

Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)



Winter 2025, Vol. 3, Spatial Issue, pp 79-94

doi [10.22077/jdcr.2025.9396.1143](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9396.1143)

Modeling the Effect of Temperature Increase on Maize Yield Components

Fateme Safari¹, Hadi Ramezani Etedali^{2,*}  Abbas Kaviani³, Leila Khosravi⁴

1. Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Agricultural and Natural Resources Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
2. Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Agricultural and Natural Resources Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Agricultural and Natural Resources Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
4. M.Sc Graduated, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding Author: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Keywords:

Maximum air temperature, Biomass, AquaCrop, Climate change.

Introduction

Challenges to global agriculture. Among the various climate-related factors, increased temperature and heat stress have been identified as major threats to crop productivity, particularly for crops that are sensitive to thermal fluctuations. Maize (*Zea mays* L.), a vital cereal crop cultivated worldwide for food, feed, and industrial purposes, is notably vulnerable to high temperatures during key phenological stages. As temperature rises above the physiological thresholds of the crop, adverse effects on photosynthesis, pollination, grain set, and ultimately yield become more pronounced.

Received:

15 May 2025

Revised:

18 June 2025

Accepted:

1 July 2025

In light of these concerns, this study was conducted to assess the effects of temperature stress on maize growth, specifically focusing on two temperature-related indicators: (1) average maximum temperature and (2) cumulative temperature above the thermal threshold. The overarching goal was to develop linear regression models that could quantify and predict the impact of these parameters on maize yield and biomass at both seasonal and phenological stage levels. Such models could be instrumental in climate risk assessments and adaptive management strategies for maize cultivation in semi-arid regions like Qazvin, Iran.

How to cite this article:

Safari, F., Ramezani Etedali, H., Kaviani, A. & Khosravi, L. (2026). Modeling the effect of temperature increase on Maize yield components. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Spatial Issue), 78-94. [10.22077/jdcr.2025.9396.1143](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9396.1143)



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Materials and Methods

The study area comprised six maize fields within the Magsal Agro-Industrial Complex in Qazvin Province, characterized by a semi-arid climate. The single-cross maize hybrid SC 704 was selected due to its widespread cultivation in Iran and its known sensitivity to temperature stress during reproductive stages.

Field-level data on crop growth, soil characteristics, management practices, and daily weather variables were collected. The AquaCrop model (developed by FAO) was used to simulate crop development, yield, and biomass. Model calibration was performed using observed data for flowering and maturity dates, biomass accumulation, and final yield.

To quantify thermal stress, two key indicators were calculated: (1) the seasonal average of maximum daily temperature, and (2) the cumulative number of days with maximum temperature exceeding a defined threshold based on the physiological limits. Regression analyses were conducted to relate these indicators to observed yield and biomass, both at the full-season level and within four specific growth stages (vegetative, flowering, grain filling, and maturity). Model performance was evaluated using statistical metrics including RMSE (Root Mean Square Error), NRMSE, MBE (Mean Bias Error), R^2 , and adjusted R^2 . To further assess uncertainty, the F-factor and R-factor indices were applied.

Result and Discussion

Calibration of the AquaCrop model demonstrated reliable performance in simulating maize development, with RMSE values between 4.6 and 6.3 for flowering and maturity predictions. When regression models were developed using seasonal indicators, average maximum temperature was found to be a strong predictor of yield ($R^2 = 0.79$, RMSE = 0.84), while cumulative high-temperature days better explained biomass variation ($R^2 = 0.67$, RMSE = 0.72).

However, the stage-based models consistently outperformed seasonal models in accuracy. Yield prediction models that incorporated maximum temperature and cumulative thermal stress during specific stages had R^2 values of 0.90 and 0.88, with corresponding RMSE values of 0.57 and 0.68, respectively. Similarly, biomass was best predicted using maximum temperature during critical stages ($R^2 = 0.83$, RMSE = 0.52). All regression coefficients were negative, indicating that temperature was associated with reductions in both yield and biomass. The flowering stage was identified as the most temperature-sensitive period, with high temperatures disrupting pollen viability and grain set.

Simulated scenarios also showed that increased temperatures during sensitive stages could lead to a 13–25% reduction in final yield. Uncertainty analysis using F-factor (0.1602) and R-factor (0.1944) demonstrated strong agreement between the model outputs and observed data, affirming the robustness of the developed regression models.

Conclusion

This study highlights the detrimental effects of temperature stress on maize productivity, particularly during flowering and grain filling stages. It emphasizes the need for stage-specific modeling approaches rather than seasonal averages, as stage-wise models provided more accurate predictions of yield and biomass. The regression models developed in this research can be integrated into decision support systems for better climate risk management and crop planning.

Given the observed yield losses under projected temperature scenarios, adaptive strategies such as adjusting planting dates, selecting heat-tolerant hybrids, and modifying irrigation schedules should be prioritized. These findings also underscore the importance of integrating crop modeling tools such as AquaCrop with climate data to improve resilience and sustainability in maize production under future warming trends.



مدل‌سازی اثر افزایش دما بر اجزاء عملکرد ذرت

فاطمه صفری^۱، هادی رضائی اعتدالی^{۲*}، عباس کاویانی^۳، لیلا خسروی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
- ۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
- ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
- ۴- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، کارشناس آزمایشگاه کیفیت آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، کرج، ایران.

*نویسنده مسئول: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم با ایجاد نوسانات در پارامترهای هواشناسی مانند دما، بر فرایندهای محیط‌زیستی و کشاورزی اثر می‌گذارد. شناخت این پارامترها و تخمین عملکرد محصول پیش از برداشت، نقش مهمی در بهبود مدیریت تولید، درآمد کشاورزان و برنامه‌ریزی تأمین غذا دارد. چراکه تولید محصول نتیجه اثر متقابل فرایندهای گیاهی و پارامترهای آب و هوایی است. در این پژوهش، عملکرد و زیست‌توده ذرت با رقم سینگل کراس ۷۰۴، بر اساس دو پارامتر دمایی: متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه گیاه تخمین زده شد و معادلات مربوط به برآورد عملکرد و زیست‌توده به صورت فصلی و مرحله‌ای توسعه داده شد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر پارامترهای دمایی و پیش‌بینی مقدار اجزاء عملکرد در اثر تغییرات دمایی است. طبق نتایج به‌دست‌آمده در معادلات فصلی، معادله عملکرد بر اساس متوسط دمای حداکثر با مقادیر R^2 و RMSE برابر ۰/۷۹ و ۰/۸۴ و معادله زیست‌توده بر اساس مجموع دماهای بالای حد آستانه با مقادیر R^2 و RMSE برابر ۰/۶۷ و ۰/۷۲ برآورد خوبی داشتند. در توسعه مرحله‌ای معادلات، معادله عملکرد بر اساس هر دو پارامتر با مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب: ۰/۹۰، ۰/۵۷، ۰/۸۸ و ۰/۶۸ و معادله زیست‌توده بر اساس متوسط دمای حداکثر با مقادیر R^2 و RMSE برابر ۰/۸۳ و ۰/۵۲ تخمین خوبی دادند.

واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم، دمای حداکثر
هوا، زیست‌توده،
AquaCrop

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۴/۰۹

مقدمه

عملکرد گیاهان زراعی و سازگاری آنها، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است. چنانچه روند این تغییرات سریع باشد، به خاطر آنکه گیاهان نسبت به سایر موجودات زنده امکان گریز از شرایط نامساعد را ندارند، بنابراین زیان بیشتری را متحمل خواهند شد. پس هرگونه تغییر در پارامترهای اقلیمی به نوبه خود، منجر به تغییر در تولید محصولات کشاورزی می‌شود. کاهش میزان تولید محصولات کشاورزی در اثر سرمازدگی، تگرگ و گرمزدگی از جمله اثرات گرمایش جهانی در بخش کشاورزی است؛ بنابراین دمای هوا، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای اقلیمی مؤثر بر رشد گیاهان و تولیدات کشاورزی به حساب می‌آید (Bayatani et al., 2020).

سطح زیر کشت، میزان تولید در هکتار و مقدار مصرف ذرت، در طی سال‌های اخیر در اغلب کشورهای جهان افزایش داشته، به طوری که در بین غلات، پس از گندم و برنج، در مقام سوم قرار دارد (Bazgir, 2016). ذرت در ایران به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین انرژی در تغذیه دام و طیور بشمار می‌رود. به همین دلیل توسعه سطح زیر کشت و افزایش تولید این محصول از اولویت خاصی برخوردار می‌باشد. طبق آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ وزارت کشاورزی، استان قزوین با سهم ذرت تولیدی ۸/۲۲ درصدی در رتبه چهارم تولید این محصول در سطح کشور قرار دارد. سطح زیر کشت استان ۲۲۳۲۳ هکتار و میزان تولید کل ذرت در استان ۴۹/۷۸۷ تن در هکتار است.

محدوده دمایی مطلوب برای رشد و دستیابی به عملکرد پتانسیل گیاه ذرت، ۳۰-۸ درجه سانتی‌گراد است (Steduto, 2012). پروتوپلاسم گیاهان، فقط در یک دامنه محدود از دما، می‌تواند به فعالیت‌های خود ادامه دهد (Alizadeh, 2010). در صورت قرارگیری گیاه در خارج از این محدوده دمایی، با تنش روبرو شده و ممکن است به

آن خسارت وارد شود. بنابراین برای افزایش میزان تولید محصول و سود کشاورز، لازم است از ارقام مقاوم به تنش‌های غیرزیستی همچون تنش دمایی استفاده شود. از طرفی افزایش تنها یک درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای فصلی، می‌تواند عملکرد اقتصادی ذرت را ۳ تا ۱۳ درصد کاهش دهد (Izaurrealde et al., 2011). تنش دمایی (دماهای بالا) اثر منفی‌ای بر زنده ماندن گرده‌ها و پذیرش کاکل‌ها دارد که منجر به کاهش قابل توجهی در تشکیل بذر و عملکرد اقتصادی می‌شود (Waqas et al., 2021). بر اساس بررسی‌های هاوتین و همکاران (Hawtin et al., 1996) چنانچه افزایش دما با کاهش رطوبت نسبی همراه باشد اثرات زیانباری بر دانه گرده ذرت خواهد داشت و در دمای ۳۵-۳۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی پایین، حدود ۳۰ درصد دانه‌های گرده بعد از رها شدن در مدت یک تا دو ساعت قدرت باروری خود را از دست می‌دهند.

گروه کشاورزی دولت آمریکا (USDA) در گزارش سال ۲۰۱۳ خود علت کاهش شدید عملکرد ذرت دانه‌ای در ایالت‌های اصلی کشت این محصول را، گرم بودن بیش از حد دمای هوا و همچنین کاهش شدید مقدار بارش در ماه جولای که همزمان با مرحله رشد زایشی ذرت بوده اعلام کرده بود. روت (Roth, 2015) در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که، افزایش دما باعث افزایش ماده خشک ذرت علوفه‌ای شد، گرچه باید توجه داشت که این افزایش دما در مراحل پایانی رشد زایشی به دلیل افزایش تنفس در گیاه، سبب کاهش عملکرد دانه می‌گردد. همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش تراکم گیاه، عملکرد نیز افزایش می‌یابد، ولی این افزایش کمیت در عملکرد، کاهش شکر و نشاسته در علوفه را به همراه خواهد داشت که در نهایت پایین بودن قابلیت هضم علوفه برای دام را بدنبال دارد. در پژوهشی که نیف و همکاران (Neiff et al., 2016) انجام دادند مشخص شد، دمای بالا بر میزان تبادل دی‌اکسید کربن در ذرت تأثیر داشته و اثر منفی آن بر

تغییر اقلیم در منطقه با افزایش GDD کاهش خواهد یافت و میزان زیست‌توده و عملکرد دانه با فرض ثابت ماندن تاریخ کشت کنونی و آبیاری کامل حدود یک تا دو تن در سناریوهای متفاوت افزایش خواهد یافت (Hajivandpaydari et al., 2023).

در تحقیقی که موکونن و هایسکانن (Muukkonen and Heiskanen, 2017) انجام دادند، نشان داده شد که تغییرات دما می‌تواند تأثیرات منفی بر عملکرد محصول در شرایط مختلف اقلیمی داشته باشد. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر که بر روی داده‌های سنجش از دور، تأثیرات تغییرات دما بر زیست‌توده و رشد گیاهان انجام شد، نتایج مشابهی را در رابطه با تأثیر منفی دما بر رشد گیاهان کشاورزی مشاهده کردند (Dorigo et al., 2010).

این مطالعات به‌طور کلی نشان می‌دهند که مدیریت دمای محیطی و انتخاب مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی تأثیرات آن بر عملکرد و زیست‌توده، نقش مهمی در بهبود تولیدات کشاورزی همچون ذرت ایفا می‌کند. در پژوهش‌های انجام شده در گذشته، اثر تغییرات دما بر روی میزان عملکرد محصول ذرت کاملاً اثبات شده است؛ بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی اثر دو پارامتر دمایی انتخابی (متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه تحمل گیاه) بر میزان عملکرد و زیست‌توده ذرت است که به دو صورت فصلی و مرحله‌ای، روابط مربوطه توسعه داده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش، اطلاعات ۶ مزرعه از کشت و صنعت مگسال واقع در بخش آبیگ استان قزوین تهیه شد. اطلاعات دریافتی در قالب جدول ۱ ارائه شده است. موقعیت مکانی مزارع مطابق شکل ۱ است.

میزان رشد گیاه، تعداد دانه و عملکرد نهایی دانه قابل مشاهده است.

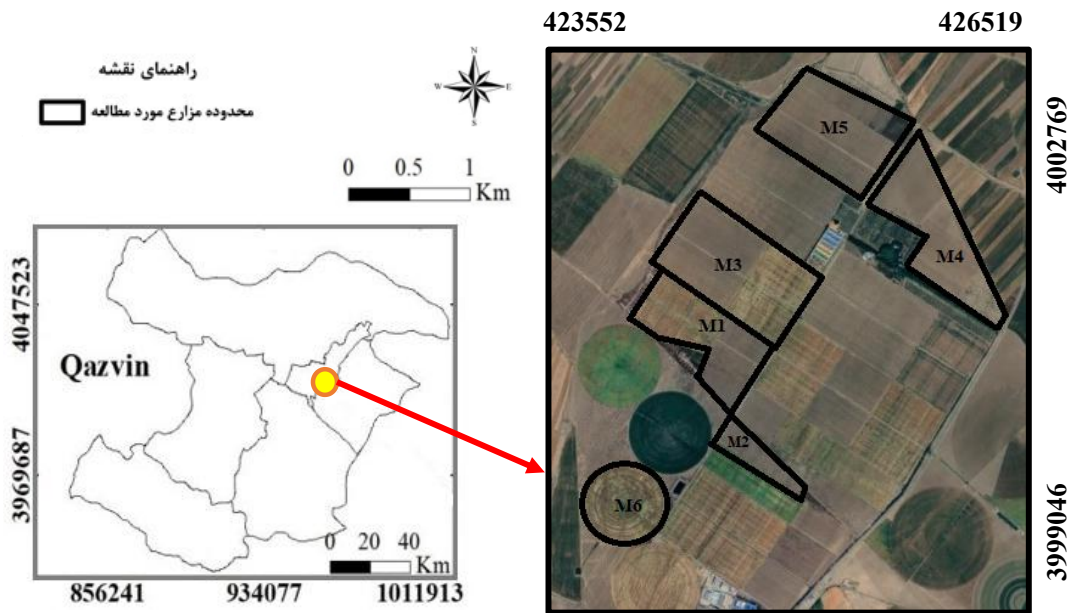
تنش حرارتی در مرحله پرشدن دانه، به‌ویژه در شرایط خشک و با افزایش دما، باعث کاهش قابل توجه در میزان پرشدن دانه و به تبع آن کاهش ۱۰ درصدی عملکرد ذرت می‌شود (Qi et al., 2022). در پژوهش فوکار و همکاران (Fokar et al., 1998)، در طول دوره پر شدن دانه، یک تیمار از ۱۹ تا ۲۸ درجه و تیمار بعدی را ۳۱ تا ۴۲ درجه اعمال کردند که تنش دمایی موجب کاهش وزن نهایی دانه شد. در مطالعه‌ای اثرات تغییر اقلیم بر رشد، زیست‌توده و عملکرد دانه ذرت در شرایط تغییر اقلیم در شمال استان خوزستان شبیه‌سازی شد.

در سال‌های اخیر مدل‌های گیاهی متعددی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان در شرایط زراعی ارائه شده است. مدل AquaCrop یک مدل فراگیر و پرکاربرد است که برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی کاربرد دارد (Ramezani etedali & Safari, 2023). این مدل باید برای هر محصول و در هر منطقه خاص واسنجی و ارزیابی شود. مزیت آن نسبت به سایر مدل‌های گیاهی آنست که تعداد پارامترهای ثابت آن بیشتر بوده و واسنجی مدل با داده‌های کمتری انجام می‌گیرد (Ramezani etedali & Safari, 2023). از این مدل در پژوهش‌های بسیاری در ایران و جهان استفاده شده است از جمله، برای شبیه‌سازی عملکرد و رشد گیاه از مدل AquaCrop و از داده‌های تولیدی بارش، دمای حداقل و حداکثر و ساعت آفتابی با استفاده از مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ استفاده شد. طبق نتایج، در سناریوهای انتشار A2 پیش‌بینی مناسبی برای پارامترهای اقلیمی و شبیه‌سازی فصل رشد آینده وجود داشت و در دمای حداقل و حداکثر و بارش افزایش دیده شد. طول دوره رشد برای هر ایستگاه با توجه به

جدول ۱. اطلاعات مزارع.

Table 1. Field data.

بافت خاک (۹۰ سانتی‌متر) Soil texture (90 cm)	بافت خاک (۶۰ سانتی‌متر) Soil texture (60 cm)	بافت خاک (۳۰ سانتی‌متر) Soil texture (30 cm)	روش آبیاری Irrigation method	نوع رقم Cultivar type	تاریخ برداشت Harvest date	تاریخ کاشت Planting date	شماره مزرعه Farm No.
			Tape تیپ		1401/06/27	1401/03/20	1
			Tape تیپ		1401/06/28	1401/03/31	2
Loam لوم	Clay Loam لومی رسی	Clay Loam لومی رسی	Linear خطی	Single cross-704	1401/06/25	1401/03/23	3
			Tape تیپ	سینگل کراس- ۷۰۴	1401/07/04	1401/03/21	4
			Tape تیپ		1401/06/26	1401/03/17	5
			Center- pivot سنتر پیوت		1401/07/29	1401/04/23	6



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزارع کشت و صنعت مگسال.

Fig 1. Geographical location of Magsal agro-industrial farms.

برداشت، نوع رقم، تراکم بذر، طول چرخه محصول و سایر اطلاعات مربوط به روند رشد گیاه، داده‌های خاک (نوع بافت خاک، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم)، داده‌های مدیریتی (روش آبیاری، نوع کود مصرفی، مقدار کود در هکتار، عملیات خاک‌ورزی و اقدامات قبل از کاشت) از

با توجه به داده‌های ورودی موردنیاز برای شبیه‌سازی در مدل AquaCrop، یک بانک اطلاعاتی شامل: داده‌های اقلیمی (دمای حداکثر و حداقل، بارش، ساعت آفتابی و رطوبت نسبی) (داده‌های اقلیمی برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳ دریافت شد)، داده‌های گیاهی (تاریخ کاشت و

$$Y=B \times HI \quad (2)$$

مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه-روز-رشد به منظور تعدیل عملکرد و زیست-توده بر اثر خسارات ناشی از سرما، استفاده می‌کند. داده‌های دمای روزانه، مقدار بارندگی روزانه و همه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه ET_0 از اطلاعات آماری سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۳ ایستگاه هواشناسی قزوین استفاده شد. پارامترهای زیست‌توده و عملکرد از طریق روابط زیر مدل‌سازی شدند.

در این رابطه صرفاً تأثیر متغیرهای متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه در نظر گرفته شد و سایر عوامل مؤثر، ثابت نگه داشته شد. روابط مربوط به توسعه معادلات بر اساس داده‌های فصل رشد گیاه و داده‌های مراحل چهارگانه رشد گیاه مطابق جدول زیر است.

جدول ۲. روابط مربوط به توسعه معادلات.

Table 2. Relationships used for equation development.

روابط Relationships	داده‌های مورد استفاده Data used	شماره رابطه Relationship No.
$Biomass=A_1(\bar{T}_{max,seasonal})+A_5$		3
$Biomass=A_1(\bar{S}_{max,seasonal})+A_5$	داده‌های فصل رشد گیاه	4
$Yield=A_1(\bar{T}_{max,seasonal})+A_5$	Crop growing season data	5
$Yield=A_1(\bar{S}_{max,seasonal})+A_5$		6
$Biomass=A_1(\bar{T}_{max,1})+A_2(\bar{T}_{max,2})+A_3(\bar{T}_{max,3})+A_4(\bar{T}_{max,4})+A_5$	داده‌های مراحل	7
$Biomass = A_1(\bar{S}_{max,1}) + A_2(\bar{S}_{max,2}) + A_3(\bar{S}_{max,3}) + A_4(\bar{S}_{max,4}) + A_5$	چهارگانه رشد گیاه	8
$Yield=A_1(\bar{T}_{max,1})+A_2(\bar{T}_{max,2})+A_3(\bar{T}_{max,3})+A_4(\bar{T}_{max,4})+A_5$	Data for the Four Phenological Stages of the Crop	9
$Yield=A_1(\bar{S}_{max,1})+A_2(\bar{S}_{max,2})+A_3(\bar{S}_{max,3})+A_4(\bar{S}_{max,4})+A_5$		10

دماهای بالای حد آستانه در مرحله i ام از رشد گیاه و A_5 : بردار ثابت سایر عوامل مؤثر بر عملکرد و زیست توده است. در نرم‌افزار SPSS، ضرایب توابع تولید برآورد شد.

منطقه جمع‌آوری گردید. با استفاده از این اطلاعات، فایل-های اقلیمی، گیاهی و مدیریتی مورد نیاز در مدل AquaCrop، به منظور واسنجی و شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده تهیه و مورد استفاده قرار گرفت.

مدل AquaCrop از تبخیر-تعرق محاسبه شده با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند. تفکیک این مؤلفه به دو جزء تبخیر و تعرق سبب حذف مصرف غیرتولیدی آب از معادلات می‌شود. با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق مقدار زیست‌توده طبق رابطه زیر برآورد می‌شود (Safari and Kaviani, 2022):

$$B=WP \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (1)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B زیست‌توده است. مقدار عملکرد (Y) نیز بر اساس زیست‌توده و شاخص برداشت (HI) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Safari and Kaviani, 2022):

$\bar{T}_{max,seasonal}$: متوسط دمای حداکثر در طول فصل رشد، $\bar{S}_{max,seasonal}$: متوسط مجموع دماهای بالای حد آستانه در طول فصل رشد، $\bar{T}_{max,i}$: متوسط دمای حداکثر در مرحله i ام از رشد گیاه، $\bar{S}_{max,i}$: متوسط مجموع

استفاده شد. هر تابعی که آماره RMSE، NRMSE و MBE آن حداقل بوده و یا آماره‌های R^2 و R^2_{adj} آن نزدیک به یک بود، به‌عنوان تابع با کارایی بهتر در تخمین عملکرد و زیست‌توده انتخاب گردید (جدول ۳).

در ادامه برای بررسی آماری از شاخص‌های میانگین ریشه دوم خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب تبیین تعدیل شده (R^2_{adj})

جدول ۳. شاخص‌های آماری مورد استفاده به‌منظور ارزیابی نتایج.

Table 3. Statistical indices used for evaluating the results.

شاخص Index	نحوه برآورد Estimation Method
RMSE	$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \right]^{0.5}$
NRMSE	$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$
MBE	$MBE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \right]$
R^2	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)}}$
R^2_{adj}	$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - P - 1}$

مدل عملکرد خوبی در برآورد هر سه پارامتر دارد. بر اساس شاخص MBE در مقادیر شبیه‌سازی شده زمان گلدهی و زیست‌توده کمی کم برآوردی و در زمان رسیدگی شبیه‌سازی شده کمی بیش برآوردی رخ داده؛ ولی قابل قبول است.

در روابط مذکور، n ، O_i ، P_i ، \bar{O} ، \bar{P} و P به ترتیب؛ تعداد داده‌ها، مقدار داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهداتی، متوسط داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهداتی و تعداد متغیرهای پیش‌بین بود.

نتایج و بحث

واسنجی مدل گیاهی AquaCrop

طبق تحقیقی که سیاحی و همکاران (Sayyahi et al., 2020) بر روی ارزیابی کارایی مدل AquaCrop و WOFOST انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مدل AquaCrop دقت بهتری نسبت به WOFOST داشته و میزان خطای شبیه‌سازی عملکرد توسط AquaCrop کمتر بود.

در این پژوهش، واسنجی مدل AquaCrop با هدف ایجاد کمترین اختلاف بین مقادیر زمان گلدهی، زمان رسیدگی و میزان زیست‌توده شبیه‌سازی شده با مقدار واقعی انجام شد.

اکثر محققان برای این مدل دقت خوبی را گزارش کرده‌اند (Stone, Liu et al., 2013; Alishiri et al., 2014) از آن به‌عنوان ابزاری مطمئن در برنامه‌ریزی برای کشت ذرت استفاده کرد.

نتایج آماری در جدول ۴ آورده شده است. طبق مقادیر جدول، میانگین خطای شبیه‌سازی هر سه پارامتر (RMSE)، از ۴/۶۲ تا ۶/۳۲ درصد متغیر بود. مقدار خطای نرمال شده (NRMSE) در محدوده ۰-۱۰ قرار داشت و این یعنی خطای مدل نسبت به مقدار مشاهده‌ای کم و

جدول ۴. شاخص‌های آماری برای ارزیابی مدل AquaCrop.

Table 4. Statistical indicators used for the evaluation of the AquaCrop model.

شاخص	زمان گلدهی	زمان رسیدگی	زیست‌توده
Index	Flowering	Maturity	Biomass
مشاهده شده Observed	72	99	25.12
شبیه‌سازی شده Simulated	76	90	21.1
MBE	-4.67	6	-4.69
NRMSE	0.33	0.09	0.19
RMSE	4.62	6.32	4.92

مدل‌سازی رابطه عملکرد و زیست‌توده با متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه

به‌منظور برآورد مقادیر عملکرد و زیست‌توده بر اساس دو پارامتر اثرگذار، متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه، رابطه تجربی (به‌عنوان مدل) بین آنها برآزش داده شد. در این پژوهش، تابع خطی به‌عنوان مدل رگرسیونی انتخاب شده و با برآزش آن بین داده‌های متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه، قابلیت آن برای تعیین مقادیر عملکرد و زیست‌توده ارزیابی شد. محدودیت این مدل به شرایط خاص مکانی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه بستگی داشته؛ اما نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی تئوری و تجربی که بر پایه فرضیات متعددی هستند، ترجیح داده شد. مدل-سازی به دو صورت انجام شد: الف) بر اساس داده‌های فصل رشد و ب) بر اساس داده‌های مراحل چهارگانه رشد گیاه.

پس از برآزش تابع مذکور در نرم‌افزار SPSS، ضرایب ثابت هرکدام از توابع طبق جدول ۵ برای داده‌های ۴۴ ساله برآورد شد. بنابراین ابتدا با استفاده از توابع بدست آمده مقادیر عملکرد و زیست‌توده برآورد شد و سپس اعتبار توابع از طریق روابط آماری اشاره شده ارزیابی شد. هر تابعی که مقدار آماره RMSE، NRMSE و MBE آن حداقل بود و یا آماره‌های R^2 و R^2_{adj} آن نزدیک به یک

باشد، تابع تخمین خوبی از مقادیر عملکرد و زیست‌توده می‌دهد.

از نظر تمام آماره‌ها در حالت توسعه توابع بر اساس داده‌های فصل رشد گیاه، توابع خطی مربوط به تخمین عملکرد با متغیر مستقل مجموع دماهای بالای حد آستانه و زیست‌توده با متغیر مستقل متوسط دمای حداکثر، عملکرد خوبی برای تخمین نداشتند. توابع خطی مربوط به عملکرد با متغیر مستقل متوسط دمای حداکثر و زیست-توده با متغیر مستقل مجموع دماهای بالای حد آستانه، با توجه به مقادیر هر پنج آماره مورد بررسی تخمین مناسب‌تری از پارامترهای عملکرد و زیست‌توده می‌دهد (جدول ۶).

در حالت توسعه توابع بر اساس داده‌های مراحل مختلف رشد گیاه، تمام آماره‌ها عملکرد خوبی را برای هر چهار تابع نشان می‌دهند. از نظر آماره R^2 و R^2_{adj} پارامتر عملکرد تخمین بهتر و از نظر آماره NRMSE تابع تخمین زیست‌توده عملکرد عالی داشته است. با توجه به اینکه مقدار آماره MBE در تمامی توابع به‌جز توابع تخمین عملکرد با متغیر مستقل مجموع دماهای بالای حد آستانه و زیست‌توده با متغیر مستقل متوسط دمای حداکثر منفی شده، بیانگر کم برآوردی و حداقل شدن و نزدیکی این آماره به صفر، نشان‌دهنده کارایی خوب توابع است (جدول ۶).

علوفه‌ای تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم ارزیابی کردند و نشان دادند که این تغییرات می‌توانند تأثیر منفی بر عملکرد ذرت داشته باشند که این امر با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

در مطالعه دیگر، تأثیر تغییرات دما بر عملکرد ذرت در استان خوزستان ایران بررسی شد و نشان داده شد که دمای بالا در مراحل مختلف رشد می‌تواند به‌ویژه در مرحله گلدهی باعث کاهش عملکرد ذرت شود که مشابه با نتایج این تحقیق است که در آن اثرات منفی دما بر عملکرد و زیست‌توده در مرحله گلدهی تأکید شده است (Ghorbani et al., 2021). همچنین، نتایج حاصله از مطالعه‌ای که به پیش‌بینی عملکرد ذرت در شرایط تغییر اقلیم پرداخته شد، نشان داد که دما و بارش تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد ذرت دارند. این یافته‌ها نیز به‌طور کلی با نتایج تحقیق حاضر هم‌راستا است، زیرا این تحقیق نیز به تحلیل تأثیر تغییرات دما بر عملکرد و زیست‌توده ذرت پرداخته است (Yazdani et al., 2022). در مطالعه‌ای بر پاسخ عملکرد ذرت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد، تابع خطی بین شدت تنش و کاهش عملکرد برای مراحل رشد رویشی و زایشی گزارش شد (Jin et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر با هدف پیش‌بینی عملکرد ذرت، استفاده از مدل داده‌محور نشان داد که میزان تجمع تنش در مراحل رشد اولیه همبستگی خطی بالایی با کاهش عملکرد دارد (Deng et al., 2023). این هم‌راستایی در نتایج، به‌ویژه در رابطه با اثرات منفی دما در مراحل مختلف رشد گیاه و اثرات آن بر عملکرد ذرت، نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل‌های رگرسیونی توسعه‌یافته در این تحقیق برای پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد و زیست‌توده ذرت در مواجهه با تغییرات اقلیمی است.

به گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، میانگین دمای سطح زمین در دهه ۲۰۱۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره

طبق نتایج آورده شده در جدول ۵، تمامی ضرایب مربوط به توابع تولید منفی شده که علت آن، جود رابطه منفی و معکوس بین دما با عملکرد و زیست‌توده است. این منفی شدن اثر کاهنده دما، بعنوان یک عامل محیطی را بر فنولوژی و فیزیولوژی گیاه ذرت نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که، تنش دمایی در ذرت می‌تواند منجر به کاهش هر دو عامل عملکرد و زیست‌توده شود اما میزان و نحوه تاثیر آن بر هر کدام به شدت دما، مرحله رشد گیاه و مدت زمان قرارگیری در معرض تنش بستگی دارد.

بر اساس نتایج، دمای بالا در زمان گلدهی (مرحله سوم رشد) باعث کاهش تولید و کیفیت گرده، اختلال در تلقیح و تشکیل دانه و کاهش تعداد دانه‌های تشکیل شده می‌شود که در نهایت منجر به کاهش وزن نهایی دانه‌ها و عملکرد اقتصادی گیاه می‌گردد. این موضوع به‌خوبی در جدول ضرایب توابع مشخص است. مقدار ضرایب به‌دست‌آمده در مرحله گلدهی (ضریب A_3) منفی‌تر شده و اثر کاهشی بر روی عملکرد و زیست‌توده را به‌خوبی نمایش می‌دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت که میزان تنش دمایی بر عملکرد محصول رابطه مستقیمی با مراحل وقوع تنش دارد. مورد دیگری که نتایج تحقیقات به آن اشاره دارد و حائز اهمیت است، افزایش یک درجه‌ای متوسط دمای فصلی می‌تواند منجر به کاهش ۱۳-۳ درصدی در عملکرد اقتصادی ذرت شود (Waqas et al., 2021).

نتایج این تحقیق در راستای مطالعات پیشین که تأثیرات تغییرات دما بر عملکرد و زیست‌توده ذرت را بررسی کرده‌اند، قرار دارد. به طور خاص، بررسی‌ها نشان داده‌اند که افزایش دما در طول فصل رشد تأثیرات منفی بر عملکرد محصول ذرت دارد. محمدی‌نژاد و همکاران (Mohammadnejad et al., 2021) در مطالعه خود تأثیر تغییرات دما و بارش را در بهره‌وری آب و عملکرد ذرت

تحت تاثیر قرار می‌دهد. طبق نتایج بررسی انجام شده در پژوهش حاضر، از تاثیرگذاری افزایش دما بر مقدار عملکرد، مشخص شد که افزایش ۴ درجه‌ای در میزان دمای حداکثر روزانه، تأثیر قابل توجهی بر کاهش عملکرد ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین دارد. مقایسه عملکرد پایه (در شرایط دمای معمول) با عملکرد ثبت شده پس از افزایش دما نشان داد که درصد کاهش عملکرد در بازه‌ای بین ۱۳ تا ۲۵ درصد متغیر است. این میزان کاهش می‌تواند ناشی از هم‌زمانی افزایش دما با مراحل حساس رشد گیاه مانند گلدهی یا پر شدن دانه، و نیز تنش‌های محیطی هم‌زمان مانند تنش خشکی باشد.

پیش‌اصنعتی (۱۸۵۰-۱۹۰۰) حدود ۱/۰۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (IPCC, 2021). همچنین گزارش شده که دمای سطح زمین تا پایان قرن ۲۱، ۱/۵ تا ۴ درجه سانتی‌گراد، نسبت به دوره پایه (۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ میلادی) افزایش خواهد داشت و این افزایش دما بعد از ۲۱۰۰ نیز ادامه دارد (IPCC, 2013). در پژوهشی که فخری (Fakhri, 2024) به منظور بررسی وضعیت تغییرات دمایی کشور انجام داد، تحلیل روند دمایی نشان داد که دمای میانگین، حداقل و حداکثر در دهه‌های اخیر افزایش یافته و موجب تشدید تنش‌های حرارتی در بخش کشاورزی ایران شده و در نهایت عملکرد محصولات را

جدول ۵. ضرایب توابع رگرسیونی برای برآورد عملکرد و زیست‌توده.
Table 5. Regression coefficients for estimating yield and biomass.

ضرایب Coefficients					متغیر وابسته Independent variable	متغیر وابسته Dependent variable
A ₅	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁		
41.828	-	-	-	-1.104	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	عملکرد Yield
13.12	-	-	-	-0.078	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	فصل رشد Growing Season
35.781	-	-	-	-0.478	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	زیست‌توده Biomass
22.749	-	-	-	-0.028	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	
46.733	0	-1.163	-0.067	0	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	عملکرد Yield
12.21	-0.002	-0.13	0	0	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	مراحل چهارگانه رشد Four stages of growth
34.573	-0.211	-0.1	-0.133	0	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	زیست‌توده Biomass
22.07	-0.023	-0.003	-0.003	-0.005	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	

جدول ۶. پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار توابع.

Table 6. Statistical parameters used for function validation.

آماره‌ها					متغیر	
Statistical Measures					متغیر مستقل	وابسته
R^2_{adj}	R^2	MBE	NRMSE	RMSE	Independent variable	Dependent variable
0.69	0.79	-0.44	0.23	0.84	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	عملکرد Yield
0.07	0.38	18.53	4.39	18.69	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	
0.49	0.66	32.34	1.62	32.36	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	زیست توده Biomass
0.51	0.67	-0.61	0.03	0.72	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	
0.85	0.90	-0.19	0.14	0.57	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	عملکرد Yield
0.82	0.88	-0.081	0.16	0.68	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	
0.74	0.83	-0.44	0.026	0.52	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	زیست توده Biomass
0.58	0.72	-0.47	0.03	0.60	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	

فصل رشد
Growing season

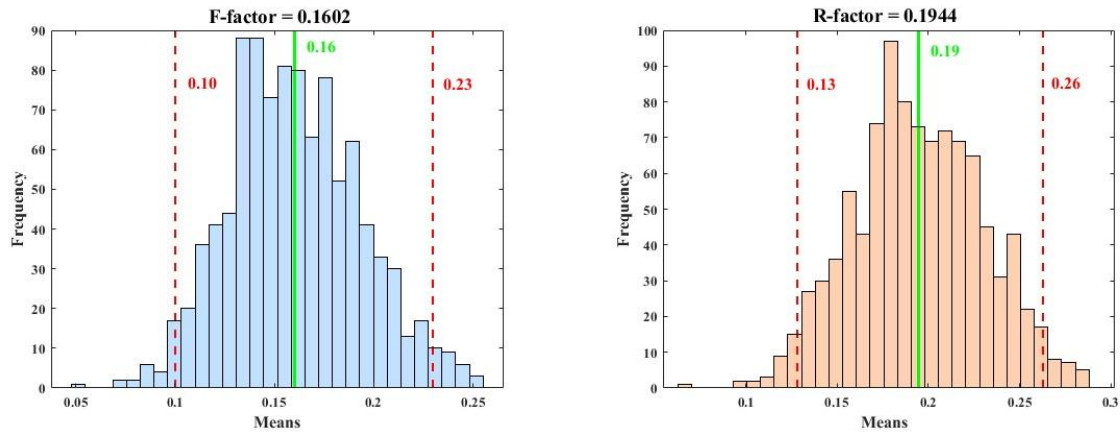
مراحل
چهارگانه
رشد
Four stages of growth

با اندازه‌گیری زمینی برای دو سال ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ که داده‌برداری از ۶ مزرعه مورد مطالعه صورت گرفته، استفاده شد. مقدار $F\text{-factor}=0.1602$ و $R\text{-factor}=0.1944$ بدست آمد (شکل ۲).

با توجه به اینکه مقادیر هر دو شاخص کمتر از ۰/۲ است، می‌توان نتیجه گرفت که عدم قطعیت بین داده‌های مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در سطح قابل قبول و پایین قرار دارد.

مقایسه عملکرد پایه (در شرایط دمای معمول) با عملکرد ثبت شده پس از افزایش دما نشان داد که درصد کاهش عملکرد در بازه‌ای بین ۱۳ تا ۲۵ درصد متغیر است. این میزان کاهش می‌تواند ناشی از هم‌زمانی افزایش دما با مراحل حساس رشد گیاه مانند گلدهی یا پر شدن دانه، و نیز تنش‌های محیطی هم‌زمان مانند تنش خشکی باشد.

شاخص‌های $F\text{-factor}$ و $R\text{-factor}$ برای بررسی میزان تطابق برآورد زیست توده از داده‌های رابطه مدل‌سازی شده



شکل ۲. عدم قطعیت زیست‌توده حاصل از رابطه مدل‌سازی با داده‌های زمینی

Fig 2. Biomass uncertainty resulting from the relationship between modeling and ground-based data

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه، ذرت جزو گیاهان زراعی استراتژیک به شمار می‌آید، اگر بتوان با توجه به نیازمندی‌های دمایی این گیاه مناطق مساعد کشت را شناسایی نموده و محدودیت‌ها یا توانمندی‌هایی که اقلیم در محیط ایجاد کرده را شناسایی کرد، قطعاً می‌توان به عملکرد بیشتری در واحد سطح دست یافت که این امر خود موجب بهبود شرایط اقتصادی کشاورزان و سطح درآمد کشور از کشاورزی خواهد شد. مطالعات متنوعی در سراسر جهان بر روی رابطه بین اقلیم، رشد و نمو و عملکرد گیاهان صورت گرفته است. طبق نتایج پژوهش حاضر و پژوهش‌های پیشین، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی مقدار عملکرد و زیست‌توده کارایی خوب و مناسبی دارد.

در بررسی اثر دما، طبق نتایج مشخص شد که متوسط دمای حداکثر بر روی مراحل مختلف رشد ذرت اثر منفی داشته و این اثر در مرحله گلدهی بیشتر است. با توجه به منفی شدن مقدار ضرایب توابع تولید (برآورد عملکرد و زیست‌توده)، اثر کاهشی بر روی میزان زیست‌توده و عملکرد کاملاً مشهود است. اما با استفاده از مدیریت مناسب مانند تغییر تاریخ کاشت و استفاده از هیبرید مقاوم به دما می‌توان تا حدی اثرات منفی دمای حداکثر را

در مطالعات مشابه نیز از این شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت مدل‌سازی استفاده شده است. دوریگو و همکاران (Albergel et al., 2010) و آلبرژل و همکاران (Dorigo et al., 2012) از شاخص‌های F و R برای بررسی میزان تطابق بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهدات زمینی در ارزیابی رطوبت خاک استفاده کردند. آن‌ها نیز مقادیر کمتر از ۰/۲ را به‌عنوان شاخصی از تطابق خوب و عدم قطعیت پایین تفسیر کردند. محققان در پژوهشی در آلاسکا، به ارزیابی عدم قطعیت تخمین زیست‌توده جنگلی با تلفیق داده‌های لیدار (LiDAR¹)، تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی به‌منظور برآورد عدم قطعیت در مدل‌های زیست‌توده پرداختند. طبق نتایج این پژوهش، ترکیب داده‌های چند منبعی و استفاده از شاخص‌های آماری دقیق می‌تواند در کاهش عدم قطعیت مدل‌های برآورد زیست‌توده مؤثر باشد (Muukkonen and Heiskanen, 2017). در مجموع، نتایج این مطالعه با یافته‌های تحقیقات مشابه سازگار بوده و نشان می‌دهد که رویکرد مورد استفاده برای ارزیابی تطابق مدل، از دقت و اعتبار کافی برخوردار است.

¹ Light Detection and Ranging

quality of satellite-derived soil moisture products using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 118(1), 386–398. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.017>

Fakhri, M. (2024). Investigating the Condition of Iran's Temperature Changes Compared to the Past Long-Term Climatic Standard Period. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(3), 17–32. [doi: 10.22077/jdcr.2024.7392.1062](https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7392.1062)

Fokar, M., Blum, A., & Nguyen, T. (1998). Heat tolerance in spring wheat II. Grain filling. *Euphytica*, 104, 9–15.

Ghorbani, M., Jafari, A., & Azadi, H. (2021). Heat stress risk assessment in maize under climate change scenarios in Khuzestan Province, Iran. *Agricultural Water Management*, 256, 107114. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107114>

Hajivandpaydari, S., Yazdanpanah, H., & Andarzian, S. B. (2023). Investigating the impact of climate change on the growth and yield of seed corn in the north of Khuzestan province using the AquaCrop model. *Journal of Agricultural Meteorology*, 11(2), 40–50. <https://doi.org/10.22125/agmj.2023.330985.1132> [In Persian]

Hawtin, G., Wanage, M., & Hodykin, L. (1996). Genetic responses in breeding for adaptation. *Euphytica*, 92, 255–266.

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2013: Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

Izaurrealde, R. C., Thomson, A. M., Morgan, J., Fay, P., Polley, H., & Hatfield, J. L. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for forage and rangeland production. *Agronomy Journal*, 103(1), 371–381.

Jin, N., He, J., Wang, Y., & Liu, Y. (2020). Yield response of maize to water stress at different growth stages in semi-arid regions. *International Journal of Plant Production*, 14(2), 255–265.

Liu, Z., Hubbard, K. G., Lin, X., & Yang, X. (2013). Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by changing the sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Global Change Biology*, 19(11), 3481–3492.

Mohammadnejad, H., Hosseini, S. M., & Mehrabi, M. (2021). Effect of climate change on the potential yield and water productivity of forage maize in Iran under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. *Agricultural Systems*, 191, 103150. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103150>

Muukkonen, P., & Heiskanen, J. (2017). Reducing the uncertainty of forest biomass estimates using a limited number of field plots. *arXiv preprint*, arXiv:1702.06650. <https://arxiv.org/abs/1702.06650>

کاهش داد. طبق نتایج حاصل از توسعه توابع تولید، توابع خطی ای که بر اساس داده‌های فصل رشد توسعه یافت، عملکرد با متغیر مستقل متوسط دمای حداکثر و زیست-توده با متغیر مستقل مجموع دماهای بالای حد آستانه تخمین مناسبی داشتند. در مورد توابع بر اساس داده‌های مرحله رشد، هر چهار تابع تخمین خوب و دقیقی از مقادیر عملکرد و زیست‌توده دادند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که بررسی مرحله‌ای بهتر و دقیق‌تر از بررسی بر اساس فصل رشد است.

منابع

Albergel, C., Dorigo, W., Reichle, R., Muñoz-Sabater, J., de Rosnay, P., Isaksen, L.,... & Wagner, W. (2012). Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 118, 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.017>

Alishiri, R., Paknejad, F., & Aghayari, F. (2014). Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop [In Persian]. *Bioscience*, 4(4), 1–9. <https://doi.org/10.12692/ijb/4.4.1-9>

Alizadeh, A. (2010). *Climate and meteorological agriculture*. Mashhad: Imam Reza University Press. First Edition, 502p. [In Persian]

Bayatani, F., Fallah Ghalhar, G. A., Karami, M., & Taei Semiromi, J. (2020). The effects of climate change on the risk of cold stress in autumn crop patterns (Case study: Tropical and subtropical areas of Kerman province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(24), 63–78. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.29471.1507> [In Persian]

Bazgir, S. (2016). Corn yield estimation using Agroclimatic Indices in the West and Southwest regions of Iran. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 15(39), 7–32. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3568-fa.html> [In Persian]

Deng, Y., Ye, Q., Yu, J., Djanaguiraman, M., & Jin, Y. (2023). A hybrid data-driven and process-based model predicts maize yield with high accuracy under varying environmental conditions. *Communications Biology*, 6, 932. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05268-3>

Dorigo, W. A., Scipal, K., Parinussa, R. M., Liu, Y. Y., Wagner, W., de Jeu, R. A., & Fernández-Prieto, D. (2010). A new methodology for assessing the

- Neiff, N., Trachsel, S., Valentinuz, O. R., Balbi, C. N., & Andrade, F. H. (2016). High temperatures around flowering in maize: Effects on photosynthesis and grain yield in three genotypes. *Crop Science*, 56(6), 2702–2712.
- Qi, Y., Zhang, Q., Hu, S., Wang, R., Wang, H., Zhao, H., Ren, S., Yang, Y., & Chen, F. (2022). Effects of high temperature and drought stresses on growth and yield of summer maize during grain filling in North China. *Agriculture*, 12(11), 1948. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111948>
- Ramezani Etedali, H., & Safari, F. (2023). Evaluation of the influence of different ETo estimation methods in the simulation of wheat actual evapotranspiration and biomass by the AquaCrop model. *Water and Soil*, 37(1), 1–14. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76839.1171> [In Persian]
- Ramezani Etedali, H., & Safari, F. (2023). Evaluation of the effect of some temperature and radiation methods for estimation of reference evapotranspiration (ET_o) on maize actual evapotranspiration and biomass. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(1), 1–13. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76839.1171> [In Persian]
- Roth, G. (2015). Weather Effects on Corn Silage. http://www.spectrumanalytic.com/support/library/ff/Weather_Effects_on_Corn_Silage.htm
- Safari, F., & Kaviani, A. (2022). Crop yield response to water. Qazvin: Imam Khomeini International University Publications. [In Persian]
- Sarkohaki, A., Egdernezhad, A., & Minaei, S. (2021). Determining the accuracy and efficiency of water-driven and carbon-driven crop models to simulate the yield, biomass, and water use efficiency of corn. *Journal of Water and Soil Science*, 25(1), 141–156. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4038-en.html> [In Persian]
- Sayyahi, H., Egdernezhad, A., & Ebrahimipak, N. A. (2020). Evaluation of AquaCrop and WOFOST for simulation of sugar beet yield and water productivity under different irrigation intervals and fertilizer stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2593–2605. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.300418.668568> [In Persian]
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66)*. FAO, Rome.
- Stone, P. (2000). The effects of heat stress on cereal yield and quality. In A. S. Basra (Ed.), *Crop Responses and Adaptations to Temperature Stress* (pp. 243–291). Food Products Press.
- USDA. (2013). Weather effects on expected corn and soybean yields. *Economic Research Service Report FDS-13g-01*. https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/45014/39389_fds13g01.pdf
- Waqas, M. A., Wang, X., Zafar, S. A., Noor, M. A., Hussain, H. A., Nawaz, M. A., & Farooq, M. (2021). Thermal stresses in maize: Effects and management strategies. *Plants*, 10(2), 293. <https://doi.org/10.3390/plants10020293>
- Yazdani, M., Zehtabian, G. H., & Salehi, H. (2022). Predicting maize yield under climate change conditions using regression models. *Field Crops Research*, 275, 108302. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108302>

