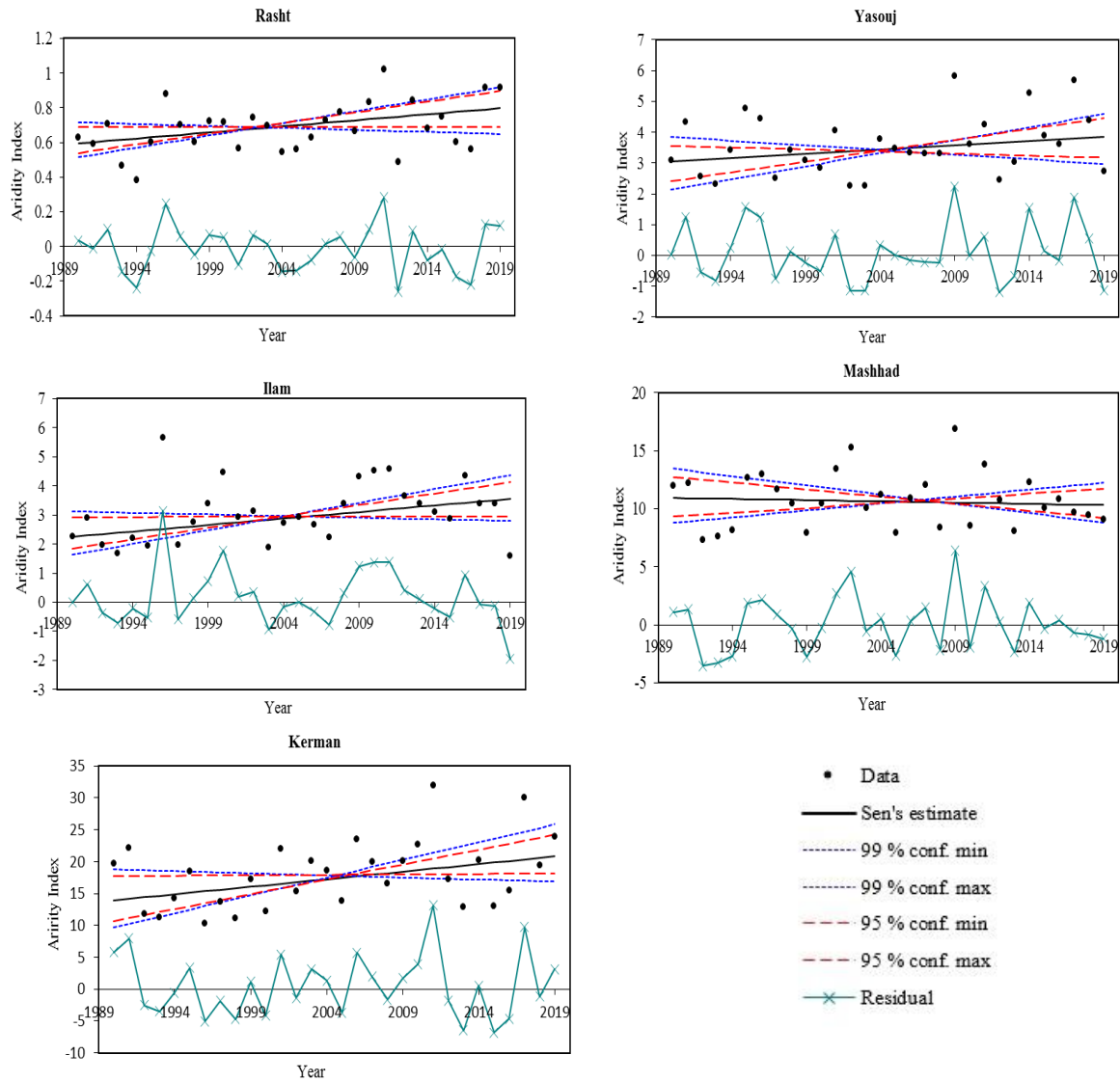


Fig. 1- AI trend in the baseline period in the studied stations
 شکل ۱- روند شاخص خشکی در دوره پایه در ایستگاه‌های مطالعاتی

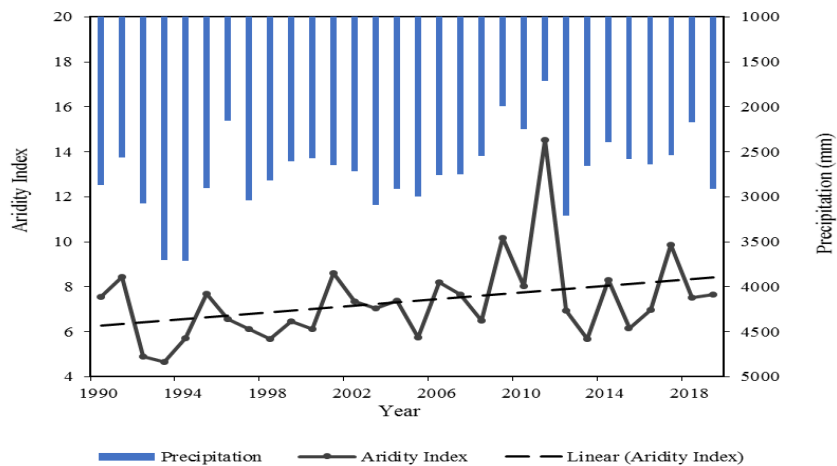


Fig. 2- Variation of aridity index in the studied stations over the baseline period
 شکل ۲- تغییرات شاخص خشکی در ایستگاه‌های مطالعاتی در دوره پایه

در دیگر دوره‌های زمانی، بهترین دوره واسنجی هر ایستگاه با سعی و خطا و معیارهای R^2 و SE حاصل از SDSM، انتخاب شدند که در جدول ۶ آورده شده است. بر اساس این نتایج، مقادیر R^2 مربوط به داده‌های بارش در مرحله واسنجی نسبت به دما پایین می‌باشند. پس از واسنجی مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی دوره باقیمانده و پارامترهای مدل، صحت‌سنجی داده‌ها صورت گرفت. طبق جدول ۷، مشاهده می‌شود که R^2 دارای مقادیر بالای ۰/۹۸ درصد و ضریب NSE بیشتر از ۰/۹۸ است.

شاخص‌های خطاسنجی RMSE و MAE نیز، نتایج قابل قبولی را نشان داده‌اند. از این رو کارایی مدل SDSM در تولید پارامترهای دمایی به کمک داده‌های NCEP مدل اقلیمی مذکور تایید می‌گردد. نتایج نشان داد که داده‌های بارش و دما تولید شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی پنج ایستگاه از همبستگی معناداری در سطح ۹۵ درصد

در ایستگاه کرمان و مشهد، فشار بخار هوا و در ایستگاه یاسوج مقدار تابش ورودی است. همچنین سهم هر متغیر اقلیمی ($Cr(x_i)$) در روند شاخص خشکی نیز گویای این است که سهم بارش بیش از سهم شش مؤلفه‌ی دیگر روند شاخص خشکی است. سهم نسبی بارش ($RC(pre)$) نیز نشان می‌دهد این متغیر در همه ایستگاه‌ها بیش از بقیه متغیرها در روند شاخص خشکی نقش داشته است. این مقدار در ایستگاه‌های رشت، یاسوج، ایلام، مشهد، کرمان به ترتیب ۱۸/۱۵٪، ۶۳/۱۰٪، ۲۵/۲۰٪، ۳۲/۹۴٪ و ۶۰/۴۵٪ است. بدین ترتیب ایستگاه‌های یاسوج و کرمان، بیشترین مقدار در روند شاخص خشکی را به خود اختصاص داده‌اند. به نظر می‌رسد کاهش بارندگی از عوامل اساسی تغییر شاخص خشکی در ایستگاه‌های مورد مطالعه بوده است.

۳-۳- واسنجی و صحت‌سنجی مدل

جهت بررسی گام واسنجی و توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌ها در

Table 5- Contribution of climate variables to variations of annual aridity trend
جدول ۵- سهم متغیرهای اقلیمی در تغییرات روند خشکی سالانه

Station		pre	T_{max}	T_{min}	e_a	U_2	R_s	ET_o
Rasht	$\frac{\partial AI}{\partial x_i}$	-0.0006	-0.00033	0.000088	0.00075	-0.00033	0.000123	0.001243
	S(xi)	-1.0729	0.00289	-0.00669	0.0001933	-0.00049	0.002451	1.572
	Cr(xi)	6.45	0.000937	0.000937	0.000932	0.000404	0.000541	0.00355
	RC(xi)	18.15	0.0134	0.0134	0.005	0.0061	0.0079	6.89
Yasouj	$\frac{\partial AI}{\partial x_i}$	-0.00725	0.000774	0.00077	0.01241	-0.00268	0.000166	0.00044
	S(xi)	-1.2480	0.00257	0.000919	0.00253	-0.00078	0.00258	0.2912
	Cr(xi)	1.677	0.000627	0.000627	0.00085	0.00032	0.00057	0.003125
	RC(xi)	63.10	0.0805	0.0805	0.095	0.042	0.078	8.49
Ilam	$\frac{\partial AI}{\partial x_i}$	-0.0071	0.0026	-0.0015	0.0043	-0.0065	0.0001	0.0022
	S(xi)	-1.1813	0.0238	-0.00513	0.00254	-0.00154	0.00063	1
	Cr(xi)	0.763	0.000612	0.000612	0.00769	0.00026	0.000075	0.01121
	RC(xi)	25.20	0.02185	0.02185	0.02658	0.0093	0.002658	4.2284
Mashhad	$\frac{\partial AI}{\partial x_i}$	-0.05343	-0.00021	0.00023	0.037392	-0.01374	0.000455	0.00044
	S(xi)	-1.1142	-0.00095	0.000036	0.003124	-0.00263	0.002465	0.09729
	Cr(xi)	3.278	0.00172	0.00172	0.00234	0.00235	0.00234	0.0119
	RC(xi)	32.94	0.043	0.043	0.076	0.058	0.059	1.45
Kerman	$\frac{\partial AI}{\partial x_i}$	-0.2050	-0.0039	-0.00223	0.05991	-0.01579	0.0013	0.00052
	S(xi)	-1.2827	-0.0054	-0.00098	0.00201	-0.00086	0.00319	0.06
	Cr(xi)	7.915	0.00307	0.00307	0.00214	0.00208	0.0029	0.0156
	RC(xi)	60.45	0.04533	0.04533	0.03164	0.0307	0.04287	0.7624

Pre: precipitation, T_{Max} : maximum temperature, T_{Min} : minimum temperature, e_a : actual vapor pressure, U_2 : wind speed at 2m height, R_s : incoming solar radiation, ET_o : evapotranspiration, $\frac{\partial AI}{\partial x_i}$: mean annual partial derivatives, S(xi): mean annual sensitivity coefficient, Cr(xi): contribution of variable xi to the trend of AI, RC(xi): relative contribution of climate variable xi to the trend of AI.

برخوردار هستند. این درحالی است که توانایی مدل در شبیه‌سازی دما در مناطق مورد مطالعه بیش از شبیه‌سازی بارش می‌باشد.

۳-۴- بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شاخص خشکی در آینده

در شکل‌های ۳ و ۴، مقدار AI سالانه تخمین زده شده برای ایستگاه‌های مطالعاتی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ نشان داده شده است. یک روند صعودی در تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی با شیب متفاوت در آینده تحت هر دو سناریوی انتشار قابل انتظار است. بر اساس نتایج ارائه شده انتظار می‌رود اقلیم ایستگاه‌ها در دوره آینده به سمت خشک‌تر شدن پیش رود. درصد نرخ تغییرات شاخص خشکی طی دوره ۳۰ ساله آینده نسبت به مقدار AI در دوره پایه ۲۰۱۹-۱۹۹۰ تحت هر دو سناریو در جدول ۸ ارائه شده است. تغییرات شاخص خشکی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی RCP4.5 در تمامی ایستگاه‌ها بیشتر است. انتظار می‌رود در ایستگاه رشت تحت سناریوی 4.5 نوسانات خشکی در این منطقه بیشتر باشد، تا جایی که در سال ۲۰۲۴ به پایین‌ترین مقدار (۰/۱۷) برسد. در ایستگاه مشهد نیز تحت سناریوی 8.5 نتایج حاکی

از روند افزایشی شاخص خشکی طی دوره آینده می‌باشد. این تغییرات از سال ۲۰۳۸ تا ۲۰۴۲ دارای نوسانات بیشتری است، به طوری که در سال ۲۰۴۰ به بالاترین حد خود به مقدار ۲۷/۰۹ می‌رسد. یاسوج تنها ایستگاهی است که در آن تحت سناریوی 4.5 کاهش شاخص خشکی با نرخ تغییرات ۵/۷۶- درصد اتفاق خواهد افتاد. در ایستگاه ایلام تحت سناریوی 8.5 از سال ۲۰۲۳ تا سال ۲۰۲۶ مقدار شاخص خشکی در کمترین حالت بین مقدار ۲/۳۶ تا ۳/۱۴ در نوسان خواهد بود. نرخ تغییرات افزایش خشکی با مقدار ۴۲/۰۵ درصد در این ایستگاه اتفاق خواهد افتاد. ایستگاه کرمان بیشترین نوسانات را تحت هر دو سناریو در بین تمامی ایستگاه‌ها داشته است به طوری که انتظار می‌رود تحت سناریوی 4.5 از سال ۲۰۲۵ به بعد، شاخص خشکی در یک سال به مقدار ۹/۰۹ رسد و در سال بعد با افزایش شدید به مقدار ۲۳/۰۲ برسد. پیش‌نگری تأثیرات تغییر اقلیم نشان می‌دهد، بیشترین و کمترین نرخ افزایش AI سالانه طی دوره آینده به ترتیب در ایستگاه رشت با ۴۹/۲۵ درصد، تحت سناریوی 8.5 و در ایستگاه مشهد با مقدار ۰/۱۸ درصد، تحت سناریوی 4.5 رخ دهد. این تغییرات در ایستگاه رشت باعث تغییر طبقه اقلیمی منطقه از بسیار مرطوب به مرطوب می‌شود.

Table 6- Evaluation of model performance in the calibration phase

جدول ۶- نتایج ارزیابی مدل در مرحله واسنجی

Variable	Station	Calibration phase	SE	R ²
Rainfall	Rasht	1990-2003	0.42	0.28
	Yasoj	1990-2002	0.50	0.35
	Ilam	1993-2005	0.56	0.27
	Mashhad	2003-2010	0.42	0.20
	Kerman	1990-2001	0.28	0.31
Temperature	Rasht	1990-2003	0.42	0.28
	Yasoj	1990-2009	0.12	0.69
	Ilam	1993-2010	2.12	0.70
	Mashhad	2003-2012	1.52	0.81
	Kerman	1990-2008	1.81	0.79

Table 7- Evaluation of model performance in the validation phase

جدول ۷- نتایج ارزیابی مدل در مرحله صحت‌سنجی

Variable	Station	Validation phase	NSE	MAE	RMSE	R ²
Rainfall	Rasht	2004-2019	0.97	0.08	0.14	0.95*
	Yasoj	2003-2019	0.85	0.74	1.33	0.86*
	Ilam	2006-2019	0.82	0.70	1.1	0.82*
	Mashhad	2011-2019	0.86	0.08	0.15	0.82*
	Kerman	2002-2019	0.86	0.14	0.21	0.89*
Temperature	Rasht	2011-2019	0.98	1.22	1.03	0.98*
	Yasoj	2010-2019	0.99	0.76	0.90	0.98*
	Ilam	2001-2019	0.99	0.86	0.98	0.99*
	Mashhad	2013-2019	0.99	1.46	1.76	0.97*
	Kerman	2009-2019	0.99	0.91	1.08	0.98*

*: Significant at 95%.

بسیار مرطوب (رشت) و مدیترانه‌ای (ایلام) داشته است. نتایج با یافته‌های (Omidvar et al., 2018; Taei semeiromi et al., 2009; Khazanedari et al., 2014) مطابقت دارد.

به نظر می‌رسد تفاوت رفتار این شاخص در نمونه‌های اقلیمی منتخب به علت این است که این شاخص به شدت تحت تاثیر مقدار بارش در هر منطقه قرار می‌گیرد. مقدار آن در اقلیم خشک (کرمان) و نیمه‌خشک (مشهد) نوسانات بیشتری نسبت به اقلیم مرطوب (یاسوج)،

Table 8- The minimum, maximum, average values and variations rate (%) of AI in the base and future periods

جدول ۸- مقادیر کمینه، بیشینه، متوسط و درصد نرخ تغییرات AI در دوره پایه و آینده

Station	Baseline period			Future period							
	1990-2019			Rcp4.5				Rcp8.5			
	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Rang (%)	Max	Min	Mean	Rang (%)
Rasht	1.02	0.38	0.68	1.53	0.17	0.81	19.21	1.69	0.49	1.02	49.25
Yasouj	5.82	2.25	3.64	4.83	2.41	3.43	-5.76	5.99	2.74	3.73	2.47
Ilam	4.58	1.56	3.02	4.13	1.65	3.66	21.19	6.64	1.67	4.29	42.05
Mashhad	12.99	7.34	10.71	21.85	4.52	10.73	0.18	27.09	5.47	13.61	27.07
Kerman	32.01	11.20	17.98	36.70	8.39	20.04	11.45	42.15	10.03	23.00	27.91

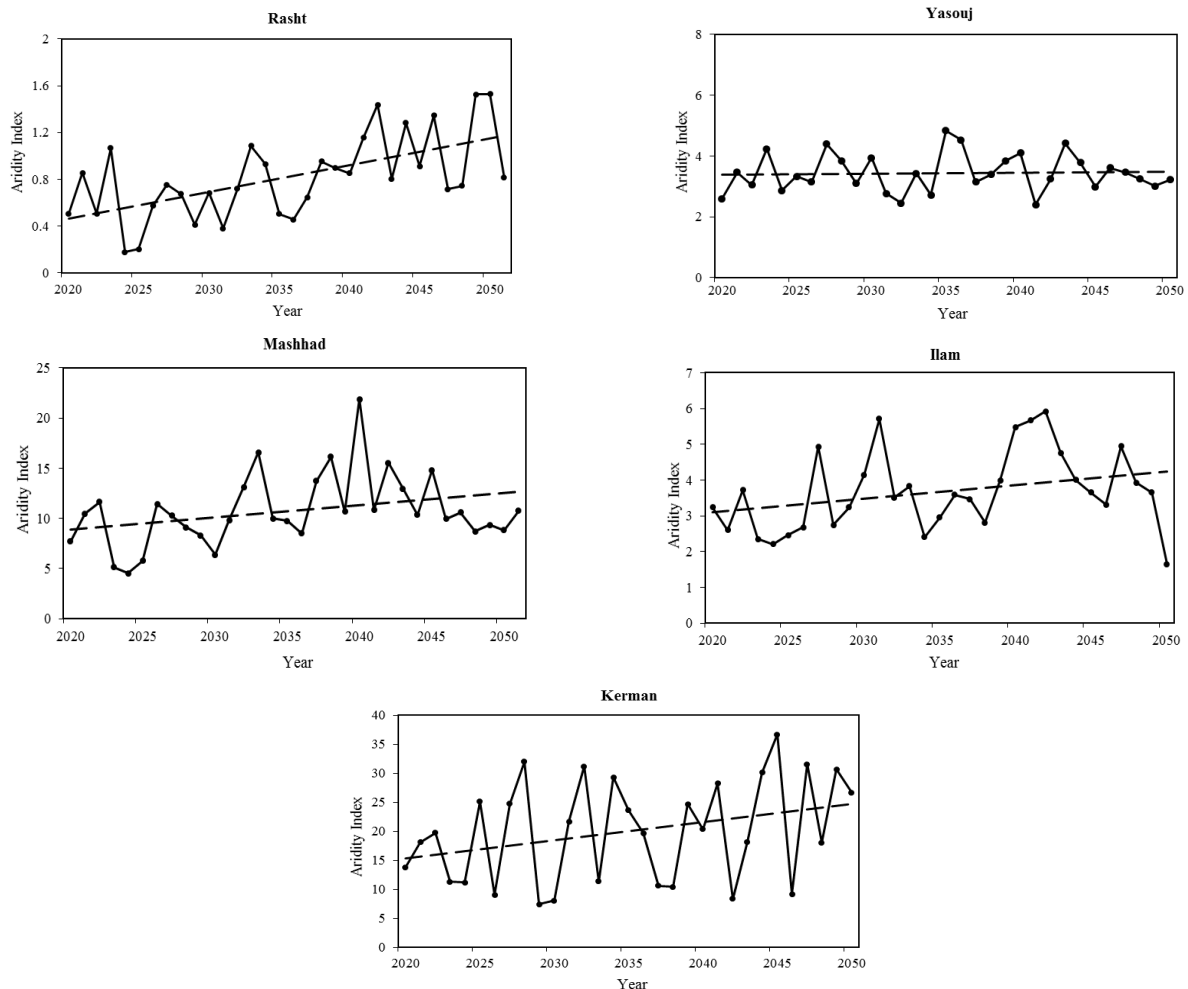


Fig. 3- AI Variations under RCP4.5 scenario in the period 2020-2050

شکل ۳- تغییرات AI در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت سناریو RCP4.5

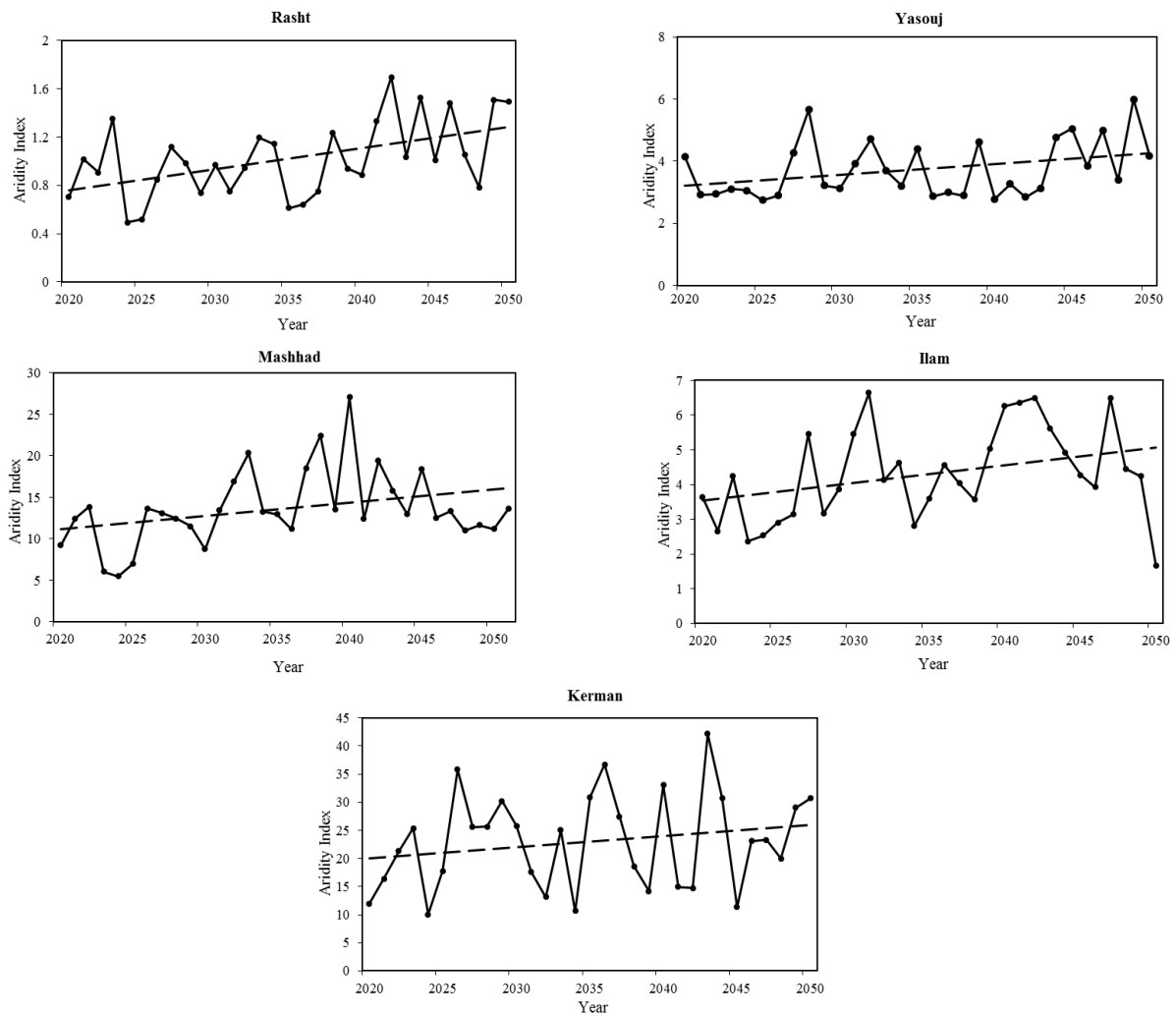


Fig. 4- AI Variations under RCP8.5 scenario in the period 2020-2050
شکل ۴- تغییرات AI در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت سناریو RCP8.5

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، روند تغییرات سالانه شاخص خشکی با آزمون من-کندال و شیب سن انجام شد و نقش متغیرهای آب و هوایی در تغییر شاخص خشکی در چند نمونه اقلیمی ایران طی سال‌های ۲۰۱۹-۱۹۹۰ مورد بررسی قرار گرفت. سپس با استفاده از مدل CanSEM2 تحت دو سناریوی RCP8.5 و RCP4.5 روند شاخص خشکی در دوره آینده ۲۰۲۰-۲۰۵۰ پیش‌نگری شد. نتایج نشان داد، در ایستگاه‌های ایلام، کرمان و رشت روند افزایشی AI سالانه در دوره مشاهداتی معنی‌دار بوده است. تنها در ایستگاه مشهد، آماره‌های آزمون سن در سطوح اطمینان مورد بررسی نشان داد که شاخص خشکی کاهش می‌یابد. می‌توان گفت در بین ایستگاه‌ها روند معنی‌دار اتفاق افتاده در کرمان دارای شیب قابل توجهی بوده است. نتایج تحلیل حساسیت AI نشان داد که در تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی، بارش مهم‌ترین

متغیر اقلیمی است که با افزایش آن مقدار شاخص خشکی کاهش می‌یابد. بعد از بارش، بیشترین حساسیت AI به متغیرهای اقلیمی در ایستگاه‌های ایلام و رشت به ترتیب دمای حداکثر و دمای حداقل است. در ایستگاه‌های کرمان و مشهد، فشار بخار هوا و در ایستگاه یاسوج، مقدار تابش ورودی است. سهم نسبی بارش (RC(pre)) نیز نشان می‌دهد این متغیر در همه ایستگاه‌ها بیش از بقیه متغیرها در روند شاخص خشکی نقش داشته است. در ایستگاه‌های یاسوج و کرمان، بارش بیشترین مقدار در روند شاخص خشکی را به خود اختصاص داده است. درصد نرخ تغییرات شاخص خشکی تحت هر دو سناریو نشان می‌دهد، احتمال می‌رود شاخص خشکی در همه ایستگاه‌ها در دوره ۳۰ ساله آینده به جز ایستگاه یاسوج افزایش یابد. انتظار می‌رود بیشترین نرخ افزایش AI سالانه طی دوره آینده در ایستگاه رشت تحت سناریوی RCP8.5 و کمترین افزایش AI سالانه در ایستگاه مشهد

- across the north west of Iran in recent half of the century. *Journal of Irrigation and Drainage* 6(10):797-809 (In Persian)
- Arora VK, Scinocca JF, Boer GJ, Christian JR, Denman KL, Flato GM, Kharin VV, Lee WG, and Merryfield WJ (2011) Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Journal of Geophysical Research* 38(5):1-6
- Bannayan M and Hoogenboom G (2008) Weather analogue: A tool for real-time prediction of daily weather data realizations based on a modified K-nearest neighbor approach. *Journal of Environmental Modelling and Software* 239(6):703-713
- Cao L and Zhou Z (2019) Variations of the reference evapotranspiration and aridity index over northeast China: Changing properties and possible causes. *Journal of Advances in Meteorology* (76922871)
- Chylek P, Li J, Dubey MK, Wang M, and Lesins G (2011) Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian earth system model CanESM2. *Journal of Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 11(8):22893-22907
- Dai A (2013) Increasing drought under global warming in observations and models. *Journal of Nature Climate Change* 3(1):52-58
- Dehghan SH, Salehnia N, Sayari N, and Bakhtiari B (2020) Prediction of meteorological drought in arid and semi-arid regions using PDSI and SDSM: A case study in Fars Province, Iran. *Journal of Arid Land* 12(2):318-330
- Dehghani M (2017) Regionalization of aridity indices and precipitation deficit in a changing climate for Zayandeh-Rud Basin. M.Sc. Thesis, School of Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology (In Persian)
- Greve p, Roderick ML, Ukkola AM, and Wada Y (2019) The aridity index under global warming. *Journal of Environmental Research Letters* 14(12)
- Hamed KH (2008) Trend detection in hydrologic data: The Mann- Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology* 349(3-4):350-363
- Hamraz BS, Akbarpour A, and Pour Reza Bilandi M (2016) Sensitivity analysis in groundwater model. *Journal of Aquifer and Aqueduct* 1(1):50-60
- Hejazizadeh Z and Jouyzadeh S (2017) Introduction to drought and its components. Samt, 376p (In Persian)
- Hill MC and Tiedeman CR (2006) Effective groundwater model calibration: With analysis of AI تحت سناریوی RCP4.5 رخ دهد. شیب خط روند تغییرات سالانه نیز نشان دهنده افزایش خشکی در دوره آینده تحت هر دو سناریو است و در این بین ایستگاه کرمان بیشترین نوسانات را خواهد داشت. هر چند به علت ساختار مدل‌های گردش عمومی جو و داده‌های مشاهداتی، در پیش‌نگری‌های بدست آمده عدم قطعیت وجود دارد اما، نتایج پژوهش می‌تواند به برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری بلند مدت در بخش‌های مختلف منابع آب، کشاورزی و اتخاذ راهکارهایی به منظور کاهش آثار منفی تغییرات اقلیمی مؤثر باشد.
- پی‌نوشت‌ها**
- 1- Assessment Report Fourth
 - 2- Assessment Report Fifth
 - 3- Intergovernmental Panel on Climate Change
 - 4- Aridity Index
 - 5- Statistical Downscaling Model
 - 6- Dry Days Since Last Rain
 - 7- United Nations Environment Programme
 - 8- National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research
 - 9- Canadian Climate Change Scenarios Network
 - 10- Local Sensitivity Analysis
 - 11- Global Sensitivity Analysis
 - 12- Canadian Coupled Global Climate Model
 - 13- Canadian Terrestrial Ecosystem Model
 - 14- Fourth-generation Coupled Global Climate Model
 - 15- Coupled Model Inter Comparison Project Phase 5
 - 16- Returns the Square
 - 17- Standard Error
 - 18- Root Mean Square Error
 - 19- Mean Absolutely Error
 - 20- Nash-Sutcliffe Efficiency
- ۵- مراجع**
- Abarghouei BH, Asadi Zarch MA, Dastorani MT, Kousari MR, and Safari Zarch M (2011) The survey of climatic drought trend in Iran. *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25(6):851-863
- Ahmed K, Shahid S, Nawaz N, and Khan N (2019) Modeling climate change impacts on precipitation in arid regions of Pakistan: Anon-local model output statistics downscaling approach. *Journal of Theoretical and Applied Climatology* 137(1-2):1347-1364
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, and Smith M (1998) Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage* 56pp
- Amirrezaeieh A, Porhemmat J, and Ahmadi F (2017) Investigation of precipitation and temperature trend

- Nouri M, Homae M, and Bybordi M (2014) Quantitative assessment of LNAPL retention in soil porous media. *Journal of Soil and Sediment Contamination* 23(8):801-819
- Omidvar K, Sepandar N, and Ghiaisalhosseini M (2018) Assessment of climate change effects on precipitation and temperature indicators in Rasht. In: *Proc. Of National Conference on Climatology of Iran (SNCC02_190)*, 9 May, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad
- Park C, Jeong S, Joshi M, Osborn T, Ho H, Piao S, Chen D, Liu J, Yang H, Park H, Kim B, and Feng S (2018) Keeping global warming within 1.5 °C constrains emergence of aridification. *Journal of Nature Climate Change* 8:70–74
- Rostam Zadeh h, Rezaie Banafshe M, and Hossien Nezhad A (2019) Identification of non-spatial patterns of hourly temperature changes on a monthly, seasonal and annual scale Case study: Tabriz Synoptic Station. *Journal of Climate Change & Climate Disasters* 1(4):56-76 (In Persian)
- Sarlak N and Agha OMM (2018) Spatial and temporal variations of aridity indices in Iraq. *Journal of Theoretical and Applied Climatology* 133(3):1-11
- Sharma BR and Smakhtin VU (2004) Potential of water harvesting as a strategic tool for drought mitigation. *Journal of International Water Management Institute* 29(1):112-118
- Sherwood S and Fu Q (2014) A drier future? *Journal of Science Climate Change* 343(6172):737–739
- Taei Semiromi S, Moradi HR, and Khodagholi M (2014) Simulation and prediction some of climatic variables by multiple linear model SDSM and atmosphere general circulation models (Case study: Neishabour). *Journal of Human and Environment* 12(28):1-16 (In Persian)
- Tavousi T (2018) Investigation of rainfall change trend and UNEP dry index in climatic zones of western and northwestern Iran. *Journal of Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)* 27(105) (In Persian)
- Wilby R, Dawson W, Murphy C, O'Connor P, and Hawkins E (2014) The statistical DownScaling model-decision centric (SDSM-DC): Conceptual basis and applications. *Journal of Climate Research* 61(3):259-276
- Wilby R and Harris I (2006) A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames UK. *Journal of Water Resources Research* 42(2):142-160
- Y Li Y, Feng A, Liu W, Ma X, and Dong G (2017) Variation of aridity index and the role of climate data, sensitivities, predictions, and uncertainty. *John Wiley and Sons*, 480p
- Huang H, Han Y, Cao M, Song J, and Xiao H (2016) Spatial-temporal variation of aridity index of China during 1960–2013. *Journal of Advances in Meteorology* (2016):1536135
- IPCC (2014) *Climate change 2014: Synthesis report contribution of working groups I II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [Core Writing Team R K Pachauri and L A Meyer (eds.)]. IPCC Geneva Switzerland 151 pp
- Kaviani M (2001) Climate investigation on aridity and drought indices. *Journal of Geographical Research* 16(1):71-89 (In Persian)
- Khazanedari L, Zabol Abbasi F, Ghandhari SH, Kouhi M, and Malbousi SH (2009) Drought prediction in Iran during next 30 Years. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences* 13(8):1519-1530 (In Persian)
- Li M, Chu R, Islam ARM, Jiang Y, and Shen S (2020) Attribution analysis of long-term trends of aridity index in the Huai River Basin, Eastern China. *Journal of Sustainability* 12(5):1743
- Lin L, Gettelman A, Fu Q, and Xu Y (2018) Simulated differences in 21st century aridity due to different scenarios of greenhouse gases and aerosols. *Journal of Climate Change* 146:407–422
- Liu X, Liu W and Xia J (2013) Comparison of the streamflow sensitivity to aridity index between the Danjiangkou Reservoir basin and Miyun Reservoir basin, China. *Journal of Theoretical and Applied Climatology* 111(21):683–691
- Liu X, Zhang D, Luo Y, and Liu C (2013) Spatial and temporal changes in aridity index in northwest China: 1960 to 2010. *Journal of Theoretical and Applied Climatology* 112(1-2):307-316
- Mahmood R. and Babel M (2014) Future changes in extreme temperature events using the Statistical Downscaling Model (SDSM) in the trans-boundary region of the Jhelum river basin. *Journal of Weather and Climate Extremes* 5-6:56-66
- Marvel K, Cook BI, Bonfils CJ, Durack PJ, Smerdon JE, and Williams AP (2019) Twentieth-century hydroclimate changes consistent with human influence *Nature*. *Journal of Nature* 569(7754):59–65
- Nouri M, Homae M, and Bannayan M (2017) Investigating the trend of drought index changes during the period 1966- 2100 in northwestern Iran. *Journal of Watershed Engineering and Management* 8(4):439-453 (In Persian)

Zhang D, Liu X, and Hong H (2013) Assessing the effect of climate change on reference evapotranspiration in China. *Journal of Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 27:1871–1881

Zolfaghari H and Mirzaei N (2017) Spatial analysis and zoning of climate dry periods in Iran based on DDSLR index. *Journal of Natural Environmental Hazards* 6(12):1-17 (In Persian)

variables in the Southwest China. *Journal of Water* 9(10):743

YZhao Y, Zou X, and Zhang J (2015) Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and aridity index in the Loess Plateau Region of China, during 1961–2012. *Journal of Quaternary International* 349:196–206