



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 13
No. 1 (49)**

Received:
2022-02-13

Accepted:
2023-04-17

Pages: 111-129

Studying the Effect of Climate Change on Drought Conditions and Climate Regions of Iran Using Aridity Index

Marzieh Hosseini¹ and Asghar Azizian^{2*}

1) MSc in Water Resources Engineering, Water engineering Dept., Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

2) Associate Professor, Water engineering Dept., Imam Khomeini International University (IKIU), Qazvin, Iran.

*Corresponding author email: azizian@Eng.ikiu.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: One of the consequences of climate change is the occurrence of extreme events such as drought, which is important to identify, monitor, evaluate, and inform about the occurrence conditions. In this study, the effects of climate change on the drought situation in the near future (2021-2040), mid-term (2041-2060), and long-term (2061-2080) have been discussed using the Aridity Index estimated by the Copernicus Climate Change Database with the use of GFDL-ESM2M climate model output under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios.

Method: In the current research, climate data simulated by the Copernicus database is used to calculate the Aridity Index of different parts in various time horizons. Mann-Kendall's test is applied to investigate the changes of drought indices in different time horizons. Also, the aridity index is used to determine the climatic condition of different parts of Iran in several time periods and its changes are analyzed and investigated.

Results: The results illustrate that in the near future and based on the RCP4.5 scenario, the average annual dryness index has an increasing trend in most parts of the country, and these climate changes lead to a change in the climate of some parts of the north of the country from humid to semi-arid and semi-humid, and parts of the center and the southeast become dry to semi-arid. According to the RCP8.5 scenario, there is a downward trend in parts of the east and the center of the country, and an upward trend in parts of West Azerbaijan, East Azerbaijan, Chaharmahal Bakhtiari, and a part of Kermanshah, and climate change rises the spatial extent of dry climates in the country. Also, in the mid-term and based on the RCP4.5 scenario, a downward trend can be seen in most parts of the country, and climate change will increase the area of dry climate lands in the central and southeastern parts, while according to the RCP8.5 scenario, there is an upward trend in most of the country, and climate change causes a soar in semi-arid and dry climates in parts of the northwest, northeast, and parts of the center and south of the country. Finally, in the long-term and based on the RCP4.5 scenario, the mentioned trends will be almost true and climate change will lead to the expansion of areas with arid and semi-arid climates.

Conclusion: The results obtained in this research showed that the average drought index in the near future, mid-term and long-term according to the RCP4.5 scenario are 0.5, 2.2 and, 2.3%, respectively and according to the RCP8.5 scenario, 2, 4.2 and, 4.1% have risen compared to the primary period, respectively, and it rises by 1.4 percent compared to the base period, and it is a good indication that the reduction in rainfall and the increase in the temperature of the earth's surface will lead to a soaring in the dryness of different parts of the country. In addition to changing the climate of the region, this issue will have irreparable effects on the condition of water resources, agriculture, environment and urbanization. Therefore, in order to reduce the aforementioned effects, it is recommended that managers and officials consider appropriate measures, correspond to each climate region, to control the amount of water consumption in different parts of the country.

Keyword: Aridity Index, Hottest quarter, Coldest quarter, Wettest quarter, Driest quarter





شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۷۴۸۰
شاپا الکترونیکی: ۲۲۵۰-۷۴۰۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iawwsrcj@srbiau.ac.ir
iawwsrcj@gmail.com

سال سیزدهم

شماره ۱ (۴۹)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۱/۲۸

صفحات: ۱۱۱-۱۲۹

مطالعه اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی و اقلیم ایران

با استفاده از شاخص خشکی

مرضیه حسینی^۱ و اصغر عزیزیان^{۲*}

۱) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۲) دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: azizian@eng.ikiu.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: یکی از پیامدهای تغییر اقلیم وقوع رخداد‌های حدی نظیر خشکسالی است که شناسایی، پایش، ارزیابی و نیز اطلاع‌رسانی از شرایط وقوع حائز اهمیت است. در این مطالعه به بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی و نیز اقلیمی بخش‌های مختلف ایران در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، میانی (۲۰۶۰-۲۰۴۱) و دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) با بهره‌گیری از شاخص‌های خشکی برآورد شده توسط پایگاه اقلیمی کوپرنیک اتحادیه اروپا (مبتنی بر خروجی مدل اقلیمی GFDL-ESM2M) و تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 پرداخته شده است.

روش پژوهش: در پژوهش حاضر از داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط پایگاه اطلاعاتی کوپرنیک برای محاسبه شاخص خشکی (Aridity Index) بخش‌های مختلف ایران در اقل‌های زمانی مختلف استفاده شده است. از آزمون من کندال برای بررسی روند تغییرات شاخص‌های خشکی در اقل‌های زمانی مختلف استفاده بعمل آمده است. همچنین از شاخص خشکی برای تعیین وضعیت اقلیمی بخش‌های مختلف ایران در دوره‌های زمانی مختلف استفاده و روند تغییرات آن نیز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در آینده نزدیک و بر اساس سناریوی RCP4.5 متوسط سالانه شاخص خشکی به دلیل افزایش تبخیر و تعرق مرجع در مقایسه با بارش دارای روند افزایشی در بیشتر بخش‌های کشور است و این تغییرات اقلیمی منجر به تغییر وضعیت اقلیمی بخش‌هایی از شمال کشور از مرطوب به نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب و قسمت‌هایی از مرکز و جنوب شرقی از خشک به نیمه‌خشک می‌شود. در حالی که بر اساس سناریوی RCP8.5 در قسمت‌هایی از شرق و مرکز کشور یک روند نزولی و در بخش‌هایی از آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، چهارمحال بختیاری و بخشی از کرمانشاه روند صعودی وجود دارد. همچنین در آینده میانی و بر اساس سناریوی RCP4.5 نیز یک روند نزولی در بیشتر بخش‌های کشور رویت می‌شود و تغییر اقلیم سبب افزایش گستره مناطق دارای اقلیم خشک در بخش‌های مرکزی و جنوب شرقی می‌شود و این در حالیکه بر اساس سناریوی RCP8.5 یک روند صعودی در بیشتر سطح کشور وجود دارد و تغییر اقلیم سبب افزایش گستره مناطق دارای اقلیم نیمه‌خشک و خشک در قسمت‌هایی از شمال غرب، شمال شرق و قسمتی از مرکز و جنوب کشور می‌شود. در نهایت در آینده دور و بر اساس سناریوی RCP4.5 نیز روندهای مذکور تقریباً صادق بوده و تغییر اقلیم منجر به گسترش مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک خواهد گردید.

نتایج: نتایج بدست آمده نشان می‌دهد متوسط شاخص خشکی در آینده نزدیک، میانی و دور بر اساس سناریوی RCP4.5 به ترتیب ۰/۵، ۲/۲ و ۲/۳ درصد و مطابق سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۰/۲، ۴/۲ و ۴/۱ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. این مساله گویای این نکته است که کاهش بارش و افزایش دمای سطح زمین در اثر تغییر اقلیم، به طور توأمان منجر به افزایش وضعیت خشکی بخش‌های مختلف کشور خواهد شد. این مساله علاوه بر تغییر نوع اقلیم منطقه، اثرات جبران‌ناپذیری بر وضعیت منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست و شهرنشینی خواهد داشت. لذا توصیه می‌شود جهت کاهش اثرات مزبور، اقدامات مناسب در جهت کنترل میزان مصارف آبی در بخش‌های مختلف کشور متناسب با شرایط اقلیمی هر منطقه مدنظر مدیران و مسئولین قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: شاخص خشکی، گرم‌ترین فصل، سردترین فصل، مرطوب‌ترین فصل، خشک‌ترین فصل



مقدمه

از نیمه قرن بیستم افزایش چشم‌گیر غلظت گازهای گلخانه‌ای به ویژه دی‌اکسیدکربن به دلیل استفاده مفرط از سوخت‌های فسیلی، تغییر پوشش، 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) و پنجم (AR5) ارزیابی ارائه شده توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) بیان شده است، وضعیت آب و هوایی جهان در قرن بیست و یکم و دفعات وقوع شرایط حدی آب و هوایی با سرعت بی‌سابقه‌ای تغییر خواهد کرد (Li et al., 2020). بر اساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، میزان انتشار فعلی گازهای گلخانه‌ای احتمالاً باعث می‌شود میانگین دما تا ۰/۲ درجه سانتی‌گراد در هر دهه افزایش یابد (Pouralkhas Nokandeie et al., 2022). در نتیجه تغییرات اقلیمی، یک پدیده طبیعی و تکرار شدنی در یک دوره زمانی مشخص به نام خشکسالی و یا دوره‌های خشکی اتفاق می‌افتد. پدیده خشکسالی مخرب‌ترین پدیده اقلیمی است که در تمام نواحی اقلیمی از مناطق خشک، نیمه‌خشک و مناطق نیمه‌مرطوب پدید می‌آید (Naderianfar and Heydari, 2021). خشکی یک پدیده است که از کاهش غیرمنتظره رطوبت بوجود می‌آید و باعث عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب می‌شود که تأثیرات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی به دنبال دارد (Zhang et al., 2012). پیش‌بینی قابل اعتماد از وضعیت خشکی در آینده یکی از مبانی اصلی موفقیت در برنامه‌ریزی منابع آب است که تحت تأثیر فرآیندهای تغییر اقلیم قرار دارد (Amani et al., 2016). لذا شناسایی، پایش و پیش‌آگاهی خشکسالی در کشور ایران که جز مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Naderianfar and Heydari, 2021). دانشمندان به‌منظور ارزیابی این پدیده تاکنون شاخص‌های مختلفی ارائه نمودند (Ekhtiarikhajeh and Dinpazhooh, 2018). شاخص‌های ترانسو، اولد کاپ، لنگ، کوپن، دومارتن، آمبرژه، هارگریوز، تورنت وایت و سازمان یونسکو از جمله شاخص‌های معتبر ابداع شده طی سال‌های ۱۹۸۰-۱۹۰۰ میلادی برای ارزیابی خشکسالی است (Kaviani, 2001). شاخص خشکی (Aridity Index (AI) یا نسبت مقدار بارش بر تبخیر و تعرق مرجع (P/ET0) متغیر مناسبی برای ارزیابی خشکی در مناطق مختلف جغرافیایی است (Oliver, 2005). با توجه به اینکه این شاخص هم نیاز آبی (تبخیر و تعرق مرجع) و هم تامین آبی (بارش) را در نظر می‌گیرد، شاخص مناسبی برای بررسی شرایط اکوهیدرولوژیک یک منطقه است (Nouri et al., 2016). همچنین با در نظر گرفتن بارش و تبخیر و تعرق در شاخص

خشکی، بررسی روند AI می‌تواند به خوبی نمایانگر تأثیرات تغییرات اقلیمی باشد. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه تأثیرات تغییرات اقلیمی بر شاخص‌های خشکسالی انجام شده است. آهنی و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای روند تغییرات شاخص خشکی را برای سه حوضه اصلی ایران (مرکزی، سرخس و هامون) طی بازه‌ی زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۵ بررسی کردند و نتیجه گرفتند که روند شاخص در قسمت‌های شمالی ایران صعودی و در بخش‌های جنوبی نزولی بوده است. نوری و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای روند تغییرات شاخص خشکی، تبخیر و تعرق مرجع و بارش طی دوره‌های ۲۰۱۰-۱۹۹۶، ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ را در شش ایستگاه سینوپتیک غربی و شمال غربی ایران با استفاده از خروجی‌های مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 که به روش SDSM ریز مقیاس سازی شده بود را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در سه دوره ۳۰ ساله ابتدایی، میانی و انتهای قرن ۲۱، شاخص خشکی (میانگین تمامی ایستگاه‌ها) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۶) به ترتیب ۸، ۱۴/۷، ۳۴/۳ درصد تحت سناریوی A2 و ۱۲/۶، ۱۲/۵ و ۲۰/۱ درصد تحت سناریوی B2 کاهش خواهد یافت که بیانگر خشک‌تر شدن اقلیم مناطق شمال غربی و غرب کشور طی سده حاضر است. مصباح زاده و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روی خشکسالی هواشناسی استان یزد طی دوره ۲۰۱۷-۲۱۰۰ با استفاده از خروجی مدل اقلیمی CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 با دو شاخص SPI و SPEI پرداختند. نتایج حاصل نشان داد طبق شاخص SPI منطقه مطالعاتی در آینده تحت هر سه سناریو، خشکسالی‌های شدیدتری را نسبت به دوره پایه خواهد داشت در حالی که بر اساس شاخص SPEI تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 مشخصه‌های خشکسالی در آینده نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. کامروزمان و همکاران^۱ (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای در بنگلادش به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر بارش و خشکسالی طی دوره‌های زمانی آغاز (۲۰۳۹-۲۰۱۰)، میانه (۲۰۶۹-۲۰۴۰) و پایان (۲۰۹۹-۲۰۷۰) قرن با استفاده از خروجی‌های ۲۹ مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 با شاخص خشکسالی موثر (EDI) پرداختند. نتایج نشان داد بارندگی سالانه در قرن ۲۱ در بنگلادش افزایش خواهد یافت و نرخ افزایش بر اساس سناریو RCP8.5 نسبتاً بالاتر است. همچنین روند کلی فراوانی، مدت و شدت خشکسالی احتمالاً در قرن ۲۱ تحت هر دو سناریو RCP کاهش می‌یابد، به جز حداکثر شدت خشکسالی در ابتدای قرن که پیش‌بینی شده است در سراسر کشور افزایش می‌یابد. دهقان و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای به بررسی روند خشکسالی در استان

و تا کنون مطالعه‌ای که به بررسی روند تغییرات شاخص خشکی در تمام کشور بپردازد صورت نگرفته است. از این رو در این پژوهش به منظور برنامه‌ریزی برای مواجهه با خشکسالی به بررسی تاثیرات تغییرات اقلیمی بر شاخص خشکی در سطح کشور طی سه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، میانی (۲۰۶۰-۲۰۴۱) و دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

ایران در محدوده ۲۵ درجه ۳ دقیقه الی ۳۹ درجه ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه ۵ دقیقه الی ۳۶ درجه ۱۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است. ایران کشوری است که به دلیل قرارگیری در عرض‌های میانی ۳۰ درجه، بیشتر مساحت آن را اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک فراگرفته است. متوسط بارندگی در آن ۲۵۶ میلی‌متر در سال است که تنها ۲۵/۱ درصد ایران و عمدتاً نواحی غربی و خزری، نواحی پربارش به شمار می‌آیند و حدود ۷۵ درصد از گستره ایران، بارشی کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر در سال دارد که موجب می‌شود نسبت به وقوع خشکسالی آسیب‌پذیر باشد (Ghorbani et al., 2018).

پایگاه تغییر اقلیم کوپرنیک

در گذشته رویکرد مرسوم پایش خشکسالی بر پایه مشاهدات اقلیمی هواشناسی و بهره‌گیری از شاخص‌های اقلیمی بوده است. پراکندگی ایستگاه‌ها به ویژه در مناطق خشک، نبود آمار دراز مدت در بسیاری از ایستگاه‌ها و همچنین نقطه‌ای بودن روش‌های مبتنی بر آمار اقلیمی، محدودیت‌هایی را در بررسی خشکسالی به وجود آورده است (Dehghani Tafti et al., 2019). امروزه مراکز مختلف با استفاده از حل عددی معادلات هیدرودینامیکی جو بر اساس شرایط اولیه مختلف، مجموعه‌ای از متغیرهای هواشناسی مانند بارش و دما را در زمان‌های مختلف از ساعتی تا سالیانه در مقیاس جهانی تولید می‌کنند (Nobakht et al., 2021). سامانه اطلاعات اقلیمی کوپرنیک که از اوایل سال ۲۰۱۷ معرفی شد، مشاهدات سیستم اقلیمی را با جدیدترین علوم ترکیب می‌کند تا اطلاعات معتبر و با اطمینان از وضعیت گذشته، حال و آینده اقلیم سراسر جهان ارائه دهد. مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت جوی (ECMWF)، خدمات تغییر اقلیم کوپرنیک را به نمایندگی از اتحادیه اروپا اداره می‌کند و برای ارائه خدمات، متخصصین مختلفی را از سراسر اروپا گرد هم آورده است. سیستم تغییر اقلیم سامانه کوپرنیک علاوه بر داده‌های اقلیمی ضروری نظیر دما و بارش، مجموعه کاملی از شاخص‌های زیست اقلیم جهانی نظیر شاخص‌های خشکی، شاخص‌های تبخیر، شاخص‌های انرژی سطحی، شاخص‌های خاک، شاخص‌های ویژه

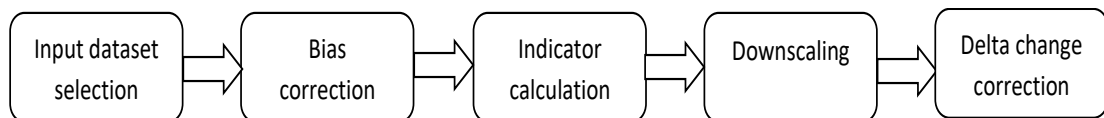
فارس با شاخص خشکی پالم (PDSI) طی دوره ۲۰۴۸-۲۰۱۹ با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 که به روش SDSM ریز مقیاس نمایی شده بود پرداختند. نتایج نشان داد خشکسالی در سه دهه بعد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد که بیشترین مقادیر آن بر اساس هر دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه‌های هواشناسی آباد و لار اتفاق می‌افتد. بختیاری و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی روند تغییرات شاخص خشکی در ۵ نمونه اقلیمی متفاوت شامل رشت، یاسوج، ایلام، مشهد و کرمان طی دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ با استفاده از خروجی مدل اقلیمی CanESM2 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 که به روش SDSM ریز مقیاس‌سازی شده بود پرداختند. نتایج نشان داد طی ۳۰ سال پیش‌رو مقدار شاخص خشکی در همه ایستگاه‌های مطالعاتی به جز یاسوج افزایش خواهد یافت و بیشترین و کمترین نرخ افزایش سالانه به ترتیب در ایستگاه‌های رشت تحت سناریوی RCP8.5 و مشهد تحت سناریوی RCP4.5 خواهد بود. شارما و همکاران^۲ (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای با شاخص SPEI در مقیاس زمانی سالانه به ارزیابی خشکسالی در نپال با ۱۳ مدل CMIP6 تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 پرداختند. نتایج نشان داد در آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۰) فراوانی خشکسالی افزایش می‌یابد و در آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) تحت تمام سناریوها کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان‌دهنده‌ی خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر در آینده نزدیک تحت سناریو SSP585 در مقایسه با SSP126 و SSP245 است. رنجبر و طباطبائی^۳ (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی روند شاخص خشکی در ایستگاه‌های شمالی کشور طی دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۲ پرداختند. نتایج نشان داد شاخص خشکی در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۲ دارای روند کاهشی است و بیشترین شیب کاهشی مربوط به ایستگاه انزلی بوده است. نایر و میراجکار^۳ (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای در ویداربا در مرکز هند با استفاده از داده‌های تاریخی بارش سازمان هواشناسی هند (۲۰۱۳-۱۹۱۴) و داده‌های بارش پیش‌بینی شده توسط موسسه هواشناسی گرمسیری هند به ارزیابی الگوی زمانی و مکانی خطر خشکسالی با شاخص‌های SPI و SPEI پرداختند. ارزیابی خشکسالی با استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده با دو شاخص SPI و SPEI نشان داد امکان وقوع رویداد خشکسالی با شدت بالاتر و مدت زمان بیشتر در آینده نزدیک وجود دارد.

بررسی مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات به بررسی روند شاخص خشکی در گذشته پرداخته‌اند و مطالعات اندکی در راستای بررسی تغییرات شاخص خشکی در آینده در کشور صورت گرفته است و همچنین لازم به ذکر است در تمامی مطالعات فقط بخشی از کشور بررسی شده است

$$AI_q(\text{quarter_min}(P)) = \frac{1}{3} \sum_{\text{month}=\text{quarter_min}(P)-1}^{\text{month}=\text{quarter_min}(P)+1} AI(\text{month}) \quad (4)$$

$$AI_q(\text{quarter_max}(P)) = \frac{1}{3} \sum_{\text{month}=\text{quarter_max}(P)-1}^{\text{month}=\text{quarter_max}(P)+1} AI(\text{month}) \quad (5)$$

در این روابط $AI(\text{yearmean})$ متوسط سالانه شاخص خشکی، $AI_q(\text{quarter_min}(T))$ شاخص خشکی در سردترین فصل، $AI_q(\text{quarter_max}(T))$ شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل، $AI_q(\text{quarter_max}(P))$ شاخص خشکی در مرطوب‌ترین فصل و $AI_q(\text{quarter_min}(P))$ شاخص خشکی در خشک‌ترین فصل و $AI(\text{month})$ شاخص خشکی ماهانه است (Wouters et al., 2021). $AI(\text{month})$ با استفاده از رابطه (۶) برآورد شده است.



شکل ۱. نمای کلی از پردازش مورد استفاده در محاسبه شاخص‌های زیست اقلیمی سامانه کوپرنیک

$$AI(\text{month}) = \min\left(1, \max\left(0, \left(1 - \frac{P(\text{month})}{PE(\text{month})}\right)\right)\right) \quad (6)$$

$$PE(\text{month}) = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (7)$$

در رابطه (۶)، $PE(\text{month})$ تبخیر و تعرق ماهانه و $P(\text{month})$ بارش ماهانه است. برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع از معادله پنمن-مانتیت (رابطه ۷) استفاده شده است. در رابطه (۷)، PE تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، Rn تابش خالص ورودی به سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع در روز)، G شار گرمای خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری (سانتی‌گراد)، u_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال) و γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) است (Wouters et al., 2021).

در پژوهش حاضر برای بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکی و روند تغییرات آن در بخش‌های مختلف کشور از متوسط سالانه شاخص خشکی، شاخص خشکی در سردترین و گرم‌ترین فصل استفاده شده است. این شاخص‌ها توسط سامانه اطلاعاتی کوپرنیک با استفاده از خروجی مدل اقلیمی GFDL-ESM2M تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 طی دوره زمانی ۲۰۸۰-۱۹۵۰ و با وضوح مکانی ۰/۵×۰/۵ ارائه شده است (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-> biodiversity-cmip5-global?tab=form).

فصل رشد و شاخص‌های باد (۷۸ شاخص) را با وضوح مکانی ۰/۵×۰/۵ درجه جغرافیایی برای دوره‌ی زمانی ۲۱۰۰-۱۹۵۰ را تولید کرده است. این پایگاه برای تهیه اطلاعات اقلیمی در آینده از خروجی مدل‌های اقلیمی مختلفی همچون ACCESS1-0، HadGEM2-CC، GFDL-ESM2M، CSIRO-Mk3.6.0، HadGEM2-ES، IPSL-CM5A-LR، IPSL-CM5B-LR، IPSL-CM5A-MR و NorESM1-M استفاده کرده است. مراحل مختلف پردازش برای محاسبه شاخص‌های زیست اقلیمی حاصل از پروژه اقلیمی مذکور مطابق شکل ۱ است. همچنین لازم به ذکر است مجموعه داده‌های خام CMIP5 با استفاده از روش نگاشت دلتا چندکی^۴ (QDM) ارائه شده توسط Cannon et al. (2015) و Switanek et al. (2017) در برابر داده‌های باز تحلیل ERA5 اصلاح اریب شده است.

شاخص خشکی تابعی از تبخیر و تعرق مرجع و بارش است که به صورت قابل توجهی با فصول سال تغییر می‌کند. رشد گیاهان فصلی مختلف از نظر پاسخ به خشکی متفاوت است (Spinoni et al. 2015). اکثر کشورهای آسیایی از جمله ایران دارای چند فصل هستند در حالی که محصولات کشت شده در این فصل‌ها به دلیل تنوع در خشکی دارای نیاز آبی متفاوت هستند. تأمین آب آبیاری جهت رفع کمبود بارش در یک سال معین باید با برنامه‌ریزی انجام گیرد (Rezaei and Motamedi, 2023). بر اساس تحلیل شاخص خشکی می‌توان راهکار مناسبی برای حفاظت بارش فصلی در نظر گرفت. آب مازاد در طول فصل موسمی می‌تواند در طول فصل‌های خشک برای پاسخگویی به افزایش تقاضای آب و افزایش تولید محصولات کشاورزی به طور قابل توجهی استفاده شود (Goparaju and Ahmad, 2019). سامانه اطلاعات اقلیمی کوپرنیک برای محاسبه متوسط سالانه شاخص خشکی و شاخص خشکی در گرم‌ترین، سردترین، خشک‌ترین و مرطوب‌ترین فصل از روابط (۱) تا (۵) استفاده می‌نماید.

$$AI(\text{yearmean}) = \frac{1}{12} \sum_{\text{month}=1}^{12} AI(\text{month}) \quad (1)$$

$$AI_q(\text{quarter_min}(T)) = \frac{1}{3} \sum_{\text{month}=\text{quarter_min}(T)-1}^{\text{month}=\text{quarter_min}(T)+1} AI(\text{month}) \quad (2)$$

$$AI_q(\text{quarter_max}(T)) = \frac{1}{3} \sum_{\text{month}=\text{quarter_max}(T)-1}^{\text{month}=\text{quarter_max}(T)+1} AI(\text{month}) \quad (3)$$

تحلیل روند

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 α Z آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α است. در این مطالعه ۱۰۰ نقطه به صورت تصادفی در سطح کشور به گونه‌ای انتخاب شد که سطح کشور را به طور کامل پوشش دهد و از آزمون من کندال برای بررسی روند تغییرات متوسط سالانه شاخص خشکی، شاخص خشکی در سردترین، گرم‌ترین، مرطوب‌ترین و خشک‌ترین فصل در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶)، آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، میانی (۲۰۶۰-۲۰۴۱) و دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) برای سطح اعتماد ۹۵٪ استفاده شده است.

طبقه‌بندی اقلیمی

طبقه‌بندی مناطق اقلیمی مختلف بر اساس شاخص خشکی برآورد شده با روش UNEP که به صورت نسبت بارش به تبخیر و تعرق (P/ET) است در جدول ۲ آورده شده است (Stefanidis et al., 2016). در این پژوهش با استفاده از نرم افزار ArcMap و متوسط سالانه شاخص خشکی ارائه شده توسط پایگاه تغییر اقلیم کوپرنیک، شاخص خشکی با روش UNEP برای سطح کشور برآورد شد و سپس بر اساس جدول (۱) طبقه‌بندی صورت گرفت.

جدول ۱. طبقه‌بندی اقلیمی بر اساس شاخص خشکی

Climatic Zone	AI=P/ET
Hyper-arid	<0.05
Arid	0.05-0.2
Semi-arid	0.2-0.5
Sub-humid	0.5-0.65
Humid	>0.65

(Stefanidis et al., 2016)

نتایج و بحث

ارزیابی تغییرات مکانی متوسط شاخص خشکی سالانه بارش و تبخیر و تعرق مرجع اثرات تاثیرگذاری بر روی خصوصیات اقلیمی دارند که نتیجه آن خشکی یا مرطوبی اقلیم است. وجود یک روند نزولی در شاخص خشکی به مفهوم وجود روند افزایشی در بارش و یا روند کاهشی در تبخیر و تعرق مرجع و وجود یک روند صعودی در شاخص خشکی به مفهوم وجود روند کاهشی در بارش و یا روند افزایشی در تبخیر و تعرق مرجع است. در شکل‌های ۲ و ۵ نقشه‌ی تغییرات مکانی متوسط شاخص خشکی سالانه بر اساس دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور نشان داده شده است. متوسط شاخص خشکی سالانه در دوره پایه ۰/۷۰۸ است و براساس سناریو RCP4.5 پیش‌بینی می‌شود متوسط

جهت تشخیص روند در سری‌های مختلف زمانی از آزمون‌های مختلفی استفاده می‌گردد که این آزمون‌ها به دو دسته پارامتری و ناپارامتری تقسیم می‌شوند. یکی از پیش فرض‌های لازم جهت استفاده از روش‌های پارامتری این است که سری زمانی مورد نظر جهت تحلیل روند بایستی تابع یک توزیع خاص آماری باشد. لذا در مورد سری‌هایی که توزیع آماری خاصی بر آن‌ها قابل برآزش نیست روش‌های پارامتری با محدودیت مواجه هستند. اما در روش‌های ناپارامتری اساس کار بر تفاوت بین داده‌های مشاهداتی است به گونه‌ای که این روش‌ها مستقل از توزیع آماری سری زمانی بوده و خصوصاً برای سری‌هایی که چولگی یا کشیدگی زیاد دارند مناسب‌تر از روش‌های پارامتری هستند. آزمون من کندال یکی از متداول‌ترین روش‌های ناپارامتری تحلیل روند سری‌های زمانی به شمار می‌رود که ابتدا توسط مان (Mann, 1945) ارائه شد و سپس توسط کندال (Kendall, 1948) توسعه یافت. از آن زمان تاکنون از این آزمون به شکل گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی، از جمله ارزیابی روندها در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و اقلیمی استفاده شده است. در این آزمون دو فرضیه آماری وجود دارد: فرض صفر که دال بر عدم وجود روند و تصادفی بودن داده‌ها است و فرض مقابل که حاکی از وجود روند معنی‌دار بین داده‌ها (در یک سطح معنی‌داری مشخص) است. آماره S آزمون من کندال بصورت رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، x_i و x_j به ترتیب مقادیر داده‌ها در سال‌های متوالی i و j و n برابر با تعداد کل داده‌ها هستند. sgn نیز نشانگر تابع علامت است و بصورت رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \\ -1 & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

توزیع آماری آماره S برای $n > 10$ دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار زیر است:

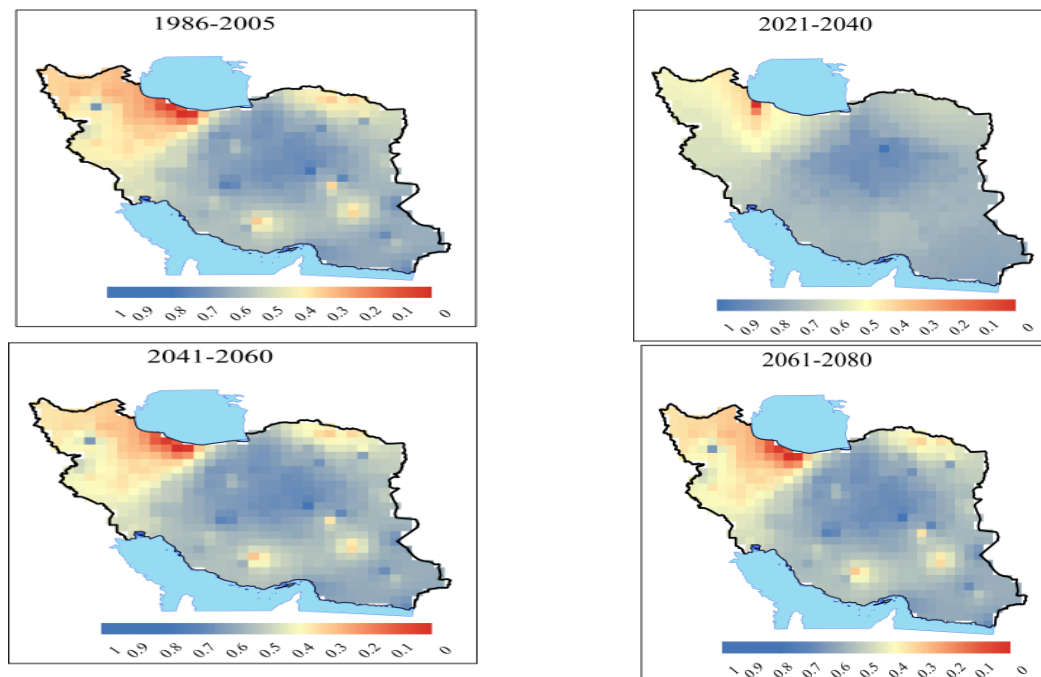
$$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{18}} \sqrt{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)} \quad (10)$$

که در آن q تعداد گروه‌های دارای گره (داده‌های برابر پشت سر هم یک گره ایجاد می‌کنند)، t_p طول p امین گروه گره‌دار است و در نهایت آماره Z آزمون ناپارامتری من کندال با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

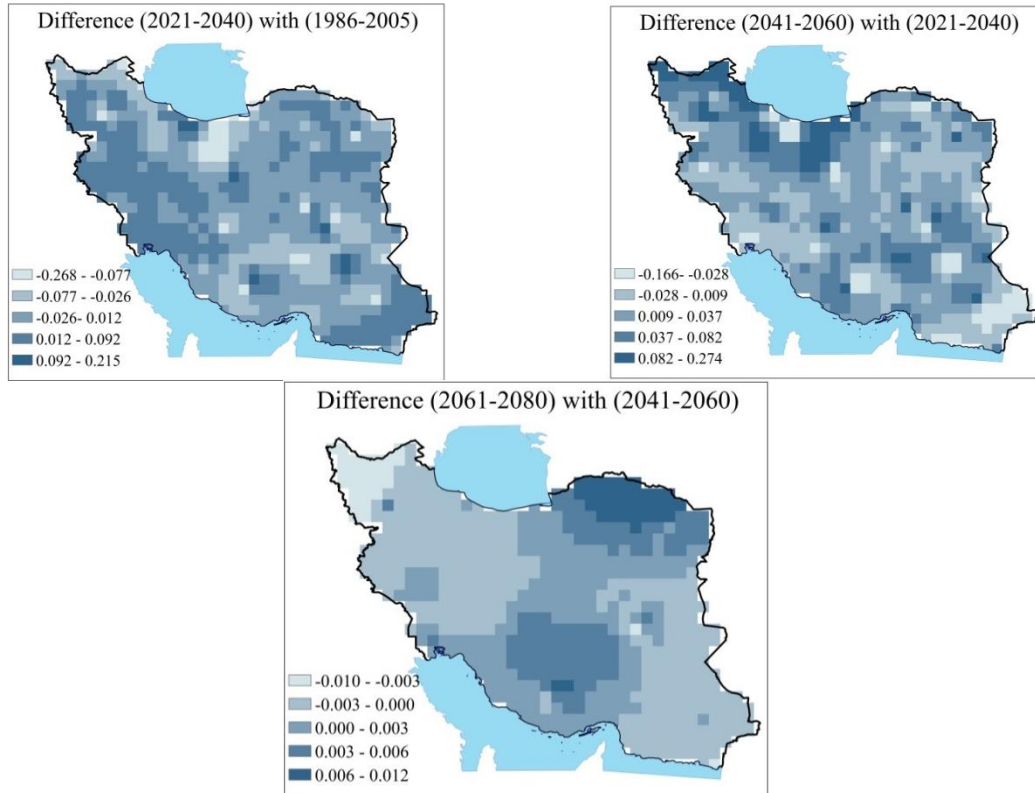
$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma_s} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma_s} & S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

بخش‌هایی از مرکز، جنوب و شرق از نیمه‌خشک به خشک می‌شود و در سایر مناطق کشور اقلیم بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین براساس سناریو RCP4.5 یک روند صعودی در آینده دور وجود دارد و مقایسه متوسط شاخص خشکی سالانه با آینده میانی نشان می‌دهد شاخص خشکی ۰/۱ درصد افزایش می‌یابد و بر اساس شکل ۳ انتظار می‌رود بخش‌هایی در شمال، مرکز، شرق و جنوب خشک‌تر شوند. بررسی نتایج مطالعه شاخص خشکی توسط (Nouri et al. 2016) در شمال و شمال غرب کشور نشان می‌دهد اقلیم در این مناطق طی سده حاضر تحت دو سناریو A2 و B2 خشک‌تر خواهد شد که مطابق با نتایج این پژوهش است و همچنین مطابق هر دو مطالعه در آینده دور شاخص خشکی بیشترین افزایش را نسبت به دوره پایه دارد و این به مفهوم خشک‌تر شدن مناطق شمال و شمال غربی نسبت به دوره پایه است. همچنین نتایج مطالعه شاخص خشکی توسط (Bakhtiari et al. 2021) تحت سناریو RCP4.5 بیانگر وجود یک روند صعودی در ایستگاه‌های رشت، ایلام، رشت، یاسوج، مشهد و کرمان طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و خشک‌تر شدن اقلیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه است در حالی که نتایج مطالعه صورت گرفته نشان می‌دهد شاخص خشکی در دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰ دارای روند صعودی و در دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ دارای روند نزولی است ولی مطابق هر دو پژوهش متوسط شاخص خشکی در مقایسه با دوره پایه افزایش می‌یابد.

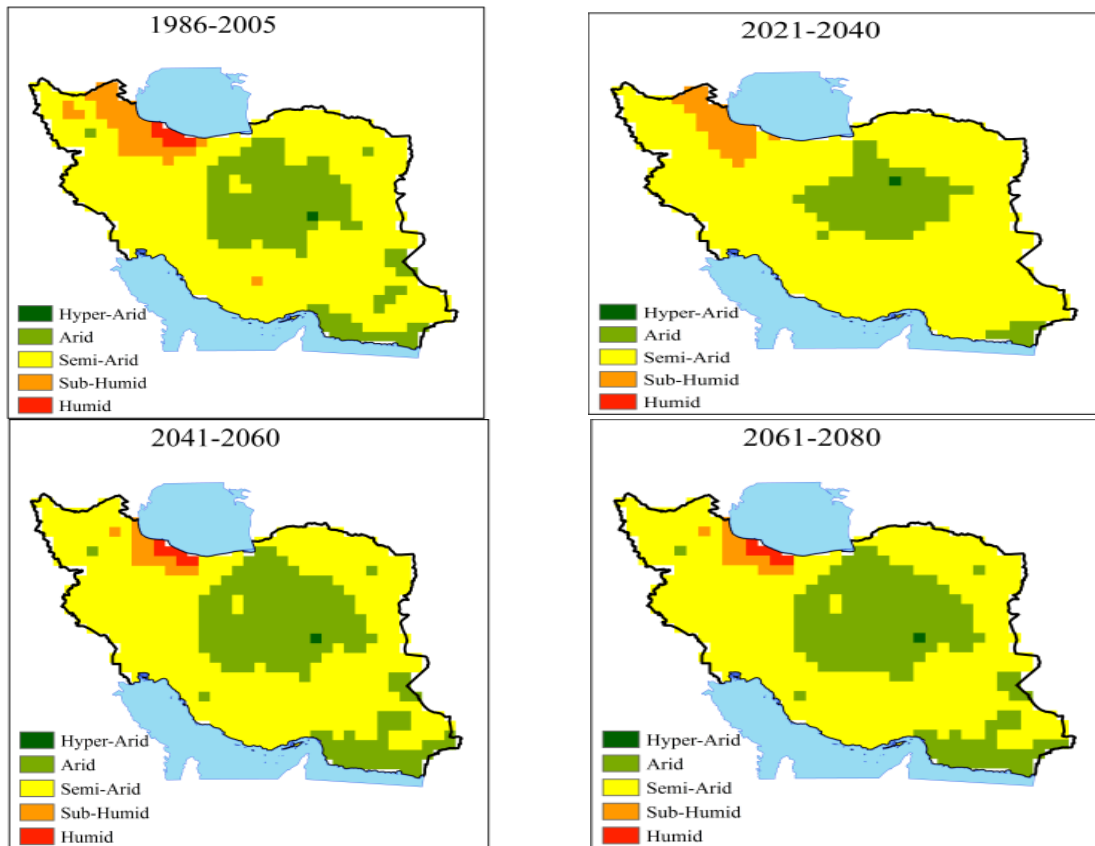
شاخص خشکی سالانه در آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب ۰/۷، ۳/۱ و ۳/۲ درصد نسبت به دوره پایه افزایش یابد و به ۰/۷۱۳، ۰/۷۳۰ و ۰/۷۳۱ برسد. بررسی روند تغییرات متوسط شاخص خشکی سالانه در آینده نزدیک براساس سناریو RCP4.5 نشان می‌دهد یک روند صعودی در بیشتر مناطق کشور وجود دارد و مقایسه متوسط شاخص خشکی سالانه در آینده نزدیک با دوره پایه (شکل ۳) نشان می‌دهد، در آینده نزدیک بخش‌های زیادی از کشور در نواحی مرکزی، غرب و شرق به سمت خشک‌تر شدن پیش می‌روند و همانطور که در شکل ۴ نیز نشان داده شده است این تغییرات باعث تغییر در وضعیت اقلیمی بخش‌هایی از شمال کشور از حالت مرطوب به نیمه مرطوب و نیمه‌خشک و بخش‌هایی از مرکز و جنوب کشور از خشک به نیمه‌خشک و قسمت‌هایی از شمال غرب و غرب کشور از نیمه‌مرطوب به نیمه‌خشک می‌شود و در بقیه سطح کشور نوع وضعیت اقلیم تغییر نمی‌کند. همچنین یک روند نزولی در آینده میانی براساس سناریو RCP4.5 در بیشتر سطح کشور وجود دارد و مقایسه مقدار متوسط شاخص خشکی سالانه آینده میانی با آینده نزدیک (شکل ۳) نشان می‌دهد خشکی در بیشتر سطح کشور افزایش می‌یابد و افزایش شاخص خشکی در سطح کشور مطابق شکل ۴ باعث تغییر در وضعیت اقلیمی بخش‌هایی از شمال کشور از نیمه‌مرطوب و نیمه‌خشک به مرطوب و بخش‌هایی از غرب از نیمه‌مرطوب به نیمه‌خشک و قسمت‌هایی از شمال غرب از نیمه‌خشک به نیمه‌مرطوب و



شکل ۲. متوسط شاخص خشکی سالانه بر اساس سناریو RCP4.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور



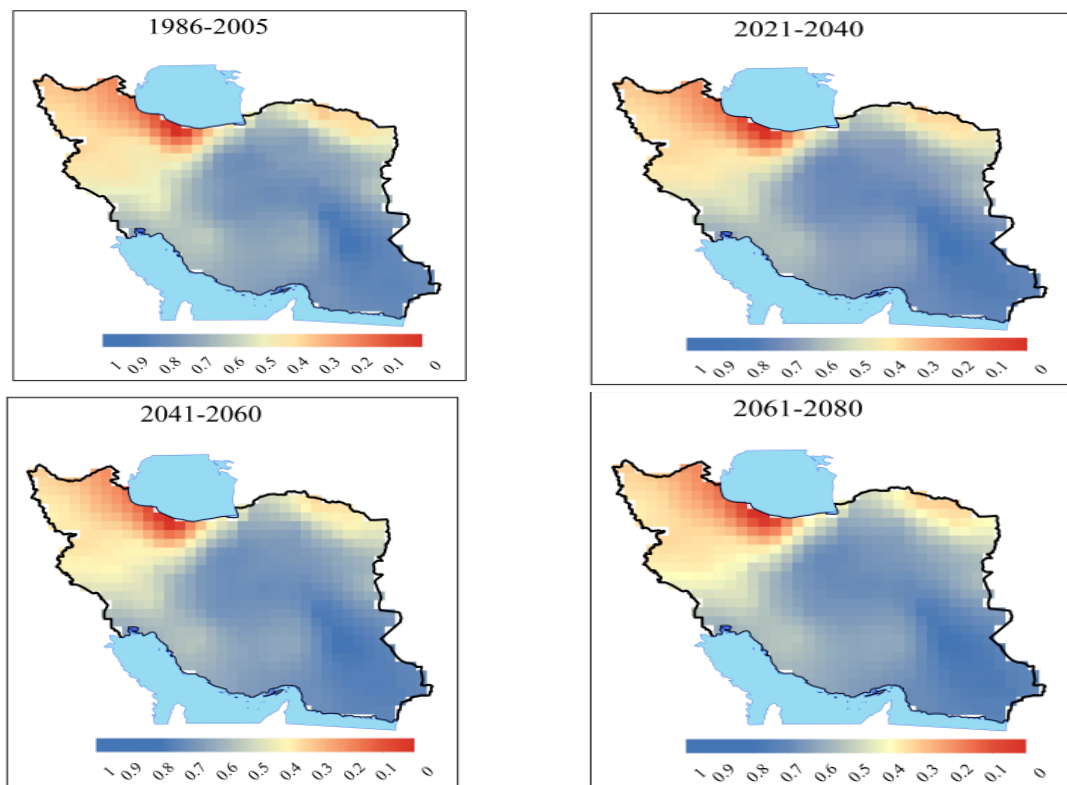
شکل ۳. تغییرات متوسط شاخص خشکی سالانه بر اساس سناریو RCP4.5



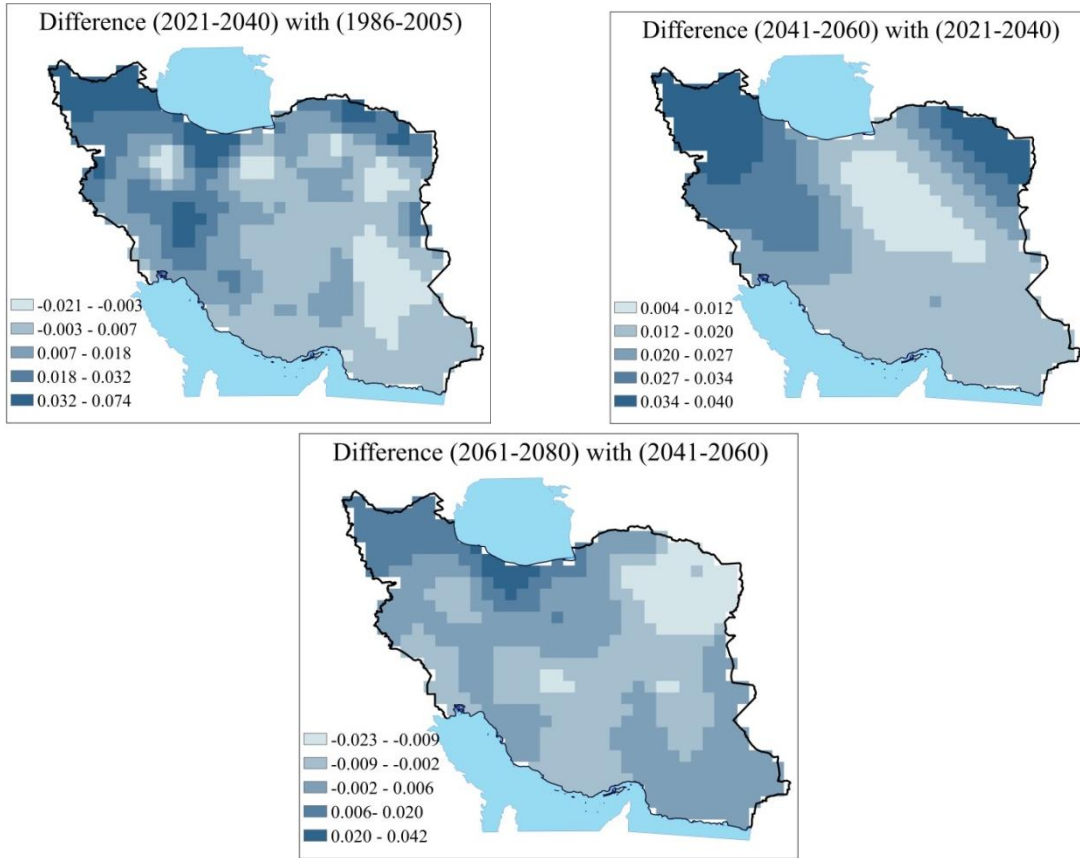
شکل ۴. تغییر وضعیت اقلیمی مناطق مختلف ایران بر اساس سناریو RCP4.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور

شکل ۷ سبب افزایش مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌شود. همچنین بر اساس سناریو RCP8.5 یک روند نزولی در آینده دور وجود دارد و تخمین زده می‌شود متوسط سالانه شاخص خشکی در این دوره ۰/۱ درصد نسبت به آینده میانی کاهش یابد. بررسی تغییرات متوسط سالانه شاخص خشکی نشان می‌دهد در آینده دور خشکی در شمال، شمال غرب، بخش‌هایی از نواحی مرکزی و جنوب شرقی نسبت به آینده میانی افزایش می‌یابد و این تغییرات باعث تغییر در طبقه‌بندی اقلیمی بخش‌هایی از کرمانشاه از خیلی خشک به خشک، قسمتی از سمنان از نیمه‌خشک به خشک و بخش از خراسان رضوی از خشک به نیمه‌خشک و قسمتی از تهران و اردبیل از مرطوب به نیمه‌مرطوب مطابق شکل ۷ می‌شود و طبقه‌بندی اقلیمی در دیگر بخش‌های کشور در اثر تغییرات اقلیمی تغییر نمی‌کند. همچنین بر اساس نتایج پژوهش Bakhtiari et al. (2021) متوسط شاخص خشکی در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت سناریو RCP8.5 در رشت، ایلام، یاسوج و کرمان افزایش و در مشهد کاهش می‌یابد که بر اساس نتایج این پژوهش شاخص خشکی در رشت، کرمان، یاسوج و قسمت‌هایی از مشهد و کرمان افزایش می‌یابد و همچنین نتایج هر دو پژوهش نشان می‌دهد تغییرات شاخص خشکی تحت سناریو RCP8.5 بیشتر از RCP4.5 است.

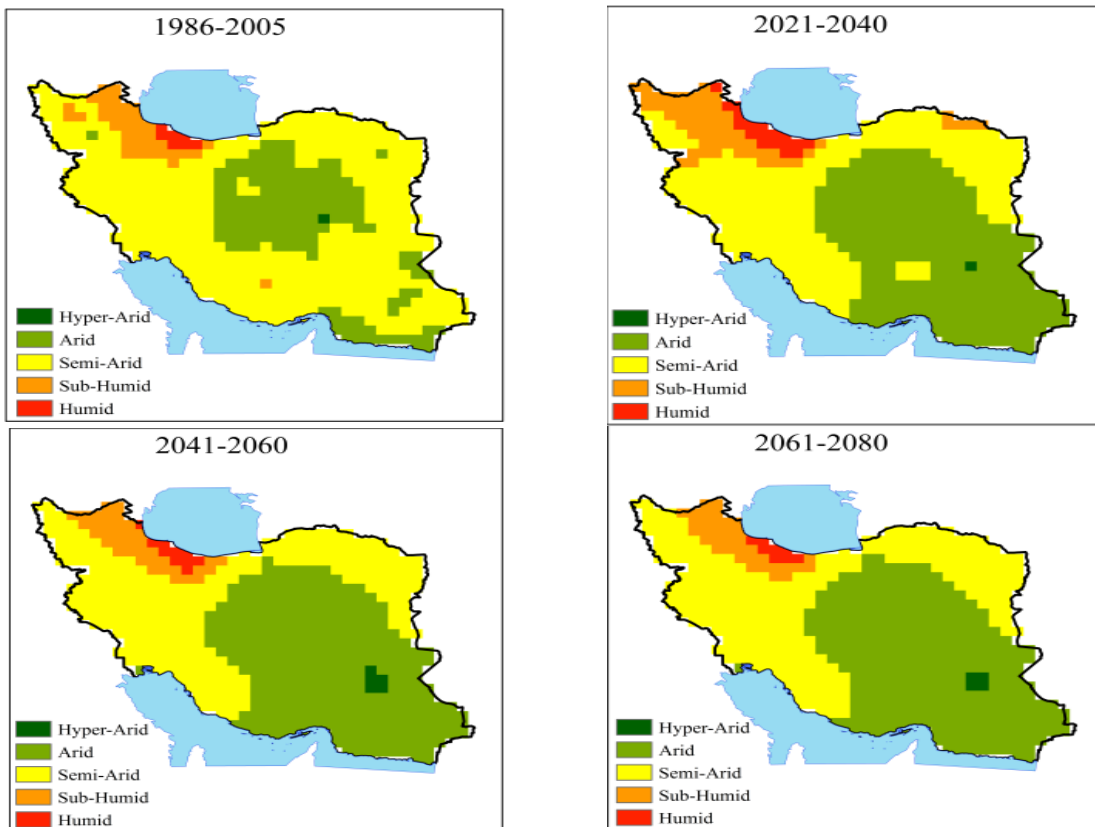
بر اساس سناریو RCP8.5 پیش‌بینی می‌شود متوسط شاخص خشکی سالانه به ترتیب در آینده نزدیک، میانی و دور ۲/۸، ۵/۹ و ۵/۸ درصد نسبت به دوره پایه افزایش یابد و به ۰/۷۲۸، ۰/۷۵۰ و ۰/۷۴۹ برسد. بررسی روند متوسط شاخص خشکی سالانه در آینده نزدیک بر اساس سناریو RCP8.5 نشان می‌دهد، روند در شرق کشور به جز سیستان و بلوچستان، بخشی از نواحی مرکزی (شامل سمنان، یزد و اصفهان، کرمان در جنوب) و گلستان در شمال کشور، نزولی است و در آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، چهارمحال بختیاری و بخشی از کرمانشاه روند صعودی و سایر بخش‌های کشور فاقد روند است. مقایسه متوسط شاخص خشکی سالانه آینده نزدیک با دوره پایه در شکل ۶ نشان می‌دهد بخش زیادی از سطح کشور به جز قسمت‌هایی در جنوب شرقی و بخش‌هایی از نواحی مرکزی خشک‌تر می‌شوند و این تغییرات باعث تغییر در وضعیت اقلیمی مطابق شکل ۷ می‌شود. بر اساس سناریو RCP8.5 یک روند صعودی در آینده میانی وجود دارد و تخمین زده می‌شود متوسط سالانه شاخص خشکی در این دوره ۳/۰۲ درصد نسبت به آینده نزدیک افزایش یابد و بررسی تغییرات در شکل ۶ نشان می‌دهد متوسط سالانه شاخص خشکی در تمام سطح ایران نسبت به آینده نزدیک افزایش می‌یابد و به سمت خشک‌تر شدن می‌رود و افزایش شاخص خشکی در بخش‌هایی از نواحی غربی، مرکز و شمال شرقی بیشتر از سایر بخش‌ها است و مطابق



شکل ۵. متوسط شاخص خشکی سالانه بر اساس سناریو RCP8.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور



شکل ۶. تغییرات متوسط شاخص خشکی سالانه بر اساس سناریو RCP8.5

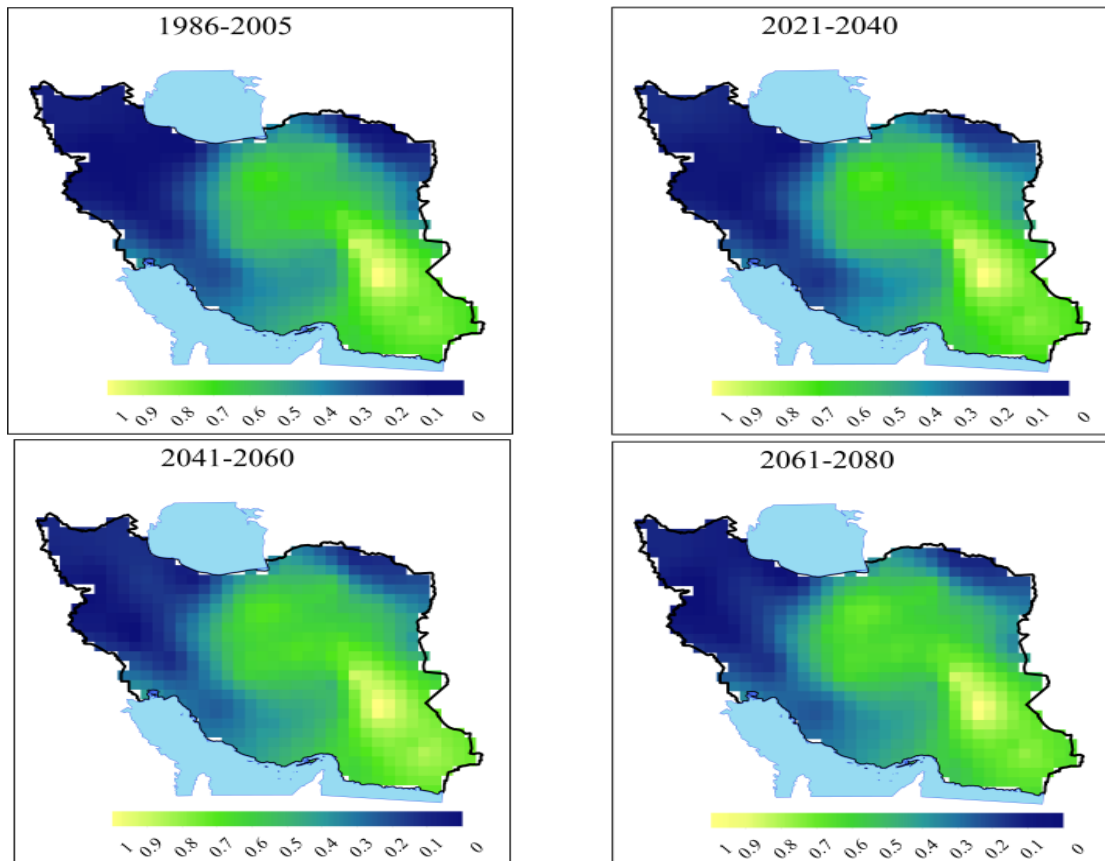


شکل ۷. تغییر وضعیت اقلیمی بخش‌های مختلف ایران بر اساس سناریو RCP8.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور

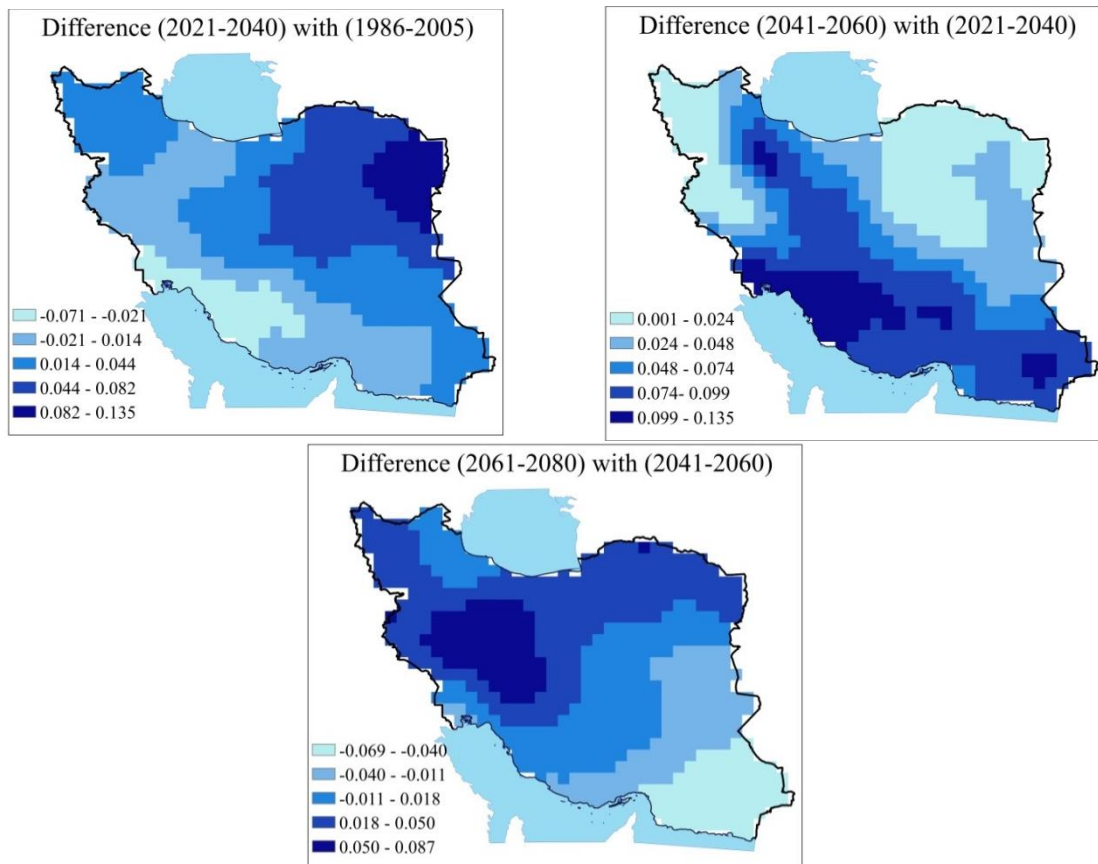
شاخص خشکی در سردترین فصل

در بخش‌هایی از مرکز و جنوب کشور و یک روند نزولی در بخش‌هایی از شمال غرب، غرب و بخشی از سیستان و بلوچستان در شرق است و براساس شکل ۹ پیش‌بینی می‌شود متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل در تمام سطح کشور افزایش یابد. یک روند صعودی در شمال شرقی، شمال غربی، غرب، بخش‌هایی از مرکز و شمال کشور و یک روند نزولی در جنوب، جنوب شرقی و بخش‌هایی از مرکز در آینده دور بر اساس سناریو RCP4.5 وجود دارد و پیش‌بینی شده است متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل در این دوره نسبت به دوره آینده میانی ۰/۹ درصد افزایش یابد و بررسی تغییرات در شکل ۹ نشان می‌دهد سیستان و بلوچستان، کرمان، خراسان جنوبی، یزد، هرمزگان، بخش‌هایی از فارس، بوشهر، کهگیلویه و بویر احمد و اردبیل نسبت به آینده میانی خشک‌تر می‌شوند.

در شکل‌های ۸ و ۱۰ نقشه‌ی تغییرات مکانی متوسط شاخص خشکی سالانه در سردترین فصل بر اساس دو سناریو RCP8.5 و RCP4.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور نشان داده شده است. متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل در سطح کشور در دوره پایه ۰/۳۳۵ است و بر اساس سناریو RCP4.5 پیش‌بینی می‌شود در آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب ۰/۳۶۱، ۰/۴۱۹ و ۰/۴۲۸ شود. بررسی روند شاخص خشکی در سردترین فصل در آینده نزدیک بر اساس سناریو RCP4.5 نشان می‌دهد در بیشتر سطح کشور یک روند صعودی وجود دارد و بررسی تغییرات در شکل ۹ بیانگر این است در آینده نزدیک در تمام سطح کشور به جز بخش‌هایی از جنوب، جنوب غربی و قسمتی از مازندران و تهران نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. شاخص خشکی در سردترین فصل در آینده میانی بر اساس سناریو RCP4.5 دارای یک روند صعودی



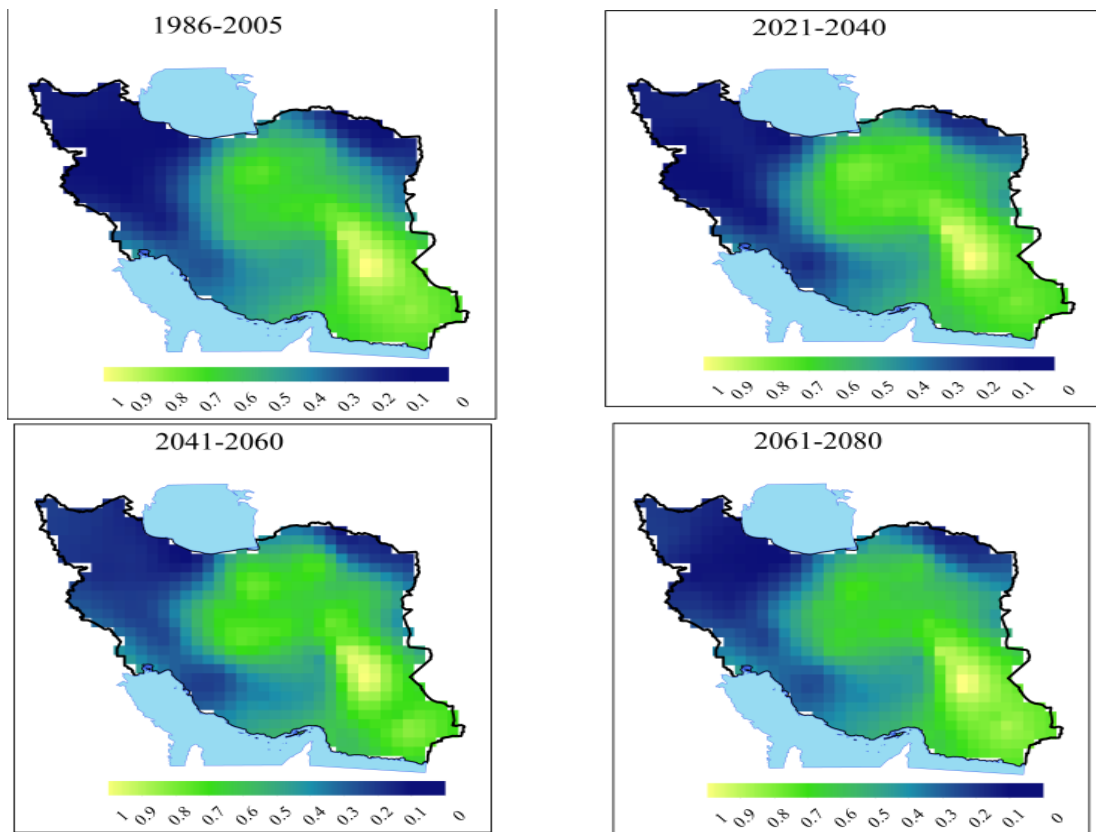
شکل ۸. شاخص خشکی در سردترین فصل بر اساس سناریو RCP4.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور



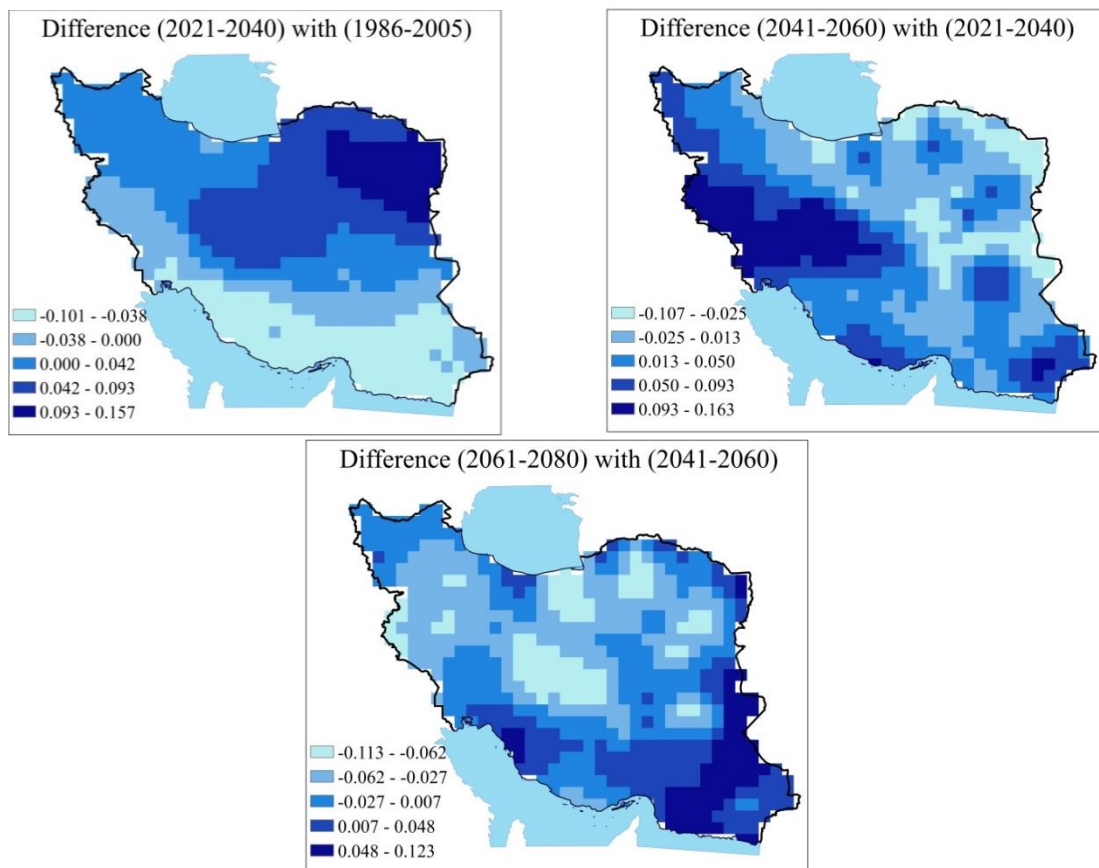
شکل ۹. تغییرات شاخص خشکی در سردترین فصل بر اساس سناریو RCP4.5

متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل در آینده میانی نسبت به آینده نزدیک ۳ درصد افزایش می‌یابد و بر اساس شکل ۱۱ پیش‌بینی می‌شود در استان‌های تهران، گلستان و بخش‌هایی از گیلان، قزوین، مازندران، اصفهان، یزد، سمنان، خراسان رضوی، کرمان و سیستان و بلوچستان کاهش و در سایر نقاط کشور افزایش یابد که بیشترین تغییرات در ایلام و بخش‌هایی از استان‌های کرمانشاه، لرستان، خوزستان و اصفهان (حدود ۷۴ تا ۱۰۰ درصد) است. در آینده دور بر اساس سناریو RCP8.5 یک روند صعودی در استان‌های شرق کشور، بخش‌هایی از یزد و اصفهان در مرکز و آذربایجان شرقی، کردستان و قسمتی از آذربایجان غربی در غرب کشور و یک روند نزولی در کرمان، فارس، خوزستان، چهارمحال و بختیاری، خوزستان، لرستان، زنجان، سمنان و قسمت‌هایی از استان‌های یزد، اصفهان و آذربایجان غربی وجود دارد. متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل در آینده دور نسبت به آینده میانی ۱/۴ درصد کاهش می‌یابد و بر اساس شکل ۱۱ در تمام سطح کشور به جز بخش‌هایی از استان‌های گلستان، خراسان رضوی، خراسان شمالی، سیستان و بلوچستان، کرمان، هرمزگان، فارس، بوشهر، خوزستان، مازندران، تهران، آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی کاهش می‌یابد.

بر اساس سناریو RCP8.5 پیش‌بینی می‌شود متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل در آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب به ۰/۳۵۰، ۰/۳۸۰ و ۰/۳۶۶ برسد. بر اساس سناریو RCP8.5 یک روند صعودی در سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی، آذربایجان غربی، زنجان، کردستان، همدان و کرمانشاه در غرب، گیلان در شمال و چهارمحال و بختیاری در مرکز کشور و یک روند نزولی در خوزستان، فارس، کرمان در جنوب و خراسان جنوبی، خراسان رضوی و خراسان شمالی در شرق کشور در آینده نزدیک وجود دارد. متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل در آینده نزدیک نسبت به دوره پایه ۱/۵ درصد افزایش می‌یابد و بررسی تغییرات در شکل ۱۱ نشان می‌دهد متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل در تمام سطح کشور به جز جنوب کشور، سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی، بخش‌هایی از گیلان، مازندران در شمال و ایلام، لرستان و کرمانشاه در غرب کشور افزایش می‌یابد. متوسط شاخص خشکی در سردترین فصل بر اساس سناریو RCP8.5 در آینده میانی دارای یک روند صعودی در لرستان، کرمانشاه، قسمتی از آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی در غرب، چهارمحال بختیاری، مرکزی و اصفهان در مرکز، جنوب و جنوب شرقی کشور و یک روند نزولی در اردبیل، گیلان، زنجان، خراسان رضوی، مازندران و قسمتی از آذربایجان غربی است.



شکل ۱۰. شاخص خشکی در سردترین فصل بر اساس سناریو RCP8.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور

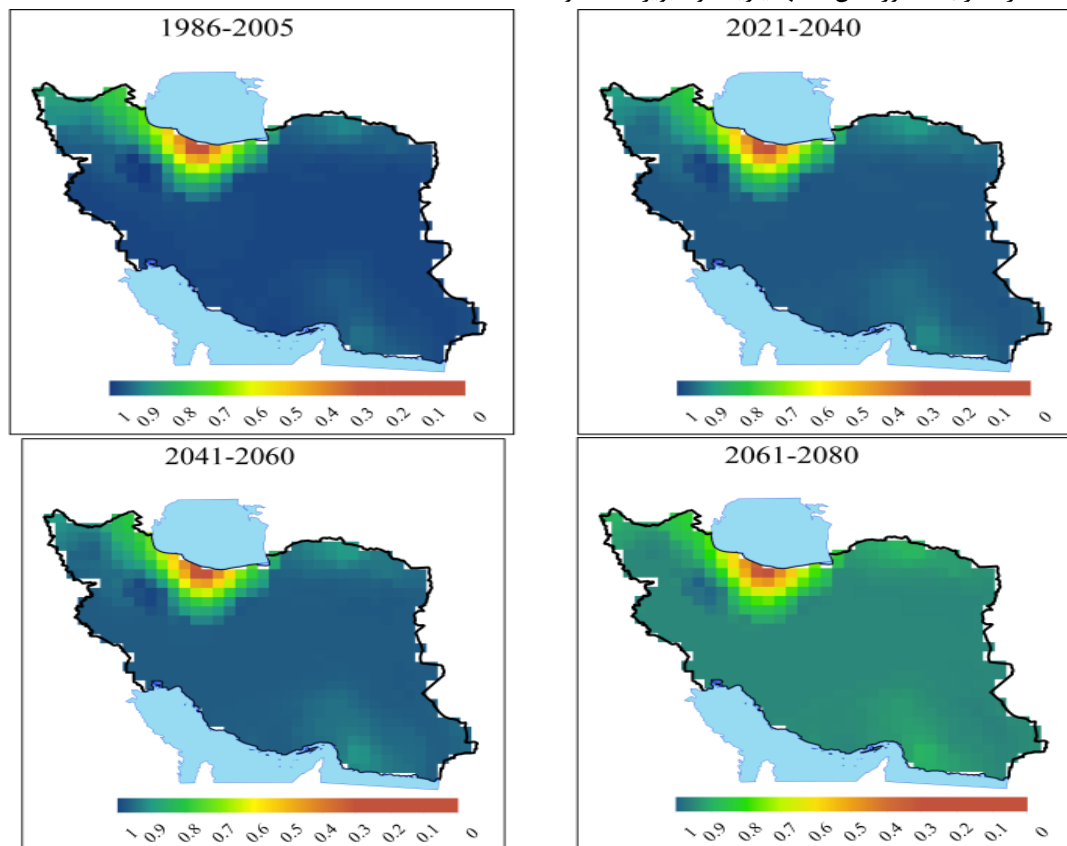


شکل ۱۱. تغییرات شاخص خشکی در سردترین فصل بر اساس سناریو RCP8.5

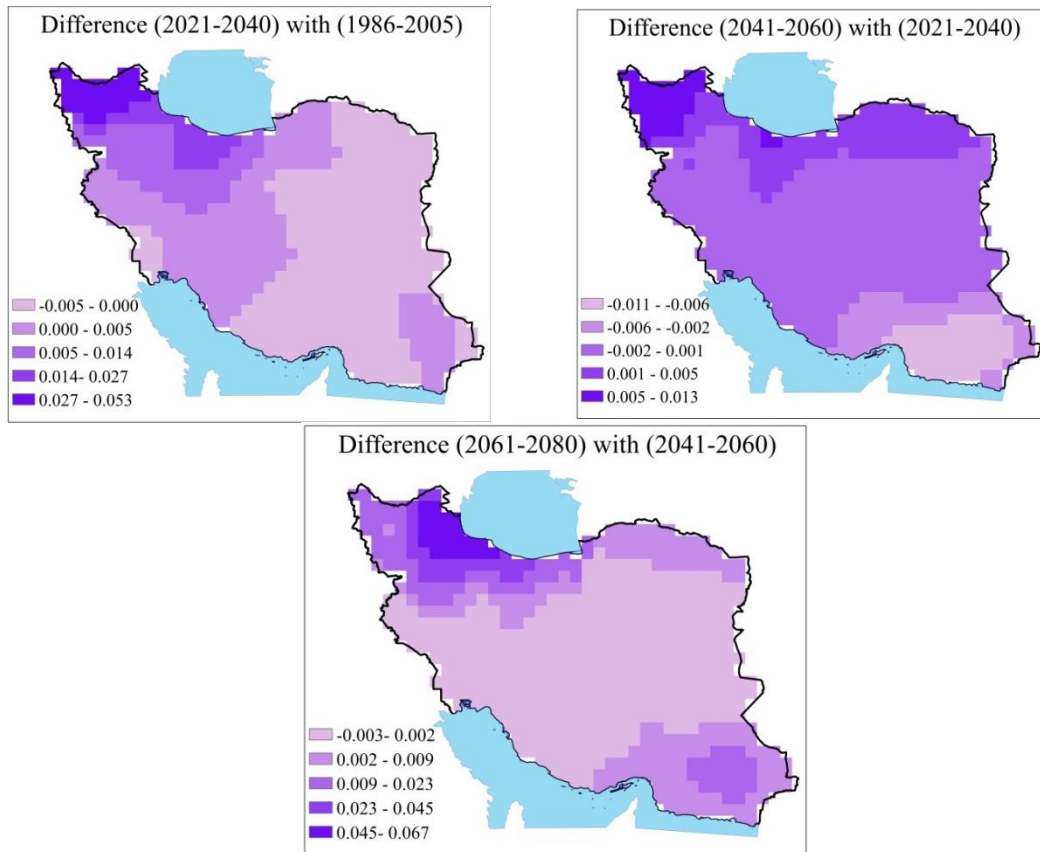
شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل

قسمت‌هایی از استان‌های کرمان، هرمزگان و فارس در جنوب، قزوین، تهران، مرکزی، قم، چهارمحال و بختیاری و قسمت‌هایی از استان‌های اصفهان، سمنان و یزد در مرکز کشور و بخش‌هایی از سیستان و بلوچستان، خراسان رضوی و خراسان جنوبی در شرق کشور نسبت به دوره پایه افزایش یابد. در آینده میانی بر اساس سناریو RCP4.5 یک روند صعودی در آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان در غرب، گیلان، مازندران و گلستان در شمال، سیستان و بلوچستان، خراسان شمالی، خراسان رضوی، خراسان جنوبی در شرق، بخش‌هایی از استان‌های کرمان، هرمزگان و فارس در جنوب و قسمت‌هایی از استان‌های یزد و سمنان در مرکز کشور و یک روند نزولی در کرمانشاه، لرستان و قسمت‌هایی از کردستان در غرب کشور وجود دارد. تخمین زده می‌شود متوسط شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در آینده نزدیک در سطح کشور ۰/۰۲ درصد نسبت به آینده نزدیک کاهش یابد و بررسی تغییرات آن در سطح کشور در شکل ۱۳ نشان می‌دهد در بخش‌هایی از استان‌های کردستان، کرمانشاه، ایلام و لرستان در غرب، قسمت‌هایی از استان‌های قزوین، مرکزی، اصفهان، چهارمحال و

نقشه تغییرات مکانی شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در شکل‌های ۱۲ و ۱۴ نشان داده شده است. متوسط شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در دوره پایه ۰/۹۶۲ است و بر اساس سناریو RCP4.5 پیش‌بینی می‌شود در آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب ۰/۹۶۶، ۰/۹۷۲ و ۰/۹۶۶ شود. بررسی روند شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در آینده نزدیک بر اساس سناریو RCP4.5 بیانگر وجود یک روند نزولی در آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، زنجان، کردستان و کرمانشاه در غرب، گیلان و گلستان در شمال، خراسان شمالی، خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان در شرق، کرمان، هرمزگان و قسمت‌هایی از فارس در جنوب و یزد در مرکز کشور و یک روند صعودی در قسمت‌هایی از استان‌های اصفهان و سمنان است. انتظار می‌رود به طور متوسط شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در آینده نزدیک ۰/۴ درصد در سطح کشور نسبت به دوره پایه افزایش یابد و بررسی تغییرات آن در آینده نزدیک در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در گلستان، مازندران و گیلان در شمال، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، لرستان، زنجان، همدان و بخش‌هایی از کرمانشاه در غرب، خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد و



شکل ۱۲. شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل بر اساس سناریو RCP4.5 در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور



شکل ۱۳. تغییرات شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل بر اساس سناریو RCP4.5

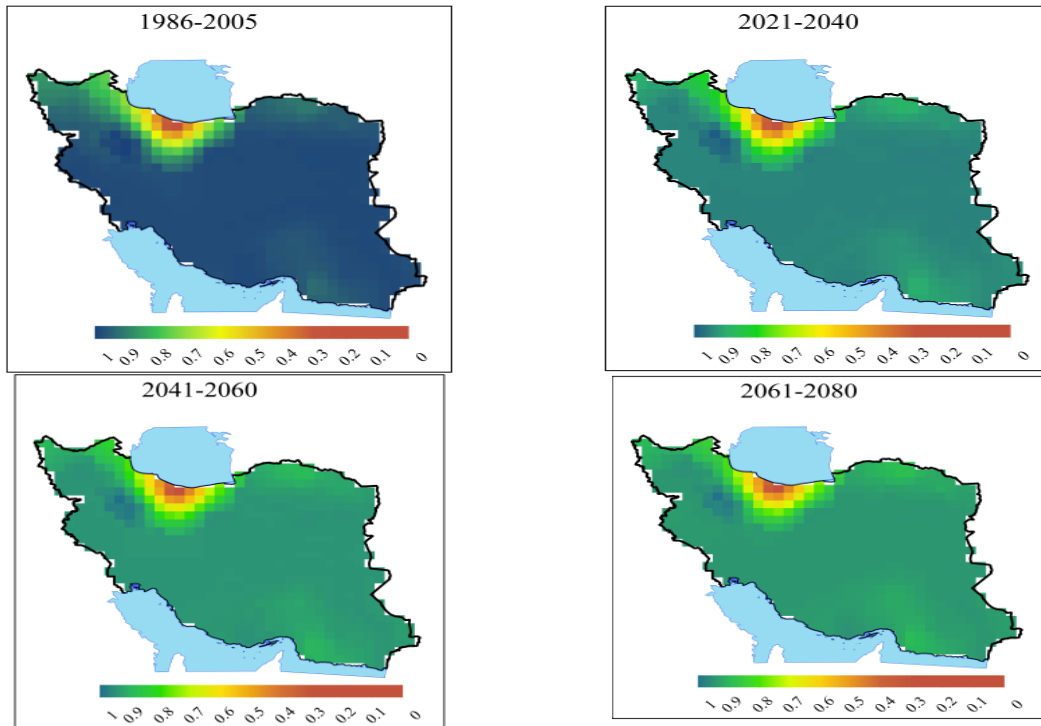
قسمت‌هایی از استان‌های قزوین، یزد، سمنان و اصفهان در مرکز و بخش‌هایی از بوشهر، فارس، کرمان و هرمزگان در جنوب کشور نسبت به آینده میانی شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل کاهش و در باقی سطح کشور افزایش می‌یابد.

متوسط شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل بر اساس سناریو RCP8.5 در سطح کشور در آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب به ۰/۹۷۰، ۰/۹۷۳ و ۰/۹۷۵ می‌رسد. بررسی روند شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در آینده نزدیک بیانگر یک روند صعودی در فارس و کرمان در جنوب، قسمت‌هایی از استان‌های یزد و اصفهان در مرکز، گلستان در شمال و قسمت‌هایی از خراسان رضوی و خراسان شمالی در شرق و آذربایجان غربی، کردستان و همدان در غرب و یک روند نزولی در قسمتی از استان‌های خراسان رضوی، خراسان شمالی، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان در شرق، بخش‌هایی از استان‌های کرمان و هرمزگان در جنوب، مازندران و قسمتی از گیلان در شمال و بخشی از آذربایجان شرقی در غرب کشور است. بررسی تغییرات نشان می‌دهد متوسط شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در آینده نزدیک ۰/۷ درصد در مقایسه با دوره پایه افزایش می‌یابد و بر اساس شکل ۱۵ در بخش‌هایی از استان‌های فارس، هرمزگان و کرمان در جنوب، قسمتی از استان‌های یزد، اصفهان، سمنان و مرکزی در مرکز، بخش‌هایی

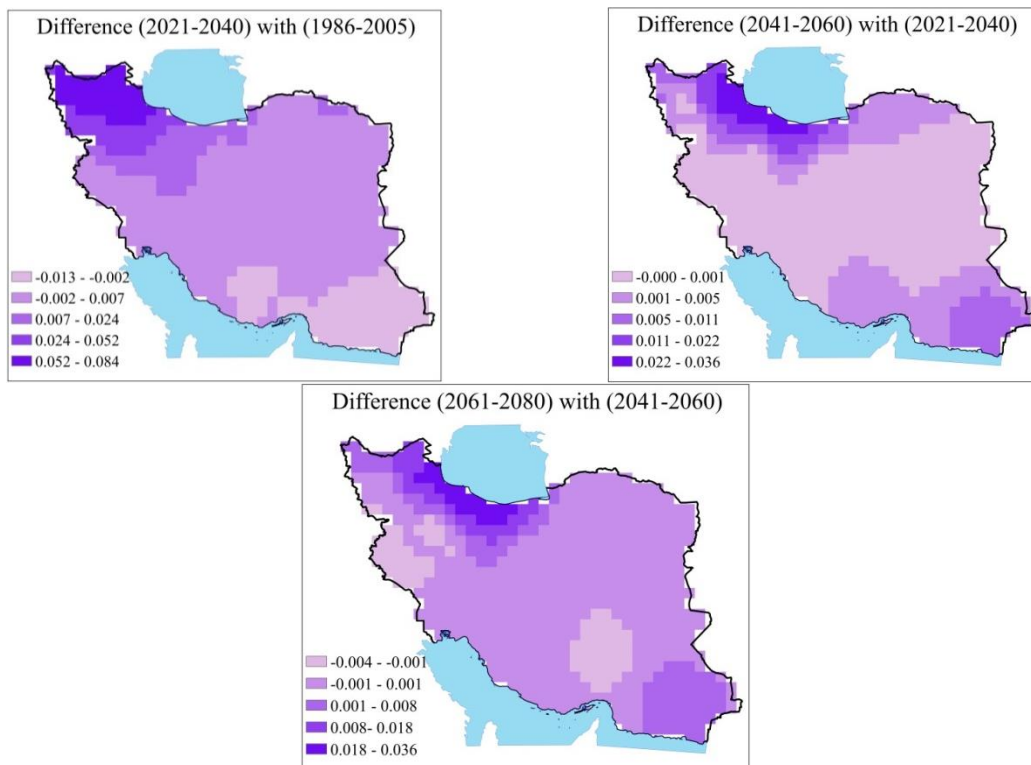
بختیاری، سمنان و یزد در مرکز، بخش‌هایی از استان‌های گلستان و مازندران در شمال، قسمت‌هایی از استان‌های هرمزگان، کرمان، خوزستان و فارس در جنوب و سیستان و بلوچستان، خراسان رضوی، خراسان جنوبی و خراسان شمالی در شرق نسبت به آینده میانی شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل کمتر می‌شود. همچنین در آینده دور بر اساس سناریو RCP4.5 در آذربایجان غربی، لرستان، کرمانشاه و کردستان در غرب، بخش‌هایی از استان‌های یزد و اصفهان در مرکز، قسمتی از خراسان رضوی در شرق و بخشی از کرمان در جنوب روند صعودی و در گیلان، مازندران و گلستان در شمال، قسمت‌هایی از استان‌های یزد و سمنان در مرکز، قسمت‌هایی از استان‌های خراسان رضوی، خراسان شمالی، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان در شرق و هرمزگان و بخشی از کرمان در جنوب روند نزولی است و بررسی تغییرات نشان می‌دهد متوسط شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در این دوره در سطح کشور نسبت به آینده میانی ۰/۶ درصد افزایش می‌یابد و بررسی تغییرات در شکل ۱۳ نشان می‌دهد در بخش‌هایی از استان‌های سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی، قسمتی از خراسان شمالی شرق، گلستان، مازندران و قسمتی از گیلان در شمال، بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان، کرمانشاه، لرستان و ایلام در غرب، تهران، قم و

کشور افزایش می‌یابد. در آینده میانی بر اساس سناریو RCP8.5 یک روند صعودی در سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی، خراسان رضوی و خراسان شمالی در شرق، قسمتهایی از استان‌های کرمان و هرمزگان در جنوب، بخش‌هایی از

از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، ایلام، کردستان، کرمانشاه، همدان و لرستان در غرب و قسمتهایی از استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان و بلوچستان در جنوب نسبت به دوره پایه کاهش و در سایر سطح



شکل ۱۴. شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در دوره پایه، آینده نزدیک، میانی و دور بر اساس سناریو RCP8.5



شکل ۱۵. تغییرات شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل بر اساس سناریو RCP8.5

پایگاه‌های اطلاعاتی نظیر پایگاه تغییر اقلیم کوپرنیک با ارائه پارامترهای اقلیمی و برآورد شاخص‌های زیستی با مقیاس زمانی و مکانی بالا می‌تواند یکی از جایگزین‌های خوب برای رفع کمبود اطلاعات باشد. در این پژوهش برای بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر روند شاخص خشکی در آینده نزدیک، میانی و دور از متوسط سالانه شاخص خشکی، متوسط شاخص خشکی در سردترین و گرم‌ترین فصل که توسط پایگاه تغییر اقلیم کوپرنیک با استفاده از خروجی مدل اقلیمی GFDL-ESM2M تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برآورد شده بود، استفاده شد. نتایج نشان داد در دوره پایه متوسط سالانه شاخص خشکی و متوسط شاخص خشکی در سردترین و گرم‌ترین فصل در سطح کشور به ترتیب ۰/۷۰۸، ۰/۳۳۵ و ۰/۹۶۲ است که در آینده نزدیک بر اساس سناریو RCP4.5 به ترتیب ۰/۷۱۳، ۰/۳۶۱ و ۰/۹۶۶ و در آینده میانی به ترتیب ۰/۷۳۰، ۰/۴۱۹ و ۰/۹۶۶ و در آینده دور بر اساس سناریو RCP4.5 به ترتیب ۰/۷۳۱، ۰/۴۲۸ و ۰/۹۷۲ می‌رسد در حالی که بر اساس سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک به ترتیب ۰/۷۲۸، ۰/۳۵۰ و ۰/۹۷۰ و در آینده میانی به ترتیب ۰/۷۵۰، ۰/۳۸۰ و ۰/۹۷۳ و در آینده دور به ترتیب ۰/۷۴۹، ۰/۳۶۶ و ۰/۹۷۵ می‌شود. همچنین بررسی روند شاخص‌های خشکی فصلی بیانگر وجود روندهای کاهشی و افزایشی است که نشان دهنده دگرگونی اقلیمی و جابجایی فصلی در بیشتر مناطق کشور است. بنابراین با توجه به اینکه محصولات زراعی و باغی در مرحله گلدهی در شرایط حساسی قرار دارند هر گونه روند رو به خشکی می‌تواند زنگ خطری را در کاهش عملکرد محصول و همچنین تقاضا برای افزایش بی‌رویه از منابع آبی را به دنبال داشته باشد. با توجه به دستاورد پژوهش حاضر می‌توان پیش‌بینی‌هایی در مورد حداکثر آب مورد نیاز محصولات کرد تا رطوبت خاک برای تامین نیاز آبی محصولات کشاورزی و تولید بیشتر محصولات کشاورزی مهیا شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد در پژوهشی به تحلیل آسیب‌پذیری ناشی از نوسانات اقلیمی با استفاده از شاخص خشکی پرداخته شود تا برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران با انتخاب چاره‌ای مناسب در این زمینه به کاهش اثرات مضر بپردازند. هر چند به علت ساختار مدل گردش عمومی جو در پیشنگری‌ها عدم قطعیت وجود دارد ولی نتایج این پژوهش می‌تواند تصمیم‌گیران را در اتخاذ راهکارهای سازگاری مناسب به‌منظور کاهش آثار منفی تغییرات اقلیمی یاری رساند.

استان‌های یزد و سمنان در مرکز، آذربایجان شرقی و زنجان در غرب و گلستان، گیلان و مازندران در شمال کشور و یک روند نزولی در بخش‌هایی از استان کرمان و فارس در جنوب و قسمتی از اصفهان در مرکز وجود دارد و بررسی تغییرات این دوره نسبت به آینده نزدیک بیانگر افزایش ۰/۳ درصدی متوسط شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل و افزایش آن در بیشتر سطح کشور به جز قسمت‌هایی از استان‌های خراسان رضوی و خراسان جنوبی در شرق، چهارمحال و بختیاری و بخش‌هایی از استان‌های اصفهان، یزد، سمنان در مرکز، کهگیلویه و بویراحمد و قسمت‌هایی از استان‌های خوزستان، بوشهر، کرمان و فارس در جنوب است. بر اساس سناریو RCP8.5 در آینده دور یک روند صعودی در مازندران در شمال، هرمزگان، کرمان و بخش‌هایی از فارس در جنوب، قسمت‌هایی از استان‌های یزد و اصفهان در مرکز و بخش‌هایی از استان‌های سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی در شرق کشور و یک روند نزولی در گلستان در شمال، کردستان، لرستان، کرمانشاه و همدان در غرب و قسمت‌هایی از استان‌های خراسان رضوی و خراسان جنوبی در شرق پیش‌بینی می‌شود. متوسط شاخص خشکی در گرم‌ترین فصل در این دوره ۰/۲ درصد نسبت به آینده میانی افزایش می‌یابد و بررسی تغییرات در شکل ۱۵ نشان می‌دهد در همدان، کرمانشاه، ایلام، لرستان، همدان و قسمت‌هایی از استان‌های آذربایجان شرقی، کردستان و زنجان در غرب، قسمت‌هایی از استان‌های یزد، اصفهان، مرکزی، چهارمحال و بختیاری و سمنان در مرکز، بخش‌هایی از استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان رضوی و خراسان جنوبی در شرق، کهگیلویه و بویراحمد و قسمت‌هایی از خوزستان، بوشهر، فارس، هرمزگان و کرمان در جنوب کشور کاهش و در سایر نقاط کشور افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

بررسی توام متغیرهای مختلف از مسائل مهم مطالعات تغییر اقلیم به شمار می‌رود و از آنجایی که در مطالعات قبلی صورت گرفته در مورد تغییر اقلیم، یک یا چند جنبه به طور مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند و یا بررسی توام چند متغیر در بخش کوچکی از کشور صورت گرفته است در این مطالعه سعی شده است تأثیر دو متغیر مهم شامل بارش و تبخیر و تعرق در قالب شاخصی معتبر به نام شاخص خشکی در سطح کشور مورد بررسی قرار گیرد. از آنجا که در بسیاری از مناطق کشور پراکنش زمانی و مکانی پارامترهای اقلیمی نامناسب است،

Reference:

- Ahani, H., Kherad, M., Kousari, M. R., Van Roosmalen, L., Aryanfar, R., & Hosseini, S. M. (2013). Non-parametric trend analysis of the aridity index for three large arid and semi-arid basins in Iran. *Theoretical and applied climatology*, 112(3): 553-564 (In Persian)
- Amani, Z., Deihimfard, R., & Mokhtassi, B.A. (2016). Evaluation of drought under increasing of temperature due to climate change in rainfed wheat-growing areas of Fars province using Aridity Index. *Journal of Crop Production*, 9(2), 151-174. (In Persian)
- Bakhtiari, B., Mahdavi, N., & Sayari, N. (2021). Variations and Sensitivity Analysis on Aridity Index (AI) in Some Climate Samples in Iran. *Iran-Water Resources Research*, 17(1), 1-15. (In Persian)
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959.
- Dehghan, S., Salehnia, N., Sayari, N., & 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, 318-330. (In Persian)
- Dehghani Tafti, A.A., Zare, M., Hosseini, S., & Arabi Aliabad, F. (2019). Investigating the Trend of Drought Changes and Its Relation with Climatic Elements. *Desert Management*, 7(13): 1-14. (In Persian)
- Ekhtiarikhajeh, S., & Dinpazhoh, Y. (2018). Application of effective drought index (EDI) for studying dry periods (Tabriz, Bandar Anzali and Zahedan stations). *Irrigation Science and Engineering*, 41(1), 133-145. (In Persian)
- Ghorbani, K., Valizadeh, E., & BararkhanPoor, S. (2018). Investigation of spatiotemporal trend of the bivariate meteorological drought index, SPEI, in Iran. *Desert Management*, 6(11), 25-38. (In Persian)
- Goparaju, L., & Ahmad, F. (2019). Analysis of seasonal precipitation, potential evapotranspiration, aridity, future precipitation anomaly and major crops at district level of India. *KN-Journal of Cartography and Geographic Information*, 69(2), 143-154.
- 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
- Kamruzzaman, M., Jang, M.W., Cho, J., & Hwang, S. (2019). Future changes in precipitation and drought characteristics over Bangladesh under CMIP5 climatological projections. *Water*, 11(11).
- Kaviani, MR. (2001). Climatic investigation on aridity and drought index. *Geographical Researches*, 16(1): 71-89. (In Persian)
- Kendall, MG. (1948). *Rank correlation methods*. Charles Griffin & Co, London, 272p
- Li, M., Chu, R., Islam, A.R.M., Jiang, Y., & 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.
- Mann, HB. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13(3):245-259.
- Mesbahzadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni saravi, M., Khosravi, H., & Mortezaei, G. (2019). Study of Current and Future Meteorological Drought Conditions using the CMIP5 Model Under RCP scenarios. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 13 (46) :11-21. (In Persian)
- Naderianfar, M., & Heydari Gharae, E. (2021). Evaluation of drought impacts on irrigated and rainfed wheat yields in Bojnourd region. *Crop Science Research in Arid Regions*, 3(1), 163-176. (In Persian)
- Nair, S. C., & Mirajkar, A. (2022). Drought vulnerability assessment across Vidarbha region, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(4), 355.
- Nobakht, M., Saghafian, B., & Aminyavari, S. (2021). Skill assessment of Copernicus climate change service seasonal ensemble precipitation forecasts over Iran. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38, 504-521. (In Persian)
- Nouri, M., Homaei, M., & Bannayan, M. (2016). Assessing Trends of aridity index changes over 1966-2100 period in the Northwest of Iran. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 439-453. (In Persian)
- Oliver, J.E. (2005). *The Encyclopedia of World Climatology*: Springer Netherlands.
- Pouralkhas Nokandeie, M., Esmali-Ouri, A., Mostafazadeh, R., Hazbavi, Z., & Sharari, M. (2022). Indicators and components of assessing variations and changes in climate change. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, 12(1): 85-98. (In Persian)
- Ranjbar, F., & Tabatabaai, H. (2022). Investigation of the trend of Aridity index in the northern stations of Iran during the period 1982-2019. *Climate Change Research*. (In Persian)
- Rezaei, H., & Motamedi Rad, M. (2023). Assessing phenological growth stages of barberry tree growth and the effect of climate change on its water requirement in Iran. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2): 78-92. doi: 10.22098/mmws.2022.11189.1105. (In Persian)
- Sharma, S., Hamal, K., Khadka, N., Ali, M., Subedi, M., Hussain, G., ... & Dawadi, B. (2021). Projected drought Conditions over Southern Slope of the Central Himalaya using CMIP6 models. *Earth Systems and Environment*, 5, 849-859.

- Spinoni, J., Vogt, J., & Barbosa, P. (2015). European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011. *International Journal of Climatology*, 35(1), 25-36.
- Stefanidis, K., Kostara, A., & Papastergiadou, E. (2016). Implications of human activities, land use changes and climate variability in Mediterranean lakes of Greece. *Water*, 8(11), 483.
- Switanek, M. B., Troch, P. A., Castro, C. L., Leuprecht, A., Chang, H. I., Mukherjee, R., & Demaria, E. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6): 2649-2666.
- Wouters, H., Berckmans, J., Maes, R., Vanuytrecht, E., & De Ridder, K. Global bioclimatic indicators from 1950 to 2100 derived from climate projections, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS) (2021).
- Zhang, Q., Li, J., Singh, V. P., & Bai, Y. (2012). SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang, China. *Natural hazards* 64: 481-492.

یادداشت‌ها

¹ Kamruzzaman *et al*

² Sharma *et al*

³ Nair and Mirajkar

⁴ quantile delta-mapping