

Assessing the Production of Cereals Exposed to Drought Due to Climate Change in Iran

Hadi Ramezani Etedali^{*}  and Sakineh Koohi¹

(Received: September 4-2024; Revised: October 10-2024; Accepted: November 17-2024)

1. 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

Agriculture, as a crucial economic and social sector in Iran, has always been significantly influenced by weather conditions, water availability, and farm management practices. Enhancing productivity and optimizing resource management in crop production are essential to achieving sustainable agricultural development and ensuring food security. This research aimed to investigate how much wheat, barley, and corn production, separately from irrigated and rainfed crops, will be affected by the severity of climatic drought (based on the CMIP6) in Iran. This research was carried out using the amount of wheat, barley, and corn production in all the provinces, which was provided by the Agricultural Jihad Organization during the years 1371 to 1402. Climate data was obtained from the NEX-GDDP database, and the De Martonne aridity index was calculated to investigate changes in aridity under climate scenarios. The results indicated that during the baseline period, the production of rainfed wheat, barley, and corn under semi-arid to very arid climatic conditions was approximately 2,076, 434, and 15 thousand tons per year, respectively. With the intensification of arid conditions across the country, these production levels are projected to increase to 3,333, 693, and 16 thousand tons under the SSP2 scenario and further rise to 3,558, 842, and 16 thousand tons under the SSP5 scenario. Additionally, the production of irrigated wheat, barley, and corn in semi-arid to very arid climatic conditions during the baseline period stands at approximately 6,240, 1,683, and 5,842 thousand tons, respectively. Under the SSP2 climate scenario, the production is expected to reach about 7,126, 1,757, and 6,253 thousand tons, while in the SSP5 scenario, the estimated production is approximately 7,348, 1,780, and 6,324 thousand tons. The findings revealed notable spatial differences in crop production across the country, highlighting that the climatic conditions, particularly in the central, southern, southeastern, and southwestern regions, are becoming increasingly arid. It is crucial to implement smart planning and policies, adopt advanced technologies, and improve the management of water and soil resources to mitigate the adverse impacts of these changes and better adapt to evolving conditions. Addressing these challenges and implementing effective measures are essential steps toward achieving sustainability in the agriculture and natural resources sectors.

Keywords: Climate Change, Aridity, Cereal Production, De Martonne Aridity Index

How to cite this article: Ramezani Etedali, H. and Koohi, S. 2025. Assessing the Production of Cereals Exposed to Drought Due to Climate Change in Iran. *J. Water and Soil Sci.* 29(1): 33-49. DOI: [10.47176/jwss.29.1.50627](https://doi.org/10.47176/jwss.29.1.50627)

Copyright © 2025 Ramezani Etedali and Koohi. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

ارزیابی میزان تولید غلات در معرض خشکی ناشی از تغییرات اقلیمی در ایران

هادی رمضانی اعتدالی*^{id} و سکینه کوهی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۷/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۷)

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ه)، قزوین، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

کشاورزی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های اقتصادی و اجتماعی در ایران همواره تحت تأثیر شرایط آب‌وهوایی، منابع آب و مدیریت مزرعه قرار داشته است. افزایش بهره‌وری و بهبود مدیریت منابع در تولید محصولات زراعی می‌تواند به توسعه پایدار کشاورزی و امنیت غذایی کمک کند. هدف این پژوهش بررسی این مورد است که چه میزان از تولید گندم، جو و ذرت در کشور به تفکیک کشت‌های آبی و دیم تحت تأثیر چه شدتی از خشکی اقلیمی (بر مبنای مجموعه مدل‌های برونداد اقلیمی سری ششم: CMIP6) قرار خواهد گرفت. این پژوهش با استفاده از میزان تولید محصولات گندم، جو و ذرت به تفکیک کشت‌های آبی و دیم در استان‌های کشور طی سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۲ که توسط سازمان جهاد کشاورزی ارائه شده، انجام شده است. برای بررسی تغییرات خشکی تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی، داده‌های اقلیمی از پایگاه NEX-GDDP دریافت و شاخص خشکی دومارتن مینا بوده است. بر اساس نتایج مشخص شد که میزان تولید گندم، جو و ذرت دیم که طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ (دوره پایه) تحت شرایط اقلیمی نیمه‌خشک تا خیلی خشک قرار داشتند، به ترتیب حدود ۲۰۷۶، ۴۳۴ و ۱۵ هزار تن است که با گسترش شرایط خشکی در کشور طی دوره آتی و تحت سناریوی SSP2 به ۶۹۳، ۳۳۳۳ و ۱۶ هزار تن و تحت سناریوی SSP5 به ۸۴۲، ۳۵۵۸ و ۱۶ هزار تن افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین میزان تولید گندم، جو و ذرت آبی در معرض شرایط اقلیمی نیمه‌خشک تا خیلی خشک در ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ (دوره پایه) به ترتیب ۶۲۴۰، ۱۶۸۳ و ۵۸۴۲ هزار تن، تحت سناریوی اقلیمی SSP2 حدود ۷۱۲۶، ۱۷۵۷ و ۶۲۵۳ هزار تن و تحت سناریوی SSP5 به ترتیب حدود ۷۳۴۸، ۱۷۸۰ و ۶۳۲۴ هزار تن تخمین زده شده است. بر اساس نتایج مشخص شد که شرایط اقلیمی در کشور و به‌ویژه در مناطق مرکزی، جنوب، جنوب شرقی و جنوب غربی کشور به سمت خشک‌تر شدن پیش می‌رود؛ بنابراین، برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه، استفاده از فناوری‌های نوین و بهبود مدیریت منابع آب‌و خاک می‌تواند به کاهش اثرات منفی ناشی از این تغییرات و سازگاری بهتر با شرایط جدید کمک کند. توجه به این مسائل و اجرای راهکارهای مؤثر از اهمیت زیادی به‌منظور رسیدن به پایداری در بخش کشاورزی برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، خشکی، تولید غلات، شاخص خشکی دومارتن

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی نگرانی و چالش‌های زیادی در زمینه پایداری در بخش کشاورزی به وجود آورده است (۹). از آنجایی که وجود سیستم کشاورزی پایدار یکی از ملزومات برای تضمین امنیت غذایی و همچنین رقابت ملی در سطح اقتصاد جهانی به شمار می‌رود؛ بنابراین، دستیابی به آن در سطح ملی و محلی دارای اهمیت است (۲۰). اما وقوع تغییرات اقلیمی و افزایش احتمال وقایع حدی اقلیمی چالش‌هایی در راه رسیدن به کشاورزی پایدار به‌ویژه برای مناطق خشک و نیمه‌خشک به وجود آورده است. به‌طوری که مطالعه‌های مختلف نشان داده است که کمترین تغییرات در بارش و دمای هوا می‌تواند با آسیب‌های قابل‌توجهی بر کشاورزی و اقتصاد همراه باشد (۱). در واقع جنبه‌های مختلف تغییر اقلیم می‌تواند با تأثیرهای متفاوتی بر عملکرد غلات و در نتیجه میزان تولید محصولات همراه باشد. کشور ایران نیز از جمله مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود؛ به‌طوری که میزان متوسط بارندگی سالانه در کشور کمتر از یک سوم مقدار جهانی (حدود ۲۳۰ میلی‌متر) عنوان شده است. همچنین تغییرات مکانی بارش‌ها در سطح کشور، از ۵۰ میلی‌متر در مرکز، جنوب و شرق کشور تا ۲۰۰۰ میلی‌متر در شمال کشور در نوسان است (۲). در چنین شرایطی منابع آب و همچنین سیستم کشاورزی کشور ایران جزء موارد آسیب‌پذیرتر نسبت به وقوع تغییرات حدی تغییر اقلیم به‌شمار می‌روند.

پژوهش‌هایی در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم در بخش‌های مختلف کشاورزی به انجام رسیده است. برای نمونه، صلواتی و همکاران (۲۶) در پژوهشی به مطالعه روند تغییرات شاخص خشکی (AI (Aridity Index طی دوره ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰ در ایتالیا پرداختند. نتایج نشان داد که خشک‌تر شدن منطقه در اثر تغییرات جوی مشهود است. همچنین افزایش خشکی منجر به ایجاد مشکلاتی در منطقه برای تأمین آب مورد نیاز کشاورزی شده است. در مطالعه‌ای روحانی و همکاران (۲۳) با بررسی تأثیر تغییرات جوی بر عملکرد ذرت در تانزانیا نشان

دادند که افزایش دو درجه دمای هوا در طول دوره رشد با ۱۳ درصد کاهش عملکرد ذرت همراه است. همچنین با افزایش ۲۰ درصدی تغییرات بارش در فصل کشت، عملکرد ذرت حدود ۴ درصد کاهش دارد. صابرعلی و همکاران (۲۴) به پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر میزان عملکرد گندم آبی در منطقه تربت‌جام بر اساس مدل MarkSim و تحت ۴ سناریوی اقلیمی RCPs پرداختند. این پژوهشگران برای شبیه‌سازی رشد گندم از مدل DSSAT استفاده کردند. نتایج نشان داد که این گیاه طی دوره ۲۰ ساله پایه با افزایش تولید ماده خشک و عملکرد مواجه بوده است. مندنی و همکاران (۱۶) در پژوهشی با شبیه‌سازی تأثیر تغییر اقلیم بر مراحل فنولوژیک و عملکرد ذرت در کرمانشاه تحت تأثیر سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نشان دادند که ویژگی‌های مورد بررسی از ذرت در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه با کاهش همراه است. سورا و همکاران (۲۸) در پژوهشی به بررسی آسیب‌پذیری برنج تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در هند پرداختند. این پژوهشگران نشان دادند که عملکرد برنج آبی در دوره‌های آتی ممکن است از ۴ تا ۱۰ درصد کاهش داشته باشد. همچنین عملکرد برنج دیم می‌تواند با ۲/۵ تا ۶ درصد کاهش همراه باشد. همچنین لی و همکاران (۱۳) آسیب‌پذیری گندم زمستانه نسبت به خشکی را تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 در سطح کشور چین مطالعه کردند. نتایج نشان داد که کاهش عملکرد گندم زمستانه در اثر خشکی اتفاق خواهد افتاد. مهرآذر و همکاران (۱۴) به ارزیابی عملکرد گندم، جو، ذرت و یونجه تحت تأثیر سناریوهای اقلیمی AR5 در دشت هشتگرد پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی منجر به کاهش ۲/۶ درصد تا ۱۵ درصدی در تولید محصولات غالب منطقه خواهد شد. در مطالعه‌ای افشارتبار و همکاران (۳) به بررسی اثرهای سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات زراعی در شهرستان مرودشت پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین کاهش عملکرد در محصولات گوجه‌فرنگی، گندم و برنج و بیشترین افزایش عملکرد در محصولات یونجه و جو اتفاق خواهد افتاد. در پژوهشی

این مسئله است که چه میزان از تولید غلات (گندم، جو و ذرت) در سطح کشور، تحت چه شدتی از خشکی اقلیمی قرار خواهند گرفت. برای این منظور فرض شده است که متوسط میزان تولید هر یک از غلات طی دوره سی ساله (۱۳۷۱ تا ۱۴۰۲) در دوره آینده نیز وجود داشته باشد. برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم از ۵ مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای جدیدترین گزارش اقلیمی (SSP2-4.5 و SSP5-8.5) در دوره پایه (۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴) و دوره آتی (۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹) استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش بر ۳۱ استان کشور ایران متمرکز است که از نظر جغرافیایی، اقلیمی و کشاورزی بسیار متنوع هستند. ایران کشوری با موقعیت جغرافیایی ویژه در جنوب غربی آسیا است که از شمال به دریای خزر و از جنوب به خلیج فارس و دریای عمان محدود می‌شود. هر یک از استان‌های کشور دارای ویژگی‌های منحصر به فرد آب‌وهوایی هستند که بر نوع و میزان تولیدات کشاورزی آن‌ها تأثیرگذار است. استان‌های شمالی همچون گیلان و مازندران با بهره‌مندی از آب‌وهوای مرطوب و بارش زیاد، برای کشت محصولات زراعی نظیر برنج و چای مناسب هستند. در مقابل، استان‌های مرکزی و شرقی کشور مانند یزد، کرمان و سیستان و بلوچستان با اقلیم خشک و کم‌آب، با چالش‌های بیشتری در زمینه کشاورزی مواجه هستند. در این مطالعه مقادیر بارش و متوسط دمای هوا ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز ۳۱ استان کشور طی دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان داده‌های مشاهداتی در نظر گرفته شده است.

داده‌های اقلیمی

در این پژوهش، از داده‌های اقلیمی مجموعه NEX-GDDP (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections) استفاده شده است که به ارائه خروجی‌های جدیدترین گزارش تغییرات اقلیمی CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)

سلیمانی‌نژاد و همکاران (۲۷) اثرهای ناشی از تغییر اقلیم بر الگوی کشت زراعی در دشت مشهد را مطالعه کردند. نتایج نشان داد روند افزایش بارش، دمای بیشینه و کمینه فصلی تحت تغییرات اقلیمی اثر معنی‌داری بر عملکرد محصولات زراعی در این منطقه دارد. همچنین بیشترین اثرگذاری تغییرات اقلیم بر محصولات گندم و جو است. امانی و همکاران (۴) با مطالعه ریسک تغییر اقلیم و شاخص عملکرد تغییر اقلیم بر ارزش‌افزوده بخش کشاورزی در ۵۴ کشور نشان دادند که هر دو متغیر شاخص عملکرد تغییر اقلیم و ریسک تغییر اقلیم دارای تأثیر معنی‌داری بر ارزش افزوده بخش کشاورزی است. بررسی مطالعه‌های مختلف حاکی از آن است که تغییر اقلیم می‌تواند شرایط کشاورزی و میزان تولیدات کشاورزی در پهنه‌های مختلف را تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی برای کشاورزی با هدف کاهش اثرات منفی ناشی از تغییر اقلیم و خشکی برای رسیدن به کشاورزی پایدار از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. ارزیابی میزان آسیب‌پذیری محصولات کشاورزی نسبت به شرایط خشکی، گامی مهم برای درک اثرات ناشی از خشکی بر سیستم‌های کشاورزی است. از آنجایی‌که قرار گرفتن در معرض خطر یکی از سه جزء اصلی آسیب‌پذیری به‌شمار می‌رود، بنابراین بررسی این مورد که چه میزان تولید از غلات تحت چه درجه‌ای از خشکی قرار خواهند گرفت، می‌تواند امری دارای اهمیت برای برنامه‌ریزی‌های کلان مدیریتی در زمینه تولید پایدار محصولات کشاورزی باشد. یکی از نوآوری‌های این پژوهش ارزیابی شرایط اقلیمی، تولید غلات (به تفکیک کشت دیم و آبی) و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در سطح استانی و تحت جدیدترین سناریوهای اقلیمی است. بنابراین نتایج حاصل از پژوهش پیش‌رو می‌تواند در زمینه ارائه پیشنهادهایی برای بهبود مدیریت منابع آب‌و خاک و ارائه سیاست‌گذاری‌های هوشمندانه برای سازگاری کشاورزی هر استان با شرایط اقلیمی در کشور مفید واقع شود. گفتنی است که محدودیت در دسترسی به داده‌های زراعی در سطوح منطقه‌ای و محلی از مهم‌ترین محدودیت‌های این پژوهش است. با توجه به توضیحات گفته‌شده، هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر ارزیابی

بارش و دمای هوا محاسبه می‌شود که دو پارامتر اساسی در تحلیل وضعیت خشکی اقلیمی هستند، این شاخص به‌عنوان یکی از ابزارهای ارزیابی وضعیت اقلیمی استفاده شده است. این شاخص براساس نسبت میانگین بارش سالانه به دمای متوسط سالانه محاسبه می‌شود و از ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌ها برای تعیین میزان خشکی یا رطوبت یک منطقه به‌شمار می‌رود. شاخص دومارتن ابتدا در سال ۱۹۲۶ معرفی شد و از آن زمان تاکنون به‌دلیل سادگی در محاسبه و توانایی در تفکیک انواع اقلیم‌ها، در مطالعه‌های متعددی به کار گرفته شده است (۶). با کاهش مقدار شاخص دومارتن، شرایط اقلیمی خشک‌تر و افزایش آن بیانگر اقلیم مرطوب‌تر است. این شاخص به‌طور معمول در مقیاس‌های فصلی و سالانه استفاده شده و می‌تواند تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت اقلیم را به‌خوبی نشان دهد. طبقه‌بندی اقلیمی براساس تغییرات مقدار شاخص دومارتن در جدول ۲ ارائه شده است (۲۱).

$$DMI = \left(\frac{P}{T + 10} \right) \quad (1)$$

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

غلات مورد مطالعه

کشاورزی در ایران از دیرباز یکی از پایه‌های اصلی معیشت و اقتصاد بوده و بخش بزرگی از اشتغال و تولیدات غذایی کشور را به خود اختصاص داده است. در هر استان، محصولات کشاورزی با توجه به شرایط آب‌وهوایی و منابع آب کشت می‌شوند. گندم، جو و ذرت به‌عنوان ۳ غله اصلی در بسیاری از استان‌ها نقش کلیدی در تأمین امنیت غذایی کشور دارند. گندم به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین محصولات کشاورزی و راهبردی در ایران، نقشی کلیدی در تأمین امنیت غذایی کشور ایفا می‌کند. بررسی‌ها نشان داده است که حدود ۲۵ درصد مواد غذایی موجود در الگوی غذایی خانوارهای ایرانی مشتق شده از گندم است (۸). مصرف سرانه گندم در ایران حدود ۱۳۵ کیلوگرم در سال است که حدود ۲ برابر سرانه جهانی مصرف گندم است (۲۵). این گیاه ازجمله گیاهانی است که در مراحل رشد، به خشکی حساس است؛

در تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه (حدود ۲۷ کیلومتر) می‌پردازد. داده‌های استفاده‌شده شامل بارش و متوسط دمای هوا است که با توجه به اهمیت زیاد این پارامترها در محاسبه شاخص خشکی انتخاب شده‌اند. دوره زمانی استفاده‌شده برای داده‌های اقلیمی شامل دوره پایه از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ و پیش‌نگری آینده از تغییرات شاخص خشکی طی سال‌های ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹ تحت دو سناریوی انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به انجام رسیده است. سناریوی SSP2-4.5 نمایانگر شرایط توسعه پایدار با تعدیل مصرف انرژی است، درحالی‌که سناریوی SSP5-8.5 بیانگر مصرف زیاد انرژی و رشد سریع اقتصادی بر پایه سوخت‌های فسیلی است (۱۸ و ۲۲). برای این پژوهش، خروجی‌های پنج مدل گردش عمومی جو (GCM) شامل CanESM5، CNRM-CM6-1، GFDL-ESM4، HadGEM3-GC31-LL و MIROC6 استفاده شده است (جدول ۱). علت انتخاب مدل‌های گفته‌شده، قرارگیری آن‌ها در گروه مدل‌های برتر در مطالعه‌های انجام‌شده در سطح کشور در زمینه ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 تخمین بارش و دما است (۵، ۱۲، ۲۹ و ۳۱). با توجه به تأثیر مثبت بهینه‌سازی ضرایب مدل‌های اقلیمی و ادغام آن‌ها در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در پژوهش‌های مختلف، در پژوهش حاضر مقادیر بارش و دما مدل‌های اقلیمی با یکدیگر ادغام شده است (۱۵ و ۱۹). تخمین ضریب هر مدل طی فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم Evolutionary مربوط به تابع بهینه‌سازی Solver انجام شده است. تابع هدف برای بهینه‌سازی ضرایب مدل‌های اقلیمی، کمینه کردن شاخص خطا بین خروجی اقلیمی حاصل از ادغام پنج مدل و مقادیر مشاهداتی است. گفتنی است که دریافت داده‌های اقلیمی پایگاه از سامانه گوگل‌ارث‌انجین انجام شده است.

شاخص خشکی دومارتن (De Martonne)

در این مطالعه، با توجه به اینکه هدف از این مطالعه ارزیابی میزان غلات تحت تأثیر خشکی ناشی از تغییرات اقلیمی است و از آنجایی‌که شاخص دومارتن براساس نسبت میان دو متغیر اقلیمی

جدول ۱. مدل‌های گردش عمومی جو استفاده شده در این مطالعه (۳۰)

GCM	مرکز توسعه دهنده	تفکیک مکانی مدل اصلی (Long×Lat)	تفکیک مکانی NEX-GDDP (Long×Lat)
CNRM-CM6-1	مرکز ملی تحقیقات هواشناسی-فرانسه	0.50 × 0.50	0.25 × 0.25
CanESM5	مرکز مدل سازی و تحلیل آب و هوا، محیط زیست و تغییر اقلیم-کانادا	2.812 × 2.789	0.25 × 0.25
GFDL-ESM4	اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده آمریکا	1.25 × 1.00	0.25 × 0.25
HadGEM3-GC31-LL	مرکز هواشناسی Hadley	1.88 × 1.25	0.25 × 0.25
MIROC6	مؤسسه تحقیقات اتمسفر و اقیانوس - ژاپن	1.41 × 1.40	0.25 × 0.25

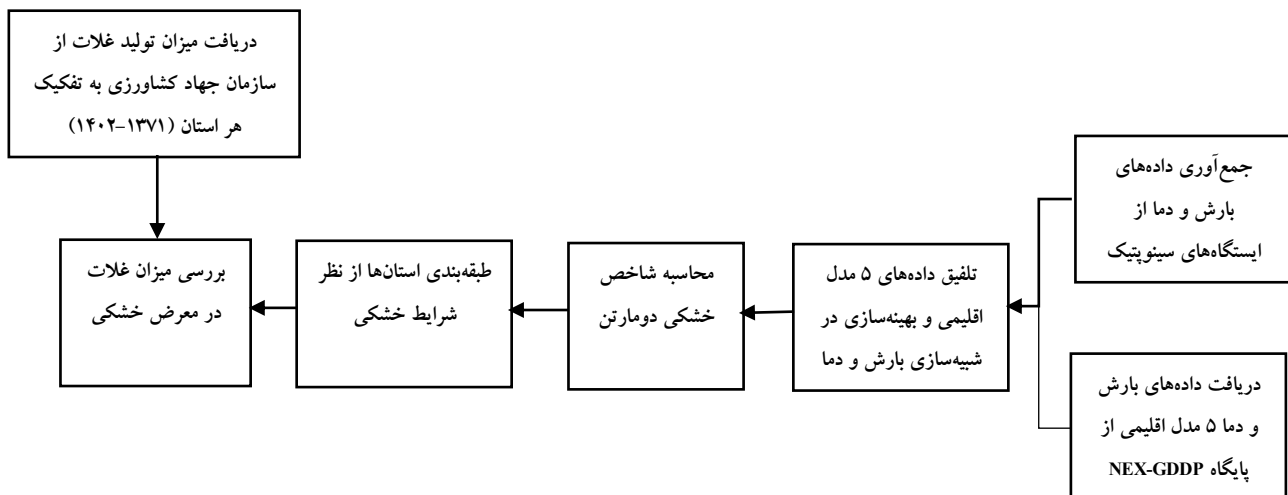
جدول ۲. طبقه بندی اقلیمی دومارتن (۲۱)

نوع اقلیم	شاخص خشکی	نوع اقلیم	شاخص خشکی
خیلی خشک	$0 \leq DMI < 5$	نیمه مرطوب	$24 \leq DMI < 28$
خشک	$5 \leq DMI < 10$	مرطوب	$28 \leq DMI < 35$
نیمه خشک	$10 \leq DMI < 20$	خیلی مرطوب نوع ۱	$35 \leq DMI < 55$
مدیترانه ای	$20 \leq DMI < 24$	خیلی مرطوب نوع ۲	$55 \leq DMI$

دانه های گرده، گلدهی و پر شدن دانه می تواند منجر به از بین رفتن کل محصول در منطقه شود (۱۱).

در این پژوهش، از میزان تولید سالانه گندم، جو و ذرت طی دوره سی ساله از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۲ که توسط سازمان جهاد کشاورزی به تفکیک هر استان منتشر شده است، برای بررسی سهم استان ها در تولید این سه غله استفاده شده است. همچنین همان طور که پیش تر نیز عنوان شد، فرض اصلی در پژوهش پیش رو این است که متوسط سی ساله میزان تولید هر غله در دوره آینده نیز وجود دارد؛ بنابراین در این پژوهش، عملکرد یا میزان تولید در سطح استان های شبیه سازی نشده است، بلکه فقط شرایط خشکی اقلیمی طی دوره های آتی بررسی شده و استان هایی که بر اساس آمار ۳۰ ساله در قطب تولید گندم، جو و ذرت هستند، از نظر شرایط اقلیمی مطالعه شدند. فلزچارت استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

به طوری که وقوع خشکی در زمان پنجه زنی و دانه بندی می تواند منجر به عدم باروری گیاه و یا پوکی دانه و ایجاد دانه های ریز شود (۱۱). جو از دیگر غلات مهم است که کشت آن در بیشتر نقاط کشور انجام می شود. جو به طور گسترده ای در تغذیه دام ها به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک ایران استفاده می شود؛ به طوری که علوفه جو در تغذیه دام از ارزشی حدود علوفه دانه ای ذرت برخوردار است. مقاومت برخی از ارقام جو نسبت به گندم در برابر خشکی و بیماری بیشتر است و در شرایط نامساعد عملکردی بیش از گندم دارند (۱۷). ذرت از دیگر محصولات کشاورزی مهم در ایران به شمار می رود که نقش قابل توجهی در اقتصاد کشاورزی کشور دارد. این محصول با توجه به کاربردهای گسترده اش در تغذیه دام، تولید علوفه و حتی مصرف انسانی اهمیت زیادی پیدا کرده است. مواجهه این گیاه با خشکی در مراحل تشکیل



شکل ۱. فلوچارت استفاده‌شده در این پژوهش

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{N} \quad (4)$$

که در آن، S_i : مقادیر داده‌های اقلیمی، $\bar{S}$: متوسط داده‌های اقلیمی، O_i : مقادیر مشاهداتی، $\bar{O}$: متوسط مقادیر مشاهداتی و N : تعداد داده‌ها.

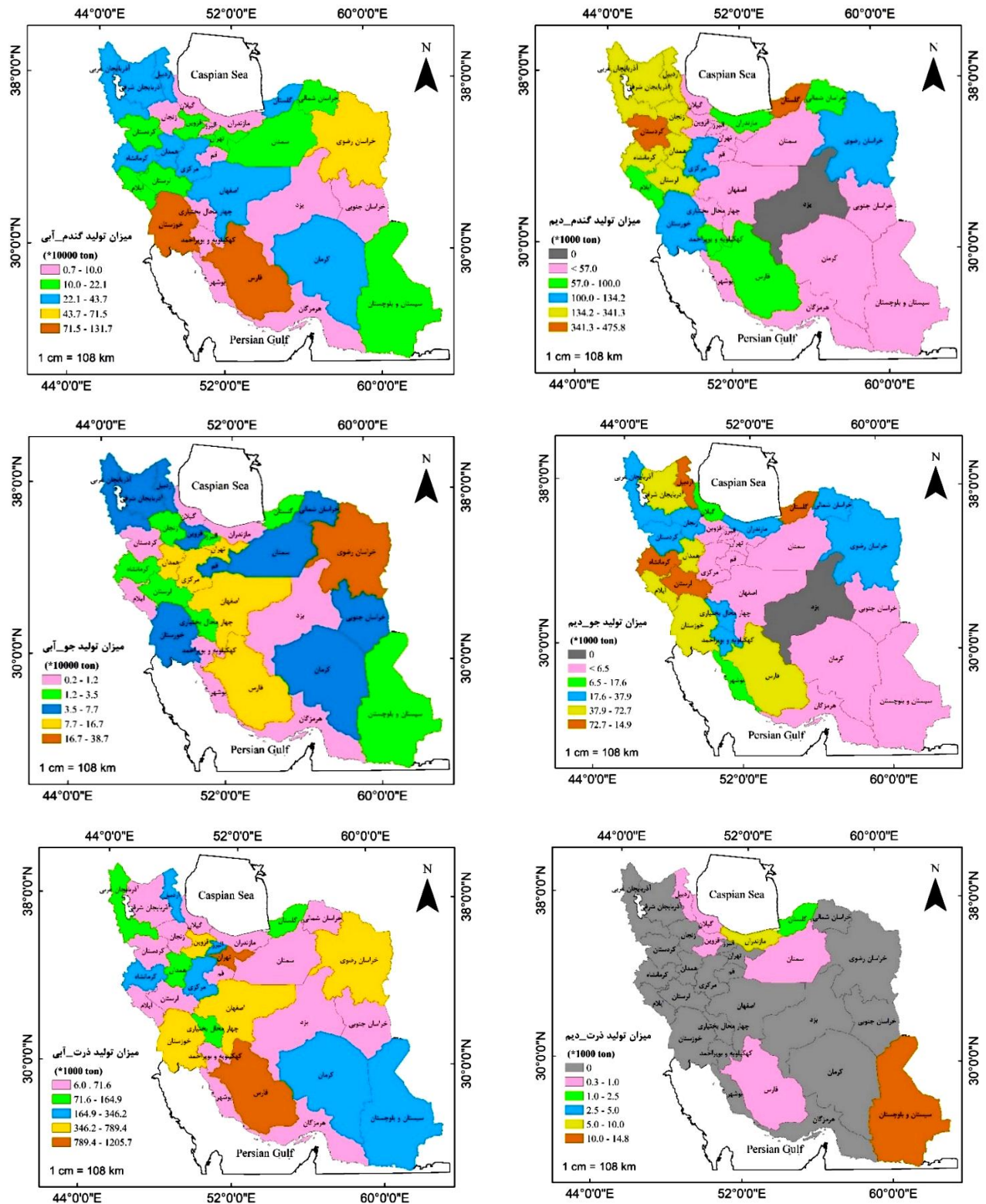
نتایج و بحث

در این بخش از پژوهش به بررسی میزان تولید هر یک از غلات شامل گندم، جو و ذرت در کشت‌های آبی و دیم پرداخته شده است. برای این منظور متوسط سی‌ساله میزان تولید هر محصول به تفکیک هر یک از استان‌های کشور و بر اساس آمار ارائه‌شده توسط سازمان جهاد کشاورزی محاسبه و نتایج در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج مجموع مقدار متوسط گندم تولیدشده در سطح کشور به روش آبی طی دوره سی‌ساله مورد مطالعه حدود ۷۷۶۲۰۰۰ تن است. بررسی تغییرات مکانی میزان تولید گندم آبی در سطح کشور حاکی از آن است که استان‌های فارس، خوزستان و خراسان‌رضوی در تولید گندم آبی

شاخص‌های ارزیابی

در این مطالعه، نتایج خروجی اقلیمی با داده‌های بارش و دمای ایستگاه‌های سینوپتیک با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2 : Coefficient Of Determination)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE: Root Mean Square Error) و میانگین انحراف خطا (MBE: Mean Bias Error) مقایسه شده است. نزدیک بودن مقدار شاخص همبستگی به ۱ بیانگر برقراری ارتباط قوی‌تر بین دو متغیر است. بر اساس طبقه‌بندی انجام‌شده توسط جونیور و همکاران (۱۰) چنانچه مقدار ضریب تعیین بیش از ۰/۲۵ باشد، مناسب ارزیابی می‌شود. جذر میانگین مربعات خطا شاخصی است که هرچه به صفر نزدیکتر باشد، گویای خطای کمتر مدل در شبیه‌سازی مقادیر مشاهداتی است. مثبت بودن شاخص میانگین انحراف خطا حاکی از بیش‌برآوردی و منفی بودن این شاخص نشان از کم‌برآوردی خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی مقادیر مشاهداتی دارد. محاسبه شاخص‌های گفته‌شده با استفاده از معادلات ۲ تا ۴ امکان‌پذیر است.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \right)^2 \quad (2)$$



شکل ۲. متوسط سی ساله میزان تولید محصولات زراعی شامل جو، ذرت و گندم به روش آبی و دیم در سطح کشور

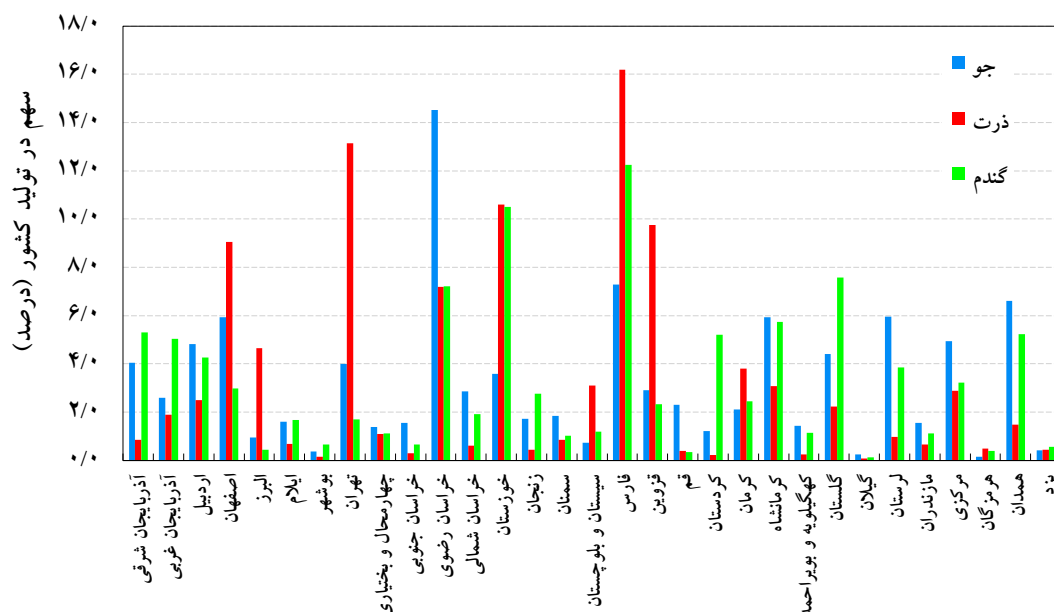
اصفهان، قزوین، خوزستان و خراسان رضوی با تولید بیش از ۳۴۶۲۰۰ تن ذرت آبی از بیشترین سهم بین استان‌ها در تولید ذرت آبی برخوردار هستند. پس از آن، استان‌های اردبیل، البرز، مرکزی، کرمانشاه، کرمان و سیستان و بلوچستان با تولید ۱۶۵۰۰۰ تا ۳۴۶۲۰۰ تن ذرت آبی در رتبه بعدی قرار دارند. به‌طور کلی با توجه به نتایج مشخص شد که برخی از استان‌ها از ظرفیت زیادی در تولید محصولات آبی برخوردار هستند؛ درحالی‌که برخی از استان‌ها با محدودیت‌های جدی در تولید مواجه هستند. بخشی از این عدم توازن می‌تواند ناشی از تفاوت در شرایط اقلیمی و دسترسی محدود به منابع آب و بخشی دیگر نیز به علت عدم سرمایه‌گذاری کافی در زیرساخت‌های آبیاری، مدیریت ناکارآمد منابع و همچنین تفاوت در دسترسی به فناوری‌های نوین کشاورزی است.

با توجه به نتایج مشخص است که کشت ذرت دیم در تعداد محدودی از استان‌های کشور رواج دارد که عبارت‌اند از: سیستان و بلوچستان، مازندران، گلستان، فارس، سمنان، قزوین، گیلان و اردبیل. نکته دارای اهمیت سهم قابل‌توجه استان سیستان و بلوچستان در تولید ذرت دیم برخلاف گندم و جو دیم است؛ به‌طوری‌که متوسط تولید ذرت، گندم و جو دیم در این استان به‌ترتیب حدود ۱۴۸۴۹، ۵۵۱ و ۴۸۵ تن برآورد شده است. توسعه کشت دیم و به‌ویژه ذرت دیم تنها در تعداد محدودی از استان‌ها، می‌تواند نشان‌دهنده عدم توسعه کافی کشت دیم در سایر مناطق باشد. این تمرکز می‌تواند خطرپذیری تولید را افزایش داده و در صورت بروز مشکلاتی همچون خشکسالی یا کاهش دسترسی به منابع آب، امنیت غذایی کشور را تهدید کند.

در این بخش به بررسی سهم استان‌های مختلف در تولید سه غله گندم، جو و ذرت (مجموع دیم و آبی) کشور پرداخته شده است (شکل ۳). همان‌طور که مشخص است استان‌های فارس، خوزستان، گلستان و خراسان رضوی با تولید به‌ترتیب ۱۲/۲، ۱۰/۵، ۷/۶ و ۷/۲ درصد از گندم کشور بیشترین سهم را در تولید این محصول دارند؛ درحالی‌که سهم ۶۷ درصد

پیش‌تاز بوده‌اند؛ به‌طوری‌که میزان متوسط گندم آبی تولیدشده در این استان‌ها به‌ترتیب حدود ۱۳۱۷۰۰۰، ۱۰۹۲۰۰۰ و ۷۱۴۸۰۰۰ تن برآورد شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که استان‌های واقع در شمال شرق، شمال غرب و غرب کشور نیز با برخورداری از متوسط تولید بیش از ۱۰۰۰۰۰ تن گندم آبی از استان‌های مؤثر در میزان تولید گندم آبی کشور بوده‌اند. بررسی میزان تولید گندم دیم در استان‌های کشور حاکی از آن است که استان‌های کردستان و گلستان پیش‌تاز در کشت گندم دیم هستند. پس از این استان‌ها، استان‌های واقع در شمال غرب و غرب کشور با تولید بیش از ۱۳۴۲۰۰۰ تن گندم دیم از نقش زیادی در تولید گندم دیم برخوردار هستند.

بررسی تغییرات مکانی متوسط میزان تولید جو آبی در سطح کشور حاکی از آن است که استان خراسان رضوی و پس از آن استان‌های فارس، اصفهان، مرکزی، همدان و تهران با برخورداری از میزان تولید بیش از ۷۷۰۰۰ تن دارای بیشترین میزان تولید جو آبی در کشور هستند؛ درحالی‌که سهم تولید جو آبی در استان‌های گیلان، مازندران، ایلام، کردستان، یزد، کهگیلویه و بویراحمد، بوشهر، یزد و هرمزگان کمتر از سایرین است و به ۱۲۰۰۰ تن محدود شده است. بررسی میزان تولید جو دیم حاکی از آن است که در برخی از استان‌ها با وجود تولید کمتر از جو آبی به کشت جو دیم توجه بیشتری شده است و سهم این استان‌ها در تولید جو دیم بیشتر است. برای نمونه، سهم تولید جو آبی در استان‌های ایلام، لرستان، کرمانشاه و گلستان به‌ترتیب حدود ۲۸۰۴، ۲۲۷۰۳، ۳۵۱۰۱ و ۲۶۳۶۱ تن است؛ درحالی‌که سهم این استان‌ها در تولید جو دیم به‌ترتیب حدود ۴۳۴۵۳، ۱۴۸۶۱۸، ۱۳۵۹۰۵ و ۱۰۰۶۱۹ تن برآورد شده است. همان‌طور که مشخص است سهم استان‌های قزوین، البرز، گیلان، تهران، قم، سمنان، اصفهان، خراسان جنوبی، کرمان، سیستان و بلوچستان و هرمزگان کمتر از سایر استان‌ها بوده است. بررسی نتایج میزان تولید ذرت آبی و دیم در سطح استان‌های کشور حاکی از آن است که استان‌های فارس، تهران،

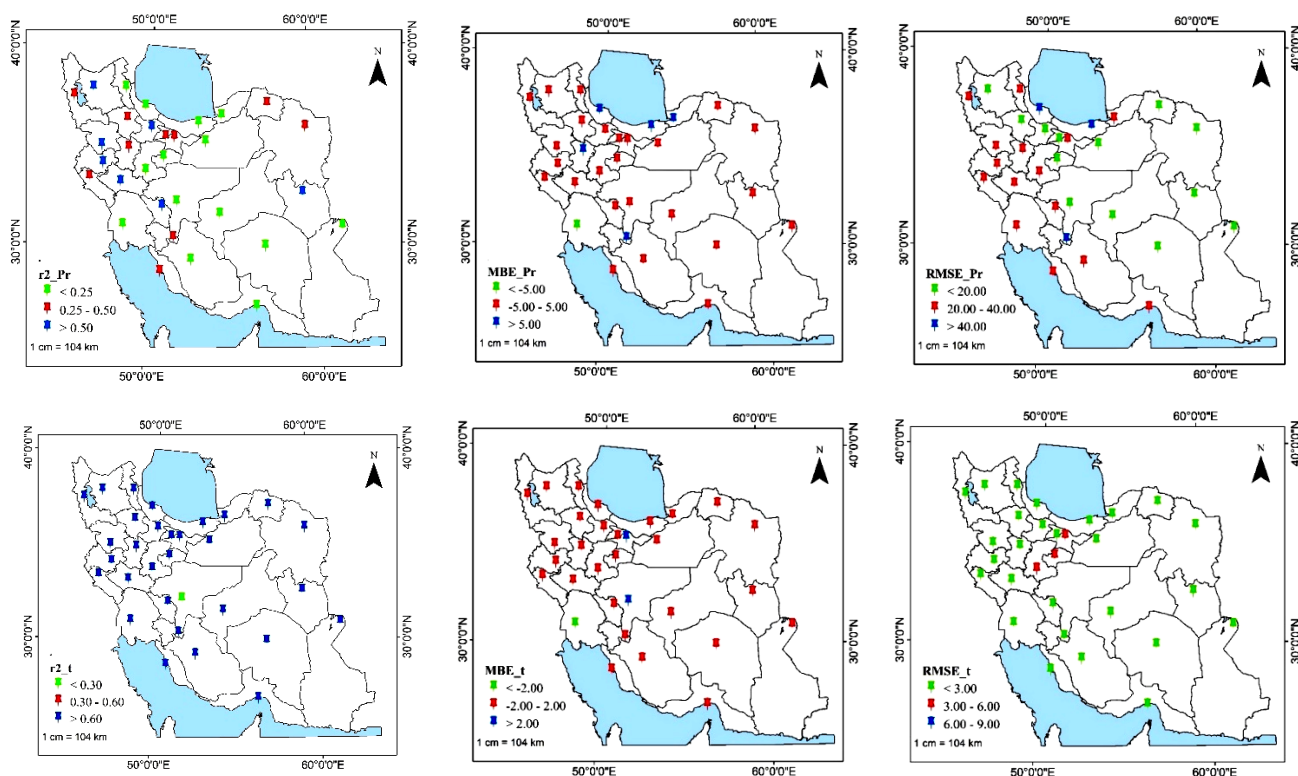


شکل ۳. سهم هر استان در تولید غلات شامل گندم، جو و ذرت طی دوره سی سال

هرمزگان، بوشهر و گیلان در رتبه ۲۵ تا ۳۱ تولید گندم، جو و ذرت قرار دارند.

در این بخش از پژوهش به ارزیابی کارایی خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی شامل بارش و متوسط دمای هوا پرداخته شده است. همان‌گونه که پیش‌تر نیز عنوان شد، در این پژوهش خروجی پنج مدل اقلیمی پس از بهینه‌سازی ضرایب هر مدل در دوره پایه و بر اساس کمترین میزان خطا (RMSE) نسبت به مقادیر مشاهداتی با یکدیگر ادغام شده است؛ بنابراین مقدار شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE و MBE بین مقادیر بارش و دما به‌دست‌آمده از ادغام پنج مدل اقلیمی نسبت به مقادیر مشاهداتی برای هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی محاسبه و تغییرات مکانی این شاخص‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج می‌توان اظهار داشت مقدار R^2 در شبیه‌سازی بارش از ۰/۱ تا ۰/۶۳ متغیر است. همان‌طور که مشخص است ضعیف‌ترین مقدار ضریب تعیین داده‌های اقلیمی بارش با مقادیر مشاهداتی در ایستگاه‌های هرمزگان، گیلان، گلستان، اردبیل و اصفهان است که کمتر از ۰/۲۰ تخمین زده شده است؛ درحالی‌که در ایستگاه‌های آذربایجان شرقی، چهارمحال و بختیاری، خراسان جنوبی، قزوین، کردستان، کرمانشاه و لرستان میزان ضریب تعیین بین مقادیر بارش بیش از ۰/۵ تخمین زده شده است که می‌تواند

از استان‌های کشور در تولید گندم کمتر از ۴ درصد است. بررسی سهم استان‌های کشور در تولید جو حاکی از آن است که استان خراسان رضوی با تولید حدود ۱۴/۵ درصد پیش‌تاز در تولید جو کشور است. پس از خراسان رضوی سهم استان‌های فارس، همدان، لرستان، کرمانشاه، مرکزی و اصفهان با تولیدی بیش از ۵ درصد از تولید کشور در جایگاه بعدی قرار دارد. با توجه به نتایج سهم بیش از ۷۰ درصد از استان‌های کشور در تولید جو کمتر از ۴ درصد است. بررسی نشان می‌دهد که استان‌های فارس، تهران و خوزستان در رتبه اول تا سوم در تولید ذرت کشور قرار دارند؛ به‌طوری‌که سهم این استان‌ها نسبت به تمام ذرت تولیدی در کشور به‌ترتیب حدود ۱۶/۲، ۱۳/۱ و ۱۰/۶ درصد برآورد شده است. پس از آن، استان‌های قزوین، اصفهان، خراسان رضوی و البرز به‌ترتیب با تولید ۹/۸، ۹/۱، ۷/۲ و ۴/۷ درصد از ذرت کشور در جایگاه‌های چهارم تا ششم قرار دارند. سهم سایر استان‌ها در تولید ذرت کمتر از ۴ درصد برآورد شده است. پس از رتبه‌بندی استان‌ها در تولید هر غله و سپس جمع رتبه‌ها مشخص شد که استان‌های فارس، خراسان رضوی، خوزستان، کرمانشاه، اصفهان، گلستان با دارا بودن جایگاه اول تا ششم از بیشترین سهم در تولید کل غلات (گندم، جو و ذرت) کشور برخوردار هستند؛ درحالی‌که استان‌های قم، کهگیلویه و بویراحمد، خراسان جنوبی، یزد،

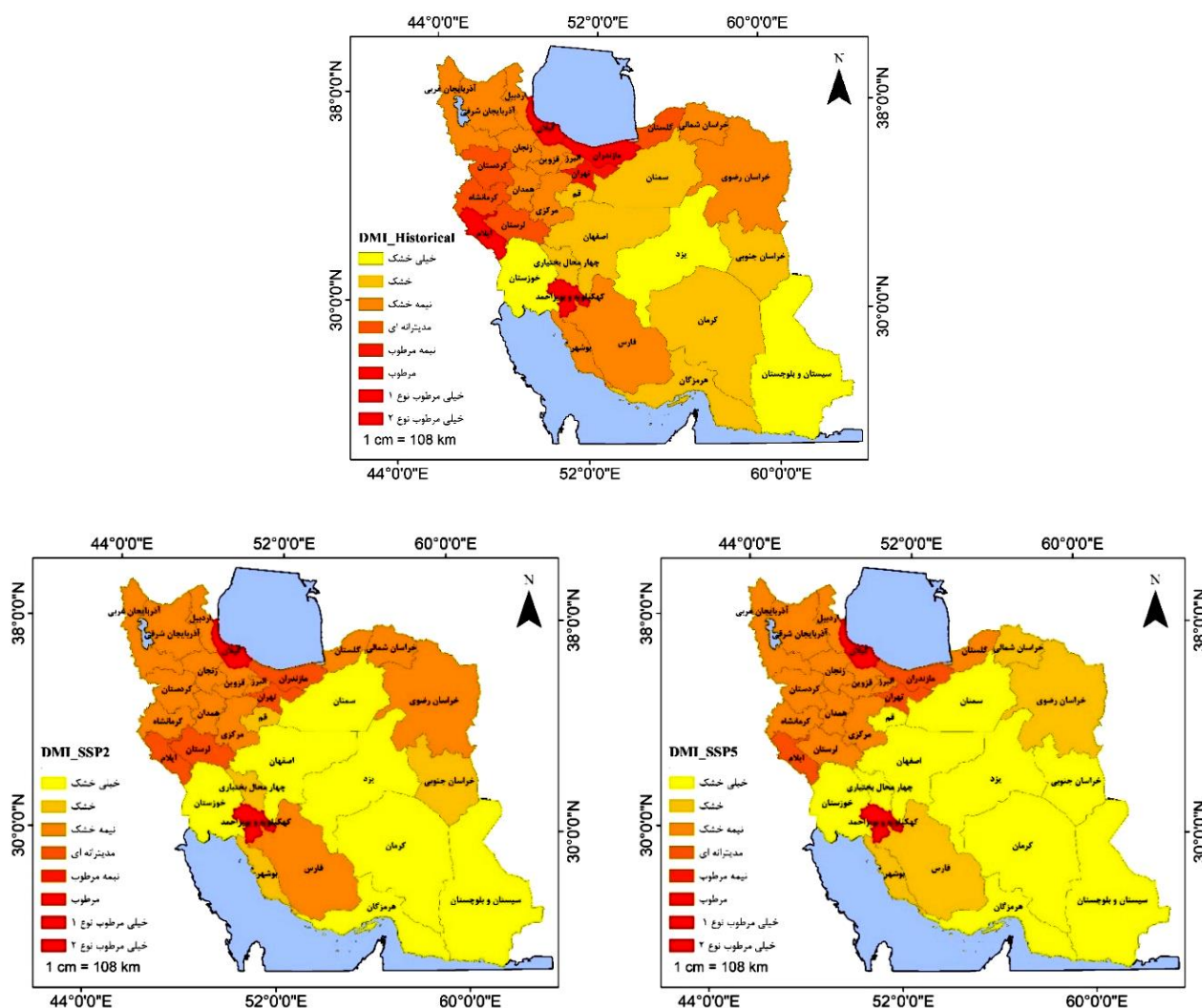


شکل ۴. تغییرات مکانی شاخص‌های R^2 ، RMSE و MBE در شبیه‌سازی متغیرهای جوی بارش و متوسط دمای هوا در دوره پایه

همراه است. کمترین و بیشترین شاخص ارزیابی MBE در شبیه‌سازی تغییرات ماهانه متوسط دمای هوا توسط داده‌های اقلیمی در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی $13/38-$ و $3/21$ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به نتایج مشخص است که عملکرد داده‌های اقلیمی در ایستگاه‌های تهران ($MBE = 3/21$) و اصفهان ($MBE = 2/19$) با بیش‌برآوردی و در ایستگاه خوزستان ($MBE = -13/38$) با کم‌برآوردی در تخمین متوسط دمای هوا همراه است. میزان ارزیابی داده‌های دما در سایر ایستگاه‌های مطالعاتی با برخورداری از شاخص ارزیابی در محدوده $0/75-$ تا $1/63$ درجه سانتی‌گراد قابل‌قبول ارزیابی می‌شود. ارزیابی شاخص RMSE نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول خروجی اقلیمی در شبیه‌سازی متوسط بارش ماهانه طی دوره مشاهده در تعداد زیادی از ایستگاه‌های مطالعاتی به غیر از ایستگاه‌های گیلان، کهگیلویه و بویراحمد و مازندران است؛ به‌طوری که متوسط شاخص خطای RMSE در ایستگاه‌های گفته‌شده به‌ترتیب $94/69$ ، $81/42$ و $52/96$ میلی‌متر تخمین زده

قابل‌قبول ارزیابی شود. بررسی میزان ضریب تعیین بین مقادیر متوسط دمای ماهانه مربوط به خروجی مدل‌های اقلیمی و مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد که مقدار همبستگی در بیش از ۹۴ درصد از ایستگاه‌های مورد مطالعه بیش از $0/88$ تخمین زده شده است که نشان می‌دهد بیش از ۸۸ درصد از مقادیر دما بر اساس داده‌های اقلیمی تبیین می‌شوند.

ارزیابی نتایج بر اساس شاخص MBE گویای این مطلب است که میزان ارزیابی داده‌های بارش نسبت به مقادیر مشاهداتی را در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی به غیر از خوزستان، کهگیلویه و بویراحمد، گلستان، گیلان، مازندران و همدان می‌توان قابل‌قبول ارزیابی کرد؛ به‌طوری که کمترین و بیشترین شاخص ارزیابی در سایر ایستگاه‌ها به‌ترتیب $0/37$ و $4/73$ میلی‌متر برآورد شده است. بر اساس نتایج خروجی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی بارش در ایستگاه خوزستان با کم‌برآوردی و در ایستگاه‌های کهگیلویه و بویراحمد، گلستان، گیلان، مازندران و همدان با بیش‌برآوردی



شکل ۵. طبقه‌بندی شاخص خشکی دومارتن تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4 و SSP5-8.5 در دوره آینده و پایه

سناریوی SSP2 نسبت به دوره پایه به ترتیب ۱۳، ۱۳ و ۱۶ درصد از استان‌های کشور تغییر شرایط اقلیمی به سمت نیمه‌خشک، خشک و خیلی‌خشک را تجربه خواهند کرد. همچنین تحت سناریوی SSP5 نسبت به دوره پایه شرایط اقلیمی در ۱۳، ۱۰ و ۲۶ درصد از استان‌ها به سمت نیمه‌خشک، خشک و خیلی‌خشک تغییر می‌کند. با توجه به نتایج مشخص است که در ۳، ۷ و ۲۰ درصد از استان‌ها شرایط اقلیمی در دوره آینده و تحت سناریوی SSP5 نسبت به SSP2 به سمت نیمه‌خشک، خشک و خیلی‌خشک تغییر پیدا می‌کند. به‌طور کلی مشخص است که تحت سناریوهای اقلیمی SSP2 و SSP5 در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۵ نسبت به دوره پایه،

از سوی دیگر، افزایش نیاز به منابع آب و انرژی برای حفظ تولیدات فعلی هزینه‌های تولید را به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد داد؛ بنابراین، نیاز به برنامه‌ریزی برای کاهش مصرف آب و استفاده از روش‌های کشاورزی مقاوم به خشکسالی در این مناطق به شدت احساس می‌شود.

در این بخش از پژوهش به بررسی فراوانی تغییر شرایط اقلیمی در استان‌های کشور به سمت خیلی‌خشک، خشک و نیمه‌خشک تحت سناریوهای اقلیمی SSP2 و SSP5 نسبت به دوره پایه و همچنین تحت سناریوی SSP5 نسبت به سناریوی اقلیمی SSP2 پرداخته شده است (جدول ۳). نتایج حاکی از آن است تحت

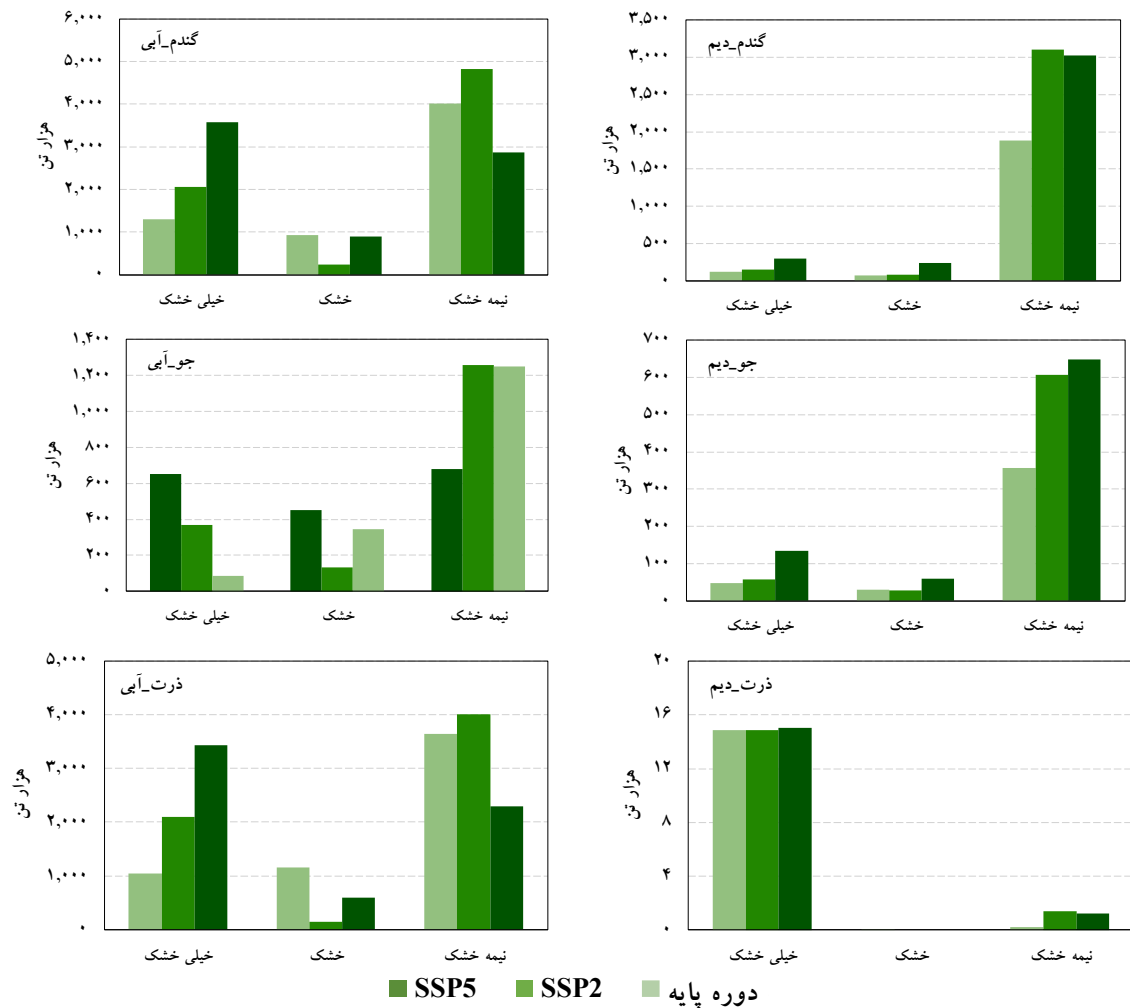
جدول ۳. فراوانی تغییر شرایط اقلیمی به سمت خشکی در استان‌های کشور تحت سناریوهای SSP2 و SSP5

تغییر شرایط اقلیمی تحت سناریوی SSP2 نسبت به دوره پایه		
تغییر وضعیت به خیلی خشک	تغییر وضعیت به خشک	تغییر وضعیت به نیمه خشک
٪ ۱۶	٪ ۱۳	٪ ۱۳
تغییر شرایط اقلیمی تحت سناریوی SSP5 نسبت به دوره پایه		
تغییر وضعیت به خیلی خشک	تغییر وضعیت به خشک	تغییر وضعیت به نیمه خشک
٪ ۲۶	٪ ۱۰	٪ ۱۳
تغییر شرایط اقلیمی تحت سناریوی SSP5 نسبت به SSP2		
تغییر وضعیت به خیلی خشک	تغییر وضعیت به خشک	تغییر وضعیت به نیمه خشک
٪ ۲۰	٪ ۷	٪ ۳

کاهش در مقدار شاخص خشکی و حرکت به سمت اقلیم‌های خشک تا خیلی خشک در بسیاری از ایستگاه‌های مورد مطالعه مشهود است.

میزان محصولات گندم، جو و ذرت تحت درجات مختلف خشکی در دوره پایه و آینده در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس شاخص خشکی دومارتن در دوره پایه ۱۲۹۳، ۹۲۸ و ۴۰۱۹ هزار تن از تولیدات گندم آبی و ۱۲۴، ۶۹ و ۱۸۸۲ هزار تن از تولیدات گندم دیم در سطح کشور می‌تواند تحت تأثیر شرایط خیلی خشک، خشک و نیمه خشک قرار دارند؛ در حالی که تحت سناریوی اقلیمی SSP2 میزان تولیدات گندم آبی تحت تأثیر شرایط خیلی خشک، خشک و نیمه خشک به ترتیب ۲۰۶۱، ۲۴۰ و ۴۸۲۴ هزار تن و میزان تولید گندم دیم که در سراسر کشور تحت شرایط خیلی خشک تا خشک قرار دارند، به ۱۴۸، ۸۲ و ۳۱۰۳ هزار تن افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج مشخص است که با وجود کاهش میزان تولیدات گندم تحت تأثیر شرایط نیمه خشک، میزان تولید آبی گندم که تحت تأثیر شرایط خیلی خشک قرار دارند، تحت سناریوی SSP5 با افزایش قابل توجهی همراه است و حدود ۳۵۷۷ هزار تن تخمین زده شده است؛ بنابراین تمایل به تداوم کشت گندم در مناطق بسیار خشک ممکن است منجر به فشار مضاعف بر منابع آب شود. همچنین بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب و عدم تطابق کشاورزی با شرایط اقلیمی آینده می‌تواند به کاهش ذخایر آب

زیرزمینی و کاهش پایداری تولیدات منجر شود. از سوی دیگر، تداوم وابستگی به کشت آبی در آینده و در شرایط کمبود منابع آب، می‌تواند خطراتی همچون کاهش کیفیت خاک، شور شدن منابع آب، و کاهش کارایی آبیاری را به دنبال داشته باشد. از سوی دیگر، توجه به این نکته لازم است که استفاده مداوم از زمین‌های دیم بدون اقدامات حفاظتی می‌تواند به تخریب اکوسیستم‌های طبیعی، کاهش مواد آلی و کاهش توانایی خاک در حفظ رطوبت منجر شود. این مشکل به‌ویژه در مناطقی که کشت دیم در شرایط خیلی خشک و خشک افزایش یافته، بارزتر است. همچنین میزان تولید گندم دیم که تحت تأثیر شرایط اقلیمی خیلی خشک قرار دارند، برابر ۲۹۴ هزار تن برآورد شده است. بررسی میزان تولیدات جو تحت تأثیر درجات مختلف خشکی حاکی از آن است که میزان تولید جو دیم که تحت تأثیر هر سه درجه از خشکی قرار دارند، با افزایش قابل توجهی همراه است. برای نمونه، در دوره پایه میزان ۴۹، ۳۰ و ۳۵۶ هزار تن از تولیدات جو دیم به ترتیب تحت تأثیر شرایط خیلی خشک، خشک و نیمه خشک قرار دارند؛ در حالی که در دوره ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹ و تحت سناریوی SSP5 به ۱۳۴، ۶۰ و ۶۴۸ هزار تن افزایش پیدا کرده است. بررسی میزان تولید ذرت که تحت تأثیر شرایط خشکی اقلیمی قرار دارد، حاکی از آن است که روند افزایش میزان تولیدات از این محصول که تحت تأثیر شرایط خیلی خشک، خشک و نیمه خشک قرار دارند،



شکل ۶. میزان تولید محصولات گندم، جو و ذرت تحت درجات مختلف خشکی در دوره پایه و آینده

شامل گندم، جو و ذرت که تحت درجات مختلفی از خشکی اقلیمی قرار دارند، می‌پردازد. برای بررسی تغییرات اقلیمی طی دوره آینده از پنج مدل گردش عمومی جو و سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شده است. همچنین متوسط تولید هر غله طی دوره پایه مبنایی برای بررسی میزان تولیدات هر استان است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که طی دوره پایه، ۷۱ درصد از استان‌های کشور دارای شرایط اقلیمی نیمه‌خشک تا خیلی‌خشک هستند، اما تحت سناریوهای اقلیمی SSP5 و SSP2، میزان استان‌های درگیر با شرایط نیمه‌خشک، خشک و خیلی‌خشک به ترتیب به ۸۱ و ۸۴ درصد افزایش یافته است. این تغییرات اقلیمی می‌تواند اثرهای قابل‌توجهی بر منابع طبیعی، تولیدات کشاورزی، و زندگی مردم در این مناطق داشته

برای ذرت آبی بیشتر از ذرت دیم است؛ به‌طوری‌که طی دوره پایه ۱۰۳۹ هزار تن از ذرت آبی در شرایط اقلیمی خیلی‌خشک قرار دارند، درحالی‌که تحت سناریوهای اقلیمی SSP5 و SSP2 میزان تولیدات تحت تأثیر شرایط خیلی‌خشک به ۲۰۹۵ و ۳۴۳۴ هزار تن افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی و افزایش شدت خشکی در ایران چالش‌های بزرگی را برای بخش کشاورزی ایجاد کرده است. با توجه به اهمیت ارزیابی آسیب‌پذیری محصولات کشاورزی نسبت به خشکی اقلیمی برای دستیابی به تولیدات پایدار محصولات زراعی و غلات، پژوهش حاضر به ارزیابی میزان تولید غلات

در افزایش تولید و بهبود کیفیت محصولات برخوردار باشد. از سوی دیگر، برنامه‌ریزی‌های دولتی برای تطبیق‌پذیری کشاورزی با شرایط جدید اقلیمی و حمایت از کشاورزان در مواجهه با تغییرات اقلیمی می‌تواند به کاهش اثرات منفی و حفظ امنیت غذایی کمک کند. درنهایت، توجه به مشکلات و ارائه راهکارهای اجرایی برای هر منطقه برای رسیدن به توسعه پایدار کشاورزی در کشور ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به تفاوت‌های منطقه‌ای و تأثیرات مختلف خشکسالی بر محصولات کشاورزی نیاز به پژوهش‌های محلی بیشتر برای فهم بهتر وضعیت خاص هر منطقه در پژوهش‌های آینده وجود دارد. از سوی دیگر، تمرکز بر تحلیل اقتصادی - اجتماعی و مطالعه بیشتر در مورد کشت‌های جایگزین در مناطق تحت تأثیر خشکی‌های شدید ضروری به نظر می‌رسد.

باشند. تغییر وضعیت اقلیمی در استان‌های گفته‌شده به سمت خشکی بیشتر می‌تواند با افزایش رقابت برای منابع آب، تعارضات محلی، فشار بیشتر بر منابع آب زیرزمینی و افزایش ناپایداری در تأمین آب همراه بوده و درنهایت مشکلات اجتماعی و اقتصادی را به دنبال داشته باشد. یکی از راهکارهایی که برای کاهش مشکلات در این زمینه پیشنهاد می‌شود، ترویج کشت محصولات جایگزین، کم‌آبر و مقاوم به خشکی است. این رویکرد می‌تواند از وابستگی به تعداد محدودی محصول کاسته و خطرات ناشی از تغییرات محیطی را کاهش دهد. بهبود تکنیک‌های آبیاری مانند آبیاری قطره‌ای و استفاده از فناوری‌های مدرن برای کاهش مصرف آب در کشاورزی از جمله راهکارهای مؤثر برای مدیریت منابع آب است. همچنین آموزش و حمایت از کشاورزان برای استفاده از روش‌های بهینه کشت و مدیریت منابع می‌تواند از نقش مؤثری

References

منابع مورد استفاده

1. Abassi, F., M. Habibi Nokhandan, L. GoliMokhtari and S. Malbousi. 2010. Climate change assessment over Iran in the future decades using MAGICC-SCENGEN model. *Physical Geography Research* 42(72): 91-110 (in Farsi).
2. Abbaspour, M. and A. Sabetraftar. 2004. Analysis of past droughts in Iran, prediction of future droughts and the challenges of advancing water resources management in the fourth development plan of the country. In: The 5th National Conference of the Association of Environmental Professionals of Iran, Tehran, Iran (in Farsi).
3. Afshartabar, R., S. A. Mortazavi and S. Khalilian. 2023. Evaluation climate change impact on the production of agricultural products in marvdasht city. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 17(1):42-55 (in Farsi).
4. Amani, R., Z. Ghorbani and Z. Mozaffari. 2024. Climate change risk, performance, and value added in agricultural sector. *Quarterly Journal of The Economic Research (Sustainable Growth and Development)* 24(3):1-30.
5. Ansari, S., H. Dehban, M. Zareian and A. Farokhni. 2022. Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Research Journal* 16(1): 11-24 (in Farsi).
6. De Martonne, E. 1926. Areism and Aridity Index. *Comptes Rendus de L'Academy of Science* 182:1395-1398.
7. Dunn, R. J. H., K. M. Willett, A. Ciavarella and P. A. Stott. 2017. Comparison of land surface humidity between observations and CMIP5 models. *Earth System Dynamics* 8(3):719-747.
8. FAO. 2020. FAO statistics.
9. Humphreys, M. W., R. S. Yadav, A. J. Cairns, L. B. Turner, J. Humphreys and L. A. Skot. 2006. Changing climate for grassland research. *New Phytologist* 169(1): 9-26.
10. Joinior, W., M. Loireau, M. Fargette, B. Filho and A. Wele. 2017. Correlation between soil erodibility and satellite data on areas of current desertification: A case study in Senegal. *Ciência & Trópico* 42(2): 51-66.
11. Khaje Pour, M. R. 2011. Industrial plants. Academic Jahad of Isfahan Industrial Unit, Esfahan (in Persian).
12. Koochi, S., A. Azizian and H. Mazandaranizadeh. 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 Farsi).
13. Li, Y., H. Huang, H. Ju, E. Lin, W. Xiong and X. Han. 2015. Assessing vulnerability and adaptive capacity to potential drought for winter-wheat under the RCP 8.5 scenario in the huang-huai-hai plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 209: 125-31.
14. Mehrazar, A., A. R. Massah Bavani, M. Mashal and H. Rahimikhoob. 2018. Assessment of climate change impacts on agriculture of the hashtgerd plain with emphasis of AR5 models uncertainty. *Irrigation Sciences and Engineering*

- 41(3):45–59 (in Farsi).
15. Mohan, S., and P. K. Bhaskaran. 2019. Evaluation of CMIP5 climate model projections for surface wind speed over the Indian Ocean region. *Climate Dynamics* 53(9–10): 5415–5435.
 16. Mondani, F., P. Karami and R. Ghobadi. 2024. Simulating the effects of climate change on phenology and yield of maize (zea mays) and possible adaptation strategies under the climatic conditions of kermanshah. *Iranian Journal of Field Crops Research* 21(4): 385–401 (in Farsi).
 17. Noormohammadi, G., A. Siadat and A. Kashani. 2005. Crop cultivation. Chamran University Press, Ahvaz (in Farsi).
 18. O'Neill, B. C., E. Kriegler, K. L. Ebi, E. Kemp Benedict, K. Riahi and D. S. Rothman. 2017. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* 42:169–80.
 19. Ramezani Etedali, H., S. Koohi and Z. Partovi. 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 (in Farsi).
 20. Ren, X. 2007. Agricultural vulnerability to drought in Southern Alberta: A quantitative assessment. Master thesis, University of Lethbridge. Canada.
 21. Rezaei, M., M. Nohtani, A. Moghaddamnia, A. Abkar and M. Rezaei. 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):836–45 (in Farsi).
 22. Rogelj, J., A. Popp, K. V. Calvin, G. Luderer, J. Emmerling and D. Gernaat. 2018. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °c. *Nature Climate Change* 8(4):325–32.
 23. Rowhani, P., D. B. Lobell, M. Linderman and N. Ramankutty. 2011. Climate variability and crop production in Tanzania. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(4):449–60.
 24. Saberali, S. F., H. Nastarinasrabadi and M. Dostkhah Ahmadi. 2019. Investigating the impact of climate change on irrigated wheat production under torbat-e jam region for the near future. *Iranian Journal of Field Crops Research* 17(1):169–86 (in Farsi).
 25. Salehnia, N., and M. A. Falahi. 2010. Evaluating eco-climatict variables on wheat yield using panel data model. *Water and Soil* 2010;24(2):375–384 (in Farsi).
 26. Salvati, L., M. Zitti, R. DiBartolomei and L. Perini. 2012. Climate aridity under changing conditions and implications for the agricultural sector: Italy as a case study. *Geography Journal* 2013(1): 923173.
 27. Soleymani Nejad S., A. Dourandish, M. Sabouhi and M. Banayan Aval. 2019. The Effects of climate change on cropping pattern (case study: mashhad plain). *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research* 50(2):249–63 (in Farsi).
 28. Soora, N. K., P. K. Aggarwal, R. Saxena, S. Rani, S. Jain and N. Chauhan. 2013. An assessment of regional vulnerability of rice to climate change in India. *Climatic Change* 118(3–4): 683–99.
 29. Thrasher, B., E. P. Maurer, C. McKellar and et al. 2012. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(9): 3309–3314.
 30. Zarrin, A. and A. A. Dadashi Roudbari. 2020. Projection the long-term outlook Iran future temperature based on the output of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Earth and Space Physics* 46(3):583–602 (in Farsi).
 31. Zarrin, A. and A. A. Dadashi Roudbari. 2021. Projected consecutive dry and wet days in Iran based on CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Earth and Space Physics* 47(3):561–78 (in Farsi).