



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. 14
No. 3 (55)

Received:
2024-07-27

Accepted:
2024-10-19

Pages: 127-139

Investigating the Impact of Climate Changes on the Aridity Index Under the Scenarios of the CMIP6 in Iran: Looking at Industries

Hadi Ramezani Etedali^{1*} and Sakine Koochi²

1) Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2) PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*Corresponding author email: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Due to the global warming and climate change and its outcomes are among the most significant environmental challenges today. Iran, as a country with a semi-arid and arid climate, has always faced issues such as water scarcity and drought, climate change can exacerbate these problems and have destructive effects on the environment, economy, and human societies. Thus, a precise understanding of the impacts of climate on the land is crucial for reducing societal vulnerability, enhancing resilience against climate changes, and preserving the country's natural resources. In this context, this study aims to examine the effects of climate change on the aridity index on seasonal and annual scales under the climate scenarios of the latest climate report (CMIP6). This study aims to offer a comprehensive outlook on the number of industries likely to be affected by varying intensities of climatic drought across Iran by providing long-term drought forecasts under the SSP climate scenarios.

Method: In this study, data from 31 synoptic stations distributed across the country were utilized. Precipitation and temperature data from the statistical period 1997 to 2014 served as observational data, while high-resolution climate data from NEX-GDDP provided the basis for projections for the three future periods of 2025-2049, 2050-2074, and 2075-2099. These data were analyzed under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. The climate models used in this research included CNRM-CM6-1, CanESM5, GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, and MIROC6. The monitoring of changes in the aridity index was performed using the De Martonne aridity index. An evolutionary algorithm was employed to optimize the coefficients of the climate models and their integration. The statistical indices RMSE, MAE, and MBE were used to evaluate the performance of the climate outputs compared to the observed values in the base period.

Results: The climatic classification of the studied stations, based on the De Martonne aridity index for the period from 1997 to 2014, indicates that 39% of the stations are situated in semi-arid climates, while 23% are in dry climates. The findings reveal that the stations in Sistan and Baluchistan, Yazd, Khuzestan, and Hormozgan are classified as very dry climates. The evaluation of the climatic output accuracy, using statistical indices, demonstrated that there is no significant bias in precipitation and temperature estimations for 81% and 90% of the stations, respectively. An analysis of changes in the De Martonne aridity index for the upcoming three periods, relative to the base period, shows a trend toward increased dryness in the stations of Isfahan, Qom, Semnan, Kerman, Hormozgan, Mazandaran, Golestan, Ilam, Chaharmahal and Bakhtiari, Fars, and Tehran. Furthermore, a review of the distribution of industrial facilities and their water consumption reveals that provinces such as Isfahan, Fars, Tehran, Alborz, East Azarbaijan, and Razavi Khorasan each host over 1,250 industrial workshops. The industrial water usage in East Azarbaijan, Tehran, Isfahan, Khuzestan, Bushehr, and Razavi Khorasan exceeds 62,217,790 m³.

Conclusion: The results indicate that, based on observational data from the base period, a significant portion of the country falls within semi-arid to very arid climate classes. The base period's results suggest that precipitation and temperature data from the sixth climate change report are valuable resources for monitoring future drought conditions under various climate scenarios. The findings reveal that the decrease in the DMI is more pronounced during the summer and autumn seasons compared to spring and winter. Overall, the results demonstrate that, under both SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, many provinces in the country will experience a shift towards semi-arid, dry, and very dry climate conditions. Given the concentration of industrial workshops in these provinces, it is imperative to develop and implement strategies for water resource management in these areas. The outcomes of this research can significantly contribute to the sustainable management of water resources in the face of climate change.

Keywords: climate change, SSP scenarios, De Martonne index, industrial workshops



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

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

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

پست الکترونیک:

iawsrcj@srbiau.ac.ir
iawsrcj@gmail.com

سال چهاردهم

شماره ۳ (۵۵)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۲۸

صفحات: ۱۳۹-۱۲۷

بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر شاخص خشکی تحت سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم در ایران: با نگاهی بر وضعیت صنایع

هادی رضائی اعتدالی^{۱*} و سکینه کوهی^۲

(۱) استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
(۲) دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
* ایمیل نویسنده مسئول: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: با توجه به اینکه گرمایش جهانی و تغییر اقلیم و پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم در حال حاضر یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی می‌باشد. از سوی دیگر، ایران به‌عنوان کشوری با اقلیم نیمه‌خشک و خشک، همواره با مشکلات مرتبط با کمبود آب و خشکسالی مواجه بوده است. تغییرات اقلیمی می‌تواند سبب تشدید این مشکلات و همراه با اثرات مخربی بر محیط‌زیست، اقتصاد و جوامع انسانی باشد. بنابراین شناخت دقیق تأثیرات اقلیمی بر خشکی می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری جامعه، افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و حفظ منابع طبیعی کشور مفید واقع شود. در همین راستا، این مطالعه با هدف بررسی تغییرات اقلیمی بر شاخص خشکی در مقیاس‌های فصلی و سالانه تحت سناریوهای اقلیمی جدیدترین گزارش اقلیمی (CMIP6) به انجام رسیده است. این پژوهش، با پیش‌نگری بلندمدت از شرایط خشکی، سعی دارد تا دیدگاه جامعی از تعداد صنایع در معرض شدت‌های مختلف از خشکی اقلیمی در سراسر ایران و تحت سناریوهای اقلیمی SSP ارائه دهد.

روش پژوهش: لازم بذکر است که در تحقیق حاضر از داده‌های ۳۱ ایستگاه سینوپتیک واقع در سراسر کشور استفاده شده است. داده‌های بارش و دما طی دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ به عنوان داده‌های مشاهداتی و داده‌های اقلیمی ریزمقیاس شده توسط NEX-GDDP مبنای مطالعه برای پیش‌نگری‌ها طی سه دوره آتی ۲۰۲۵-۲۰۴۹، ۲۰۲۵-۲۰۷۴ و ۲۰۲۵-۲۰۹۹ و ۲۰۲۵-۲۰۹۹ می‌باشند. این داده‌ها تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مدل‌های اقلیمی استفاده شده شامل: CNRM-CM6-1، CanESM5، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL و MIROC6 می‌باشند. پایش تغییرات شاخص خشکی با استفاده شاخص خشکی دومارتن صورت گرفته است. به‌منظور بهینه‌سازی ضرایب مدل‌های اقلیمی و ادغام آن‌ها، از الگوریتم Evolutionary استفاده شده است. شاخص‌های آماری RMSE، MAE و MBE برای ارزیابی عملکرد خروجی اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه مینا بوده است.

یافته‌ها: طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه بر مبنای شاخص خشکی دومارتن برای دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که ۳۹ درصد از ایستگاه‌ها در اقلیم نیمه‌خشک و ۲۳ درصد در اقلیم خشک قرار دارند. براساس نتایج، ایستگاه‌های سیستان و بلوچستان، یزد، خوزستان و هرمزگان در اقلیم خیلی‌خشک قرار دارند. دقت خروجی اقلیمی در تخمین بارش و دما با استفاده از شاخص‌های آماری نشان داد که در تخمین بارش و دما به‌ترتیب در ۸۱ و ۹۰ درصد از ایستگاه‌ها خطای آریبی قابل توجه نمی‌باشد. بررسی تغییرات شاخص خشکی دومارتن در سه دوره آتی نسبت به دوره پایه در ایستگاه‌های اصفهان، قم، سمنان، کرمان، هرمزگان، مازندران، گلستان، ایلام، چهارمحال و بختیاری، فارس، تهران، نیز حاکی از کاهش شاخص خشکی و تغییر اقلیم به سمت خشک‌تر می‌باشد. بررسی پراکندگی کارگاه‌های صنعتی در سطح کشور و میزان آب مصرفی توسط این صنایع نشان داد که استان‌های اصفهان، فارس، تهران، البرز، آذربایجان شرقی و خراسان رضوی بیش از ۱۲۵۰ کارگاه صنعتی دارند. مصرف آب صنایع در استان‌های آذربایجان شرقی، تهران، اصفهان، خوزستان، بوشهر و خراسان رضوی بیش از ۶۲۲۱۷۷۹۰ مترمکعب است.

نتایج: نتایج حاکی از آن است براساس داده‌های مشاهداتی در دوره پایه بخش قابل‌توجهی از کشور در طبقه‌های اقلیمی نیمه‌خشک تا خیلی‌خشک واقع شده‌اند. با توجه به عملکرد داده‌های اقلیمی در دوره پایه می‌توان چنین عنوان نمود که داده‌های بارش و دما مربوط به گزارش ششم تغییر اقلیم منبع ارزشمندی برای پایش شرایط خشکی در دهه‌های آتی و تحت سناریوهای اقلیمی به‌شمار می‌روند. براساس نتایج میزان کاهش در مقدار شاخص خشکی در سه دوره آتی نسبت به دوره پایه، در فصل‌های تابستان و پاییز بیش از بهار و زمستان می‌باشد. به‌طورکلی نتایج نشان داد که با کاهش مقدار شاخص خشکی دومارتن تحت هر دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 شرایط اقلیمی در تعداد زیادی از استان‌های کشور به نیمه‌خشک، خشک و خیلی‌خشک تغییر یافته است. با توجه به واقع شدن تعداد زیادی از کارگاه‌های صنعتی در استان‌ها ضروری است تا برای مدیریت منابع آب در این مناطق برنامه‌ریزی و اقدام شود. نتایج تحقیق حاضر می‌تواند در راستای مدیریت پایدار منابع آبی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی مفید واقع شود.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، سناریوهای SSP، شاخص دومارتن، کارگاه‌های صنعتی

مقدمه

تغییرات اقلیمی حتی به صورت جزئی اجزای مختلف اکوسیستم و جوامع انسانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Bahri et al., 2015). افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی همچون گسترش استفاده از سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی و توسعه کشاورزی منجر به افزایش دمای جهانی و تغییر در الگوی بارش‌ها شده است. این تغییرات می‌توانند با تغییر در مولفه‌های هواشناسی، هیدرولوژی و افزایش پدیده‌های شدید اقلیمی همراه باشند (Dey & Mishra, 2017; Kalanaki & Karandish, 2015). خشکسالی به عنوان یکی از مهم‌ترین اثرات حدی تغییر اقلیم، می‌تواند تأثیرات مخربی بر اقتصاد، محیط‌زیست و جوامع انسانی داشته باشد. براساس گزارش مجمع بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) این پدیده از پیچیده‌ترین مخاطرات طبیعی به شمار می‌رود که در اثر بارش کم‌تر از متوسط در یک دوره طولانی‌مدت و افزایش دما حاصل خواهد شد (IPCC, 2007). یکی از موارد مهم در مطالعات خشکسالی، قائل شدن تمایز بین خشکسالی و خشکی می‌باشد. خشکی نوعی ویژگی دائمی آب و هوا و جزء ذات منطقه است، درحالی‌که خشکسالی می‌تواند در تمام طبقات اقلیمی رخ داده ولی مشخصات و تأثیرات آن در مناطق مختلف، متفاوت باشد (Alizadeh, 2014). خشکسالی هواشناسی نیز یکی از نمودهای خشکسالی به شمار می‌رود و پیامدهایی همچون کاهش کمیت و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی، محصولات کشاورزی و سایر مسائل اقتصادی و اجتماعی را به دنبال دارد (IPCC, 2014). ایران نیز به عنوان کشوری با اقلیم نیمه‌خشک و خشک، همواره با مشکلات مرتبط با کمبود آب و خشکی مواجه می‌باشد. موقعیت جغرافیایی و اقلیم ایران منجر شده است تا در برابر آثار و نتایج خشکسالی از آسیب‌پذیری بیش‌تری برخوردار باشد. از آنجایی‌که جلوگیری از وقوع خشکی و خشکسالی به‌طور کامل امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین، یکی از مسائل مهم برای کاهش تأثیرات خشکی، خشکسالی و برنامه‌ریزی‌های طولانی‌مدت در زمینه محیط‌زیست، اقتصاد و اجتماع، ارزیابی و شناسایی دوره‌های خشک و مرطوب و بررسی تأثیرات تغییر اقلیم در این زمینه است.

مطالعاتی نیز در زمینه ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر شرایط خشکی و خشکسالی به انجام رسیده است. به‌عنوان مثال، شکوهی و مروتی (۱۳۹۳) در تحقیقی به بررسی تأثیرات خشکسالی بر روند خشک شدن دریاچه ارومیه انجام دادند. نتایج نشان داد که گسترش فعالیت‌های عمرانی در حوضه منطبق بر دوره‌هایی است که حوضه بر مبنای شاخص خشکسالی از نظر منابع آبی شکننده می‌باشد. پیرنیا و همکاران

(۱۳۹۸) به ارزیابی وضعیت خشکسالی در بالادست سد گلستان در آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 براساس شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI پرداختند. نتایج حاکی از تغییرات ناچیز بارندگی و افزایش معنادار دما می‌باشد. همچنین مشخص شد که استفاده از شاخص SPEI برآورد منطقی‌تر و واقعی‌تری نسبت به شاخص SPI داشته است و شرایط خشکسالی شدیدتری را نشان داده است. بختیاری و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی به تحلیل حساسیت شاخص خشکی AI براساس ۷ متغیر هواشناسی و در ۵ نمونه اقلیمی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند. نتایج حاکی از افزایش خشکی در هر ۵ ایستگاه به جز ایستگاه مشهد است. همچنین با توجه به نتایج مقدار شاخص خشکی طی دوره آبی و تحت سناریوهای اقلیمی در همه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه یاسوج با افزایش همراه است. احمدعلی‌پور و همکاران (2019) با ارزیابی ریسک خشکسالی هواشناسی در سراسر آفریقا نشان دادند که نسبت ریسک خشکسالی در کشورهای آفریقای مرکزی در نتیجه افزایش آسیب‌پذیری و جمعیت، بالاتر است. در صورت عدم اتخاذ سناریوهایی با هدف سازگاری با تغییرات آب و هوایی، ریسک و خطر خشکسالی‌ها می‌تواند ده‌ها سال زودتر از موعد رخ دهد. اسپسئونیا^۱ و همکاران (2019) در تحقیقی با ارزیابی شرایط خشکسالی در سه مقیاس جهانی، منطقه‌های کلان و کشوری نشان دادند که در دهه‌های اخیر در آسیای مرکزی خشکسالی‌های شدیدی رخ داده است. همچنین در بخش عظیمی از آسیای مرکزی افزایش درجه حرارت با تعدیل در افزایش بارندگی‌ها همراه بوده است که این موضوع منجر به خشکسالی‌های مکرر و شدید در منطقه شده است.

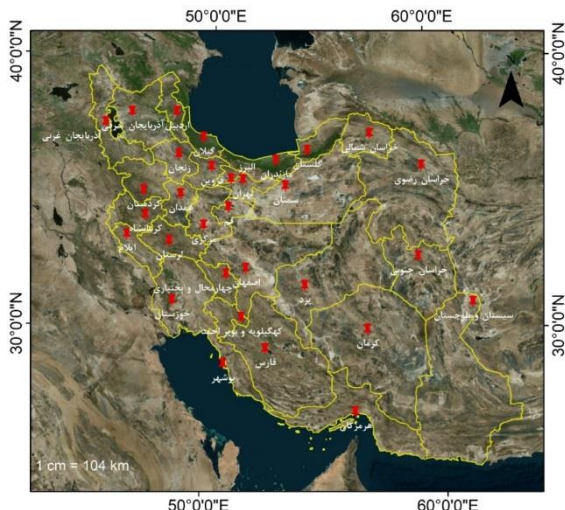
همچنین سرلک و آقا (۲۰۱۸) در پژوهشی با بررسی تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌های خشکی شامل لانگ، دومارتن، UNEP و Erinc در کشور عراق نشان دادند که حدود ۹۷ درصد از این کشور دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. همچنین کاهش بارش و افزایش دما در این منطقه منجر به خشک‌تر شدن شرایط اقلیمی طی دوره‌های آبی خواهد شد. دهقان و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر خشکسالی تحت دو سناریوی اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 در استان فارس پرداختند. نتایج نشان داد که دوره‌های خشک در دهه‌های آبی و تحت سناریوهای اقلیمی با افزایش همراه است. میرگل و همکاران (2021) در پژوهشی به بررسی تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از پنج مدل اقلیمی و تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 براساس شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI پرداختند. نتایج نشان داد که دوره‌های آبی نسبت به

است. لازم بذکر است که پژوهش پیش‌رو طی دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره مشاهداتی به‌انجام رسیده است و تغییرات آتی در سه دوره آماری مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سطح ۳۱ ایستگاه سینوپتیک واقع در کل کشور به‌انجام رسیده است. در این مطالعه مقادیر بارش و دما ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک طی دوره آماری ۱۸ ساله (۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴) به‌عنوان داده‌های مشاهداتی در نظر گرفته شده است. علاوه‌براین، مقدار شاخص دومارتن برای ایستگاه‌ها طی سه دوره آتی که عبارتند از: ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹، ۲۰۵۰ تا ۲۰۷۴ و ۲۰۷۵ تا ۲۰۹۹ محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱، موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

داده‌های اقلیمی مورد استفاده

مجموعه داده‌های NEX-GDDP (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections)، اخیراً اقدام به ریزمقیاس‌سازی و انتشار داده‌های اقلیمی جدیدترین گزارش تغییر اقلیم (CMIP6) در تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه نموده است. داده‌های اقلیمی ریزمقیاس شده توسط NEX-GDDP شامل بارش، حداقل، حداکثر و متوسط دما، سرعت باد و رطوبت نسبی مدل‌های CMIP6 در مقیاس روزانه می‌باشد. داده‌های این مجموعه از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره پایه و از سال ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ تحت دو سناریوی انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از سامانه قابل GEE (Google Earth Engine) دریافت می‌باشد. مفروضات سناریوی SSP2-4.5 بیانگر شرایط حد وسط است، در این شرایط توسعه اجتماعی-اقتصادی همگام با شرایط معمول است.

دوره پایه تحت تمام سناریوهای اقلیمی از نظر روند و مدت زمان خشکسالی با شرایط خشکسالی کمتری مواجه خواهد بود. اما فراوانی خشکسالی‌های شدید فصلی در آینده بیش از دوره پایه می‌باشد که می‌تواند وضعیت کم‌آبی دریاچه را تشدید نماید. اندراد^۲ و همکاران (2021) به ارزیابی شرایط خشکی در شبه جزیره‌ای در پنسیلوانیا با استفاده از سه شاخص دومارتن، پینا و ارینچ تحت سناریوهای اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند. نتایج بیانگر افزایش شرایط خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5 در مرکز و جنوب این منطقه تا سال ۲۰۷۰ می‌باشد. کوهی و همکاران (2022) به بررسی تغییرات ویژگی‌های خشکسالی در حوضه آبخیز کارون براساس شاخص خشکسالی فازی تحت سناریوهای اقلیمی SSP3 و SSP5 پرداختند. پایش شرایط خشکسالی طی دوره‌های آتی حاکی از وجود روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد، افزایش دوره‌های خشک و کاهش دوره‌های تر می‌باشد. همچنین مناطق شمالی، شمال‌غرب و غرب حوضه کارون بیشتر در معرض شرایط خشکی قرار دارند. بررسی مطالعات حاکی از آن است که شرایط خشکی و خشکسالی‌ها تحت تاثیر تغییرات اقلیم با تشدید همراه بوده است. همچنین بسیاری از مطالعات گذشته بر کاربرد سناریوهای قدیم اقلیمی و مناطق خاصی از کشور متمرکز بوده و در کمتر تحقیقی به ارزیابی تعداد صنایع در معرض شدت‌های مختلف خشکی پرداخته شده است. این خلاء یکی از دلایل عدم وجود برنامه‌ریزی‌های جامع و کارآمد برای مدیریت منابع آب و سازگاری صنایع با شرایط اقلیمی آینده می‌باشد. درحالی‌که بررسی صنایع در معرض شدت‌های مختلف خشکی می‌تواند به‌عنوان گامی اولیه برای شناسایی صنایع آسیب‌پذیر، تحلیل تأثیرات خشکی بر آن‌ها و توسعه راهکارهای سازگاری در سطح کشور به‌شمار رود. بنابراین، با توجه به اهمیت آگاهی از روند تغییرات این پدیده تحت اثر تغییرات اقلیمی به‌ویژه در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح در زمینه منابع آب و فعالیت‌های کشاورزی، لازم است تا روند تغییرات خشکی پایش و ارزیابی شود. بدین ترتیب با پیش‌بینی شرایط خشکی تحت سناریوهای جدید اقلیمی می‌توان کمک قابل‌توجهی به کاهش اثرات ناشی از این اتفاق نمود. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی و پایش وضعیت خشکی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در سطح کشور می‌باشد. همچنین، این پژوهش به‌دنبال شناسایی تعداد صنعتی است که در معرض شدت‌های مختلف از خشکی قرار دارند. از همین رو، در این تحقیق پایش وضعیت خشکی تحت تأثیر تغییر اقلیم براساس شاخص خشکی دومارتن در سطح کشور ایران مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش از داده‌های ۵ مدل GCM تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از جدیدترین گزارش IPCC (CMIP6: Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) استفاده شده

جدول ۱. طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن

شاخص خشکی	نوع اقلیم
$0 \leq DMI < 5$	خیلی خشک
$5 \leq DMI < 10$	خشک
$10 \leq DMI < 20$	نیمه‌خشک
$20 \leq DMI < 24$	مدیترانه‌ای
$24 \leq DMI < 28$	نیمه‌مرطوب
$28 \leq DMI < 35$	مرطوب
$35 \leq DMI < 55$	خیلی مرطوب نوع ۱
$55 \leq DMI$	خیلی مرطوب نوع ۲

شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده

در مطالعه حاضر از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE: *Root Mean Square Error*)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE: *Mean Absolute Error*) و میانگین انحراف خطا (MBE: *Mean Bias Error*) برای ارزیابی عملکرد خروجی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی مقدار بارش و دما در دوره پایه استفاده شده است. معادلات مورد استفاده برای هر یک از شاخص‌های فوق و مقدار بهینه آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در این پژوهش

مقدار بهینه	معادله	شاخص آماری
صفر	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}$	RMSE
صفر	$\frac{\sum_{i=1}^N O_i - S_i }{N}$	MAE
صفر	$\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)}{N}$	MBE

که در جدول فوق، S_i : مقدار بردادهای اقلیمی، O_i : مقدار مشاهداتی، N : تعداد داده‌ها.

نتایج و بحث

طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه

در ابتدا به طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه بر مبنای شاخص خشکی دومارتن طی دوره ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ پرداخته شده است. نتایج حاصل از طبقه‌بندی اقلیمی با استفاده داده‌های بارش و دمای مشاهداتی طی دوره پایه در جدول ۳ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود به ترتیب ۳۹ و ۲۳ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه در اقلیم‌های نیمه‌خشک و خشک واقع شده‌اند. تغییرات مقدار متوسط سالانه‌ی شاخص خشکی دومارتن طی دوره مشاهداتی برای ایستگاه‌های خراسان

در حالی که در سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 فرض بر دنیایی پیشرفته و با مصرف بالای انرژی و سوخت فسیلی می‌باشد. در مطالعه حاضر، از داده‌های بارش و دما مربوط به ۵ GCM شامل: CanESM5، CNRM-CM6-1، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL و MIROC6 استفاده شده است.

از آنجایی که در تحقیقات مختلفی نشان داده شده است که بهینه‌سازی ضرایب مدل‌های اقلیمی و ادغام آن‌ها از تاثیر مثبتی بر افزایش کارایی و کاهش عدم قطعیت خروجی‌های اقلیمی در بازتولید متغیرهای جوی برخوردار است (Mirakbari et al., 2018; Mohan & Bhaskaran, 2019; Ramezani et al., 2023). در این پژوهش نیز خروجی‌های مدل‌های اقلیمی با یکدیگر ادغام شده است. روش مورد استفاده در این مطالعه برای بهینه‌سازی ضرایب مدل‌های اقلیمی، الگوریتم Evolutionary مربوط به تابع بهینه‌سازی Solver می‌باشد. الگوریتم Evolutionary یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراشناختی مبتنی بر ازدحام جمعیت است که در شاخه‌ای از هوش مصنوعی قرار می‌گیرد. در این الگوریتم جستجو از چندین نقطه در فضای تصمیم آغاز می‌شود (Xia et al., 2013). در این مطالعه، حداقل نمودن مقدار شاخص خطای RMSE محاسباتی بین خروجی اقلیمی حاصل از ادغام پنج مدل و مقادیر مشاهداتی به عنوان تابع هدف برای کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است.

شاخص خشکی دومارتن (De Martonne)

در این مطالعه شاخص دومارتن که از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های خشکی نیز به‌شمار می‌رود، استفاده شده است. این شاخص بر اساس نسبت میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) و میانگین درجه حرارت سالانه بنا شده است. به عقیده دومارتن کاهش ضریب خشکی بیانگر خشکی منطقه و افزایش این شاخص حاکی از مرطوب بودن منطقه می‌باشد. محاسبه شاخص خشکی دومارتن در مقیاس‌های فصلی و سالانه به ترتیب توسط روابط ۱ و ۲ انجام می‌شود (De Martonne, 1926). در روش دومارتن، شش نوع اقلیم در نظر گرفته شده است. این تقسیم‌بندی توسط محققین اصلاح و به ۸ نوع تقسیم شده است که در جدول ۱ مشاهده می‌شود (Rezaei et al., 2013).

$$DMI_{\text{month}} = \left(\frac{P}{T + 10} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$DMI_{\text{year}} = \left(\frac{P}{T + 10} \right) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، P مجموع بارش (میلی‌متر) و T متوسط دما (درجه سانی‌گراد) می‌باشد.

رضوی، آذربایجان شرقی، خراسان شمالی، البرز، مرکزی، فارس، همدان، آذربایجان غربی، قزوین، اردبیل و زنجان در محدوده ۱۰

جدول ۳. طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره مشاهداتی

ایستگاه	DMI	ایستگاه	DMI
سیستان و بلوچستان	0.5	فارس	0.5
یزد		همدان	
خوزستان		آذربایجان غربی	
هرمزگان		قزوین	
کرمان		اردبیل	
سمنان		زنجان	
قم		گلستان	
خراسان جنوبی		کرمانشاه	
اصفهان		کردستان	
چهارمحال و بختیاری		لرستان	
بوشهر	تهران	1.0	
خراسان رضوی	ایلام		
آذربایجان شرقی	مازندران		
خراسان شمالی	کهگیلویه و بویراحمد		
البرز	گیلان		
مرکزی			

خیلی خشک	$0 < DMI \leq 5$
خشک	$5 < DMI \leq 10$
نیمه‌خشک	$10 < DMI \leq 20$
مدیترانه‌ای	$20 < DMI \leq 24$
نیمه‌مرطوب	$24 < DMI \leq 28$
مرطوب	$28 < DMI \leq 35$
خیلی مرطوب نوع ۱	$35 < DMI \leq 55$
خیلی مرطوب نوع ۲	$DMI \geq 55$

نتایج حاکی از آن است که در ۱۹ و ۵۸ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار خطای حاصل از ادغام مدل‌های اقلیمی در تخمین بارش در دوره پایه و بر مبنای شاخص آماری MAE به ترتیب کمتر از ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر بوده است. با توجه به شکل ۲ مشخص است که بیشترین میزان خطای مدل‌های اقلیمی در ایستگاه‌های واقع در حاشیه دریای خزر و همچنین جنوب غرب کشور شامل گیلان، گلستان، مازندران، کهگیلویه و بویراحمد، خوزستان، تهران و ایلام بوده است. مقدار متوسط شاخص MAE در ایستگاه‌های مذکور حدود ۳/۱ میلی‌متر تخمین زده شده است. بررسی شاخص MBE که نشان‌دهنده میزان بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی تغییرات بارش در دوره پایه می‌باشد نشان داد که خروجی حاصل از مدل‌های اقلیمی گزارش ششم تغییر اقلیم در ۸۱ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه با بهره‌مندی از مقدار شاخص MBE در محدوده ۵- تا ۵ دارای بیش‌برآوردی یا کم برآوردی قابل توجهی در تخمین مقدار بارش نمی‌باشد. براساس شکل ۲ مشخص است که متوسط مقدار شاخص MBE در ایستگاه‌های سینوپتیک گیلان، گلستان، مازندران، کهگیلویه و بویراحمد و همدان ۱۲/۳ میلی‌متر و در ایستگاه خوزستان ۷/۳- میلی‌متر و به ترتیب حاکی از بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی در تخمین مقدار بارش می‌باشد. ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی نسبت به مقادیر بارش مشاهداتی بر مبنای شاخص‌های MAE و MBE گویای این مطلب است که میزان خطا و اریبی داده‌های اقلیمی برای دوره پایه و در مقیاس ماهانه در بیش از ۷۵ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه قابل قبول ارزیابی می‌شود.

تا ۲۰ و برای ایستگاه‌های کرمان، سمنان، قم، خراسان جنوبی، اصفهان، چهارمحال و بختیاری و بوشهر در محدوده ۵ تا ۱۰ تخمین زده شده است. با توجه به نتایج مشخص است که ایستگاه‌های سیستان و بلوچستان، یزد، خوزستان و هرمزگان در اقلیم خیلی‌خشک قرار دارند. همچنین ایستگاه‌های سینوپتیک گلستان، کرمانشاه، کردستان، لرستان و تهران با مقدار شاخص خشکی دومرتن در محدوده ۲۰ تا ۲۴ در اقلیم مدیترانه‌ای واقع شده‌اند. با توجه به نتایج مشخص است که تنها ۳ (ایستگاه سینوپتیک ایلام)، ۳ (ایستگاه سینوپتیک مازندران) و ۶ درصد (ایستگاه‌های سینوپتیک کهگیلویه و بویراحمد و گیلان) از ایستگاه‌های سینوپتیک در اقلیم نیمه‌مرطوب، مرطوب و خیلی مرطوب قرار گرفته‌اند.

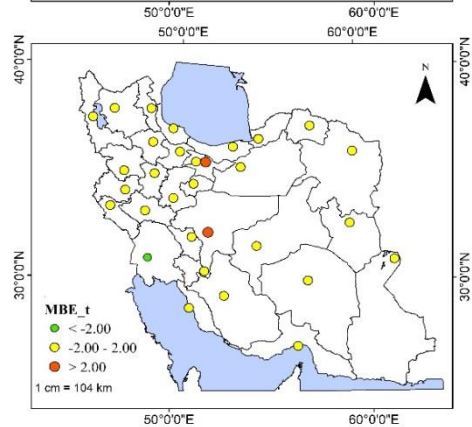
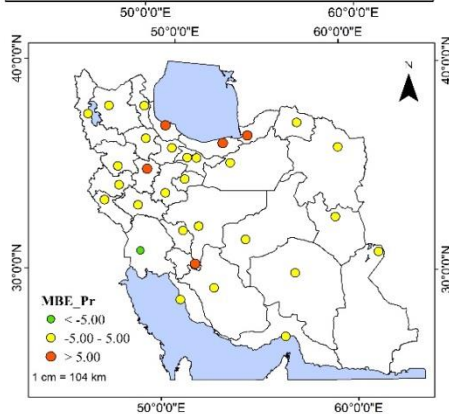
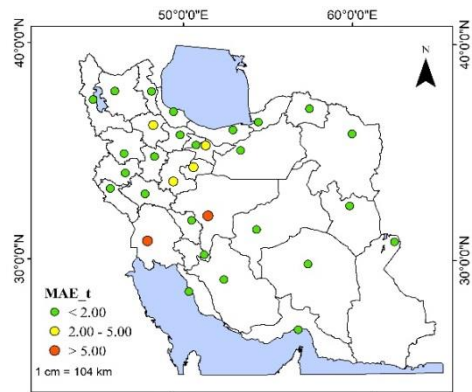
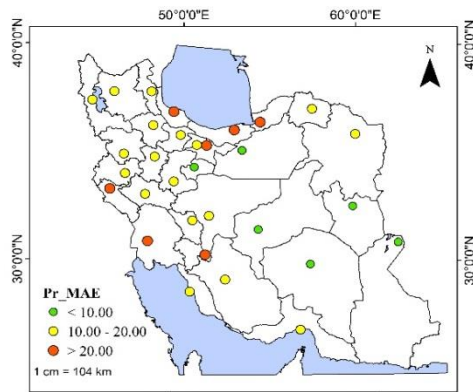
ارزیابی عملکرد خروجی مدل اقلیمی در دوره پایه

در این بخش عملکرد خروجی حاصل از ادغام پنج مدل اقلیمی مورد مطالعه در تخمین متغیرهای جوی موثر بر تخمین مقدار شاخص خشکی دومرتن (بارش و دما) نسبت به مقادیر مشاهداتی پرداخته شده است. در شکل ۲ تغییرات مکانی شاخص‌های آماری MAE و MBE بین مقادیر بارش و دما به‌دست آمده از ادغام مدل‌های اقلیمی نسبت به مقادیر ثبت شده برای مقیاس ماهانه در ایستگاه‌های سینوپتیک در دوره پایه ارائه شده است. بررسی مقدار شاخص MAE در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی در شبیه‌سازی بارش نشان داد که در مقیاس ماهانه این شاخص از ۳/۵ تا ۷۰/۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد و مقدار متوسط آن ۱۸/۲ میلی‌متر است. همچنین

تغییرات شاخص خشکی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی

در این بخش از پژوهش، به بررسی تغییرات فصلی شاخص خشکی دوارتن تحت تأثیر تغییرات اقلیمی طی سه دوره آتی نسبت به دوره پایه پرداخته شده است (شکل ۳). با توجه به تعداد بالای ایستگاه‌های مورد مطالعه، به ارائه نتایج هفت ایستگاه به نمایندگی از هر اقلیم (مبتنی بر نتایج بخش طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌ها) تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 اکتفا شده است. بررسی نتایج در ایستگاه یزد به نمایندگی از ایستگاه‌های دارای اقلیم خیلی خشک حاکی از وجود روند کاهشی در مقدار شاخص دوارتن در فصل‌های پاییز و زمستان طی دوره‌های آتی و تحت هر دو سناریوی اقلیمی نسبت به دوره پایه می‌باشد. چنانکه در فصل زمستان مقدار شاخص خشکی دوارتن در ایستگاه یزد حدود ۶/۰ تخمین زده شده است که طبق طبقه‌بندی اقلیمی دوارتن حاکی از اقلیم خشک می‌باشد. اما کاهش مقدار شاخص خشکی منجر به تغییر اقلیم این منطقه به اقلیم خیلی خشک در فصل زمستان شده است. بیشترین و کمترین میزان در کاهش مقدار شاخص خشکی در فصل زمستان در ایستگاه یزد برابر است با ۴۳/۸ و ۲۴/۵ درصد کاهش که به ترتیب به دوره دوم و دوره اول تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 تعلق دارد. مشخص است که مقدار شاخص دوارتن در فصل تابستان هم در دوره پایه و هم در

ارزیابی عملکرد خروجی مدل‌های اقلیمی در تخمین متوسط دمای ماهانه طی دوره پایه بر مبنای شاخص MAE حاکی از آن است که به ترتیب در ۸۱ و ۱۳ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه مقدار خطا در تخمین متوسط دمای هوا به ۲ و ۵ درجه سانتی‌گراد محدود شده است. براساس شاخص MAE مشخص است که بیشترین میزان خطا در شبیه‌سازی تغییرات ماهانه دما توسط مدل‌های اقلیمی در ایستگاه‌های اصفهان و خوزستان بوده است. به عنوان مثال، میزان شاخص خطا در ایستگاه‌ها فوق به ترتیب برابر است با ۸/۲ و ۱۴/۴ درجه سانتی‌گراد. ارزیابی نتایج براساس شاخص آماری MBE که نشان‌دهنده میانگین انحراف در داده‌ها است حاکی از عملکرد قابل قبول مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی متوسط دمای هوا در ۹۰ درصد از ایستگاه‌های مطالعاتی می‌باشد، به طوری که محدوده تغییرات مقدار شاخص اریبی در این ایستگاه ۲- تا ۲ درجه سانتی‌گراد تخمین زده شده است. با توجه به نتایج مدل‌های اقلیمی در تخمین متوسط دمای هوا در ایستگاه‌های تهران و اصفهان با برخورداری از شاخص اریبی ۲/۲ و ۳/۲ درجه سانتی‌گراد با اندکی بیش‌برآوردی و در ایستگاه خوزستان (MBE برابر با ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد) با کم‌برآوردی همراه بوده‌اند. براساس نتایج، عملکرد خروجی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم تغییر اقلیم از نظر میزان خطا و میزان اریبی در تخمین متوسط دما هوا به ترتیب در بیش از ۹۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه مناسب ارزیابی می‌شود.



بارش

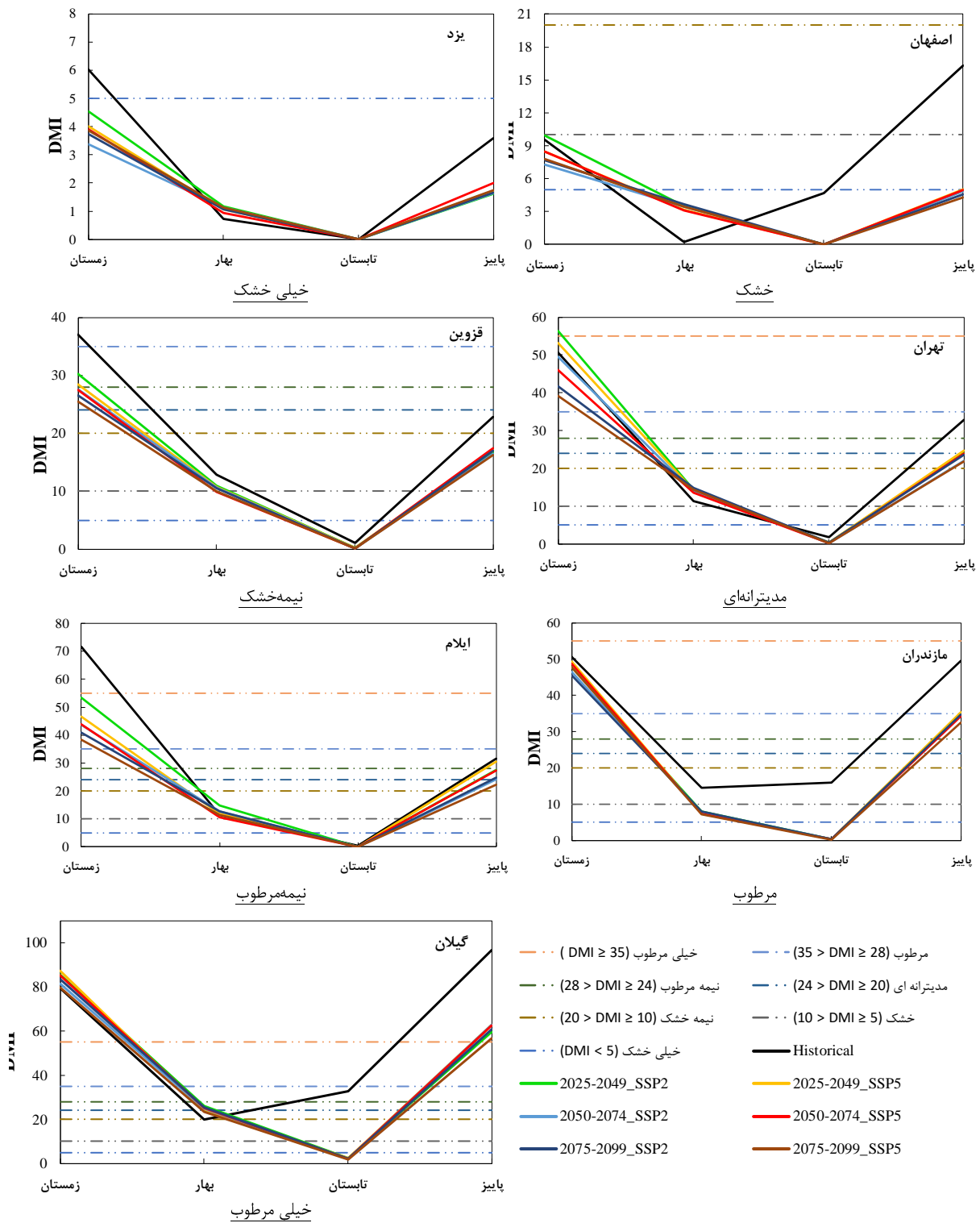
دما

شکل ۲. تغییرات مکانی شاخص‌های MAE و MBE در شبیه‌سازی متغیرهای جوی بارش و متوسط دمای هوا در دوره پایه SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و طی دوره‌های آبی کمتر از فصل‌های تابستان و پاییز تخمین زده شده است. به‌طور کلی مشخص است که تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در سه دوره آبی نسبت به دوره پایه، کاهش در مقدار شاخص خشکی و حرکت به سمت اقلیم‌های خشک تا خیلی‌خشک در بسیاری از ایستگاه‌های مورد مطالعه مشهود می‌باشد. با توجه به نتایج، شدت این تغییرات در فصول تابستان و پاییز بیش از بهار و زمستان پیش‌بینی می‌شود که می‌تواند از تأثیرات جدی بر کشاورزی دیم و آبی، تغییر در الگوی کشت، کاهش تولیدات کشاورزی و در نهایت تهدیدی برای امنیت غذایی کشور به‌شمار رود. بنابراین تنظیم استراتژی‌های کشاورزی منطبق با شرایط اقلیمی جدید، تامین منابع آبی پایدار و مدیریت دقیق آب منابع آبی با هدف سازگاری با تغییرات اقلیمی و کاهش خسارات ناشی از آن الزامی بنظر می‌رسد.

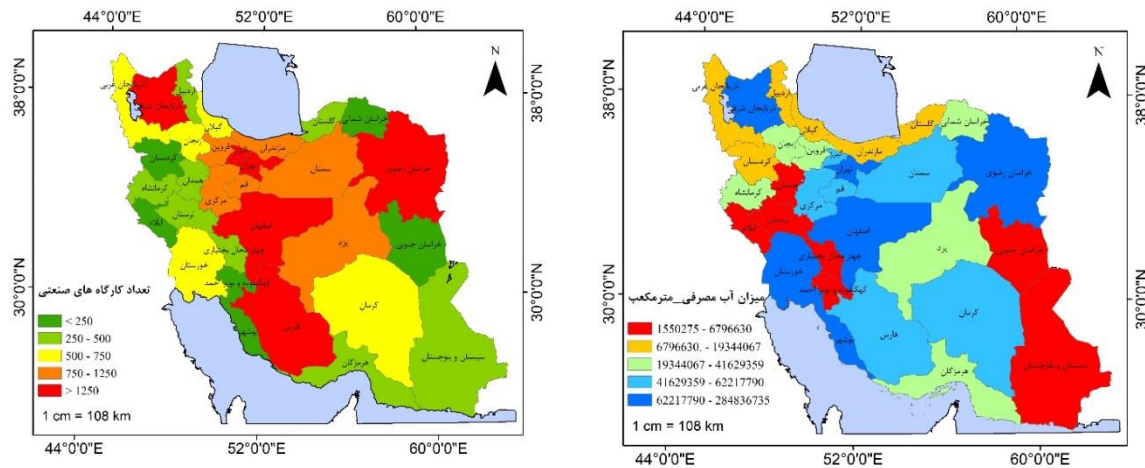
تأثیر تغییرات اقلیمی بر صنایع

در این بخش از پژوهش، برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر صنایع، به بررسی پراکندگی تعداد کارگاه‌های صنعتی بیش از ده نفر در استان‌های مختلف کشور و میزان آب مصرفی سالانه این صنایع پرداخته شده است. لازم به‌ذکر است که تعداد کارگاه‌های صنعتی و میزان آب مصرفی آن‌ها براساس آماربرداری سازمان آمار کشور در سال ۱۴۰۰ می‌باشد که در سایت سازمان آمار در دسترس قرار دارد (<https://amar.org.ir/statistical-information>). در شکل ۴ تعداد کارگاه‌های صنعتی با بیش از ده نفر شاغل و مقدار آب مصرفی سالانه توسط این صنایع به تفکیک استان‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به شکل ۴ مشخص است که استان‌های اصفهان، فارس، تهران، البرز، آذربایجان شرقی و خراسان رضوی را می‌توان از قطب‌های صنعتی کشور دانست به‌طوری‌که تعداد کارگاه‌های صنعتی در این استان‌ها بیش از ۱۲۵۰ عدد عنوان شده است. پس از استان‌های فوق، مازندران، قزوین، مرکزی، قم، سمنان، یزد با ۷۵۰ تا ۱۲۵۰ کارگاه صنعتی در رتبه دوم قرار دارند. مشخص است که مصرف آب صنایع در این استان‌ها به مقدار قابل‌توجهی بالاست؛ به عنوان مثال، در استان‌های آذربایجان شرقی، تهران، اصفهان، خوزستان، بوشهر، خراسان رضوی میزان مصرف آب توسط صنایع در یک سال بیش از ۶۲۲۱۷۹۰ مترمکعب تخمین زده شده است. نکته قابل‌توجه بالا بودن میزان مصرف صنایع در استان‌های خوزستان (۷۵۰ کارگاه صنعتی) و بوشهر (۱۹۹ کارگاه صنعتی) علی‌رغم تعداد کمتر صنایع موجود در این دو استان می‌باشد.

دوره‌های آبی در حداقل مقدار خود یعنی صفر که بیانگر اقلیم خیلی‌خشک است قرار دارد. با توجه به نتایج در فصل بهار شاخص خشکی با اندکی افزایش نسبت به دوره پایه همراه می‌باشد که این میزان در تغییر نوع اقلیم منطقه اثرگذار نیست. بیشترین میزان افزایش شاخص خشکی در فصل بهار مربوط به دوره اول و تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 می‌باشد، (میزان شاخص خشکی در این حالت برابر است ۱/۱۷). بررسی نتایج در ایستگاه اصفهان حاکی از کاهش قابل‌توجه در مقدار شاخص دوارتن به‌ویژه در فصل‌های تابستان و پاییز می‌باشد. به‌طوری‌که طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه اصفهان در دوره پایه در فصل‌های تابستان و پاییز به‌ترتیب خشک و نیمه‌خشک بوده است، درحالی‌که طی دوره‌های آبی و تحت سناریوهای اقلیمی مقدار شاخص دوارتن به کم‌تر از ۵ (اقلیم خیلی‌خشک) کاهش یافته است که با نتیجه معین‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) نیز همخوانی دارد؛ به‌طوری‌که این محققین با بررسی اثر تغییر اقلیم بر ایستگاه‌های استان اصفهان تحت سناریوهای اقلیمی RCP نشان دادند که مقدار شاخص دوارتن در ایستگاه سینوپتیک اصفهان طی دوره‌های آبی و تحت سناریوهای اقلیمی گزارش پنجم تغییر اقلیم به سمت اقلیم خیلی‌خشک کاهش خواهد یافت. تغییرات مقدار شاخص خشکی در ایستگاه قزوین حاکی از کاهش شاخص دوارتن و تغییر وضعیت اقلیمی منطقه به سمت نیمه‌خشک و خیلی‌خشک در فصل‌های بهار تا پاییز و مرطوب در فصل زمستان دارد. درحالی‌که در دوره پایه اقلیم ایستگاه قزوین در فصل‌های بهار، پاییز و زمستان به‌ترتیب خشک، مدیترانه‌ای و خیلی‌مرطوب بوده است. در ایستگاه تهران در فصل‌های تابستان و پاییز همچنان روند کاهشی در مقدار شاخص خشکی مشهود است. درحالی‌که در فصل بهار و زمستان چنین نمی‌باشد. بررسی نتایج در ایستگاه ایلام حاکی از وجود روند کاهشی قابل‌توجهی در مقدار شاخص خشکی دوارتن در فصل زمستان می‌باشد. به‌طوری‌که بیشترین و کمترین مقدار کاهش در شاخص خشکی به‌ترتیب ۴۶/۶ و ۲۵/۷ درصد تخمین زده شده است و به دوره سوم (تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5) و دوره اول (تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5) تعلق دارد. روند تغییرات مقدار شاخص خشکی در ایستگاه‌های واقع در اقلیم مرطوب و خیلی‌مرطوب همچون مازندران و گیلان نیز حاکی از کاهش قابل‌توجهی در مقدار شاخص خشکی در فصل‌های بهار و پاییز می‌باشد، به‌طوری‌که مقدار کاهش شاخص دوارتن منجر به ایجاد تغییر در طبقه‌ی اقلیمی در منطقه شده است. درحالی‌که در فصل‌های بهار و زمستان میزان کاهش در شاخص خشکی نسبت به دوره پایه و تحت سناریوهای اقلیمی



شکل ۳. تغییرات فصلی مقدار شاخص خشکی دوماه‌تن تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایستگاه‌های یزد، اصفهان، قزوین، تهران، ایلام، مازندران و گیلان به‌عنوان نمونه

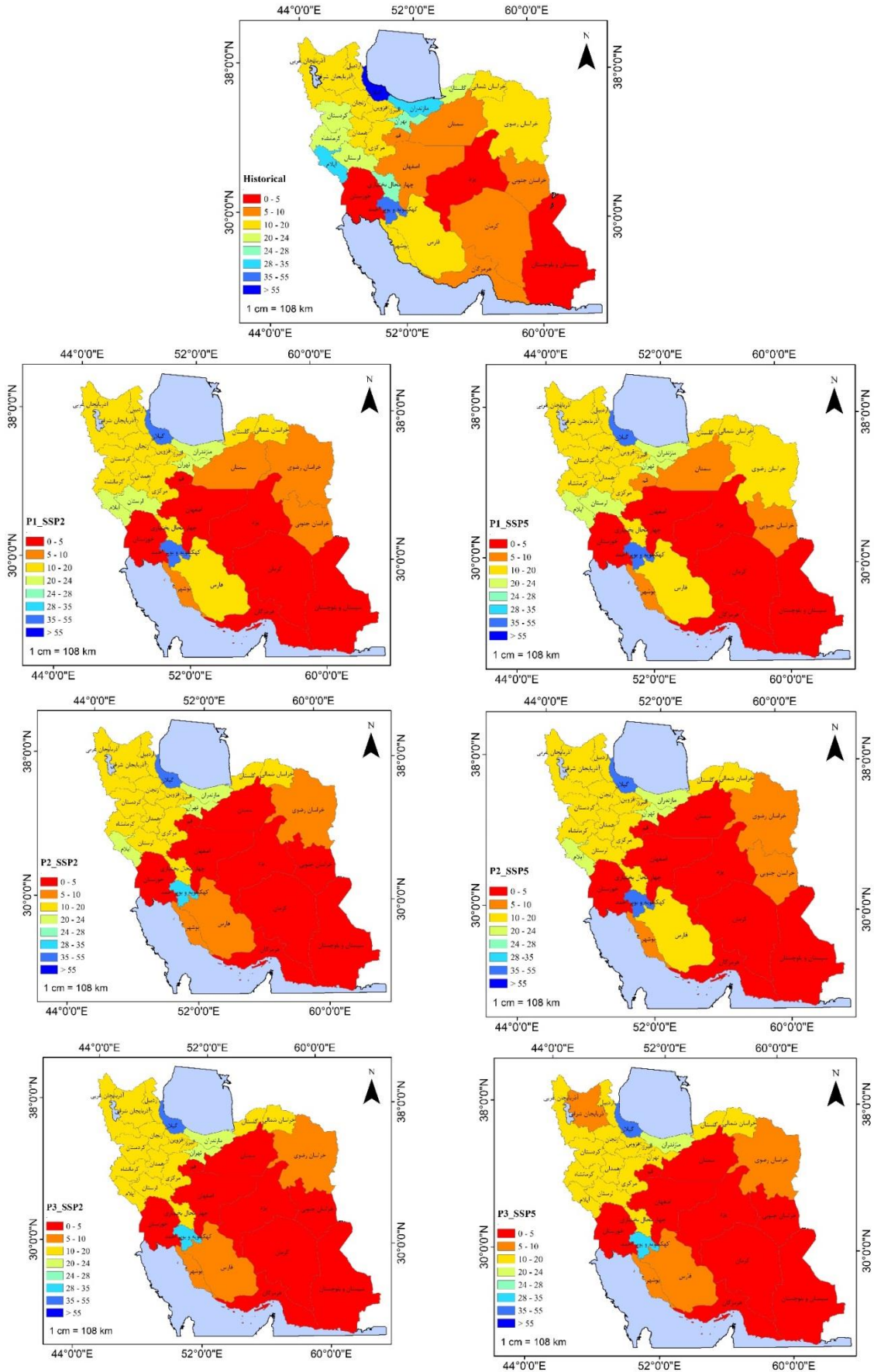


شکل ۴. تعداد کارگاه‌های صنعتی و میزان مصرف آب توسط صنایع (آماربرداری سازمان آمار، ۱۴۰۰)

بارش یا افزایش دمای هوا می‌تواند از نظر فیزیکی و روانشناختی در کارایی و بهره‌وری نیروی کار موثر واقع شود، به طوری که گرم و خشک شدن شرایط اقلیمی فعالیت انسان‌ها را دشوار نموده و منجر به پایین آمدن تمرکز نیروی کار خواهد شد. از سوی دیگر، بالا بودن مصرف آب توسط صنایع در این استان‌ها می‌تواند وضعیت منابع آبی در آن‌ها را تحت تاثیر قرار دهد و خود نیز یکی دیگر از علت‌های تشدید کم‌آبی در مناطق شود.

با توجه به شکل ۵ مشخص است که با کاهش مقدار شاخص خشکی دومارتن تحت هر دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5، شرایط اقلیمی در استان‌های مازندران، گلستان، ایلام، چهارمحال و بختیاری و فارس نیز به مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و نیمه‌خشک تغییر یافته است. به طور کلی براساس نتایج می‌توان چنین انتظار داشت که اقلیم تعداد زیادی از ایستگاه‌ها در دوره آینده به سمت خشک‌تر شدن پیش رود که این اتفاق هم‌راستا با نتایج تحقیقات بختیاری و همکاران (2021) می‌باشد. این محققین با بررسی روند تغییرات شاخص خشکی (نسبت تبخیر و تعرق به بارش) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ نشان دادند که افزایش خشکی تحت سناریوهای اقلیمی در تعداد زیادی از ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به وابستگی صنایع به آب و میزان مصرف آب توسط صنایع که پیش‌تر مورد بررسی قرار گرفت، می‌توان چنین عنوان نمود که کاهش شدید منابع آبی در تعداد زیادی از استان‌های ایران در نتیجه تغییرات اقلیمی می‌تواند فعالیت صنایع را نیز تحت تاثیر قرار دهد، بنابراین انتظار می‌رود که بهره‌وری اقتصادی استان‌ها نیز با کاهش روبرو شود.

برای بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی در آینده، متوسط سالانه مقدار شاخص دومارتن تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و در سه دوره آتی محاسبه و طبقه‌بندی اقلیمی منطبق با جدول ۱ به تفکیک استان‌های مختلف انجام شده است (شکل ۵). با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در سه دوره زمانی آتی استان‌های واقع در مرکز، جنوب‌شرق کشور و همچنین خوزستان در گروه اقلیمی خیلی خشک واقع شده‌اند. با توجه به نتایج مشخص است که استان‌های یزد، خوزستان و سیستان و بلوچستان همچون دوره پایه تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و در سه دوره زمانی آتی با برخورداری از شاخص خشکی کمتر از ۵ و دارای اقلیمی خیلی خشک می‌باشند. در شکل ۴ نشان داده شد که تعداد کارگاه‌های صنعتی در این استان به ترتیب ۱۱۴۴، ۷۵۰ و ۳۶۴ و میزان مصرف آب صنایع در این استان‌ها به ترتیب ۳۸۱۶۷۶۳۱، ۲۸۴۸۳۶۷۳۵ و ۶۴۵۴۷۲۰ مترمکعب می‌باشد. علاوه بر این، استان‌های اصفهان، قم، سمنان، کرمان، هرمزگان در هر سه دوره آتی و تحت سناریوهای اقلیمی با کاهش مقدار شاخص خشکی به کمتر از ۵ در اقلیم خیلی خشک قرار خواهند گرفت، در حالی که در دوره پایه در اقلیم خشک قرار داشته‌اند. بررسی وضعیت صنایع در این استان‌ها حاکی از آن است که تعداد کارگاه‌های صنعتی در استان‌های اصفهان، قم و سمنان نیز بیش از ۷۵۰ و مصرف آب توسط صنایع نیز بالا می‌باشد. با فرض ثابت بودن تعداد صنایع در دوره‌های آتی، با توجه به بالا بودن تعداد صنایع در این استان‌ها و همچنین تغییر وضعیت اقلیم آن‌ها به سمت خیلی خشک، می‌توان انتظار داشت که فعالیت صنایع در آن‌ها در دوره‌های آتی با مشکلاتی ناشی از کمبود آب مواجه شود. علاوه بر این، تغییر در شرایط اقلیمی به شکل کاهش



شکل ۵. طبقه‌بندی شاخص خشکی دومارتن تحت سناریوهای اقلیمی SSP5-8.5 و SSP2-4.5 در دوره‌های آبی و پایه

نتیجه‌گیری

طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه بر مبنای داده‌های مشاهداتی در دوره پایه نشان داد که بخش وسیعی از کشور (حدود ۷۵ درصد از استان‌های مورد مطالعه) دارای اقلیم نیمه‌خشک، خشک و خیلی خشک می‌باشند. همچنین بررسی تغییرات فصلی و سالانه مقدار شاخص خشکی طی دوره‌های آبی و تحت سناریوهای مختلف حاکی از آن است که روند تغییرات اقلیمی با خشک‌تر شدن شرایط آب و هوایی در تعداد زیادی از استان‌ها همراه خواهد بود. با فرض ثابت بودن تعداد صنایع در دوره‌های آبی، با توجه به بالا بودن تعداد کارگاه‌های صنایع بیش از ده نفر در برخی از استان‌ها همچون اصفهان، قم، سمنان و یزد و از سوی دیگر وابستگی کارگاه‌های صنعتی مذکور به آب (با توجه به مصرف بالای آب توسط کارگاه‌ها)، انتظار می‌رود که فعالیت و تولید کارگاه‌های صنعتی در دوره‌های آبی تحت تاثیر قرار گیرد. از سوی دیگر، بالا بودن مصرف آب توسط کارگاه‌های صنعتی در استان‌های با اقلیم خشک تا خیلی خشک می‌تواند شرایط منابع آبی استان‌ها را تحت تاثیر قرار داده و بحرانی‌تر نماید.

از آنجایی‌که بررسی دوره‌های خشک و مرطوب تحت تاثیر تغییرات اقلیمی برای مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح در بخش‌های مختلف جامعه با هدف کاهش پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم ضروری بنظر می‌رسد. پژوهش حاضر با هدف پایش و بررسی وضعیت خشکی بر اساس شاخص خشکی دومارتن تحت جدیدترین سناریوهای اقلیمی شامل SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در نمونه‌های مختلف اقلیمی در سراسر ایران به انجام رسیده است. برای این منظور از داده‌های اقلیمی مربوط به پنج GCM استفاده شده است. بررسی در دوره پایه طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ و پیش‌نگری طی سه دوره آبی از ۲۰۲۵ تا ۲۰۹۹ انجام شده است. نتایج در دوره پایه حاکی از عملکرد قابل‌قبول خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی بارش و دما در تعداد زیادی از ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. به‌طوری‌که بر اساس شاخص MAE میزان خطا در شبیه‌سازی بارش و دما به‌ترتیب در بیش از ۷۵ و ۹۰ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه قابل‌قبول ارزیابی می‌شود. یافته‌های پژوهش در رابطه با تعیین

Reference:

- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., Castelletti, A., & Magliocca, N. (2019). Future Drought Risk in Africa: Integrating Vulnerability, Climate Change, and Population Growth. *Science of the Total Environment*, 662, 672–686.
- Alizadeh, A. (2014). *Principle of Applied Hydrology*. Emam Reza University Press. (In Persian).
- Andrade, C., Contente, J., & Santos, J. A. (2021). Climate Change Projections of Aridity Conditions in the Iberian Peninsula. *Water*, 13(2035). <https://doi.org/10.20944/preprints202106.0536.v1>
- Bahri, M., Dastorani, M., & Goodarzi, M. (2015). Assessment of future drought under climate change status, case study: Eskandari Basin, Isfahan Province. *Watershed Engineering and Management*, 7(2), 157–171. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.101259>. (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).
- De Martonne, E. (1926). Aerisme, et Indices d'aridite. *Comptes Rendus de L'Academy of Science*, 182, 1395–1398.
- 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.
- Dey, P., & Mishra, A. (2017). No Title Separating the Impacts of Climate Change and Human Activities on Streamflow: A Review of Methodologies and Critical Assumptions. *Journal of Hydrology*, 548, 278–290.
- IPCC. (2007). Summary for Policymakers in Climate Change, The Physical Science Basis, *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers*.
- Kalanaki, M., & Karandish, F. (2015). Predicting The Long-term Effect of Climate Change on Climatic Variables in Humid Region. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 5(4), 131–149. (In Persian).
- Koochi, S., Azizian, A., & Mazandaranzadeh, H. (2022). The Effects of Climate Change on Drought Conditions Using Fuzzy Logic Under SSP3 and SSP5 Scenarios. *Iran-Water Resources Research*, 18(3), 1–17. (In Persian).
- Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., MohseniSaravi, M., Khosravi, H., & MortezaieFarizhendi, G. (2018). Performance of Series Model CMIP5 in Simulation and Projection of Climatic Variables of Rainfall, Temperature and Wind Speed (Case Study: Yazd). *Physical Geography Research Quarterly*, 50(3), 593–609. <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2018.248177.1007156>. (In Persian).
- Mirgol, B., Nazari, M., RamezaniEtedali, H., & Zamanian, K. (2021). Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. *Meteorological Applications*, 28(4).

- Moeinzadeh, M. (2019). Evaluation of Climate Change Effects on Meteorological Drought under RCP Scenarios (Case Study: Selected Stations in Isfahan Province). *Master of Sciences Thesis*. Kashan University, Isfahan.
- Mohan, S., & Bhaskaran, P. K. (2019). Evaluation of CMIP5 climate model projections for surface wind speed over the Indian Ocean region. *Climate Dynamics*, 53(9–10), 5415–5435. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04874-2>
- Pirnia, A., Golshan, M., Bigonah, S., & Solaimani, K. (2018). Investigating the drought characteristics of Tamar basin (upstream of Golestan Dam) using SPI and SPEI indices under current and future climate conditions. *Journal of Eco Hydrology*, 5(1), 215–228. <https://doi.org/10.22059/IJE.2018.239226.689>. (In Persian).
- Radmanesh, Y., SaraiTabrizi, M., Etedali, H. R., Azizian, A., & Babazadeh, H. (2023). Comparative evaluation of the accuracy of re-analysed and gauge-based climatic data in Iran. *Journal of Earth System Science*, 132(4). <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02202-1>
- Ramezani Etedali, H., Koohi, S., & Partovi, Z. (2023). Evaluation of Ensemble Climate Model development methods based on CMIP5 to investigate the potential of water harvesting from air humidity. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(11), 1609–1625. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364087.669553>. (In Persian).
- Rezaei, M., Nohtani, M., Moghaddamnia, A., Abkar, A., & Rezaei, M. (2013). Performance Evaluation of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Forecasting Precipitation in two Arid and Hyper arid Regions. *Journal of Water and Soil*, 28(4), 836–845. <https://doi.org/10.22067/JSW.V0I0.23119>. (In Persian).
- Sarlak, N., & Agha OMM. (2018). Spatial and Temporal Variations of Aridity Indices in Iraq. *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 133(3), 1-11.
- Shokoohi, A., & Morovati, R. (2014). An investigation on the Urmia Lake Basin drought using RDI and SPI indices. *Watershed Engineering and Management*, 6(3), 232–246. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2014.101628>. (In Persian).
- Spinonia, J., Barbosaa, P., De Jagera, A., McCormicka, N., Naumanna, G., V., Vogta, J., Magnib, D., Masanteb, D., & Mazzeschic, M. (2019). A New Global Database of Meteorological Drought Events from 1951 to 2016. *Journal of Hydrology*, 22, 1–24.
- Xia, H., Zhuang, J., & Yu, D. (2013). Combining Crowding Estimation in Objective and Decision Space With Multiple Selection and Search Strategies for Multi-Objective Evolutionary Optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 44(3). <https://doi.org/10.1109/TCYB.2013.2256418>

یادداشت‌ها

¹ Spinonia

² Andrade