

Projecting Aridity Changes in Iran Based on SSP Scenarios: A Climate Change Perspective

Mohsen Hamidianpour^{1*}, Halimah Shahzaei²

¹ Associate Professor, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran,
Email: mhamidianpour@gep.usb.ac.ir

² Master's student in Climatology, University of Sistan and Baluchistan, Zahedan, Iran, Email: shahzaei870@gmail.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 202-1-12

Accepted: 202-3-7

Keywords:

climate change
aridity coefficient
Downscaling
GCMs
SSP scenarios

This research investigated the spatio-temporal changes of Iran's climate aridity coefficient during the observed period (1976-2020) and its projection for the future period (2031-2050). To examine the aridity coefficient, precipitation and temperature data from 44 meteorological stations across the country during the base period of 1976-2014, outputs of SSP scenarios (SSP146, SSP246, and SSP585) from General Circulation Models (CMIP6 phase), and the de Martonne aridity index method were used. For the projection of precipitation and temperature data, and consequently the calculation of the aridity coefficient in the future period, the LARS-WG8 downscaling model was employed. To evaluate the temporal and spatial changes of the aridity coefficient, the non-parametric Mann-Kendall test and Sen's slope method were used. The results of the first part of the study, which examined the changes during the observed period, showed that the aridity coefficient had a decreasing trend between 1976 and 2020. This decreasing trend was more pronounced in areas with Mediterranean climates (-0.187) and humid regions (-0.102). Based on the outputs of the downscaled data and the scenarios used in the future period, the aridity trend varied and was mainly decreasing in all three scenarios (optimistic, pessimistic, and moderate). This indicates a trend towards a more continental climate, characterized by decreased humidity and increased temperature

Cite this article: Hamidianpour, M., Shahzaei, H. (2025). Projecting Aridity Changes in Iran Based on SSP Scenarios : A Climate Change Perspective. *Journal of the Climate Change research*, 6 (22), 45-62.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: [10.30488/CCR.2025.499536.1264](https://doi.org/10.30488/CCR.2025.499536.1264)



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال ششم / شماره مسلسل بیست و دوم / تابستان ۱۴۰۴ / صفحات: ۶۲-۴۵



پیش‌نمایی تغییرات خشکی در ایران بر اساس سناریوهای SSP: چشم‌اندازی از تغییر اقلیم

محسن حمیدیان‌پور^{۱*}، حلیمه شاهزائی^۲

^۱دانشیار دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، رایانامه: mhamidianpour@gcp.usb.ac.ir
^۲دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، رایانامه: shahzaei870@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷</p> <p>واژه‌های کلیدی: تغییرات زمانی- مکانی ضریب خشکی ریزگردانی GCMs</p>	<p>در این پژوهش به بررسی تغییرات فضایی- زمانی ضریب خشکی اقلیم ایران در دوره مشاهده شده (۲۰۲۰-۱۹۷۶) و پیش‌نمایی آن در دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۳۱) پرداخته شد. جهت بررسی ضریب خشکی از داده‌های بارش و دما ۴۴ ایستگاه هواشناسی در سرتاسر کشور طی دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۷۶، برون‌داد سناریوهای SSP (SSP146، SSP246 و SSP585) از مدل‌های گردش عمومی جو (فاز ششم CMIP) و روش ضریب دمارتن استفاده گردید. برای پیش‌نمایی داده‌های بارش و دما و به تبع آن محاسبه ضریب خشکی در دوره آتی از مدل ریزگردانی LARS- WG8 بهره گرفته شد. در راستای ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی ضریب خشکی از روش ناپارامتریک من کندال و شیب سن بهره برده شد. نتایج بخش اول مطالعه یعنی بررسی تغییرات در دوره مشاهده شده نشان داد ضریب خشکی در بین سال‌های ۲۰۲۰-۱۹۷۶ دارای روندی کاهشی بوده و این روند کاهشی در نواحی با اقلیم مدیترانه‌ای (۰/۱۸۷-) و مناطق مرطوب (۰/۱۰۲-) بیشتر است. براساس برون‌داد داده‌های ریزگردانی شده و سناریوهای مورد استفاده در دوره آتی روند خشکی متفاوت بوده و عمدتاً در هر سه سناریو خوشبینانه، بدبینانه و متوسط از رفتار کاهشی برخوردار است. که این مهم، به قاره‌ای‌تر شدن اقلیم یعنی کاهش رطوبت و افزایش دما همراه است.</p>

استناد: حمیدیان‌پور، محسن؛ شاهزائی، حلیمه. (۱۴۰۴). پیش‌نمایی تغییرات خشکی در ایران بر اساس سناریوهای SSP: چشم‌اندازی از تغییر اقلیم. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۲)، ۴۵-۶۲.

DOI: [10.30488/CCR.2025.499536.1264](https://doi.org/10.30488/CCR.2025.499536.1264)

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان.



مقدمه

طرح مسأله: تغییر اقلیم، پدیده‌ای ناپایدار و پویاست که جوانب مختلف بشری را تحت‌تأثیر قرار داده است و فاکتورهای مهمی در این امر دخیل هستند (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۷). تغییر اقلیم زمانی رخ خواهد داد که ویژگی‌های اقلیمی یک منطقه تغییر پیدا کند. پژوهش‌های بسیاری به موضوع تغییر اقلیم با توجه به مؤلفه‌های دما و بارش که منجر به کاهش ریزش‌های جوی و به خطر افتادن منابع آبی و امنیت غذایی است، انجام شده است (تیموری و همکاران، ۱۳۹۰؛ کوچکی و همکاران، ۱۳۸۶؛ صوفی و علیجانی، ۱۳۹۱ و ابراهیمی، ۱۳۹۸). البته برخی از پژوهش‌ها برای مطالعه اثر تغییر اقلیم بر روی دما و بارش و اثراتی که بر روی یک سرزمین یا اکولوژی یک منطقه می‌گذارد، از شاخص‌های مختلفی مانند ضرایب خشکی استفاده می‌کنند که میزان و مقدار کاهش آب در یک منطقه است (قاضی و همکاران، ۲۰۲۴؛ بهزادی و همکاران، ۲۰۲۴؛ محمدی، ۱۴۰۰). این گونه از مطالعات معمولاً به دو قسمت تقسیم می‌شوند. برخی از پژوهشگران به تغییرات زمانی و مکانی در دوره‌های گذشته پرداخته‌اند یعنی از زمان تاسیس ایستگاه‌ها تا زمان حال حاضر. به عنوان مثال دما در اثر تغییر اقلیم با توجه به نقش انسان و تغییرات ناشی از آن افزایش داشته است. این افزایش دما و کاهش بارندگی می‌تواند در افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی نقش اساسی داشته باشد (هادی‌پور و همکاران، ۲۰۲۰؛ مهسافر و همکاران، ۱۳۸۹؛ کوچکی و همکاران، ۱۳۸۶ و روشنی و همکاران، ۱۳۹۲). افزایش دما، خشکی را افزایش می‌دهد. خشکی ویژگی ذاتی اقلیم مناطق خشک و نیمه‌خشک است (کاوپانی و علیجانی، ۱۳۸۵) که معیار مناسبی در ارزیابی نوع اقلیم یک منطقه به شمار می‌رود (ابراهیمیان و سهیلی، ۱۴۰۱؛ سعیدیان، ۱۴۰۱؛ دوستان، ۱۳۹۴؛ درویشی و قدم‌خیر، ۱۴۰۰ و کیقبادی و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن گستره زیادی از سرزمین ایران جزء مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. بر اساس ضریب دمارتن بیش از ۷۰ درصد ایران جز مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این دست از مناطق از

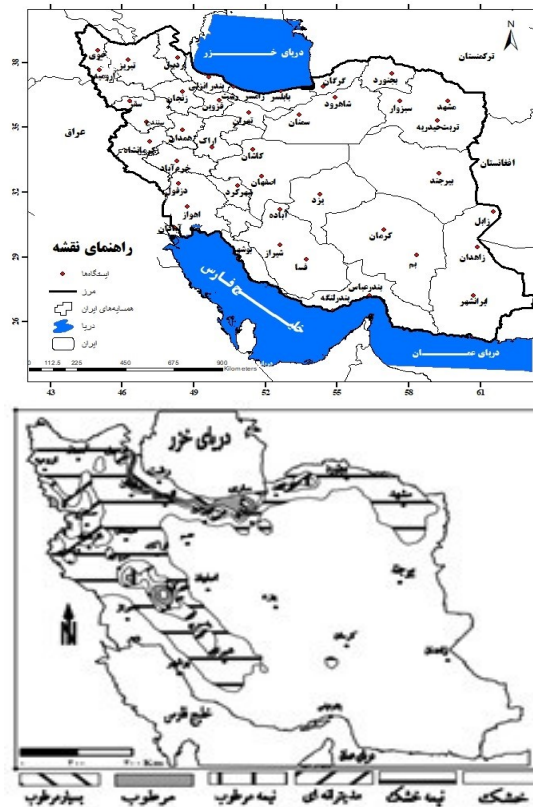
اکوسیستمی شکننده برخوردار هستند (معروفی و همکاران، ۱۳۹۰؛ عساکره، ۱۳۸۱؛ اخگر و همکاران، ۱۴۰۱؛ شفیع‌ی و همکاران، ۱۴۰۲؛ خلیلی و همکاران، ۱۴۰۰؛ مسعودیان، ۱۳۸۲ و فتحی تپه‌رشت و همکاران، ۱۴۰۰). مطالعات زیادی بر روی بررسی تغییر اقلیم متمرکز شده‌اند که در سال‌های اخیر این دست از مطالعات بسیار زیاد شده است. تیموری و همکاران (۱۳۹۰) ۳۶ ایستگاه را در بین سال‌های ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۴ با توجه به اقلیم ایران به شش ناحیه اقلیمی و با استفاده از پارامترهای خشکی و رطوبت به روش تورنت‌وایت مطالعه و نتیجه گرفتند که در اکثر ایستگاه‌ها دو متغیر خشکی و رطوبت کاهش غیرمعنی‌داری دارد. البته برخی از نتایج این پژوهش‌ها مشابه است و اغلب مطالعات بارش و ضریب خشکی را کاهش می‌دانند همچون زارع‌ابیان و همکاران، ۱۳۸۹. دسته دوم از پژوهشگران ضریب خشکی را براساس سناریو تغییر اقلیم و مدل‌های گردش عمومی جو برای دوره آینده مورد پیش‌نمایی قرار داده‌اند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰). به عنوان مثال وانگ و همکاران (۲۰۲۱) در پی مطالعه تغییرات آینده خشکی در حوضه بالادست رودخانه ایندوس در قرن بیست و یکم به بررسی تغییرات خشکی بر اساس ۱۲ مدل CMIP6 و سه سناریوی مختلف پرداختند. شاخص خشکی (AI) با استفاده از نسبت بارندگی سالانه به تبخیر و تعرق بالقوه (PET) محاسبه شده است. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دمای میانگین سالانه و PET، شاخص خشکی کاهش یافته و روند خشکی در حوضه بالادست رودخانه ایندوس در قرن بیست و یکم ادامه خواهد داشت. امانی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای دو مدل گردش عمومی (HadCM3 و IPCM4) تحت سه سناریوی انتشار B1، A1B و A2 را در سه دوره بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۹۹ در مورد شاخص خشکی بررسی و نتیجه گرفتند که کاهش بارندگی تجمعی میزان شاخص خشکی در دوره آینده را کاهش داده است. مهسافر و همکاران (۱۳۸۹) تغییر اقلیم را با استفاده از مدل Had CM3 از سری مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) تحت سناریوهای (A2, B2) و با استفاده از شبکه‌های ANFIS برای دوره ۲۱۰۰-

است و رفتار این متغیر مبتنی بر سناریوهای IPCC چگونه خواهد بود؟

روش تحقیق

محدوده و قلمرو پژوهش: منطقه مورد مطالعه کشور ایران است. ایران با موقعیت جغرافیایی بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی، از جمله مناطقی است که در کمربند خشک و نیمه خشک جهان قرار گرفته است (رضایی و همکاران، ۱۳۹۸) که در دهه‌های گذشته شاهد افزایش دما، کاهش دوره سرد و افزایش دوره گرم بوده است (مسعودیان، ۱۳۹۱). هدف از این پژوهش بررسی روند تغییرات ضریب خشکی کشور ایران در دوره مشاهده شده (۲۰۲۰-۱۹۷۶) و پیش‌نمایی آن در دوره آتی (۲۰۳۱-۲۰۵۰) است. در این راستا، دو نوع داده ایستگاهی یا مشاهده شده و برونداد مدل گردش سیاره‌ای اقلیم (تاریخی و آینده) مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مشاهداتی مربوط به ۴۴ ایستگاه هواشناسی در دوره زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰ از سازمان هواشناسی ایران جمع‌آوری شد. برونداد مدل ACCESS-ESMI-5 شامل داده‌های دوره پایه یا تاریخی (۱۹۷۶ تا ۲۰۱۴) و پیش‌نمایی‌های آینده (۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰) به صورت روزانه است. این داده‌ها شامل دمای بیشینه و کمینه، بارش و ساعات آفتابی می‌باشند که از فاز ششم مدل‌سازی تغییرات اقلیمی (CMIP6) و از وب‌سایت مرکز هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) استخراج شده‌اند. داده‌های مورد نظر مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) شامل مدل SSP245، ACCESS-ESMI-5 و سه سناریو SSP126 و SSP585 از مرجع شبکه داده‌های تغییر اقلیم استرالیا و بانک داخلی داده‌های LARS-WG.8 است. با توجه به گرمایش جهانی و تغییر اقلیم این مطالعه قصد دارد با استفاده از ضریب خشکی دمارتن وضعیت اقلیم را در آینده با سناریوهای مختلف مطالعه نماید. شکل ۱ موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه و تقسیمات اقلیمی ایران به روش دمارتن را نشان می‌دهد.

۲۰۰۰ شبیه‌سازی کرده و به این نتیجه رسیدند که دمای میانگین سالانه دما در هر دو سناریو افزایشی بوده است ولی سطح تراز دریاچه ارومیه در سناریو A2 کاهش و در سناریو دوم B2 افزایشی بوده است که در سناریو A2 شرایط بحرانی تری را در سال ۲۱۰۰ برای دریاچه ارومیه پیش‌بینی می‌کند. احمدی و ذبیحی (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای عملکرد زمانی و مکانی مدل‌های جهانی آب و هوا در شبیه‌سازی بارش و دما در ایران به روش (CMIP6) و مقایسه مدل جفت شده با داده‌های مشاهده‌ای (GCM CMIP6) (۲۰۱۴-۱۹۸۵) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این ارزیابی مدل‌ها از رویکرد آماری چندک‌ها برای انطباق معیار GCM استفاده شد. مدیریت اقلیم یکی از ارکان اصلی حفظ پایداری محیط است. در مطالعات گذشته با استفاده از سناریوهای قدیم همچون سناریوهای A1 و سناریوهای RCP و ... ضریب خشکی کار شده است. بر اساس مطالعات و نوشتارهای مطرح شده، تغییر اقلیم به‌عنوان یک پدیده ناپایدار و پویا، تأثیرات عمیقی بر جنبه‌های مختلف زندگی بشری دارد. این تأثیرات به‌ویژه در کاهش بارش، منابع آبی و امنیت غذایی در ایران مشهود است. پژوهش‌های گوناگون نشان داده‌اند که تغییرات دما و بارش در این کشور، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، منجر به افزایش شاخص‌های خشکی و شکنندگی اکوسیستم‌ها شده است. بنابراین، هدف از این مطالعه بررسی رفتار شاخص خشکی در دوره‌های آتی بر اساس مدل‌های اقلیمی جهانی (GCMs) است. با تحلیل داده‌های پیش‌بینی شده توسط این مدل، تلاش می‌شود تا تغییرات احتمالی در دما، بارش و شاخص‌های خشکی در ایران شناسایی و ارزیابی شوند. این مطالعه به‌منظور فراهم کردن اطلاعات لازم برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی و کشاورزی در برابر چالش‌های ناشی از تغییر اقلیم انجام می‌شود و اهمیت آن در کمک به تصمیم‌گیری‌های مؤثر برای مقابله با اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی و پایداری محیط زیست نمایان می‌شود. در این راستا، سوالات کلیدی که مورد بررسی قرار خواهند گرفت شامل این موارد است که اولاً ضریب خشکی ایران دارای چه روندی



شکل ۱: موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه (بالا) و تقسیمات اقلیمی ایران به روش دمارتن، مسعودیان، ۱۳۹۰ (پایین).

روش انجام پژوهش

مهم‌ترین هدف این پژوهش، بررسی تغییرات گذشته و پیش‌نمایی ضریب نمایه خشکی می‌باشد. بدین منظور از روش دمارتن (De Martonne) استفاده شد. دمارتن ساده‌ترین و مرسوم‌ترین روش در اغلب پژوهش‌های اقلیمی است. این آزمون به طور گسترده برای تجزیه و تحلیل روندهای یکنواخت در سری‌های زمانی و عناصر اقلیمی مناسب است (خام‌چین‌مقدم و رضائی‌پژند، ۱۳۸۸، فتحی‌تپه‌رشت و همکاران، ۱۴۰۱). این طبقه‌بندی بر مبنای خشکی ایجاد شده است. در محاسبه این شاخص دما و بارش دو مؤلفه اصلی برای تعیین نوع اقلیم استفاده می‌شود. دمارتن معادله تجربی زیر را برای تعیین اقلیم یک منطقه ارائه داده است.

$$I = \frac{P}{t + 10}$$

رابطه ۱

در این رابطه، I: شاخص خشکی، P: میانگین بارش

سالانه بر حسب میلی‌متر، t: متوسط دما سالانه بر حسب سانتی‌گراد. پس از محاسبه شاخص خشکی برای بررسی معنی‌داری و P-Value از آزمون ناپارامتریک من-کندال و شیب سن بهره گرفته شد. با استفاده از این روش تغییرات داده‌ها شناسایی نوع و زمان آن مشخص می‌گردد. شایان ذکر است با توجه به روش دمارتن ایران به شش منطقه اقلیمی تقسیم شده است که شامل اقلیم خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، مرطوب، نیمه‌مرطوب و بسیار مرطوب. در نهایت خلاصه‌ای از وضعیت ضریب خشکی ایران در دوره‌های آتی مبتنی بر این نواحی اقلیم ارائه گردید. باید اضافه کرد تمامی نقشه‌های مطالعه بر اساس روش درون‌یابی کریجینگ و استفاده از روش‌های پیشرفته زمین‌آمار و تخمین‌گر فضایی ترسیم شده است. در روش عملیات تخمین‌گر کریجینگ، میانگین خطا صفر و واریانس آن به حداقل می‌رسد (حمیدیان‌پور، ۱۳۹۴؛ فرخزاد و همکاران، ۱۳۹۳؛ قهرودی‌تالی، ۱۳۸۱؛

LARS-WG8 نقش محوری در افزایش دقت خروجی مدل‌های تغییر اقلیم دارد. در این پژوهش از داده‌های کمینه و بیشینه دما، بارش، ساعات آفتابی یا تابش که رکن اساسی در مدل‌های اقلیمی دارد استفاده شده است. نسخه هشتم این نرم‌افزار ۲۰۲۴ انتشار پیدا کرد. و از مدل‌های CMIP6 و سناریوهای ACCESS-ESM1-5 که سه مدل SSP126، SSP245 و SSP585 (به ترتیب متوسط، خوشبینانه و بدبینانه) منتشر شد. در این مورد جدول ۲، به طور مختصر به مهم‌ترین ویژگی‌های این مدل می‌پردازد.

محمدی (۱۳۹۵) بر اساس مقادیر ارزیابی عملکرد انواع روش‌های کریجینگ، روش Simple (جدول ۱) با کمترین خطا انتخاب گردید.

بخش دوم مطالعات به بررسی ضریب خشکی در دوره آینده اختصاص داده شده است. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG8 به بررسی تغییر اقلیم ایران با استفاده از مدل گردش عمومی جو GCM جهت شبیه‌سازی اقلیم کنونی و پیش‌بینی تغییرات اقلیم آینده زمین پرداخته شد (سمینوف و بروکس، ۱۹۹۹). در این میان، ریزمقیاس نمایی یا به عبارتی ریزگردانی

جدول ۱: آزمون شش روش کریجینگ برای محاسبه ضریب خشکی

روش‌ها	Ordinary	Simple	Universal	Indicator	Probability	Disjunctive
Root- Mean-Standardized	۰/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۹	۰/۹	۰/۷
Average Standard Error	۱۳/۹	۱۱/۱۱	۱۳/۹۲	۰/۴۵	۰/۴۶	۱۱/۷۷

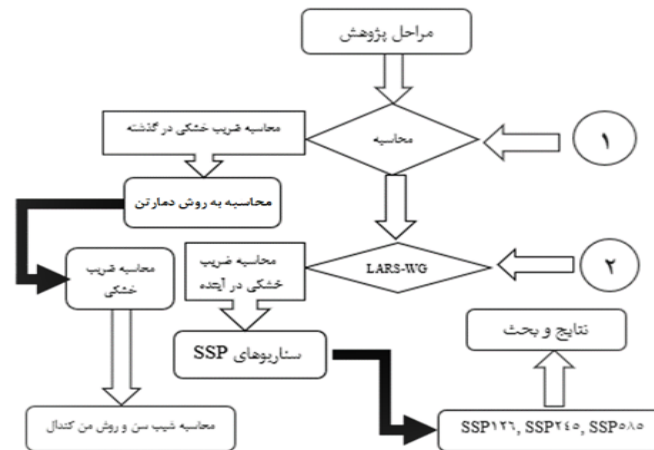
جدول ۲: مشخصات مدل‌های گردش عمومی استفاده شده در این مطالعه

نام مدل اقلیم جهانی	کشور	مرکز تحقیقاتی	وضوح افقی (طول و عرض)
ACCESS-ESM1-5	استرالیا	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organizatio	$1.2^{\circ} \times 1.9^{\circ}$

کمینه و بیشینه، بارش و ساعت آفتابی را شامل می‌شود که از توزیع نیمه تجربی استفاده می‌کند. رابطه ۲ $EMP = \{a_1, \dots, a_i, h_i, i = 1, \dots, 10\}$ EMP هیستوگرامی با ده بازه با شدت‌های مختلف بارش است و در آن $a_i < a_{i-1}$ و h_i تعداد رخداد بارش را در i امین فاصله نشان می‌دهد. مقادیر تصادفی از توزیع‌های نیمه تجربی با انتخاب یکی از فاصله‌ها و سپس انتخاب یک مقدار در آن محدوده از توزیع یکنواخت مشخص می‌شود این نوع توزیع انعطاف پذیر است و تا حدودی به تنوع وسیعی از شکل‌های مختلف با بازه‌های مختلف $[a_{i-1} < a_i]$ تبدیل می‌شود (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵). مراحل کار در این مقاله به اختصار در چارت پایین آورده شده است.

ریزگردانی^۱: روش سناریو سازی نرم‌افزار LARS-WG روشی بسیار مناسب برای پیش‌بینی رویدادها در آینده است و با توجه به اینکه در مناطق مختلف اقلیمی مورد آزمایش قرار گرفته و در ایجاد خصوصیات آماری اقلیمی خوش درخشیده است. لذا در این پژوهش برای محاسبه ضریب خشکی در آینده مورد استفاده قرار گرفته است. دوره زمانی آینده در LARS-WG (۲۰۳۱-۲۰۵۰) که دوره متوسط است مورد بررسی قرار می‌گیرد. دوره پایه (تاریخی) در این پژوهش ۲۰۱۴-۱۹۷۶ است که با روش ریزگردانی خروجی این مدل در مقیاس ایستگاهی مورد بررسی قرار می‌گیرد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۴). خروجی نرم‌افزار LARS-WG مقادیر روزانه پارامترهای دمای

¹ Downscaling



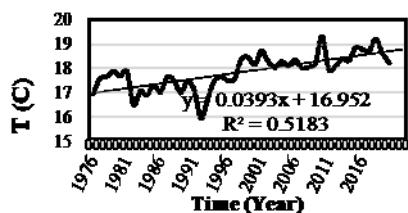
شکل ۲: مراحل پژوهش مقاله

مداوم افزایش یافته است، که این موضوع با استناد به شکل (۳) قابل اثبات است. بر اساس این شکل، متوسط دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای روندی مثبت با شیب تغییرات حدود $0.393/0$ درجه سلسیوس به ازای هر سال (معادل تقریباً 0.3 درجه سلسیوس به ازای هر دهه) می‌باشد. دما به عنوان یک متغیر اقلیمی، نسبت به سایر مؤلفه‌های اقلیمی دارای تغییرپذیری زیادی در توزیع فضایی است و از عناصر کلیدی اقلیمی محسوب می‌شود (عطایی و همکاران، ۱۳۹۴؛ شلتن، ۱۳۹۰). مسعودیان و کویانی (۱۳۸۷) تغییرات دمای شبانه‌روزی کشور را حدود 2 درجه سلسیوس در صد سال برآورد کرده‌اند. همچنین، نمرودی و همکاران (۲۰۲۱) نیز به روند افزایشی دما اشاره دارند. به منظور تبیین بهتر رفتار دما، اشکال (۳-ب تا ی) به تفکیک اقلیم‌های مختلف تهیه شده است. این اشکال نشان‌دهنده روند افزایشی دما در تمامی نواحی اقلیمی هستند. بیشترین شیب تغییرات دما مربوط به ناحیه اقلیم مدیترانه‌ای است که به ازای هر سال $0.422/0$ درجه سلسیوس (حدود 0.4 درجه سلسیوس به ازای هر دهه) افزایش یافته است. شایان ذکر است که آهنگ تغییرات دما از دهه ۹۰ به طور قابل توجهی در تمامی اقلیم‌ها با سرعت بیشتری رو به افزایش است. این یافته‌ها همچنین با پژوهش حمیدیان پور و همکاران (۱۴۰۲) همخوانی دارد.

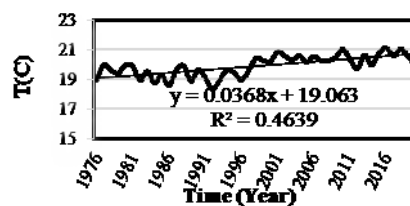
سناریوهای تغییر اقلیم: سناریوهای بخش مهمی از پژوهش و ارزیابی تغییر اقلیم را شامل می‌شود. به بیانی سناریوها، پیش‌فرض یا سیر شرایط اجتماعی، اقتصادی، فیزیکی و دینامیکی در مدل‌ها هستند و روند اقلیم را در شرایط مختلف تحت واداشتهای کنترل‌کننده مورد بررسی قرار می‌دهد (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱). وظیفه مرکز IPCC شناخت تمام جنبه‌های تغییر اقلیم است. در گزارش ششم ارزیابی، سناریوهای خط سیر اجتماعی، اقتصادی مشترک (SSP) سیاست‌های اقلیمی و سناریوهای اقتصادی-اجتماعی را با تغییرات اقلیمی در یک راستا قرار می‌دهد (حمیدیان پور و شجاع، ۱۴۰۱). در نرم‌افزار LARS-WG همه خروجی‌های متغیرهای اقلیمی مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای گزارش‌دهی بین‌الدول تغییر اقلیم است (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۹۵).

نتایج و بحث

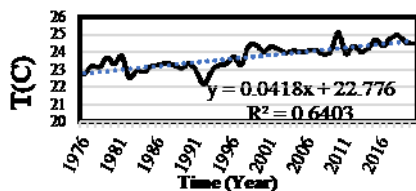
بررسی تغییرات زمانی فضایی ضریب خشکی به تفکیک مناطق اقلیمی در دوره مشاهداتی (۲۰۲۰-۱۹۷۶): شکل (۳) تغییرات زمانی دما در ایران را به تفکیک نواحی اقلیمی مختلف نمایش می‌دهد. در شکل (۳-الف)، رفتار متوسط دما در تمامی اقلیم کشور نمایان شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که از دهه‌های گذشته، میزان دما به طور



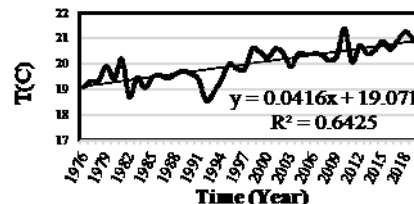
الف



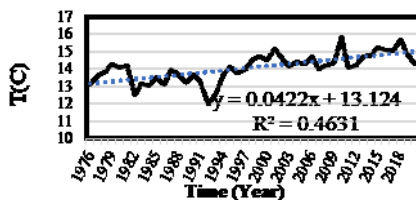
ب



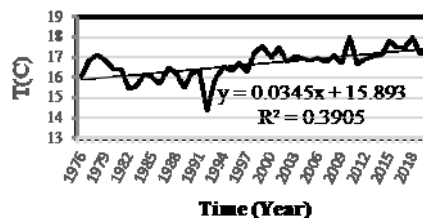
ج



د



ر

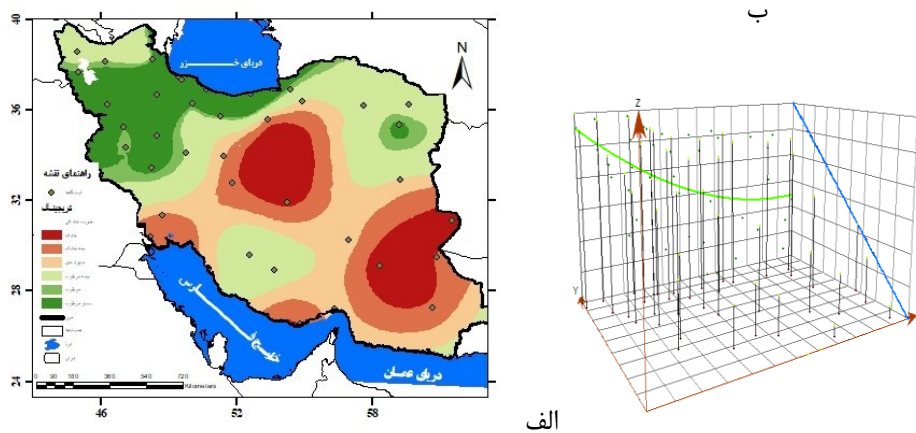


ی

شکل ۳: آهنگ تغییرات سری زمانی دمای ایران به تفکیک نواحی اقلیمی. متوسط اقلیم ایران (الف)، اقلیم مناطق خشک (ب)، اقلیم مناطق نیمه‌خشک (ج)، اقلیم مناطق مرطوب (د)، اقلیم مناطق نیمه‌مرطوب (ر)، اقلیم مناطق مدیترانه‌ای (ی)

به بی نظمی این روند شده است. بنابراین بالاترین ضریب خشکی نخست متعلق به این مناطق در مرکز ایران است. مناطق جنوب شرق ایران به دلیل کم ارتفاع بودن، کاهش نزولات جوی و پوشش گیاهی ضعیف و کم، خشکی هوا، آسمان اغلب صاف دارای ضریب خشکی کاهشی است و مناطق جنوبی دریای خزر به دلیل وجود دریای خزر و رطوبت اشباع و تلاقی دریا و کوه و کمربند پوششی سبز از ضریب خشکی کمتری برخوردار است.

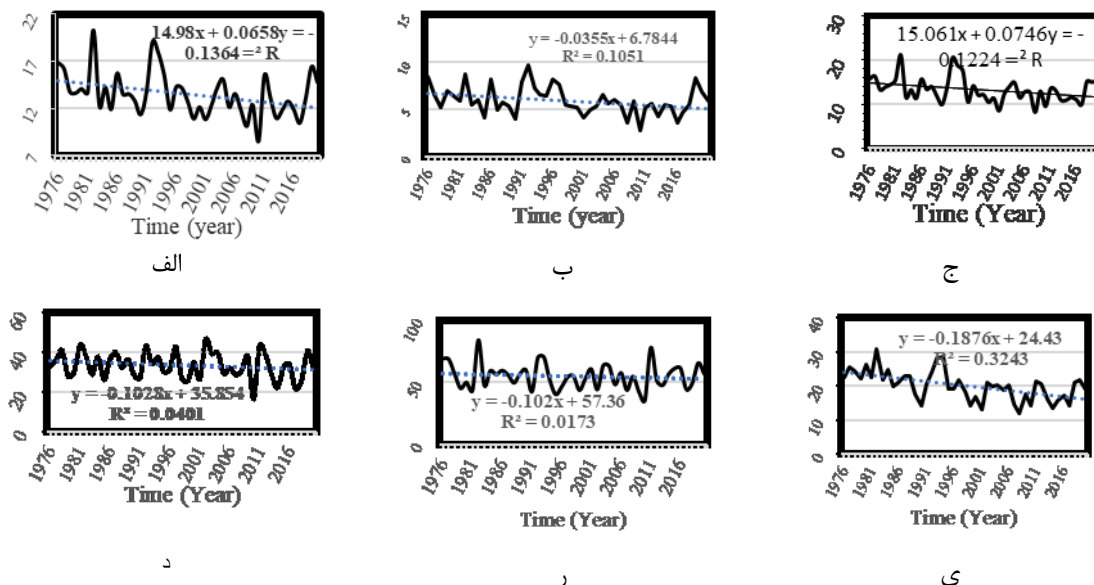
برای فهم بهتر نقشه توزیع فضایی تغییرات ضریب دمازن نشان داده شده است. (شکل ۴- الف و ب). در کنار این شکل نمودار روند فضایی آن نیز آورده شده است (شکل ۴- ب) که مبتنی بر اشکال ضریب خشکی ایران دارای روند شمالی- جنوبی، شمال غربی - جنوب شرقی و غربی - شرقی دارد. بنابراین بیشترین ضریب خشکی در مناطق جنوب شرقی و جنوبی ایران قابل مشاهده است. البته در میان ناهمواری‌هایی همچون بیابان لوت، دشت کویر به دلیل موقعیت بادپناهی و نداشتن عامل رطوبت منجر



شکل ۴: توزیع فضایی و نمودار روند فضایی شاخص خشکی ایران (۱۹۷۶-۲۰۲۰) (دوره مشاهداتی)

تفکیک مناطق اقلیمی ایران است. در ضریب خشکی دمارتن هر قدر، اعداد کوچکتری را نشان دهد نشان‌گر خشکی بیشتر آن منطقه است. به طور دقیق‌تر مقادیر کمتر از ۱۰ اقلیم خشک و کمتر از ۵ فراخشک را نشان می‌دهد. بر این اساس در صورتی که شیب خط در معادله خطی زیر از علامت منفی برخوردار باشد نشان می‌دهد ضریب خشکی کاهش یافته است. این به مفهوم قاره‌ای شدن یا خشک شدن اقلیم مناطق مختلف است.

تحلیل تغییرات زمانی ضریب خشکی در دوره مشاهداتی: ایران در ناحیه جنب حاره قرار گرفته است و قاعدتا متغیرهای هواشناسی از رفتار کلان‌مقیاس تبعیت می‌کند (سلیقه، ۱۳۹۶، مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۰). تغییرات عوامل کلان‌مقیاس منجر به تغییر پارامترهای اقلیمی همچون دما و بارش خواهد شد. در سال‌های اخیر، ضریب خشکی در برخی از مناطق اقلیمی روند رو به کاهش داشته است. شکل ۵ نمایانگر روند تغییرات زمانی ضریب خشکی به

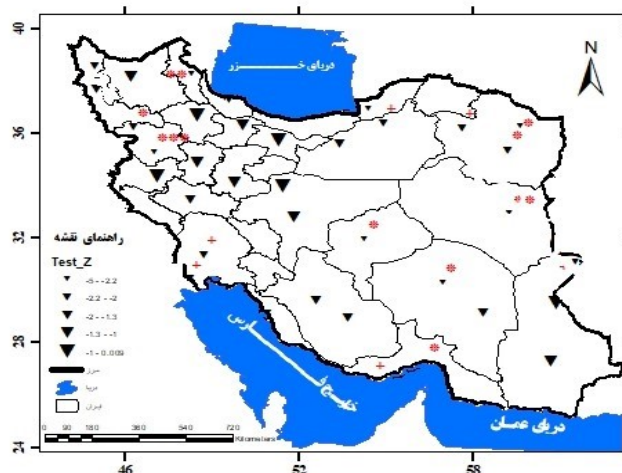


شکل ۵: محاسبه شاخص خشکی ایران بر اساس نواحی اقلیمی به روش دمارتن (۱۹۷۶-۲۰۲۰). متوسط اقلیم ایران (الف)، اقلیم مناطق خشک (ب)، اقلیم مناطق نیمه‌خشک (ج)، اقلیم مناطق مرطوب (د)، اقلیم مناطق نیمه‌مرطوب (ر)، اقلیم مناطق مدیترانه‌ای (ی) - (محور عمودی نمایانگر ضریب خشکی است)

مناطق خشک هم خشک‌تر می‌شوند. با توجه به مناطق مختلف اقلیمی، ضریب خشکی در همه اقلیم‌ها در ایران رو به کاهش هستند که نشان از خشک‌تر شدن شرایط اقلیمی ایران است. آنچه حائز اهمیت است اینکه تمامی این کاهش‌ها در تمامی سطوح مختلف آماری معنی‌دار می‌باشد. مثلث‌های رو به پایین در نقشه روند کاهشی ضریب خشکی را نشان می‌دهد. بیشترین کاهش‌ها مربوط به ارتفاعات زاگرس که جزء مناطق مرطوب به حساب می‌آیند می‌باشد. مناطق غرب و شمال غرب ایران و قسمت‌های جزئی در جنوب شرق ایران همچون خاش و زاهدان که نسبت به مناطق اطراف دارای ارتفاع هستند مشاهده می‌شود. این سیر کاهشی ضریب خشکی در این مناطق شدیدتر هستند. اما مناطقی از شرق و شمال شرق مثل بیرجند و قسمت‌هایی از مناطق جنوبی و مرکزی مثل کرمان و یزد کاهش آنچنانی مشاهده نمی‌شود.

بیشترین کاهش ضریب خشکی مربوط به نواحی با اقلیم مدیترانه‌ای (۰/۱۸۷-) و مناطق مرطوب (۰/۱۰۲-) است و کمترین کاهش ضریب خشکی مربوط به نواحی خشک و نیمه خشک است. نتایج فوق با مطالعه طاوسی و همکاران (۱۳۹۸) همراستا می‌باشد. آنها وضعیت خشکی شمال شرق ایران را بر پایه تلفیق تغییر اقلیم در هفت گروه اقلیمی با ۹ ایستگاه بررسی کردند و نتایج حاصل آزمون من کندال و شیب خط روند برای شاخص خشکی یونپ بیانگر این مسئله بود که طی ۲۸ سال شرایط خشکی در منطقه رو به افزایش و عاملی برای بیابان‌زایی است.

تحلیل فضایی تغییرات ضریب خشکی ایران در دوره مشاهداتی: توزیع فضایی این تغییرات نمایی آشکارتر از تغییرات ارائه می‌دهد (شکل ۶). مطابق با این شکل روند ضریب خشکی رو به کاهش است. در کل، مناطق مرطوب رطوبت‌شان را از دست می‌دهند و



شکل ۶: توزیع زمانی - مکانی تغییرات شاخص خشکی ایران با توجه به روش من کندال در دوره گذشته

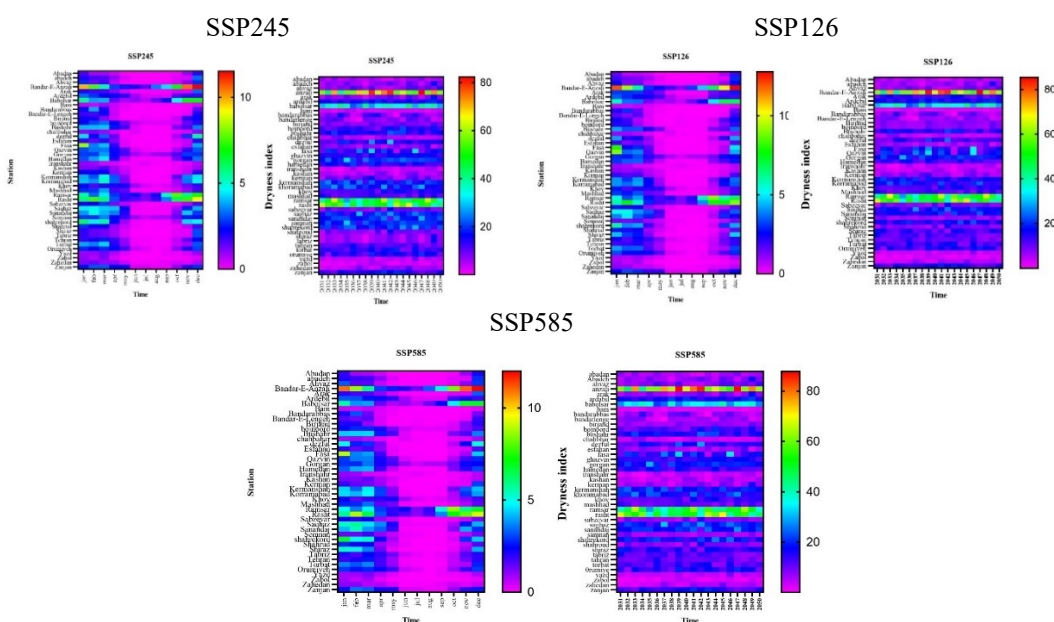
(*** معنی داری در سطح ۰/۹۹۹ درصد، ** وجود روند در سطح معنی‌داری ۰/۹۹ درصد، * وجود روند در سطح معنی‌داری ۰/۹۵ درصد، + وجود روند در سطح معنی‌داری ۰/۹۰ درصد).

که طی برای دوره آماری ۶۰-۲۰۴۱ تخمین زده شده است که میزان دما در سناریو SSP126 نزدیک به ۱/۷ درجه سلسیوس، در سناریو حدوسط SSP245 حدود ۲ درجه و همچنین در سناریو بدبینانه SSP585 حدود ۲/۴ درجه سلسیوس افزایش خواهد داشت (IPCC, 2021). به طور کلی، با توجه به شکل

بررسی ضریب تغییرات ضریب خشکی به تفکیک مناطق اقلیمی در دوره آینده (۵۰-۲۰۳۱): مرحله دوم پژوهش مربوط به ضریب خشکی در آینده است. با توجه به نقشه‌های Heat Map که شامل سه سناریو SSP126, 245 & SSP585 است

ایستگاه فسا و قزوین شرایط مرطوب را در این دو ماه خواهند داشت و ایستگاه‌های رامسر و رشت در مرز خشکی و مرطوب قرار دارند که بیشتر در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس و ماه‌های بین سپتامبر تا دسامبر از رطوبت جزئی برخوردار هستند و بقیه ایستگاه‌ها به سمت خشک و فراخشک تمایل دارند. در SSP245 تقریباً تعداد ایستگاه‌های نیمه‌خشک بیشتر و فراخشک کمتر است. ماه‌هایی که خشکی تشدید می‌شود در ماه‌های گرم سال است و در SSP585 از افزایش بیشتری برخوردار است.

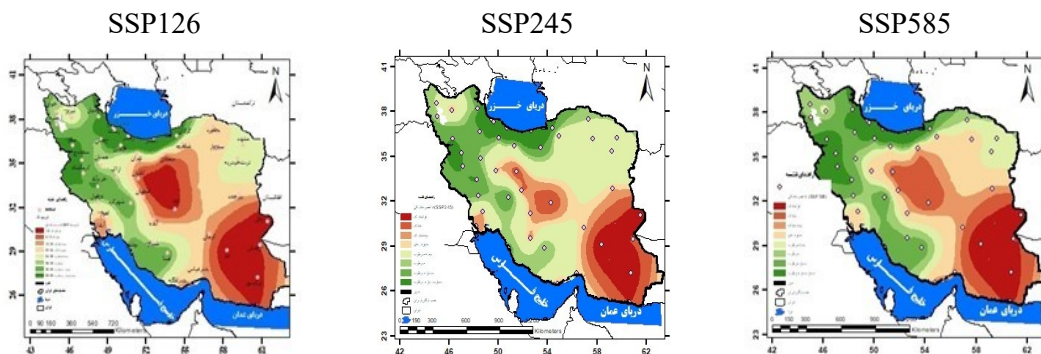
۶ در سه سناریو، تقریباً در همه ایستگاه‌ها رژیم خشکی به خشک و فراخشک تمایل دارد و فقط بندر انزلی، بابلسر، رامسر و رشت در این سه سناریو وضعیت مطلوب‌تری را نشان می‌دهد. همچنین ایستگاه‌های یزد، زابل، زاهدان، ایرانشهر، کاشان، کرمان، چابهار و بسم شرایط فراخشک در آینده پیش‌نمایی می‌شود. بین ماه‌های می تا سپتامبر (فصل بهار و تابستان) ضریب خشکی مشهودتر است. در سناریو SSP126 بندر انزلی در ماه ژانویه و دسامبر شرایط مرطوب و خیلی مرطوب را تجربه خواهد نمود.



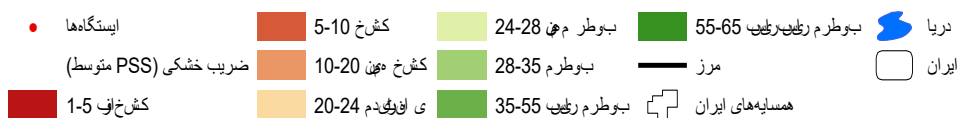
شکل ۷: رژیم تغییرات ماهانه و سالانه (نقشه Heat Map) دوره مورد مطالعه ۲۰۳۱-۲۰۵۰ (سمت راست، Heat map سالانه و سمت چپ، Heat map ماهانه)

میزان تخمین شده افزایش دما در سناریوهای مانند سناریو SSP585 بیشتر است. در یک نگاه اجمالی نواحی جنوب شرقی کشور و به طور کلی نواحی شرق و جنوب کوهستان‌های زاگرس و البرز در نواحی نیمه‌خشک تا فراخشک قرار دارند. البته همانطور که ذکر شد سطح مناطق فراخشک در دوره‌های آتی مبتنی بر افزایش دما افزوده خواهد شد.

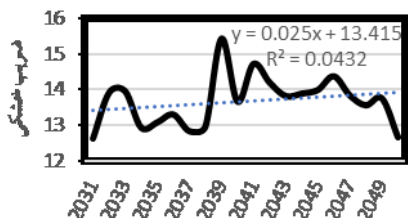
شکل ۸ توزیع فضایی ضریب خشکی کشور را بر اساس سه سناریوهای SSP مورد استفاده در پژوهش طی دوره آماری آینده (۲۰۳۱-۲۰۵۰) نشان می‌دهد. همانطور که پیش‌تر بیان شد در این مطالعه سه سناریو گوناگون با رفتارهای متفاوت از شرایط خوش‌بینانه، حد وسط و بدبینانه به کار گرفته شده است. بر این اساس با تغییر سناریوها انتظار می‌رود بر سطح مناطق خشک و فراخشک افزوده شود. چرا که



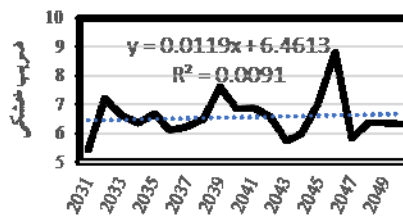
راهنمای نقشه



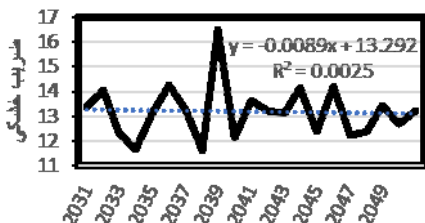
شکل ۸: توزیع فضایی ضریب خشکی کشور بر اساس سه سناریوهای SSP طی دوره آماری ۲۰۳۱-۲۰۵۰



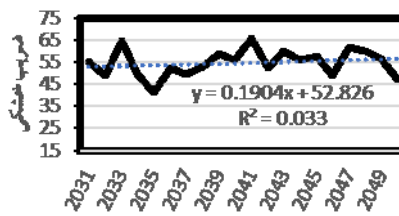
الف



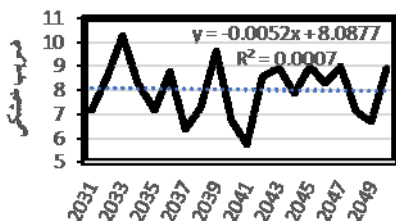
ب



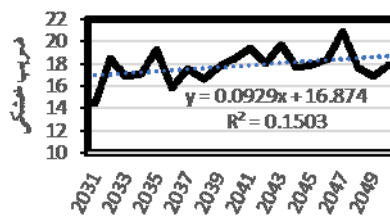
ج



د



ر



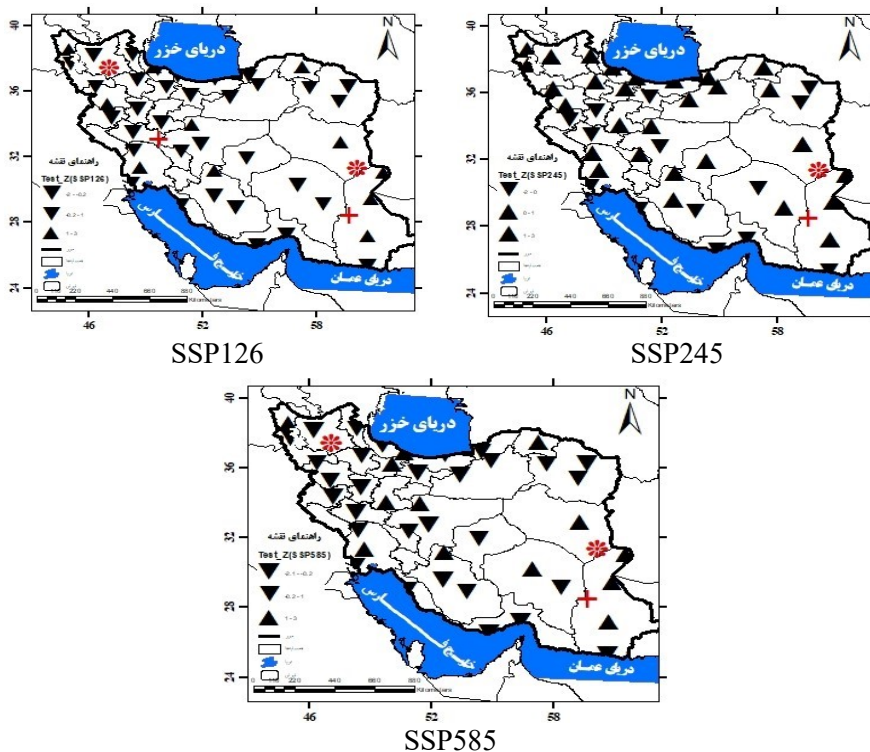
ی

شکل ۹: محاسبه شاخص خشکی ایران براساس نواحی اقلیمی به روش دمارتن (۲۰۳۱-۲۰۵۰). متوسط اقالیم ایران (الف)، اقلیم مناطق خشک (ب)، اقلیم مناطق نیمه خشک (ج)، اقلیم مناطق مرطوب (د)، اقلیم مناطق نیمه مرطوب (ر)، اقلیم مناطق مدیترانه‌ای (ی)

زمانی - مکانی تغییرات شاخص خشکی ایران را به همراه مقدار معنی‌داری آنها برای سه سناریو مختلف نشان می‌دهد. آنچه که حائز اهمیت است که میزان کاهش ضریب خشکی در مناطق دارای ارتفاعات بالا همچون ارتفاعات زاگرس و البرز محسوس‌تر بوده. این امر با می‌توان به حساسیت اکوسیستم مناطق کوهستانی مرتبط دانست. چرا که این مناطق با توجه به تغییر نوع ریزش باران و تغییرات کاهشی پوشش برف و یخ همراه می‌باشد که می‌تواند این امر بر ضریب خشکی منطقه موثر واقع گردد. برخی ایستگاه به طور پراکنده در سناریوهای مختلف رفتار افزایش نیز نشان می‌دهد. اقلیم پدیده متفاوت می‌باشد و نمایش تغییرات به صورت منطقه‌ای امری طبیعی محسوب می‌گردد. البته پیشنهاد می‌گردد که در آینده چنین مطالعه‌ای با بهره‌گیری از مدل‌های بیشتر و محاسبه مدل ترکیبی رفتار دقیق‌تر نشان خواهد داد.

شکل ۹ ضریب خشکی را با توجه به اقلیم‌های مختلف (خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، مرطوب و نیمه‌مرطوب) مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب خشکی در دوره آتی در اقلیم‌های گوناگون دارای رفتاری متفاوت نشان می‌دهد. به طوری که مقدار ضریب خشکی در اقلیم‌های مناطق مرطوب و نیمه مرطوب دارای رو به کاهش و دیگر اقلیم‌ها میزان ضریب خشکی رو به افزایش است (شکل ۹ ب تا ی). البته در یک نگاه کلی ضریب خشکی کل ایران دارای میزان افزایشی است. البته این معنی افزایش کلی ضریب خشکی نمی‌باشد چرا که در ابتدا دوره مقدار ضریب خشکی چندان افزایشی نبوده تقریباً از میان‌های دوره مورد مطالعه روند این شاخص رو به کاهش می‌باشد. بدین معنی که روند خشکی شکلی کاهشی را نشان می‌دهد.

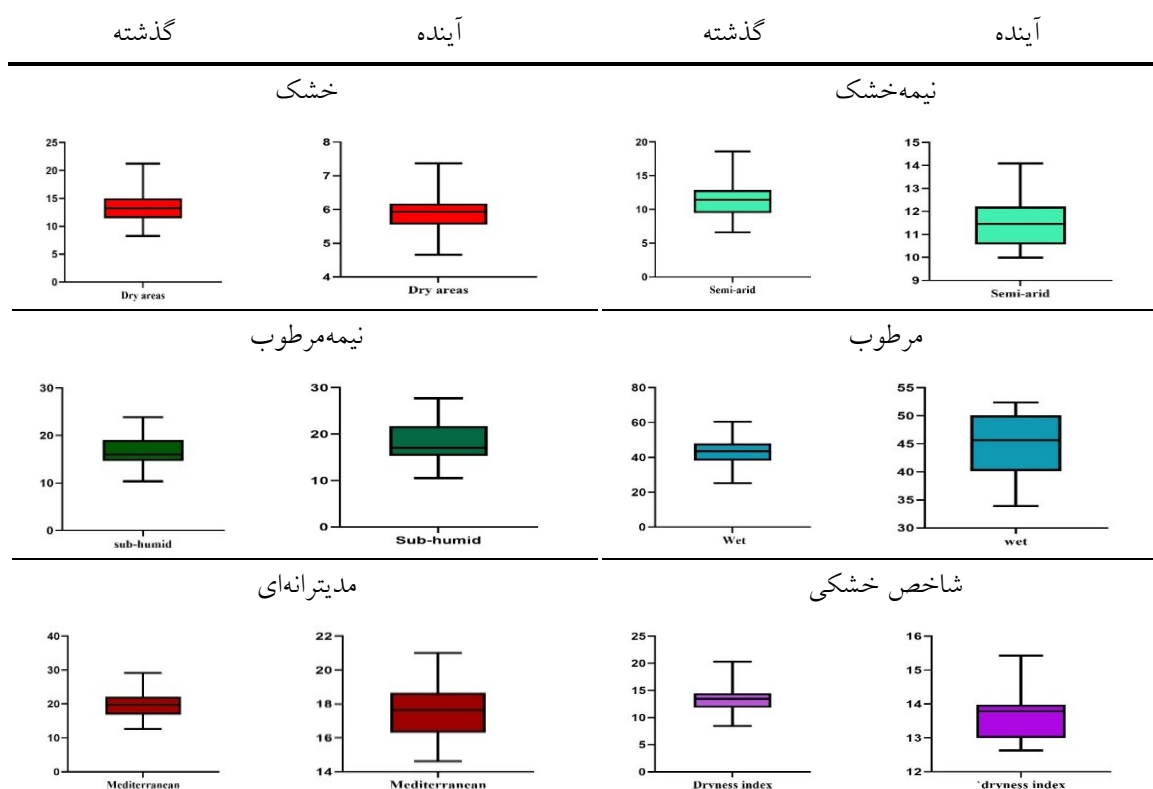
توزیع فضایی روند تغییرات شاخص خشکی این موضوع را بهتر می‌تواند به تصویر آورد. شکل ۱۰ توزیع



شکل ۱۰: توزیع زمانی - مکانی تغییرات شاخص خشکی ایران با توجه به روش من‌کنندال دوره زمانی ۲۰۳۱-۲۰۵۰ (***) معنی داری در سطح ۰/۹۹۹ درصد، * وجود روند در سطح معنی‌داری ۰/۹۹ درصد، * وجود روند در سطح معنی‌داری ۰/۹۵ درصد، + وجود روند در سطح معنی‌داری ۰/۹۰ درصد).

است. نکته قابل ارائه مبتنی بر این اشکال افزایش فاصله بین میزان شاخص کمینه و بیشینه در این نمودار است به طوری که مساحت چندضلعی موجود در آن را افزایش داده است. این امر نشان از افزایش میزان نوسانات دمایی در منطقه است. افزون بر این تفاوت‌های زمانی به ویژه در طول شب و روز تشدید خواهد یافت. به‌عنوان مثال روزهای گرم‌تر و شب‌های سردتر. به تبع در ایام گرم نیاز به تجهیزات سرمایشی و در در ایام سرد نیاز شدید به تجهیزان گرمایش می‌باشد.

رفتار زمانی و مکانی تغییرات ضریب خشکی مطالعه شد. به منظور یک جمع‌بندی و کسب اطلاعات مشهودتر اقدام به ترسیم نمودار جعبه‌ای از تغییرات ضریب خشکی شد (شکل ۱۱). این امر به صورت مقایسه‌ای در دوره گذشته و آینده نمایش داده شده است. در همه اقلیم‌ها ضریب دوره خشکی نسبت به گذشته کاهش داشته است که نیاز به ذکر است در مناطق خشک و نیمه خشک این رفتار کاهش نسبت به دیگر مناطق اقلیمی چشمگیرتر پیش‌نمایی شده



شکل ۱۱: ویژگی‌های ضریب خشکی ایستگاه‌ها براساس تقسیم‌بندی دمارتن (گذشته و آینده) (محور عمودی نمایش دهنده میزان ضریب خشکی می‌باشد)

هواشناسی در شش ناحیه اقلیمی ایران میزان ضریب خشکی دمارتن محاسبه شد. نخست ضریب خشکی در دوره گذشته مورد مطالعه قرار گرفت نتایج بیانگر روندی کاهشی در میزان ضریب خشکی می‌باشد. این روند کاهشی میزان ضریب خشکی با روند افزایش دما همراستا می‌باشد. افزون بر بررسی ضریب خشکی در دوره گذشته میزان ضریب خشکی در کل ایران رفتار نسبتاً افزایش نشان می‌دهد. البته این افزایش تقریباً

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم، ویژگی‌های اقلیمی یک منطقه را تغییر می‌دهد. اقلیم ایران در دهه‌های گذشته تغییرات زیادی را تجربه نموده و این روند همچنان با شدت و ضعف‌هایی همراه بوده است و تاثیر مستقیمی بر روی زندگی ساکنان ایران داشته است. بنابراین میزان تغییرپذیری مقادیر کمینه و بیشینه بسیار مهم می‌باشد. بنابراین با استفاده از داده‌های ۴۴ ایستگاه

اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، آموزش و آگاهی‌رسانی به کشاورزان و ساکنان مناطق آسیب‌پذیر ضروری است. سرمایه‌گذاری در تحقیقات علمی و توسعه زیرساخت‌های مقاوم می‌تواند به بهبود شرایط کمک کند. در نهایت، همکاری‌های بین‌المللی و تدوین سیاست‌های زیست‌محیطی موثر، از دیگر اقدامات لازم برای مقابله با این چالش‌ها هستند. ضمن اینکه پیشنهاد می‌گردد به منظور دستیابی به نتایج مطلوب‌تر و کاهش عدم قطعیت‌ها، از مدل‌های بیشتری برای ارزیابی شاخص خشکی (AI) استفاده شود. این امر می‌تواند به فهم بهتر تغییرات خشکی در سناریوهای مختلف کمک کند.

تحت‌الشعاع یک چند سال اولیه قرار می‌گیرد. تقریباً از دهه‌ها اول آبی روند کلی ضریب خشکی به صورت کاهشی می‌باشد. به صورت مجزا کاهش ضریب خشکی در گذشته و دوره‌های آبی با توجه به سناریوهای SSP، ایران را به سمت قاره‌ای شدن پیش می‌برد و در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب روند شاخص خشکی از کاهش بیشتری برخوردار است که زنگ هشدار را برای این مناطق به صدا در می‌آورد. برای مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش ضریب خشکی در ایران، باید برنامه‌های مدیریت آب را تقویت کرده و کشاورزی پایدار را ترویج کنیم. استفاده از محصولات مقاوم به خشکی و افزایش پوشش گیاهی نیز از

منابع

1. ابراهیمی، عباس؛ صفرداد، طاهره؛ جانبازقبادی، غلامرضا. ۱۳۹۸. ارتباط کاربری‌های اراضی شهری با تغییرات ویژگی‌های تابش (مطالعه موردی: شهرهای میانی استان مازندران). مطالعات ساختار و کارکرد شهری، ۱۷۸-۱۶۱.
2. ابراهیمیان، صدیقه و سهیلی، اسماعیل. ۱۴۰۱. پهنه‌بندی و تعیین بهترین شاخص خشکسالی (مطالعه موردی: استان لرستان). مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، ۲۳-۱۱.
3. اخگر، دامون؛ کریمی، حمیدرضا؛ صرافی، سیدرسول و میردهقان، سیدحسین. ۱۴۰۱. تأثیر پایه بادمجان وحشی (*Solanum torvum*) بر میزان تحمل به تنش خشکی گوجه‌فرنگی بر اساس شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیکی. نشریه علوم باغبانی، ۳۷(۲)، ۴۹۵-۴۸۱.
4. امانی، زینب؛ دیهیم‌فرد، رضا و مختصی‌بیدگلی، علی. ۱۳۹۴. بررسی خشکی تحت شرایط افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم در گندم دیم استان فارس با استفاده از شاخص خشکی. نشریه تولید گیاهان زراعی، ۹(۲)، ۱۵۱-۱۷۴.
5. بختیاری، بهرام؛ مهدوی، نکیسا و سیاری، نسرين. ۱۴۰۰. تحلیل حساسیت و بررسی تغییرات شاخص خشکی (AI) در چند نمونه اقلیمی ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷(۱)، ۱۵-۱.
6. تیموری، مهدی؛ عبدالهی‌مایوان، محبوبه؛ نژادحسن، بتول و گرای، پرویز. ۱۳۹۰. بررسی روند شاخص خشکی در ایران. مرکز تحقیقات کم‌آبی و خشکسالی در کشاورزی و منابع طبیعی، اولین کنفرانس ملی خشکسالی و تغییر اقلیم.
7. حمیدیان‌پور، محسن. ۱۳۹۴. تحلیل تغییرات فضایی- زمانی تداوم بارش در ایران. پنجمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم.
8. حمیدیان‌پور، محسن و شجاع، فائزه. ۱۴۰۱. مقدمه‌ای بر روش‌ها و شگردهای مدل‌سازی اقلیم و تغییر اقلیم. انتشارات دانشگاه سیستان و بلوچستان.
9. حمیدیان‌پور، محسن؛ نظری‌پور، حمید؛ خزاعی‌فیض‌آبادی؛ فرزانه، مهسا و فیروزه، صدیقه. ۱۴۰۲. تعیین نقطه تغییر آستانه‌های دمایی امواج گرمایی و سرمای در ایران زمین طی دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۶۶. مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۷).
10. خام‌چین‌مقدم، فرهاد و رضائی‌پژند، حجت. ۱۳۸۸. نقد روش اقلیم‌بندی دمارتن برای بارش حداکثر روزانه در ایران به کمک روش گشتاورهای خطی. مجله فنی مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، ۲(۲).
11. خلیلی، علی؛ بذرافشان، جواد و چراغعلی‌زاده، مجید. ۱۴۰۰. بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده شده و کاربست روش برای پهنه‌بندی اقلیم جهان. هواشناسی کشاورزی، ۱۰(۱)، ۱۶-۳.

۱۲. درویشی، یوسف و قدم‌خیر، محمدصادق . ۱۴۰۰. سنجش و تحلیل اثرات درجه خشکی اقلیم با استفاده از شاخص‌های خشکی ماهانه طاوسی، بارش انگوت (K) و یونپ (UNEP) (مورد مطالعه: شهرستان‌های استان گلستان). فصلنامه علمی دانشگاه گلستان، ۲(۷)، ۷۰-۴۹.
۱۳. دوستان، رضا . ۱۳۹۴. تحلیلی بر خشکسالی‌های ایران در نیم قرن گذشته. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۶(۲۳، ۲۴).
۱۴. ذوالفقاری، فرهاد؛ آذرنیوند، حسین؛ خسروی، حسن؛ زهتابیان، غلامرضا و خلیقی‌سیگارودی، شهرام . ۱۳۹۷. اثر پوشش گیاهی بر ایجاد خرد اقلیم در اکوسیستم‌های مناطق خشک (مطالعه موردی: دشت سیستان). فصلنامه مرتع و آبخیزداری، ۷۱(۴)، ۹۱۴-۹۰۱.
۱۵. رضایی، فرشته؛ احمدی، محمود و شکیبیا، علیرضا . ۱۳۹۸. شبیه‌سازی آستانه دمایی گرما طی دوره گرم سال در ایران براساس سناریوهای RCP در بازه زمانی (۲۰۴۵-۲۰۱۶). پژوهش‌های دانش زمین، ۱۰(۳۹)، ۲۴۷-۲۳۱.
۱۶. روشن، غلامرضا؛ قانقرمه، عبدالعظیم و شاهکویی، اسماعیل . ۱۳۹۲. اثر تغییر اقلیم منطقه‌ای بر نیاز آبی غلات دیم در ایران. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی. ۲۴(۵۲).
۱۷. زارع‌ابیان، حمید؛ بیات‌ورکشی، مریم و دین‌پژوه، یعقوب . ۱۳۸۹. بررسی روند تغییرات شاخص خشکی در نیمه جنوبی ایران. مجله دانش آب و خاک، ۲۱(۲).
۱۸. سعیدیان، حمزه . ۱۴۰۱. مروری جامع بر شاخص‌های کاربردی خشکسالی. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۲(۳)، ۳۰-۱.
۱۹. سلیقه، محمد . ۱۳۹۶. آب و هواشناسی سینوپتیک ایران. انتشارات سمت.
۲۰. شفیع، مینا؛ پهبوری، علی؛ بیژن‌زاده، احسان و میردورقی، مریم . ۱۴۰۲. ارزیابی عملکرد و شاخص‌های تحمل به خشکی در کشت خالص و مخلوط غلات مختلف تحت تنش آبی و آبیاری نرمال. تنش‌های محیطی در علوم زراعی، ۱۶(۳).
۲۱. شلتن، مارلین . ۱۳۹۰. هیدرکلیماتولوژی. ترجمه و تلخیص: ذوالفقاری، حسن. چاپ اول، انتشارات دانشگاه رازی.
۲۲. صوفی، معصومه و علیجانی، بهلول . ۱۳۹۱. تغییر اقلیم در ناهم‌واری‌های زاگرس. جغرافیای سرزمین، ۹(۳۴)، ۴۵-۶۴.
۲۳. طاوسی، تقی؛ شجاع، فائزه و عسگری، الهه . ۱۳۹۸. بازنگری پهنه‌های اقلیمی شمال شرق ایران بر پایه کاربرد تلفیقی تغییر شاخص خشکی. مدیریت بیابان، ۷(۱۳)، ۱۳۴-۱۱۷.
۲۴. عساکره، حسین . ۱۳۸۱. مدل‌های گردش عمومی جو. فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۱۱(۴۱)، ۲۱-۲۳.
۲۵. عطایی، هوشمند و فتایی، راضیه . ۱۳۹۲. بررسی روند تغییرات زمانی- مکانی دمای شبانه استان اصفهان. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۸(۴)، ۱۱۱، ۱۸۲-۱۶۷.
۲۶. کاویانی، محمدرضا و علیجانی، بهلول . ۱۳۸۵. مبانی آب و هواشناسی. انتشارات سمت.
۲۷. قهرودی‌تالی، منیژه . ۱۳۸۱. ارزیابی درون‌یابی به روش کریجینگ. پژوهش‌های جغرافیایی، ۴۳، ۹۵-۱۰۸.
۲۸. فتحی تپهرشت، امین؛ شفیع‌زاده مقدم، حسین و کوچک‌زاده، مهدی . ۱۴۰۰. تحلیل فضایی- زمانی طبقه‌بندی اقلیمی ایران بر اساس روش دمارتن و آزمون من- کندال در دوره آماری ۱۳۷۴-۱۳۹۸. فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۳).
۲۹. فرخ‌زاد، فروغ؛ کرم‌شاهی، عبدالعلی؛ تازه، مهدی و عبدالخانی، علی . ۱۳۹۳. ارزیابی روش‌های درون‌یابی قطعی و زمین‌آماری در تهیه نقشه شوری خاک (مطالعه موردی: منطقه شادگان). همایش ملی ژئوماتیک، ۲۱
۳۰. کوچکی، علیرضا؛ نصیری، مهدی و کمالی، غلامعلی . ۱۳۸۶. مطالعه شاخص‌های هواشناسی ایران در شرایط تغییر اقلیم. پژوهش‌های زراعی ایران، ۵(۱).
۳۱. کیقبادی، ساقی؛ فتوحی‌قزوینی، رضا؛ تاجور، یحیی و صبوری، عاطفه . ۱۳۹۹. معرفی مقاوم‌ترین ژنوتیپ‌های سرو کوهی (*Juniperus spp.*) به تنش خشکی بر پایه شاخص‌های فیزیولوژیکی و آنتی‌اکسیدانی. نشریه علوم باغبانی، ۲۶(۲)، ۳۵۳-۳۴۳.
۳۲. گودرزی، مسعود؛ صلاحی، برومند و حسینی، سیداسعد . ۱۳۹۴. ارزیابی عملکرد مدل‌های ریزمقیاس گردانی LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۹(۳۱)، ۲۲-۱۱.
۳۳. مسعودیان، سید ابوالفضل . ۱۳۹۰. آب و هوای ایران. انتشارات شریعه توس، اصفهان، ۲۶۴.
۳۴. مسعودیان، سید ابوالفضل . ۱۳۸۲. نواحی اقلیمی ایران. مجله جغرافیا و توسعه، ۱(۲)، ۱۷۱-۱۸۴.
۳۵. محمدی، حسین . ۱۴۰۰. مفاهیم و اصطلاحات آب و هواشناسی. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.
۳۶. محمدی، حسین؛ ربانی، فاطمه و امیری، ابراهیم . ۱۳۹۵. تغییر اقلیم و مدل‌های اقلیمی. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم.

۳۷. معروفی، صفر؛ طبری، حسین؛ آبینی، علی و معروفی، حسین . ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات زمانی و خصوصیات مکانی بارش و خشکسالی هواشناسی، در غرب کشور طی چند دهه اخیر. فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، (۳۱).
۳۸. مهسافر، حمید؛ مکنون، رضا و ثقفیان، بهرام . ۱۳۸۹. اثرات تغییر اقلیم بر بیلان آبی دریاچه ارومیه. تحقیقات منابع آب ایران، سال هفتم (۱).
39. Ahmadi A, Zabihi O. (2024). Multi- Criteria evaluation of CIMP6 precipitation and temperature simulations over Iran, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101707> .
40. Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S. M., Moridi, A., Neshat, A., Golmohammadi, G., & Maghsoudi, R. (2024). Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, 14, 5027. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55340-x>.
41. IPCC, (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, [doi:10.1017/9781009157896.001](https://doi.org/10.1017/9781009157896.001).
42. Ghazi, B., Salehi, H., Cheshami, M., Zeydalinjad, N., & Linh, N. T. T. (2024). Projection of climate change impact on main climate variables and assessment of the future of Köppen–Geiger climate classification in Iran. *Acta Geophysica*. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01457-6>.
43. Hadi Pour, S., Abd Wahab, A. K., & Shahid, S. (2020). Spatiotemporal changes in aridity and the shift of drylands in Iran. *Atmospheric Research*, 233, 104704. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104704>.
44. Namroodi M, Hamidianpour M, Poodineh M. R. 2021. Spatio-temporal analysis of changes in heat and cold waves across Iran over the statistical period 1966–2018. *Arabian Journal of Geosciences* (2021) 14:857 <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07161-9>.
45. Omidi F., Paimozd S. 2023. Agricultural water requirement supply under climate change (case study: Bazoft Reservoir), pp. 277-287. In Gastescu, P., Bretcan, P. (edit., 2023), *Water resources and wetlands*, 6th International Hybrid Conference Water resources and wetlands, 1317 September 2023, Tulcea (Romania). pp.287. Available online at <http://www.limnology.ro/wrw2023/proceedings.html>.
46. Semenov M.A, Brooks R. J. 1999. Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain, *climate Research clim Res*. Published March 22, Vol. 11: 137 – 148, 1999.
47. Xue R, Sun B, Li W, Li H, Zhou B. 2024. Future Changes in compound drought eventa and associated population and GDP exposure in China based on CMIP6, <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2024.100461>.
48. Wang, X., Lang, X., & Jiang, D. (2022). Future changes in aridity in the Upper Indus Basin during the twenty-first century. *Climate Research*, 87(117-132). <https://doi.org/10.3354/cr01684>.
49. Wang, X., Jiang, D., & Lang, X. (2021). Future changes in Aridity Index at two and four degrees of global warming above preindustrial levels. *International Journal of Climatology*, 41(1), 278-294. <https://doi.org/10.1002/joc.6620>.

