

Assessing the effect of climate change on agricultural drought by using of SMDI index in different Irrigation levels

Fatemeh Hajiabadi¹, Farzad Hassanpour², Mostafa Yaghoobzadeh^{3,5}, Hossein Hammami⁴

¹Educational Expert of Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Birjand and Ph. D. Graduate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

² Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

³ Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

⁴ Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

⁵Department of Research Group of Drought and Climate Change, University of Birjand, Birjand, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 06 November 2024

Revised form 09 December 2024

Accepted 27 January 2025

Published online 28 June 2025

Keywords:

AOGCM Models

AquaCrop

Climate Change Drought

SMDI Index

ABSTRACT

Objective One of the most important indices of drought that considers soil moisture as an input parameter is the soil moisture drought (SMDI) index.

Methods: The current study seeks to investigate the effect of climate change on agricultural drought using SMDI index in different salinity and drought stresses with the help of the AquaCrop model in the basic period (2005-1975) and upcoming (2025-2055) in Birjand. To predict precipitation and maximum and minimum temperature in the upcoming period in the study area of five climate models IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, CSIRO-MK3.6, HADGEM2-ES, GFDL-ESM2M under RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios, were used, among which the CSIRO-MK3.6 model was selected as the best model using weighing method and performance criteria.

Results: The results showed that the amount of precipitation forecast for the upcoming period compared to the base period decreased under both emission scenarios and the annual average maximum and minimum temperature in the future period, increased compared to the base period under both emission scenarios. The amount of SMDI drought index for rainfed treatment in the upcoming period was lower in both scenarios compared with other irrigated treatments.

Conclusions: The results also showed that all treatments, on average, would have a lower degree of drought in the RCP8.5 scenario in the upcoming period than in the RCP4.5 emission scenario.

*Corresponding author, Email: M.Yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

Cite this article: Hajiabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., & Hammami, H. (2024). Assessing the effect of climate change on agricultural drought by using of SMDI index in different Irrigation levels. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.486306.1116>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2025.486306.1116>

Publisher: Gonbad Kavous University.



ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI

در رژیم‌های مختلف آبیاری

فاطمه حاجی آبادی^۱، فرزادحسن پور^۲، مصطفی یعقوب زاده^۳، حسین حمای^۴

^۱ گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران و گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۲ گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

^۳ گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۴ گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

^۵ عضو گروه پژوهشی خشک‌سالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>هدف: یکی از مهم‌ترین شاخص‌های خشک‌سالی که رطوبت خاک را به عنوان پارامتر ورودی در نظر می‌گیرد شاخص خشک‌سالی رطوبت خاک (SMDI) می‌باشد</p> <p>مواد و روش: بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI در تنش‌های شوری و خشکی مختلف به کمک مدل گیاهی Aqua Crop در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۵) و آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) در منطقه بیرجند هدفی است که در این پژوهش دنبال می‌شود. جهت پیش‌بینی پارامترهای بارش و دمای ماکزیمم و مینیمم در دوره آتی در محدوده مورد مطالعه از پنج مدل اقلیمی IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, CSIRO-MK3.6, HADGEM2-ES, GFDL-ESM2M و RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد که از این میان مدل CSIRO-MK3.6 با استفاده از روش وزن‌دهی و معیارهای عملکردی به عنوان مدل برتر انتخاب گردید.</p> <p>نتایج: نتایج نشان داد که مقدار بارش پیش‌بینی شده برای دوره آتی نسبت به دوره پایه، تحت هر دو سناریوی انتشار کاهش و میانگین سالانه دمای ماکزیمم و مینیمم در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت هر دو سناریو انتشار افزایش داشته است. مقادیر شاخص خشک‌سالی SMDI برای تیمار دیم نسبت به تیمارهای آبی در دوره آتی در هر دو سناریو انتشار کمتر می‌باشد.</p> <p>نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد تمامی تیمارها، به طور میانگین در دوره آتی در سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو انتشار RCP4.5 از درجه خشک‌سالی کمتری برخوردار خواهند بود.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷</p> <p>کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم خشک‌سالی شاخص SMDI مدل‌های AOGCM AquaCrop</p>

* نویسنده مسئول، Email: M.Yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

استناد: حاجی آبادی، فاطمه؛ حسن پور، فرزاد؛ یعقوب زاده، مصطفی؛ و حمای، حسین. (۱۴۰۴). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی کشاورزی به کمک

شاخص SMDI در رژیم‌های مختلف آبیاری. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2025.486306.1116>

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.

© نویسندگان.



مقدمه

امروزه پدیده تغییر اقلیم از جمله معضلاتی است که همواره در جهان مورد توجه قرار گرفته است. خشکسالی نیز از مخاطرات طبیعی شناخته شده و بخش جدایی ناپذیر تغییرات اقلیمی است (Oliveira-Júnior et al. 2018); رودری و همکاران (۱۳۹۸). تاکنون تعاریف بسیار زیادی از خشکسالی ارائه شده است. اما هر کدام از این تعاریف دیدگاه خاصی را در نظر داشته‌اند. هواشناسان، خشکسالی را بارش کمتر از حد معمول که منجر به تغییر الگوی آب و هوایی می‌شود، تعریف کرده‌اند. بنابراین خشکسالی از دیدگاه هواشناسی اساساً به حالتی از خشکی ناشی از کمبود بارندگی اطلاق می‌شود. از دیدگاه اقلیم-شناسان،

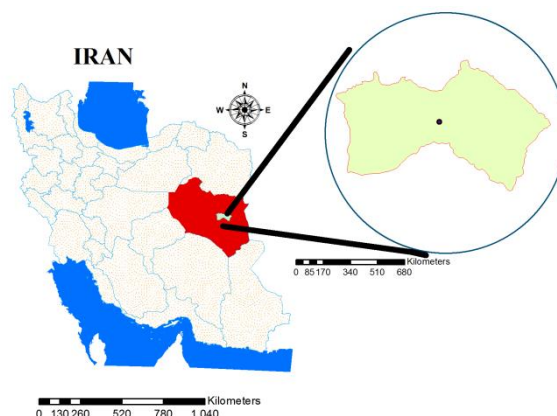
موجب عدم تعادل اکولوژی و هیدرولوژی می‌شود. از دیدگاه هیدرولوژیست‌ها، خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که سطح تراز ذخایر آب‌های سطحی و زیرزمینی از حد معمول خود پایین‌تر باشد. اما از دیدگاه کشاورزی زمانی که رطوبت خاک از نیاز واقعی محصول کمتر باشد و منجر به خسارت در محصول شود، خشکسالی اتفاق افتاده است (یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۶). خشکسالی کشاورزی بخشی از اقلیم زمین است و هرازگاهی بدون هیچ علائم هشداردهنده و در محدوده‌ای با مرزهای غیرقابل تشخیص اتفاق می‌افتد و بیش از تمامی حوادث طبیعی دیگر، امنیت غذایی مردم را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Vicente-Serrano et al., 2018). رطوبت خاک پارامتری تعیین کننده در بسیاری از فرآیندهای پیچیده زیست‌محیطی است و نقش تعیین کننده‌ای در وقوع خشکسالی کشاورزی دارد. اساساً پایش مستقیم رطوبت خاک و استخراج داده‌ای رطوبت به صورت نقطه‌ای، نه تنها پرهزینه و وقت گیر است، بلکه در سطوح وسیع غیرعلمی است. این در حالی است که خشکسالی پدیده‌ای منطقه‌ای بوده و برای پایش آن نیاز به داده‌های وسیع و منطقه‌ای است. بنابراین اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای رطوبت خاک کافی نیست و نیاز به ابزاری برای افزایش دامنه داده‌ها و کاهش هزینه‌ها وجود دارد. امروزه برای ارزیابی داده‌های رطوبت خاک، مدل‌های زیادی توسعه یافته‌اند. یکی از این مدل‌ها، مدل AquaCrop است که برای شبیه‌سازی رطوبت خاک از بیلان رطوبت در ناحیه توسعه ریشه استفاده می‌کند. از مهم‌ترین شاخص‌های خشکسالی که رطوبت خاک را به عنوان پارامتر ورودی در نظر می‌گیرد، می‌توان به شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI) اشاره کرد (یعقوب زاده، ۱۳۹۴). با توجه به اینکه کشاورزی و تولید محصولات زراعی یکی از عوامل بسیار وابسته به شرایط آب و هوایی است، لذا آگاهی از مقدار و آهنگ سریع تغییرات اقلیمی و بررسی اثرات اقلیم بر روی کشاورزی در سطح منطقه‌ای و سیاست‌گذاری مناسب و به موقع توسط دولت‌ها ضروری به نظر می‌رسد. از آنجاکه منطقه بیرجند نیز متأثر از تغییر اقلیم خواهد بود، در همین راستا می‌توان به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در دوره‌های آبی و ارزیابی خشکسالی در منطقه پرداخت. گندم گیاه استراتژیک و مهم‌ترین منبع غذایی بشر است، شبیه‌سازی عملکرد گندم تحت تنش‌های شوری و خشکی مختلف، به کمک مدل گیاهی AquaCrop و مدل‌های تغییر اقلیم حائز اهمیت است. به منظور تعیین میزان خشکسالی در آینده تحقیقاتی در داخل و خارج کشور در این زمینه انجام شده است. رضانی و همکاران (۱۳۹۱) برای تعیین شاخص خشکسالی SMDI و مقایسه آن با سایر شاخص‌های خشکسالی مثل SPI، DI، PNI و CZI، رطوبت خاک را با استفاده از مدل AquaCrop بین سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۸۲ در ایستگاه سینوپتیک قزوین شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، بیشترین مقدار شاخص SMDI در ۱۹۹۴ با مقدار ۲/۷ و کم‌ترین مقدار آن در سال ۱۹۹۷، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۸ با مقدار منفی ۱/۵ رخ داده است. Toorajzadeh et al. (2024) تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی بهره‌وری مصرف آب و عملکرد کینوا تحت مدیریت‌های مختلف مقدار و شوری آب آبیاری و کاربرد بیوجار و نانوبیوجار را انجام دادند. دل‌قندی و همکاران (۱۴۰۲) شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI) و شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) منطقه سمنان برای سه دوره آبی (۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰) و دوره گذشته (۲۰۰۹-۲۰۰۹)

در چهار مقیاس زمانی مختلف (ماهانه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و سالانه) محاسبه کردند. نتایج نشان داد که در سناریوی RCP8.5 در مقایسه با سناریوی RCP4.5، دوره‌های ترسالی و خشکسالی بیشتری وجود خواهد داشت. (Wambua, 2019) خصوصیات مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی را در بالادست حوضه آبریز تانا کنیا با استفاده از شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI بررسی کرد. وی با استفاده از داده‌های ۸ ایستگاه هواشناسی به طول دوره ۴۱ سال و به کمک نرم‌افزار AquaCrop رطوبت خاک را شبیه‌سازی نمود. نتایج شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI نشان داد مقادیر این شاخص در فصل خشک نسبت به فصول مرطوب کمتر است. همچنین استنباط شد که در ارتفاعات پایین حوضه در قسمت‌های جنوب شرقی مناطق مستعد به خشکی بیشتر از ارتفاعات بالا در مناطق شمال غربی است و در آخر منحنی‌های شدت و مکان خشکسالی برای دوره‌های برگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله توسعه داده شد. با توجه به اینکه در خصوص ارتباط تاثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی با عملکرد گیاه گندم در دوره آبی با استفاده از داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم تحقیقات اندکی انجام شده است، از این رو در این تحقیق سعی شده است، اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI در تنش‌های شوری و خشکی مختلف در منطقه بیرجند بررسی شود.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق مزرعه گندم در دشت بیرجند مورد مطالعه قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه دشت بیرجند در طول جغرافیایی $۱۳^{\circ}۵۹'$ شرقی و عرض جغرافیایی $۵۳^{\circ}۳۲'$ شمالی قرار گرفته است. وسعت این دشت ۳۴۸۹۳ کیلومتر مربع است. دشت در ارتفاع ۱۴۵۰ متر از سطح دریاهای آزاد واقع است. آب و هوای آن خشک و نیمه‌خشک و متوسط دمای سالیانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد با متوسط بارش سالیانه ۱۷۱ میلی‌متر است (صالحی طبس، ۱۳۹۸). ایستگاه هواشناسی بیرجند در سال ۱۳۳۴ خورشیدی (۱۹۵۵ میلادی) راه‌اندازی گردید (جدول ۱). بر اساس اطلاعات این ایستگاه، میانگین حداقل و حداکثر دمای سالانه بیرجند به ترتیب ۸ و ۲۴ درجه سانتی‌گراد است و همچنین میانگین سالانه رطوبت نسبی در این شهر ۳۶ درصد است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی را دشت بیرجند نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی در کشور

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک بیرجند

نام ایستگاه	کد ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
بیرجند	۴۰۸۰۹	سینوپتیک	۵۹/۱۲	۳۲/۸۸	۱۴۸۰

روش تحقیق

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر رشد و نمو گندم آبی و دیم از مدل‌های AOGCM و مدل گیاهی AquaCrop استفاده گردید. پارامترهای اقلیمی مورد استفاده در این تحقیق شامل دمای مینیمم، ماکزیمم و بارش بوده که یکی از مهم‌ترین موارد تاثیرگذار بر رطوبت خاک هستند. برای تولید سناریوهای دما و بارش ماهانه منطقه برای دوره‌های آتی از میان پنج مدل گردش کلی - GFDL, MIROC-ESM, CSIRO-MK3.6, IPSL-CM5A-LR, HADGEM2-ES استفاده گردید. مدل CSIRO-MK3.6 با استفاده از روش وزن‌دهی و معیارهای عملکردی (RMSE، R^2 و NSE) به عنوان مدل برتر در محدوده مطالعاتی انتخاب گردید. (Yaghoobzadeh (2022) همچنین مدل CSIRO-MK3.6 را جزو مدل‌های برتر در پیش بینی بارش برآورد کرده بود. خروجی مدل CSIRO-MK3.6 تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 مربوط به گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم (IPCC) استفاده شد. دوره آماری (۲۰۰۴-۱۹۷۵) به عنوان دوره پایه و همچنین دوره (۲۰۵۴-۲۰۲۵) به عنوان دوره آتی انتخاب و در ادامه برای تولید داده‌های روزانه و ریز مقیاس شده، از مدل LARS-WG استفاده گردید. آزمایش‌های مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به صورت فاکتوریل با ۵ سطح تنش خشکی (۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد و تیمار دیم با دونوبت آبیاری) و دو سطح تنش شوری (۱/۶ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر) در محل مزرعه در طی دو سال انجام گرفت (جدول ۲). پس از واسنجی و ارزیابی مدل گیاهی، برای برآورد خشک‌سالی کشاورزی (SMDI) و مقایسه آن با عملکرد گیاه گندم در دوره پایه، داده‌های رطوبت خاک توسط مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. سپس برای شبیه‌سازی رطوبت خاک در دوره آتی از سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 و مدل CSIRO-MK3.6 استفاده گردید و در نهایت شاخص خشک‌سالی کشاورزی (SMDI) در دوره آتی تعیین شد و نتایج تحلیل گردید.

جدول ۲- مقادیر تنش شوری و خشکی در رژیم‌های مختلف آبیاری

رژیم آبیاری	S1I4	S1I3	S1I2	S1I1	S2I4	S2I3	S2I2	S2I1	rainfed
	تنش	تنش	تنش	تنش	تنش	تنش	تنش	تنش	
	خشکی	خشکی	خشکی	خشکی	خشکی	خشکی	خشکی	خشکی	
توضیحات	۵۰٪	۷۵٪	۱۰۰٪	۱۲۵٪	۵۰٪	۷۵٪	۱۰۰٪	۱۲۵٪	دیم
	& تنش	& تنش	& تنش	& تنش	& تنش	& تنش	& تنش	& تنش	
	شوری ۱/۶	شوری ۱/۶	شوری ۱/۶	شوری ۱/۶	شوری ۶	شوری ۶	شوری ۶	شوری ۶	
	ds/m	ds/m	ds/m	ds/m	ds/m	ds/m	ds/m	ds/m	

Root Mean Square Error^۱
Nash-Sutcliffe^۲
Intergovernmental panel of climate change^۳

مدل و سناریوهای مورد استفاده

در حال حاضر معتبرترین ابزار تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های GCM هستند. هیات بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم خود از سناریوهای جدید باعنوان RCP^۴ استفاده نموده است. سناریوهای RCP شامل یک سناریوی کاهش‌ی سختگیرانه (RCP2.6)، دو سناریوی حد واسط (RCP4.5 و RCP6) و یک سناریوی بدبینانه (RCP8.5) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا هستند (IPCC, 2013). خصوصیات مدل‌ها و سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق، در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- خصوصیات مدل و سناریوهای انشار مورد استفاده در این تحقیق

نام مدل	مخفف مدل	کشور و گروه موسس	قدرت تفکیک (طول*عرض)	سناریوهای انتشار مورد استفاده
CSIRO-MK3.6.0	CSIRO-QCCCE	استرالیا CSIRO (Common wealth Scientific and Industrial Research Organization)	1.875*1.86	RCP4.5&RCP8.5
GFDL-ESM2M	NOAA-GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA	2.5*2	RCP4.5&RCP8.5
HADGEM2-ES	INPE	National Institute For Space Research Brazil	1.875*1.25	RCP4.5&RCP8.5
MIROC-ESM	MIROC	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan	1.77*2.81	RCP4.5&RCP8.5
IPSL-CM5A-LR	IPSL	Institut Pierre Simon Laplace France	1.875*3.75	RCP4.5&RCP8.5

مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG

خروجی مدل‌های AOGCM را نمی‌توان به‌طور مستقیم در مطالعات مختلف به منظور پیش‌بینی و ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای استفاده کرد، به‌همین دلیل از روش‌های ریزمقیاس نمایی برای رفع این مشکل استفاده می‌شود (یعقوب زاده وهمکاران، ۱۳۹۶). بنابراین برای ریزمقیاس نمایی خروجی‌های مدل‌های گردش کلی و تولید سری زمانی بارش و دما برای دوره آتی از مدل آماری LARS-WG استفاده می‌شود. این مدل یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی (بارش روزانه، دمای حداکثر و حداقل) در یک ایستگاه استفاده شود (Fan et al., 2021). LARS-WG برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی، از توزیع‌های آماری پیچیده بهره می‌برد. بنابراین، مدل مذکور برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک، تر، بارش روزانه و سری‌های تابش دارای توزیع نیمه‌تجربی است.

Representative Concentration Pathways^۴

این مدل با دریافت فایل محتوای رفتار آب و هوای گذشته ایستگاه و سناریوی تغییر اقلیم، مقادیر روزانه دمای حداقل، حداکثر و بارش را در آینده پیش‌بینی می‌کند (یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۵).

شاخص خشک‌سالی کمبود رطوبت خاک (SMDI)

این شاخص بر مبنای مجموع رطوبت خاک به طور روزانه برای یک سال استوار است و تنها فاکتور اقلیمی مورد استفاده در این شاخص، داده‌های رطوبت خاک است. این داده‌ها به کمک مدل شبیه‌ساز رطوبت دوره پایه محاسبه شده و شاخص کمبود رطوبت خاک از طریق روابط (۱ و ۲) محاسبه می‌شود (Narasimhan and Srinivasan, 2005). در این روابط، $SD_{i,j}$: درصد کمبود رطوبت خاک، $SW_{i,j}$: میانگین رطوبت خاک در هفته در پروفیل خاک، MSW_j : متوسط درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، $max SW_j$: ماکزیمم درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، $min SW_j$: مینیمم درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، i : نشان‌دهنده تعداد هفته‌ها، j : نشان‌دهنده تعداد سال‌ها است. در صد کمبود رطوبت خاک از ۱۰۰ تا ۱۰۰- متغیر است. در ۱۰۰ خاک مرطوب‌ترین و در ۱۰۰- خاک خشک‌ترین وضعیت را دارا است. در نهایت شاخص SMDI از رابطه (۳) برای هر هفته به دست می‌آید. به دلیل اینکه اندازه‌گیری رطوبت خاک هفتگی، به منظور تعیین خشک‌سالی برای یک دوره آماری بلندمدت سبب می‌شود با داده‌های زیادی رو به رو شویم، بدین‌منظور شاخص SMDI بر اساس روش پالمر اصلاح شده است (۴). اگر بخواهیم شدت خشک‌سالی را برای هر ماه محاسبه نماییم، در معادلات زیر، $i = 1$ و $t = 1$ (زمان برای هفته اول) قرار داده می‌شود و معادله بعد از یک سری محاسبات به شکل رابطه (۵) خلاصه می‌شود. پس از محاسبه این شاخص، می‌توان به کمک جدول (۴) وضعیت خشک‌سالی کشاورزی را توسط این شاخص ارزیابی نمود.

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{MSW_j - \min SW_j} * 100 \quad \text{if } SW_{i,j} \leq MSW_j \quad (1)$$

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{\max SW_j - MSW_j} * 100 \quad \text{if } SW_{i,j} > MSW_j \quad (2)$$

$$SMDI_j = \frac{\sum_{t=1}^j SD_t}{(25t+25)} \quad (3)$$

$$SMDI_j = SMDI_{j-1} + \Delta SMDI_j \quad (4)$$

$$SMDI_j = 0.5 * SMDI_{j-1} + \frac{SD_j}{50} \quad (5)$$

جدول ۴- طبقه‌بندی شاخص خشکسالی بر اساس شاخص SMDI (Yaghoobzadeh,2015)

SMDI Values	weather conditions
۴ یا بیشتر	به شدت مرطوب (Extreme wet spell)
۳ تا ۳,۹۹	خیلی مرطوب (Severe wet spell)
۲ تا ۲,۹۹	رطوبت متوسط (Moderate wet spell)
۱ تا ۱,۹۹	رطوبت خفیف (Mild wet spell)
۰,۹۹ تا ۰,۵	دوره مرطوب اولیه (Incipient wet spell)
۰,۴۹ تا -۰,۴۹	نرمال (Normal)
-۰,۹۹ تا -۰,۵	دوره خشکسالی اولیه (Incipient drought)
منفی ۱ تا -۱,۹۹	خشکسالی خفیف (Mild drought)
منفی ۲ تا -۲,۹۹	خشکسالی متوسط (Moderate drought)
منفی ۳ تا -۳,۹۹	خشکسالی شدید (Severe drought)
منفی ۴ یا کمتر	خشکسالی بسیار شدید (Extreme drought)

نتایج و بحث

اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی

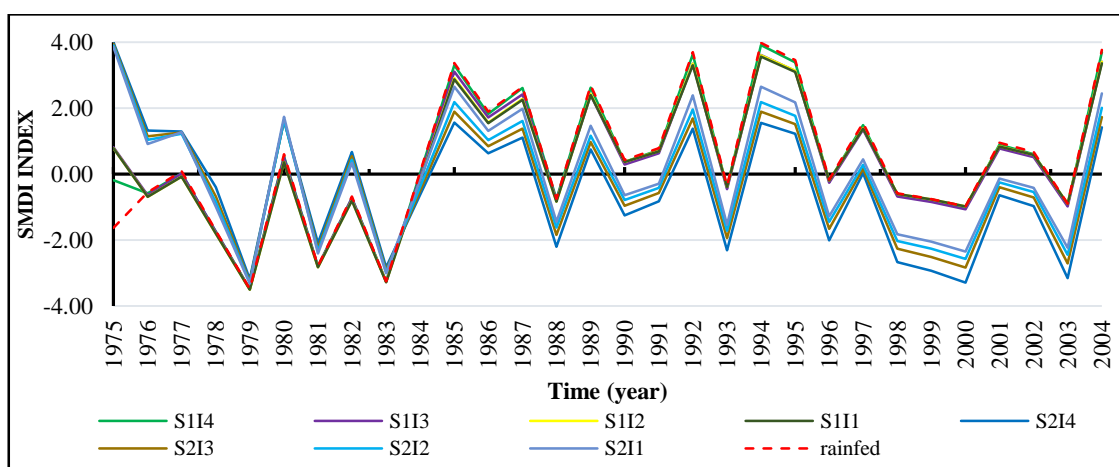
برای تولید داده‌های اقلیمی و مشخص شدن تغییرات آن‌ها در دوره آتی، از مدل CSIRO-MK3.6.0 با دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. جدول (۵) مقادیر متوسط سالانه پارامترهای اقلیمی را در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو انتشار نام‌برده نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۵) مشاهده می‌شود که مقدار بارش پیش‌بینی شده برای دوره آتی نسبت به دوره پایه، تحت هر دو سناریوی انتشار کاهش یافته است. همچنین برطبق پیش‌بینی مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6.0 سناریو RCP8.5 نسبت به RCP4.5 میانگین بارش کمتری نشان می‌دهد. همچنین نتایج میانگین سالانه دمای ماکزیمم و مینیمم در دوره پایه و آتی نشان می‌دهد که مقدار دمای ماکزیمم و مینیمم در دوره آتی نسبت به دوره پایه در هر دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 افزایش داشته است. از طرفی به‌منظور مقایسه سناریوها، مقادیر سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5، افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش را نشان می‌دهد که بیانگر بحرانی بودن سناریو RCP8.5 در دوره آتی است.

جدول ۵- مقادیر متوسط سالانه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5

سناریو	دمای حداکثر (سانتی‌گراد)	دمای حداقل (سانتی‌گراد)	بارش (میلی‌متر)
دوره پایه	۲۴/۳۷	۸/۰۹	۱۷۳/۳۸
RCP4.5	۲۶/۹۹	۱۰/۹۱	۱۷۱/۱۱
RCP8.5	۲۷/۲۶	۱۱/۲۴	۱۶۹/۱۵

اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی در دوره پایه

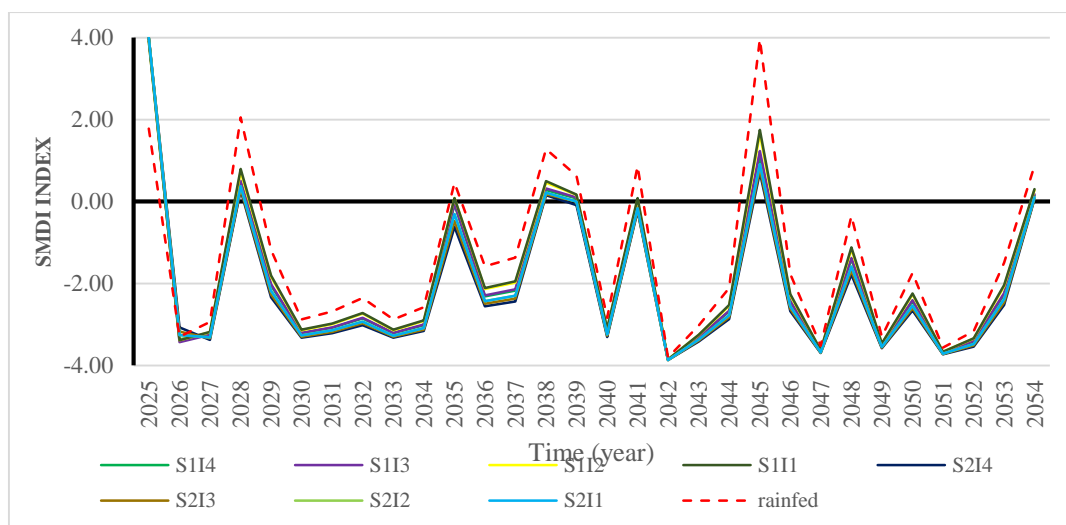
شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI) روند کمبود رطوبت خاک را در طی دوره رشد محصول نشان می‌دهد. شکل (۲) مقادیر میانگین سالانه SMDI برای گیاه گندم در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۵) را در تنش‌های شوری و خشکی متفاوت نشان می‌دهد. ارزیابی نتایج شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره پایه برای تیمارهای مورد بحث در شکل (۲) نشان می‌دهد که تعداد سال‌های خشک بر اساس شاخص خشکسالی SMDI در دو تیمار دیم (rainfed) و S114 برابر با ۱۲ سال است. همچنین تعداد سال‌های خشک بر اساس شاخص خشکسالی SMDI در تیمارهای دیگر با سطوح تنش شوری ۱/۶ برابر با ۱۳ سال و در تیمارهای با سطح تنش شوری ۶ برابر با ۱۶ سال است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح تنش شوری رابطه مستقیم با شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI دارد؛ به این صورت که تعداد سال‌های خشک با مقادیر منفی شاخص SMDI در سطح تنش شوری آب ۶ بیشتر از سطح تنش شوری ۱/۶ است. با بررسی مقادیر به دست آمده شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI برای دو تیمار دیم و تیمار S114 مشخص شد که تیمار دیم نسبت به تیمار S114 در دوره پایه از نظر خشکسالی کشاورزی از شرایط بهتری برخوردار است. در مجموع با بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۲) می‌توان گفت که در تیمارهای مورد بحث، تیمار دیم (rainfed) در دوره پایه کمتر تحت تاثیر خشکسالی کشاورزی قرار گرفته‌اند.



شکل ۲- شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره پایه برای تیمارهای مختلف

اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP4.5

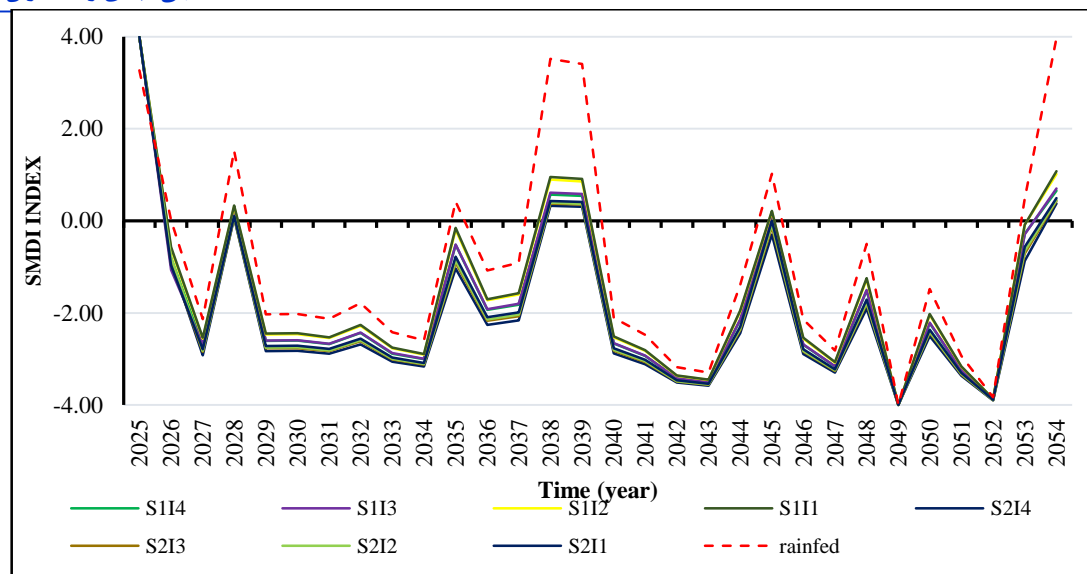
بررسی نتایج مربوط به شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آتی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP4.5 برای تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) تیمارهای دیم (rainfed)، S112 و S111 تعداد مقادیر منفی شاخص خشکسالی SMDI کمتری نسبت به سایر تیمارها دارند. همچنین نتایج شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش سطح تنش شوری از ۱/۶ به ۶ باعث افزایش تعداد سال‌های خشک می‌شود و همچنین افزایش میزان درصد آبیاری از سطح ۵۰ درصد به سطح ۱۲۵ درصد میزان نیاز گیاه تاثیر مستقیمی بر روی کاهش تعداد سال‌های خشک در تیمارهای مختلف دارد. در نهایت با بررسی نمودار مربوط به شاخص خشکسالی SMDI برای تیمارهای مختلف مشخص شد در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP4.5، تیمار دیم نسبت به سایر تیمارها کمتر تحت تاثیر خشکسالی کشاورزی قرار گرفته است و شرایط بهتری را خواهد داشت. همچنین بررسی مقادیر ارائه شده شاخص SMDI برای تیمار دیم در دوره آتی تحت سناریو RCP4.5 نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۲۸ و ۲۰۴۵ دارای رطوبتی بالاتر از متوسط و سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۳۸، ۲۰۳۹ و ۲۰۴۱ جز سال‌های با رطوبت کم هستند. همچنین سال‌های ۲۰۲۶، ۲۰۴۲، ۲۰۴۳، ۲۰۴۷، ۲۰۴۹، ۲۰۵۱ و ۲۰۵۲ در دوره آتی در طبقه‌بندی سال‌های با خشکسالی شدید قرار می‌گیرند.



شکل ۳- شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آتی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP4.5 برای تیمارهای مختلف

اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP8.5

نتایج شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI) در دوره آتی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP8.5 برای تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که در دوره آتی تیمار دیم (rainfed) تعداد مقادیر منفی شاخص خشکسالی SMDI کمتری نسبت به سایر تیمارها دارد. همچنین نتایج شکل (۴) نشان می‌دهد که افزایش سطح تنش شوری از ۱/۶ به ۶ باعث افزایش تعداد سال‌های خشک می‌شود و همچنین افزایش میزان درصد آبیاری از سطح ۵۰ درصد به سطح ۱۲۵ درصد میزان نیاز گیاه تاثیر مستقیمی بر روی کاهش تعداد سال‌های خشک در تیمارهای مختلف دارد. در نهایت با بررسی نتایج مربوط به شاخص خشکسالی SMDI برای تیمارهای مختلف مشخص شد که در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP8.5، تیمار دیم نسبت به سایر تیمارها کمتر تحت تاثیر خشکسالی کشاورزی قرار گرفته است و شرایط بهتری خواهد داشت. همچنین بررسی مقادیر ارائه شده شاخص SMDI برای تیمار دیم در دوره آتی تحت سناریو RCP8.5 نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۳۸، ۲۰۳۹ و ۲۰۵۴ دارای رطوبت بالا و سال‌های ۲۰۲۸ و ۲۰۴۵ جز سال‌های با رطوبت کم هستند. همچنین سال‌های ۲۰۴۲، ۲۰۴۳، ۲۰۴۹ و ۲۰۵۲ در دوره آتی در طبقه بندی سال‌های با خشکسالی شدید و بسیار شدید قرار می‌گیرند. در نهایت با مشاهده نتایج ارائه شده در شکل (۳) و (۴) می‌توان گفت که در تیمارهای مختلف در دوره آتی سطح تنش شوری و سطح تنش خشکی هر دو بر روی درجه خشکسالی تاثیر گذارند؛ به این صورت که با افزایش سطح تنش شوری تعداد و مقادیر منفی شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI افزایش می‌یابد و همچنین با تغییر سطح تنش خشکی از ۵۰ درصد به ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه تعداد و مقادیر منفی شاخص SMDI کاهش می‌یابد یا به عبارت دیگر درجه خشکسالی کمتر می‌شود و نیز تیمار دیم (rainfed) در هر دو سناریو انتشار در دوره آتی نسبت به سایر تیمارهای از شرایط بهتری برخوردار است و درجه خشکسالی در این تیمار کمتر از سایر تیمارها است. همچنین با مشاهده نتایج جدول (۶) می‌توان گفت تمامی تیمارها، به طور میانگین در دوره آتی در سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو انتشار RCP4.5 درجه خشکسالی کمتری خواهند داشت یا به عبارت دیگر کمتر تحت تاثیر خشکسالی قرار خواهند گرفت.



شکل ۴- شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP8.5 برای تیمارهای مختلف

جدول ۶- میانگین شاخص خشکسالی SMDI در دوره پایه و آبی تحت دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 برای تیمارهای مختلف

rainfed	S2I1	S2I2	S2I3	S2I4	S1I1	S1I2	S1I3	S1I4	
۰/۴۰	۰/۰۵	-۰/۱	-۰/۲۴	-۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۴۱	دوره پایه
-۱/۴۲	-۲/۰۳	-۲/۰۳	-۲/۰۷	-۲/۱۱	-۱/۸۱	-۱/۸۳	-۱/۹۳	-۱/۹۵	RCP4.5
-۰/۹۹	-۱/۹۰	-۱/۹۳	-۱/۹۵	-۲/۰۱	-۱/۶۱	-۱/۶۳	-۱/۷۹	-۱/۷۹	RCP8.5

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای تولید داده‌های رطوبت خاک در دوره آبی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۷۵) از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. به منظور ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی، از مدل LARS-WG استفاده شد. و پارامترهای اقلیمی برای دوره آبی برآورد گردید. در نهایت توسط مدل AquaCrop، مقادیر رطوبت خاک برای تیمارهای مختلف شبیه‌سازی شد و خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI در دوره پایه و آبی تعیین شد و نتایج تحلیل گردید. نتایج تغییرات پارامترهای اقلیمی نشان داد، که مقدار بارش پیش‌بینی شده برای دوره آبی نسبت به دوره پایه، تحت هر دو سناریوی انتشار کاهش یافته است. همچنین نتایج میانگین سالانه دمای ماکزیمم و مینیمم در دوره پایه و آبی نشان داد که مقدار دمای ماکزیمم و مینیمم در دوره آبی نسبت به دوره پایه تحت هر دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 افزایش داشته است. از طرفی به‌منظور مقایسه سناریوها، مقادیر سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5، افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش را نشان می‌دهد که بیانگر بحرانی بودن سناریو RCP8.5 در دوره آبی است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، شدت شاخص خشکسالی SMDI برای تیمار دیم در دوره آبی در هر دو سناریو انتشار نسبت به سایر تیمارها کمتر است. همچنین تمامی تیمارها، به‌طور میانگین در دوره آبی در سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو انتشار RCP4.5 از درجه خشکسالی کمتری برخوردار خواهند بود یا به عبارت دیگر کمتر تحت تاثیر خشکسالی قرار خواهند گرفت.

منابع

- رمضانی اعتدالی، ه، لیاقت، ع، پارسی نژاد، م، رضانی اعتدالی، م. ۱۳۹۱. بررسی وضعیت خشکسالی کشاورزی بر اساس رطوبت خاک در ایستگاه سینوپتیک قزوین. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶(۱): ۹۱-۸۱.
- رودری، آ، حسن پور، ف، یعقوب زاده، م، دلاور، م. ۱۳۹۸. بررسی رابطه خشک سالی هواشناسی و هیدرولوژی در دشت سیستان. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۶): ۴۴-۳۳.
- دلقدنی، م، جورابلو، س، گنجی نوروزی، ز. ۱۴۰۲. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شدت، مدت و مقدار خشکسالی منطقه سمنان با استفاده از دو شاخص SPI و RDI. مجله پژوهش های خشکسالی و تغییر اقلیم، ۱(۱): ۱۸-۱.
- صالحی طبس، م. ۱۳۹۸. اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی و هواشناسی به کمک مدل گیاهی و داده های گزارش پنجم تغییر اقلیم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند.
- یعقوب زاده، م. ۱۳۹۴. شبیه سازی تبخیر و تعرق و رطوبت خاک به منظور ارزیابی خشکسالی کشاورزی برای دوره های پایه و آبی به کمک تکنیک سنجش از دور، پایان نامه دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز.
- یعقوب زاده، م، احمدی، م، برومند نسب، س، حقایقی مقدم، س. ۱۳۹۵. اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر-تعرق در طی دوره رشد گیاهان مزارع آبی و دیم با استفاده از مدل های AOGCM. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۰(۴): ۵۲۳-۵۱۱.
- یعقوب زاده، م، امیرآبادی زاده، م، رضانی، ی، پوررضا بیلندی، م. ۱۳۹۶. بررسی عدم قطعیت مدل های گردش عمومی جو در برآورد رطوبت خاک تحت تاثیر تغییر اقلیم. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۵): ۱۱۱۹-۱۱۰.
- Chunping, T., Jianping, Y., Man, L. 2015. Temporal-spatial variation of drought indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui autonomous region, China. *Journal of Atmosphere*, 6, 1399 -1421.
- Delghandi, M., Sanaz Joorablou, S., Ganji Nowroozi, Z. 2023. The impact of climate change on severity, duration, and magnitude of drought using SPI and RDI in the Semnan region, *JOURNAL OF DROUGHT AND CLIMATE CHANGE RESEARCH*, 1(1): 1-18 (In Persian).
- Fan, G., Sarabandi, A., Yaghoobzadeh, M. 2021. Evaluating the climate change effects on temperature, precipitation and evapotranspiration in eastern Iran using CMPI5, *Water Supply* 218: 4316-4327.
- Grillakis, M. G. 2019. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. *Science of the Total Environment*, 660, 1245-1255.
- Toorajzadeh, O., Piri, H., Barati, M. 2024. Sensitivity analysis and evaluation of Aquacrop model in simulating water productivity and quinoa yield under different irrigation water amount and salinity management and Biochar and NanoBiochar application, *Journal of Water and Soil Conservation*, 31(1): 1-25 (In Persian).
- IPCC. 2013. Summary for policymakers. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P. (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, 1-19
- Narasimhan, B., Srinivasan, R. 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4): 69-88.
- Oliveira-Júnior J.F., Gois G., Terassi P.M.B., Silva Junior C.A., Blanco C.J.C., Sobral B.S., Gasparini K.A.C. 2018. Drought severity based on the SPI index and its relation to the ENSO and PDO climatic variability modes in the regions North and Northwest of the State of Rio de Janeiro – Brazil, *Atmos. Res.* 212: 91-105.
- Ramezani, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Ramezani, M. 2012. Status of Agricultural Droughts Based on Soil Moisture in Qazvin, *Journal of Water Research in Agriculture*, 26(1), 81-91 (In Persian).
- Roodari, A., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., Delavar, M. 2019. Investigation of relation between meteorological and hydrological drought in Sistan plain. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21: 33-44 (In Persian).
- Salehi Tabas, M. 2019. The investigation of climate change impact on agriculture and meteorological drought of birjand plain by DSSAT vegetarian model and drought indexes. MSc dissertation, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Iran (In Persian).
- Semenov, M. A., Barrow, E. M. 2002. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. *User Manual*, Hertfordshire, UK (August):0-27
- Vicente-Serrano, S.M., Miralles, D.G., DomínguezCastro, F., Azorin-Molina, C., El Kenawy, A., McVicar, T.R., Tomás-Burguera, M., Beguería, S., Maneta, M. Peña-Gallardo, M. 2018. Global assessment of the

- standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) for drought analysis and monitoring. *Journal of Climate*, 31(14), 5371-5393.
- Wambua, R. M. 2019. Spatio-temporal characterization of Agricultural Drought using Soil Moisture Deficit Index (SMDI) in the Upper Tana River basin, Kenya.
- Yaghoobzadeh, M. 2015. The simulation of evapotranspiration and moisture soil for agricultural drought evaluation in the base line and future by using remote sensing, Ph.D. dissertation, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz (In Persian).
- Yaghoobzadeh M., Ahmadee, M. boroomand, S. 2017. Impact of Climate Change on Changing Trend of Evapotranspiration during the Growth Period of Irrigated and Rainfed Field Crops by AOGCM Models, *Journal of Water Research in Agriculture*, 30(4): 511-523 (In Persian).
- Yaghoobzadeh, M., AmirAbadi Zadeh, M., Ramezani, Y., Pourreza, M. 2018. An uncertainty analysis of general circulation models for estimation of soil moisture affected by climate change, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5): 1109-1119 (In Persian).
- Yaghoobzadeh, M. 2022. Selecting the best general circulation model and historical period to determine the effects of climate change on precipitation, *IDŐJÁRÁS/Quarterly journal of the Hungarian meteorological service*, 126(2): 247-265.