J. Soil Plant Interact. 2026; 17(3): 1–16. https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.01662

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Effect of Environmental Conditions and Planting Dates on Yield and Water Productivity of Forage Maize in Selected Regions of Isfahan Province (A Modeling Approach)

Maryam Saremi, Mahdi Gheysari*, Mohammad Shayannejad and Fahime Mohamadzade

Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
* Corresponding author, Email: gheysari@iut.ac.ir

(Received: 2 February 2026; Revised: 12 May 2026; Accepted: 16 May 2026)

Abstract

Background and Objective: Given declining water resources in Iran, particularly in Isfahan Province, assessing forage maize production potential and water productivity—despite its relatively high water requirement but strategic importance—has become essential. This study aimed to determine the optimal planting date and to evaluate yield potential and water productivity across different regions of Isfahan province.

Methods: Maize growth was simulated for 18 planting dates using 13 years of climatic data and the CERES-Maize model for 20 calibrated hybrids across dominant soil textural classes. After selecting optimal planting date for nine selected stations, production potential and water productivity were assessed for two calibrated hybrids (SC606 and SC704) using detailed soil profile data.

Results: Climatic analysis indicated that eastern stations had potential yields below the provincial average. The combined effects of climate and soil texture revealed that the highest yield was occurred in Daran (26.2 Mg ha^{-1}) for SC606, while the lowest was obtained in Zarrin-Shahr (17.2 Mg ha^{-1}) for SC704. Dry biomass water productivity ranged from 3.75 to 5.55 kg m^{-3}. The western regions of the province, due to their higher elevation, greater solar radiation, and favorable temperatures, exhibited the highest production and water productivity. Conversely, poorer water and soil quality in the central and eastern regions substantially reduced yield and water productivity. Accordingly, the western parts were identified as suitable areas for forage maize production because of favorable climatic conditions and the absence of soil salinity constraints.

Conclusion: The simulation results indicated that planting date has a significant effect on maize yield and water productivity. In the suitable regions of the province, planting from late May to late July (depending on the hybrid), not only enhances yield and water productivity, but can also reduce the risk of late-season cold stress.

Keywords: Climate variability, DSSAT software package, Water management, Zayandeh-Rud.

How to Cite: Saremi, M., Gheysari, M., Shayannejad, M., Mohamadzade, F., 2026. Assessment of distinct environmental conditions and planting dates on the yield and water productivity of forage maize in selected regions of Isfahan province (a modeling approach). J. Soil Plant Interact. 17(3), 1–16 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.01662

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. 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.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۳): ۱۶-۱، https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.01662

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

اثر شرایط محیطی و تاریخ کاشت بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در برخی مناطق استان اصفهان (با رویکرد مدل‌سازی)

مریم صارمی، مهدی قیصری*، محمد شایان‌نژاد و فهیمه محمدزاده

گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: gheysari@iut.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲۶)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: با توجه به کاهش منابع آب در نواحی مرکزی ایران، به‌ویژه استان اصفهان، بررسی پتانسیل تولید و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای، به‌عنوان محصولی با نیاز آبی نسبتاً زیاد اما دارای اهمیت راهبردی ضرورت دارد. این پژوهش با هدف تعیین بازه تاریخ کشت بهینه ذرت و ارزیابی پتانسیل عملکرد و بهره‌وری آب، در نقاط مختلف استان اصفهان انجام شد.

روش‌ها: ابتدا کشت ذرت در ۱۸ تاریخ کشت با استفاده از داده‌های اقلیمی ۱۳ ساله و مدل CERES-Maize، برای ۲۰ هیبرید واسنجی‌شده در کلاس‌های بافت خاک شاخص استان شبیه‌سازی شد. پس از تعیین تاریخ کشت بهینه در ۹ ایستگاه منتخب، پتانسیل تولید و بهره‌وری آب دو هیبرید رایج و واسنجی‌شده SC606 و SC704 با استفاده از داده‌های دقیق خاک‌رخ تعیین شد.

نتایج: بررسی اثر آب‌وهوا نشان داد ایستگاه‌های شرقی عملکرد پتانسیل کمتر از میانگین استان دارند. بررسی اثر آب‌وهوا و بافت خاک نشان داد بیشترین عملکرد در داران (۲۶/۲ مگاگرم در هکتار) برای هیبرید SC606 و کمترین عملکرد در زرین‌شهر (۱۷/۲ مگاگرم در هکتار) برای هیبرید SC704 به‌دست آمد. همچنین بهره‌وری آب زیست‌توده خشک بین ۳/۷۵ تا ۵/۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود. مناطق غربی استان به‌دلیل مرتفع بودن، تشعشع بیشتر و دمای مناسب، بیشترین تولید ذرت علوفه‌ای و بهره‌وری آب را داشتند. درحالی‌که کاهش کیفیت آب و خاک در مناطق مرکزی و شرقی موجب کاهش قابل‌توجه عملکرد و بهره‌وری آب ذرت شد. ازاین‌رو مناطق غربی به‌دلیل شرایط اقلیمی مناسب و نبود محدودیت شوری خاک، به‌عنوان نواحی مستعد تولید ذرت علوفه‌ای شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری کلی: نتایج شبیه‌سازی نشان داد تاریخ کشت تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای دارد؛ به‌طوری‌که در مناطق مستعد استان، کشت از اواخر اردیبهشت تا اواخر تیر (متناسب با هیبرید)، علاوه بر افزایش عملکرد و بهره‌وری آب، می‌تواند احتمال مواجهه با سرمای انتهای فصل رشد را نیز کاهش دهد.

واژه‌های کلیدی: بسته نرم‌افزاری DSSAT، تنوع اقلیمی، زاینده‌رود، مدیریت آب.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

در ایران، ذرت در تمامی ۳۱ استان کشور کشت می‌شود و با توجه به نقش راهبردی آن، میزان تولید و مصرف این محصول در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. به‌طوری‌که بر اساس آخرین آمارنامه کشاورزی، ذرت علوفه‌ای در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ با ۱۳/۵۱ میلیون تن تولید، بیشترین میزان تولید را در بین محصولات زراعی آبی به خود اختصاص داده است (Ministry of Agriculture Jihad, 2024).

کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در کشور بوده و افزایش نیاز غذایی ناشی از رشد جمعیت، فشار بر منابع آبی این بخش را تشدید کرده است (Ahmadee et al., 2021). یکی از راهکارهای اجرایی، تولید محصولات کشاورزی با بیشترین بهره‌وری آب (افزایش تولید به‌ازای هر واحد آب مصرفی) و شناسایی مناطق مستعد برای کشت هر محصول است. تعیین پتانسیل تولید محصولات کشاورزی در شرایط مختلف اقلیمی، خاکی، تاریخ‌های کاشت و ارقام گوناگون از راه انجام آزمایش‌های میدانی، فرآیندی پرهزینه و زمان‌بر است و نتایج آن به‌دلیل محدودیت‌های مکانی و زمانی، از قابلیت تعمیم گسترده برخوردار نیست. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی معتبر که به درستی واسنجی و ارزیابی شده‌اند، ابزاری کارآمد برای بررسی سناریوهای مدیریتی، برنامه‌ریزی و بهبود تصمیم‌گیری محسوب می‌شود (Ritchie, 1998). این مدل‌ها قادرند اثر نوسانات کوتاه‌مدت و درازمدت آب‌وهوا، ویژگی‌های خاک و شیوه‌های مدیریتی را بر تعادل آب خاک، پویایی عناصر غذایی، رشد و عملکرد محصول شبیه‌سازی کنند (Jha et al., 2021). برخی مدل‌های تجربی مانند ماس و هافمن، و ون‌گنوختن و هافمن نیز توانایی تخمین عملکرد گیاه بر مبنای شوری آب آبیاری را دارند (Noroozi et al., 2023).

در میان سامانه‌ها و بسته‌های نرم‌افزاری مدل‌سازی رشد گیاهان مانند APSIM، CropSyst و AquaCrop، بسته نرم‌افزاری DSSAT به‌عنوان سامانه پشتیبانی تصمیم‌گیری در انتقال فناوری کشاورزی[1]، سابقه‌ای بیش از چهار دهه در پژوهش‌های جهانی دارد (Hoogenboom et al., 2019a; Hoogenboom et al., 2019b) و برای بیش از ۳۵ گیاه توسعه یافته است. وجود بانک اطلاعاتی آب‌وهوا، خاک، ژنتیک گیاهی، و داده‌های مدیریتی مختلف، این بسته نرم‌افزاری را به یکی از کامل‌ترین ابزارهای مدل‌سازی تبدیل کرده است. از رایج‌ترین مدل‌های موجود در بسته نرم‌افزاری DSSAT، مدل‌های گروه CERES[2] بوده که توانایی شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد غلات را دارند (Hoogenboom et al., 1994). مدل CERES-Maize مدل اختصاصی ذرت است که شبیه‌سازی روزانه رشد گیاه را در واکنش به شرایط آب‌وهوایی، محیطی و مدیریتی انجام می‌دهد (Hammad et al., 2018).

انتخاب تاریخ کشت مناسب یکی از عوامل مؤثر در بهبود عملکرد دانه و علوفه ذرت به شمار می‌رود (Maresma et al., 2019). در پژوهش Ahmad et al. (2016) در پاکستان، میانگین بیشینه عملکرد علوفه و دانه با استفاده از مدل CSM-CERES برای ذرت در تاریخ کشت ۱۰ ژوئیه به‌دست آمد. Adnan et al. (2017) در شمال نیجریه با بهره‌گیری از مدل CERES-Maize نشان دادند که در ناحیه ساوانای سودان، کشت هیبرید بسیار زودرس ذرت در اواخر ژوئیه و کشت هیبرید زودرس ذرت در میانه ژوئیه منجر به بیشترین عملکرد دانه شد. Rugira et al. (2021) با بهره‌گیری از مدل DSSAT–CERES Maize در شمال چین گزارش کردند که مناسب‌ترین بازه زمانی کاشت برای افزایش تولید و کارایی مصرف آب، دوره ۱۵ تا ۲۵ می است. Mozaffari (2015) با هدف بهبود بهره‌وری آب برای تولید ذرت در دشت میاندوآب، پژوهشی با استفاده از مدل DSSAT انجام داد. بر اساس نتایج این پژوهش، تاریخ کشت ۱۵ خرداد همراه با ۵۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی و کاربرد ۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار، بهترین عملکرد را از نظر بهره‌وری آب دارد.

علاوه‌بر تاریخ کشت، اقلیم و موقعیت مکانی از عوامل مؤثر بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی است. تطبیق فنولوژی با شرایط

1- Decision Support System for Agrotechnology Transfer

2- Crop and Environment Resource Synthesis

زیستی و غیرزیستی پیش‌نیاز سازگاری ژنوتیپ با محیط است؛ موضوعی که در شرایط تغییرات اقلیمی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. نتایج پژوهش Prevey et al. (2017) با بررسی ۴۷ گونه گیاهی نشان داد که حساسیت فنولوژیک گیاه به دما، به‌ویژه در زمان برگ‌دهی و آغاز گل‌دهی، در نواحی سردتر با عرض جغرافیایی بالاتر بیشتر از مناطق گرم‌تر بوده است. در پژوهش Norooz-Valashedi and Bararkhanpour Ahmadi (2026) نیز افزایش دما سبب جابجایی در زمان شکوفه‌دهی محصولات زراعی از جمله برنج و کلزا شد. Xiao et al. (2021) ارتباط مثبتی بین طول دوره رشد ذرت، برنج و سویا با بارش تجمعی و ساعات آفتابی تجمعی یافتند. نتایج تحلیل حساسیت مدل CERES-Maize در پیش‌بینی عملکرد ذرت نشان داد که حساسیت گیاه نسبت به تغییرات تابش روزانه بیشتر از تغییرات ویژگی‌های خاک است (Bert et al., 2007).

استان اصفهان به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم تولید محصولات دامی، در جایگاه پنجم تولیدکنندگان ذرت علوفه‌ای کشور قرار دارد (Ministry of Agriculture Jihad, 2024). تشدید تنش‌های آبی در اصفهان از یک‌سو و لزوم صیانت از سرمایه‌های بخش کشاورزی و دامپروری از سوی دیگر، دو چالش هم‌زمان و دارای اهمیت‌اند که همواره توجه مدیران، سیاست‌گذاران و پژوهشگران را به خود جلب کرده است. اگرچه پژوهش‌های متعددی اثر تاریخ کاشت و اقلیم بر عملکرد و بهره‌وری آب را در مناطق مختلف جهان بررسی کرده‌اند، اما آنچه پژوهش حاضر را از پژوهش‌های پیشین متمایز می‌سازد، تلفیق هم‌زمان سه عامل اقلیم، خاک‌رخ و شوری واقعی آب در چارچوب CERES-Maize، تعیین تاریخ کاشت بهینه و پتانسیل تولید به‌صورت منطقه‌بندی‌شده برای کل استان، و کمّی‌سازی اثر شوری واقعی آب بر عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری در دو سامانه بارانی و قطره‌ای است. بنابراین این پژوهش بر پایه نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای و با بهره‌گیری از بسته نرم‌افزاری DSSAT، در راستای دستیابی به اهداف زیر انجام شد:

۱. تعیین مناطق مستعد کشت ذرت علوفه‌ای در نقاط مختلف استان تحت تأثیر تفاوت‌های اقلیمی
۲. تعیین تاریخ کشت بهینه ذرت علوفه‌ای و ارزیابی پتانسیل تولید و بهره‌وری آب در استان تحت تأثیر تفاوت‌های اقلیمی و خاک‌رخ‌ها
۳. بررسی اثر واقعی شوری آب آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب در دو هیبرید رایج SC606 و SC704

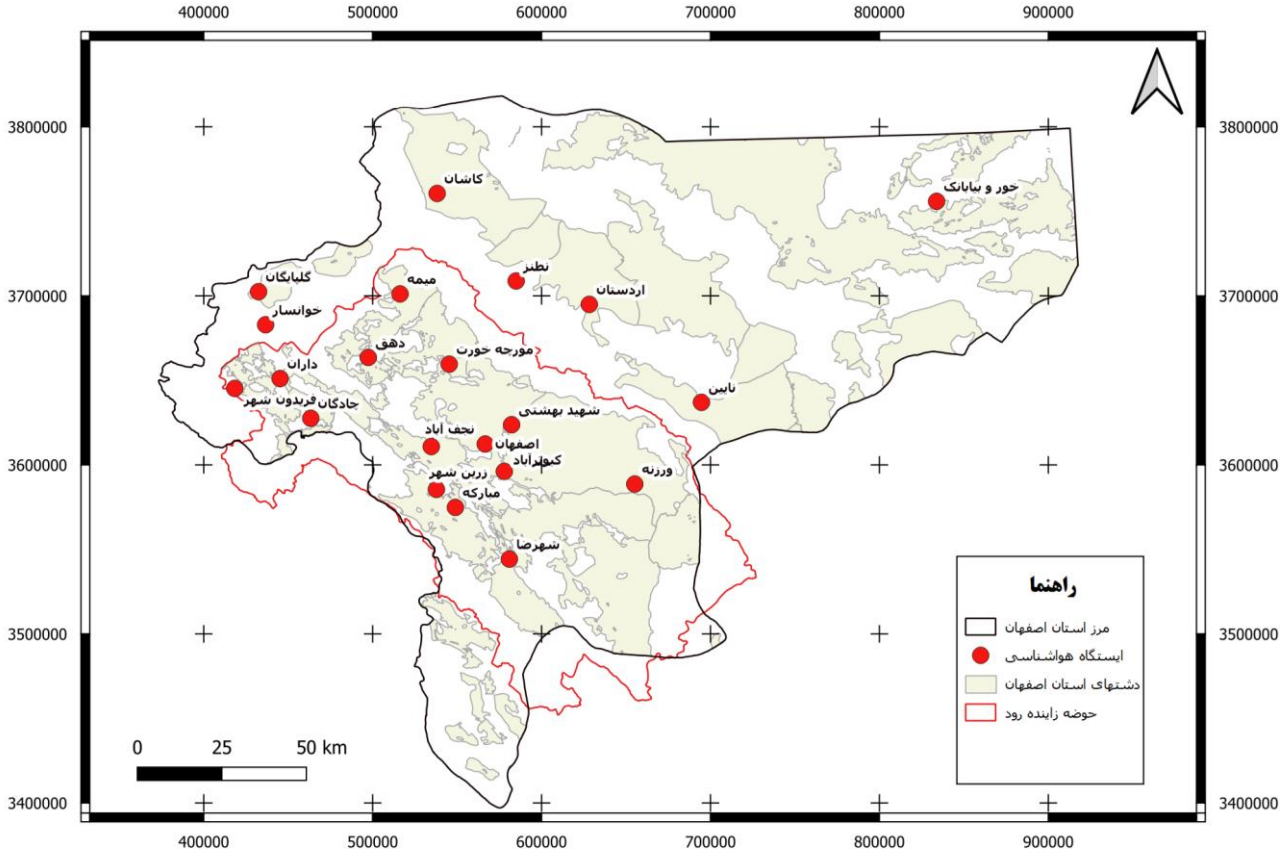
مواد و روش‌ها

-منطقه مورد بررسی

محدوده مورد بررسی در این پژوهش، استان اصفهان با وسعت حدود ۱۰۷ هزار کیلومتر مربع در بخش میانی فلات مرکزی ایران است که در مختصات ′۳۸ ۴۹º تا ′۳۲ ۵۵º طول شرقی و ′۴۳ ۳۰º تا ′۲۷ ۳۴º عرض شمالی و میانگین ارتفاع برابر ۱۵۵۰ متر از سطح دریا واقع شده است. این استان دارای تنوع اقلیمی از فراخشک تا مرطوب بوده و بخش عمده حوضه آبریز زاینده‌رود را دربرمی‌گیرد (Gohari et al., 2013; Soltani et al., 2012). به‌منظور شبیه‌سازی رشد گیاه ذرت در استان اصفهان، از مدل CERES-Maize استفاده شد. در ادامه داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز مدل ارائه شده‌اند.

-اطلاعات ورودی به بسته نرم‌افزاری DSSAT

اطلاعات هواشناسی: بر اساس داده‌های دریافت‌شده از سازمان هواشناسی کشور، ۲۱ ایستگاه هواشناسی استان اصفهان با توجه به سه معیارِ کامل و پیوسته بودن داده‌ها در دوره آماری مشترک، پراکنش مناسب مکانی برای پوشش تنوع اقلیمی و اختلافات ارتفاعی استان، و قرارگیری در درون یا مجاورت مناطق عمده کشاورزی و کشت ذرت، به‌عنوان نماینده مزارع کل استان انتخاب شدند (شکل ۱). بررسی آمار هواشناسی کشور (۱۳۹۹-۱۳۸۵) و



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی استان اصفهان

Fig. 1. Location of meteorological stations in Isfahan province

طبقه‌بندی شاخص کوپن نشان داد فریدون‌شهر (FR[3]) دارای اقلیم قاره‌ای مرطوب، سمیرم (SM)، داران (DN)، چادگان (CN) و خوانسار (KR) دارای اقلیم مدیترانه‌ای، دهق (DH) و گلپایگان (GN) دارای اقلیم نیمه‌خشک، و بخش وسیعی از ایستگاه‌ها از جمله مبارکه (MBE)، مورچه‌خورت (MT)، شهرضا (SA)، شهید بهشتی (BI)، کبوترآباد (KD)، میمه (ME)، اصفهان (IN)، نجف‌آباد (ND)، نطنز (NZ)، زرین‌شهر (ZR)، ورزنه (VE) و کاشان (KN)، دارای اقلیم خشک هستند. همچنین اردستان (AN) و خوروبیابانک (KK) در محدوده اقلیم بیابانی قرار دارند. تحلیل دما و بارش نشان داد که غرب استان (ایستگاه‌های فریدون‌شهر، داران، چادگان و خوانسار) دارای میانگین دمای °C ۱۹/۴۶±۱۱/۸، دمای بیشینه کمتر از °C ۳۵ و بارش سالانه بیش از ۲۰۰ میلی‌متر است، درحالی‌که در شرق استان، میانگین دمای °C ۳۱/۳۳±۱۸/۹، دمای بیشینه بیشتر از °C ۴۰ و بارش کمتر از ۶۰ میلی‌متر گزارش شده است. به‌منظور امکان مقایسه بین ایستگاه‌های هواشناسی، حداقل بازه مشترک ۱۳ ساله میان همه ایستگاه‌ها به‌عنوان مبنای تحلیل انتخاب شد. همچنین ورود اطلاعات هواشناسی به DSSAT با استفاده از ابزار Weatherman انجام گرفت.

اطلاعات خاک: با هدف بررسی اثر آب‌وهوا بر تولید ذرت در سطح استان، در گام نخست مدل‌سازی با فرض ثابت‌بودن بافت خاک انجام شد. بدین منظور اطلاعات بافت خاک (درصد شن،

۳- اختصارات ایستگاه‌ها بر اساس حروف اول و آخر نام انگلیسی هر ایستگاه تعیین شده‌اند (برای مثال FR ← Fereydunshahr)

جدول ۱. اطلاعات سه گروه بافت خاک به‌عنوان نماینده کلاس‌های بافت خاک در استان اصفهان (مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، ۲۰۱۸)

Table 1. Properties of three soil textural groups representing the dominant soil textural classes in Isfahan province (Isfahan Agricultural and Natural Resources Research Center, 2018)

کلاس بافت خاک Soil textural class	عمق (سانتی‌متر) Depth (cm)	ماده آلی (٪) Organic matter (%)	رس (٪) Clay (%)	سیلت (٪) Silt (%)
Clay loam	0–30	0.5 ± 0.3	31.5 ± 6.9	35.0 ± 8.4
	30–100	0.7 ± 0.1	35.5 ± 8.3	33.0 ± 9.2
Loam	0–30	0.4 ± 0.2	21.0 ± 4.8	39.0 ± 6.9
	30–100	0.4 ± 0.1	24.0 ± 3.2	42.5 ± 7.3
Sandy loam	0–30	0.2 ± 0.1	10.0 ± 7.4	30.0 ± 7.0
	30–100	0.2 ± 0.1	10.5 ± 2.2	27.0 ± 7.9

اعداد به‌صورت میانگین ± انحراف معیار (SD) گزارش شده‌اند.

Data are reported as mean ± standard deviation (SD).

سیلت و رس در لایه‌های مختلف) برای نقاط مختلف استان اصفهان از مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان (۲۰۱۸) تهیه شد. سپس این اطلاعات در سه گروه کلی شامل ریزبافت، میان‌بافت و درشت‌بافت دسته‌بندی شده و سه بافت متفاوت از نظر درصد ذرات استخراج شد و به‌عنوان نماینده کلی مناطق مختلف در نظر گرفته شد (جدول ۱). در گام دوم، به‌منظور ارزیابی همزمان اثر آب‌وهوا و بافت خاک بر عملکرد ذرت، شبیه‌سازی‌ها برای ۹ ایستگاه منتخب که در مرحله اول دارای پتانسیل تولید بیشتری بودند انجام شد. در این مرحله، اطلاعات واقعی خاک‌رخ‌ها (ویژگی‌های فیزیکی لایه‌های مختلف خاک‌رخ) در محدوده ایستگاه‌های هواشناسی از سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان (۲۰۲۱) تهیه شد و با استفاده از ابزار SBuild به‌عنوان خاک‌رخ اختصاصی هر ایستگاه وارد مدل شد (جدول ۲).

اطلاعات هیبریدهای ذرت: در گام نخست برای بررسی اثر آب‌وهوا بر پتانسیل عملکرد ذرت در سطح استان و شناسایی مناطق مستعد کشت ذرت، ۲۰ هیبرید ذرت (از ارقام پیش‌فرض مدل و نتایج پژوهش‌ها) که در عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۴۰ درجه شمالی (منطبق با عرض جغرافیایی ایران) بررسی شده بودند و ضرایب ژنتیکی آن‌ها برای مدل CERES-Maize استخراج شده بود، بدون انجام واسنجی مجدد، انتخاب و وارد فایل ژنتیکی مدل شد (Mohamadzade, 2022). در گام دوم و به‌منظور بررسی همزمان اثر آب‌وهوا و بافت خاک بر پتانسیل عملکرد ذرت در ۹ ایستگاه هواشناسی منتخب (مناطق مستعد کشت ذرت حاصل از مرحله اول)، دو هیبرید رایج واسنجی‌شده در اصفهان، SC704 و SC606 به‌کار گرفته شد. فرایند واسنجی مدل CERES-Maize برای تعیین ضرایب ژنتیکی این دو هیبرید و همچنین اعتبارسنجی مدل، با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از پژوهش‌های میدانی انجام‌شده در مزارع استان اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۸، پیش‌تر انجام شده است (Mohamadzade et al., 2022).

اطلاعات کشت: برای ارزیابی اثر تاریخ کشت بر عملکرد ذرت در ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی، ۲۰ تاریخ کشت با فواصل زمانی ۱۰ روزه به‌گونه‌ای انتخاب شد که بازه زمانی رایج کشت در استان اصفهان را به‌طور کامل پوشش دهد. این تاریخ‌ها از ۲۹ بهمن تا ۵ شهریور در نظر گرفته شد (جدول ۳) و با استفاده از ابزار XBuild در مدل تعریف گردید. علاوه‌بر تاریخ کاشت اطلاعاتی مانند روش کاشت، توزیع بوته‌ها در ردیف، تراکم بوته، فاصله ردیف‌ها، جهت ردیف‌ها نسبت به شمال و عمق کاشت، بر اساس داده‌های میدانی دریافت‌شده از کشاورزان محلی و عرف رایج در منطقه وارد مدل شد.

جدول ۲. اطلاعات خاک‌رخ‌ها در محدوده ایستگاه‌های هواشناسی (سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان، ۲۰۲۱)

Table 2. Soil profiles information within the meteorological station areas (Agricultural Jihad Organization of Isfahan Province, 2021)

ماده آلی (٪)		بافت خاک	سنگریزه (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	ایستگاه هواشناسی
Organic matter (%)	pH	Soil texture	Gravel (%)	Silt (%)	Clay (%)	Meteorological station
0.5 ± 0.2	7.7 ± 0.2	SCL, L, SiL	18.0 ± 8.4	34.9 ± 11.1	35.7 ± 7.1	فریدون‌شهر (FR)
0.5 ± 0.3	7.8 ± 0.2	SCL, CL, SiCL, SiL, C	17.0 ± 16.6	36.8 ± 11.1	36.5 ± 6.3	داران (DN)
0.4 ± 0.2	7.7 ± 0.2	SCL, SiCL, L	18.7 ± 7.8	40.5 ± 10.6	34.6 ± 7.8	چادگان (CN)
0.4 ± 0.4	8.0 ± 0.07	L, CL	22.4 ± 13.2	33.1 ± 6.9	31.9 ± 3.9	خوانسار (KR)
0.2 ± 0.4	7.7 ± 0.1	SL	45.2 ± 11.8	22.0 ± 7.0	20.7 ± 4.7	میمه (ME)
0.4 ± 0.3	8.4 ± 0.4	L, CL, SiCL, SiL, C, LS, SL, SCL	8.7 ± 15.2	38.6 ± 12.0	33.1 ± 13.5	گلپایگان (GN)
0.4 ± 0.2	8.1 ± 0.2	SiCL, C, CL, SCL, L	2.1 ± 4.5	37.2 ± 6.9	38.3 ± 11.2	کبوترآباد (KD)
0.3 ± 0.4	7.9 ± 0.2	SL, SCL, SiC, L, C	10.2 ± 17.2	36.5 ± 9.9	33.3 ± 8.9	زرین‌شهر (ZR)
0.3 ± 0.2	7.9 ± 0.1	CL, SCL	13.7 ± 13.1	31.1 ± 11.7	33.5 ± 7.5	نجف‌آباد (ND)

اعداد به‌صورت میانگین ± انحراف معیار (SD) گزارش شده‌اند.

Data are reported as mean ± standard deviation (SD).

جدول ۳. سناریوهای تاریخ کشت

Table 3. Planting date scenarios

روز ژولیوسی	تاریخ	روز ژولیوسی	تاریخ	روز ژولیوسی	تاریخ	روز ژولیوسی	تاریخ
Julian day	Date	Julian day	Date	Julian day	Date	Julian day	Date
	27 تیر		8 خرداد		20 فروردین		29 بهمن
200	18-July	150	29-May	100	9-April	50	18-February
	6 مرداد		18 خرداد		30 فروردین		9 اسفند
210	28-July	160	8-June	110	19-April	60	28- February
	16 مرداد		28 خرداد		9 اردیبهشت		19 اسفند
220	7-August	170	18-June	120	29-April	70	10-March
	26 مرداد		7 تیر		19 اردیبهشت		29 اسفند
230	17-August	180	28-June	130	9- May	80	20-March
	5 شهریور		17 تیر		29 اردیبهشت		10 فروردین
240	27-August	190	8-July	140	19-May	90	30-March

-مدل‌سازی رشد و نمو گیاهی

شبیه‌سازی تحت شرایط مختلف آب‌وهوایی: در این بخش، برای دستیابی به دید کلی از پتانسیل عملکرد ذرت در سطح استان، تحت تاثیر آب‌وهوا، مدل برای ۲۱ ایستگاه هواشناسی، ۲۰ رقم ذرت، ۱۸ تاریخ کاشت و سه بافت خاک رایج در استان اصفهان اجرا شد. بدین منظور در هر ایستگاه، با استفاده از ابزار XBuild فایل هواشناسی و خاک فراخوانی شد و با ورود مشخصات رقم و اطلاعات مدیریت زراعی شامل تاریخ کاشت، تیمارهای مختلف در محیط DSSAT تعریف گردید. به‌منظور برآورد پتانسیل تولید، مدل تحت سناریوی آبیاری و کوددهی

اتوماتیک اجرا گردید. در حالت اتوماتیک، تأمین آب و نیتروژن بدون محدودیت و در زمان نیاز گیاه صورت می‌گیرد. پس از اجرای مدل، مقادیر عملکرد زیست‌توده و عملکرد دانه از فایل PlantGro.OUT و مقادیر تبخیر–تعرق واقعی و عمق آب آبیاری از فایل ET.OUT استخراج شد. این مقادیر بدون هیچ‌گونه تغییری برای محاسبه بهره‌وری آب (WPC[4], kg m^{-3}) و بهره‌وری آب آبیاری (WPI[5], kg m^{-3}) استفاده شدند (روابط ۱ و ۲) (Fernández et al., 2020):

$$WPC = \frac{Y}{ETa} \quad (۱)$$

$$WPI = \frac{Y}{dg} \quad (۲)$$

که در این روابط، Y عملکرد قابل‌فروش محصول (kg ha^{-1})، ETa تبخیر–تعرق واقعی تجمعی (m^3 ha^{-1}) و dg عمق آب آبیاری تجمعی (m^3 ha^{-1}) شبیه‌سازی‌شده است.

در نهایت بیشینه مقدار شبیه‌سازی‌شده در بین تیمارهای اجراشده برای هر ایستگاه، بر اساس روابط ۳ تا ۷ با سایر ایستگاه‌ها مقایسه و ارزیابی شد. این شاخص‌ها امکان شناسایی مناطق مستعد کشت ذرت در سطح استان را فراهم کردند.

$$RTB = \frac{Max(TB)_i}{\sum_i^n Max(TB)_i / n} \quad (۳)$$

$$RMY = \frac{Max(MY)_i}{\sum_i^n Max(MY)_i / n} \quad (۴)$$

$$RWPC = \frac{Max(WPC)_i}{\sum_i^n Max(WPC)_i / n} \quad (۵)$$

$$RWPI = \frac{Max(WPI)_i}{\sum_i^n Max(WPI)_i / n} \quad (۶)$$

$$Range = \frac{Max(WPC)_i - Min(WPC)_i}{\sum_i^n Max(WPC)_i / n} \quad (۷)$$

که در این روابط، RTB[6] نسبت وزن زیست‌توده، RMY[7] نسبت وزن عملکرد دانه، RWP$_C$[8] نسبت بهره‌وری آب، RWP$_I$[9] نسبت بهره‌وری آب آبیاری، Range دامنه تغییرات و n تعداد ایستگاه‌ها است.

شبیه‌سازی تحت ترکیب شرایط آب‌وهوا و بافت خاک: در این بخش، به‌منظور ارزیابی همزمان اثر آب‌وهوا و بافت خاک بر پتانسیل تولید و بهره‌وری آب ذرت، مدل برای ۹ ایستگاه هواشناسی منتخب (مناطق مستعد کشت ذرت که در مرحله پیش بر اساس شاخص‌های RTB، RMY، RWPC و RWPI بیشترین پتانسیل تولید را داشتند) اجرا شد. بدین منظور دو هیبرید واسنجی‌شده ذرت (میان‌رس SC606 و دیررس SC704)، اطلاعات واقعی خاک‌رخ و ۱۸ تاریخ کشت، با استفاده از ابزار XBuild در مدل تعریف شد و ترکیب‌های مختلف تیماری تحت شرایط پتانسیل (آبیاری و کوددهی اتوماتیک) شبیه‌سازی گردید. پس از اجرای مدل، شاخص‌های زیست‌توده، بهره‌وری آب و بهره‌وری آب آبیاری برای تیمارهای مختلف در هر ایستگاه استخراج و تعیین گردید. تعیین بازه بهینه تاریخ کشت هر ایستگاه، بر اساس آزمون *t*-test در سطح خطای ۵ درصد و با استفاده از بیشینه شاخص‌های مذکور انجام شد. بدین صورت که ابتدا تاریخ کشت با بیشینه مقدار شاخص‌ها تعیین گردید. سپس تاریخ‌های کشتی که مقادیر شاخص‌های آن‌ها از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با بیشینه مقدار نداشتند، به‌عنوان بازه تاریخ کشت بهینه تعیین شدند. در نهایت نتایج به‌صورت تقویم کشت همرا با مقادیر متناظر تولید و بهره‌وری، برای دو هیبرید SC606 و SC704 استخراج گردید.

شبیه‌سازی تحت ترکیب شرایط آب‌وهوا، بافت خاک و شوری آب آبیاری: با توجه به شرایط منطقه، منابع آبی زراعی شامل آب رودخانه (در دوره تأمین حقابه) و چاه‌های مزرعه‌ای است. داده‌های کیفی چاه‌های استان طی سال‌های اخیر از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان (۲۰۱۸) دریافت شد. بر اساس اطلاعات دریافت‌شده، کاهش بارش در نواحی شرقی استان و قطع جریان دائمی زاینده‌رود، موجب افزایش شوری آب چاه‌های کشاورزی (EC$_w$) و شوری عصاره اشباع خاک (EC$_e$) از مرکز به شرق شده است (کمترین مقادیر شوری خاک مربوط به فریدون‌شهر و داران

4- Crop water productivity
5- Irrigation water productivity
6- Ratio of total biomass
7- Ratio of grain yield
8- Ratio of crop water productivity
9- Ratio of irrigation water productivity

با ۰/۳۴ و ۰/۳۷ دسی‌زیمنس بر متر و بیشترین مقدار شوری خاک مربوط به کبوترآباد با ۱/۶ ± ۵/۴ دسی‌زیمنس بر متر).

به‌منظور بررسی تاثیر شوری آب بر عملکرد، بهره‌وری آب و بهره‌وری آب آبیاری، ابتدا ضریب کاهش عملکرد برای ذرت بر اساس شوری عصاره اشباع خاک‌رخ‌ها محاسبه شد (رابطه ۸) (Keller and Bliesner, 1990):

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - \frac{b}{100}(EC_e - EC_{e-thershold}) \quad (۸)$$

که در این رابطه، Y_a عملکرد ذرت در شرایط واقعی شوری، Y_m بیشینه عملکرد شبیه‌سازی‌شده زمانی که $EC_e < EC_{e\text{-}threshold}$، EC_e میانگین شوری عصاره اشباع ($dS\ m^{-1}$)، $EC_{e\text{-}threshold}$ شوری عصاره اشباع بدون کاهش عملکرد و b نسبت درصد کاهش عملکرد با افزایش یک واحد شوری است. برای ذرت علوفه‌ای مقدار $EC_{e\text{-}threshold}$ برابر $1/8\ dS\ m^{-1}$ و مقدار b برابر ۱۳/۲ در نظر گرفته شد (Allen et al., 1998). مقدار EC_e نیز بر اساس داده‌های شوری آب آبیاری (EC_w)، با فرض نیاز آبشویی برابر ۱۵ درصد (LR=0.15)، و با استفاده از رابطه $EC_e = 1.5 \times EC_w$ محاسبه شد. سپس نیاز آبشویی بر اساس داده‌های شوری آب چاه هر منطقه، در دو سامانه آبیاری بارانی (رابطه ۹) و قطره‌ای (رابطه ۱۰) محاسبه شد (Keller and Bliesner, 1990):

$$LR_{sp} = \frac{EC_w}{5EC_e - EC_w} \quad (۹)$$

$$LR_{dr} = \frac{EC_w}{2(EC_e\ max)} \quad (۱۰)$$

که در این روابط، LR_{sp} نیاز آبشویی در سامانه آبیاری بارانی، LR_{dr} نیاز آبشویی در سامانه آبیاری قطره‌ای، EC_w شوری آب ($dS\ m^{-1}$)، EC_e شوری عصاره اشباع با ده درصد کاهش عملکرد و EC_{emax} بیشینه شوری عصاره اشباع با ۱۰۰ درصد کاهش عملکرد است. همچنین عمق آبیاری در شرایطی که LR کمتر و بیشتر از ۰/۱ باشد، به‌ترتیب بر اساس روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه شد (Keller and Bliesner, 1990):

$$\text{if } LR < 0.1,\ dg = \frac{dn}{Ea} \quad (۱۱)$$

$$\text{if } LR > 0.1,\ dg = \frac{0.9 \times dn}{Ea \times (1 - LR)} \quad (۱۲)$$

که در این روابط، dg عمق ناخالص آبیاری، dn نیاز خالص آبیاری به‌دست‌آمده از مدل و Ea کارایی آبیاری است که در سامانه بارانی برابر ۵۵٪ و در سامانه قطره‌ای برابر ۸۵٪ لحاظ شد. در نهایت، بهره‌وری آب (WPC) با استفاده از رابطه (۱) برای دو هیبرید SC606 و SC704 محاسبه شد. بهره‌وری آب آبیاری (WPI) نیز با استفاده از رابطه (۲) برای سامانه‌های آبیاری بارانی (WP_{Isp}) و قطره‌ای (WP_{Idr}) به‌طور مجزا محاسبه گردید.

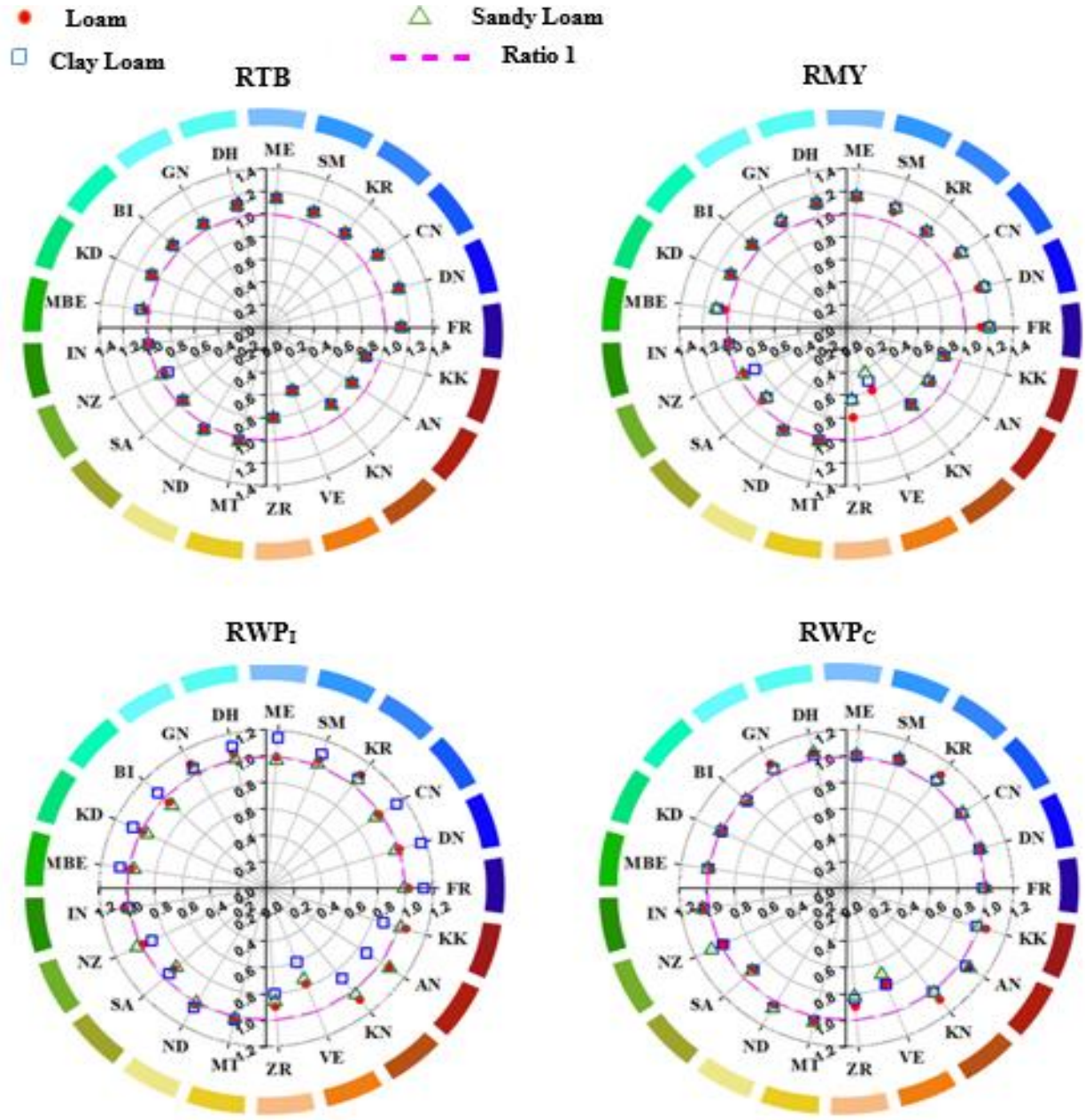
- تجزیه و تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS 26.0.0.1 انجام شد و برای مقایسه مقادیر شاخص‌ها با مقدار حداکثر، آزمون *t*-test در سطح خطای ۵ درصد مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

-ارزیابی پتانسیل تولید ذرت تحت تأثیر شرایط آب‌وهوای مناطق (بدون محدودیت آب و خاک)

نسبت بیشینه مقادیر زیست‌توده، عملکرد دانه، بهره‌وری آب و بهره‌وری آب آبیاری به میانگین بیشینه همه ایستگاه‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. نتایج نسبت‌های RTB و RMY نشان داد ایستگاه‌های اصفهان، نطنز، شهرضا، زرین‌شهر، ورزنه، کاشان، اردستان و خوروبیابانک دارای تولیدی برابر یا کمتر از میانگین استان هستند. بر اساس شاخص RWP_C در خاک با بافت متوسط، مقادیر نسبت به‌دست‌آمده در ایستگاه‌های فریدون‌شهر، شهیدبهشتی، کبوترآباد و خوروبیابانک در بازه ۰/۹۸ تا ۱ قرار داشت، درحالی‌که شهرضا، زرین‌شهر و ورزنه مقادیر کمتر از ۰/۹۵ را نشان دادند. در نهایت، با توجه به این نسبت‌ها و پراکنش مزارع ذرت در استان، ایستگاه‌های فریدون‌شهر، داران، چادگان، خوانسار، میمه، گلپایگان، کبوترآباد، نجف‌آباد و زرین‌شهر، به‌عنوان مناطق مستعد کشت ذرت برای مرحله بعد انتخاب شدند تا پتانسیل تولید و بهره‌وری آب با شرایط واقعی خاک‌رخ‌های هر منطقه و هیبرید واسنجی‌شده در منطقه ارزیابی شود.



شکل ۲. تغییرات وزن زیست‌توده (RTB)، عملکرد دانه (RMY)، بهره‌وری آب (RWP_C) و بهره‌وری آب آبیاری (RWP_I) تحت تأثیر شرایط اقلیمی، در سه بافت خاک لوم شنی، لوم و لوم رسی برای ۲۱ ایستگاه هواشناسی مورد بررسی

Fig. 2. Variations of biomass weight (RTB), grain yield (RMY), water productivity (RWP_C), and irrigation water productivity (RWP_I) under different climatic conditions across three soil textures (sandy loam, loam, and clay loam) for the 21 meteorological stations studied

-ارزیابی پتانسیل تولید ذرت تحت تأثیر شرایط آب‌وهوا و خاک‌رخ مناطق (بدون محدودیت کیفی آب)

بازه کلی تاریخ کشت هیبرید SC606 در مناطق مورد بررسی از ۱۸ خرداد تا ۶ مرداد، و برای هیبرید SC704 از ۱۹ اردیبهشت تا ۶ مرداد به‌دست آمد. با هدف دستیابی به بیشینه عملکرد، بهره‌وری آب و بهره‌وری آب آبیاری، تاریخ کشت بازه ده روزه ۱۸ خرداد برای فریدون‌شهر، بازه ده روزه ۲۸ خرداد برای داران، چادگان و میمه، بازه ده روزه ۷ تیر خوانسار، بازه ده روزه ۱۷ تیر

گلپایگان و کبوترآباد و بازه ده روزه ۲۷ تیر برای نجف‌آباد و زرین‌شهر به‌عنوان تاریخ کشت بهینه برای هیبرید SC606 تعیین شد. همچنین برای هیبرید SC704، بازه ۲۹ اردیبهشت تا ۸ خرداد در فریدون‌شهر، بازه ۱۰ روزه با شروع ۱۸ خرداد در داران، چادگان و میمه، بازه ۱۰ روزه با شروع ۲۸ خرداد در خوانسار، بازه ۱۰ روزه با شروع ۷ تیر در گلپایگان، بازه ۱۰ روزه با شروع ۱۷ تیر در کبوترآباد، بازه ۱۰ روزه با شروع ۲۷ تیر در نجف‌آباد و بازه ۱۷ تیر تا ۲۷ تیر در زرین‌شهر، به عنوان بازه تاریخ کشت بهینه تعیین شد.

اطلاعات هواشناسی دوره رشد، همراه با پتانسیل تولید و بهره‌وری آب هیبرید میان‌رس SC606 و هیبرید دیررس SC704، در جدول (۴) گزارش شده است. بر اساس نتایج جدول (۴)، برای هیبرید SC606، کمترین عملکرد در ایستگاه‌های نجف‌آباد و زرین‌شهر مشاهده شد که به‌ترتیب برابر ۶۶ و ۵۵ درصد بیشینه عملکرد شبیه‌سازی‌شده در سطح استان است. بررسی ارتباط عملکرد ذرت با اقلیم منطقه نشان داد که در ایستگاه‌های با میانگین تشعشع خورشیدی روزانه بیشتر در طی فصل رشد (۲۳/۸، ۲۳/۵ و ۲۳/۳ مگاژول بر مترمربع بر روز به‌ترتیب برای چادگان، میمه و داران)، عملکرد بیشتری حاصل شد، درحالی‌که افزایش میانگین دمای بیشینه اثر معکوس بر عملکرد ذرت داشته است. بنابراین جابه‌جایی تاریخ کشت بهینه از خرداد به اوایل مرداد موجب کوتاه‌شدن دوره رشد، کاهش انرژی دریافتی و در نتیجه کاهش عملکرد ذرت می‌شود. پتانسیل عملکرد ذرت در منطقه مرکزی استان (نجف‌آباد)، تحت تأثیر ویژگی‌های خاک و اقلیم، حدود ۸۷ درصد بیشترین عملکرد شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه‌های فریدون‌شهر، کبوترآباد و میمه برآورد شد. با توجه به بازه دمایی مطلوب برای فتوسنتز ذرت (۱۶/۵ تا ۳۳ درجه سلسیوس) و پرشدن دانه (۱۶ تا ۲۷ درجه سلسیوس؛ فایل MZCER047.SPE) و نیز میانگین تشعشع دریافتی در فصل رشد، شرایط گرم‌تر شرق و جنوب استان می‌تواند تبخیر–تعرق را افزایش دهد، اما الگوی تشعشع دریافتی و دما در غرب استان بیانگر شرایط مساعدتر برای فتوسنتز و تقاضای تبخیر–تعرق کمتر نسبت به مناطق مرکزی و شرقی است. یافته‌های پیشین کاهش طول دوره رشد و عملکرد در مناطق گرمسیری علی‌رغم تشعشع زیاد را گزارش کرده‌اند (Muchow et al., 1990؛ Yang et al., 2019) و افزایش تشعشع طی دوره رشد را عامل بهبود فتوسنتز و عملکرد ذرت دانسته‌اند (Yang et al., 2021).

میانگین شاخص بهره‌وری آب زیست‌توده خشک ذرت (WP_C) در استان برابر ۴/۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد شد. بیشترین مقدار این شاخص در خوانسار برابر ۰/۰۱ ± ۵/۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب و کمترین مقدار آن در زرین‌شهر برابر ۰/۲۲ ± ۴/۴۴ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد. دمای زیاد و ویژگی‌های نامطلوب خاک از عوامل اصلی کاهش بهره‌وری آب محسوب می‌شوند؛ به‌طوری‌که افزایش دما ضمن کاهش عملکرد، تبخیر–تعرق را تشدید کرده و در نتیجه، به‌ویژه در نواحی شرقی استان، موجب کاهش شاخص بهره‌وری آب می‌گردد.

در هیبرید دیررس SC704، بیشترین مقادیر پتانسیل تولید زیست‌توده در ایستگاه‌های داران (۲۴/۹ مگاگرم در هکتار)، فریدون‌شهر (۲۴/۶ مگاگرم در هکتار) و میمه (۲۴/۲ مگاگرم در هکتار) مشاهده شد. مقادیر پتانسیل عملکرد در ایستگاه‌های خوانسار و گلپایگان به‌ترتیب برابر ۲۱/۷ و ۲۳/۱ مگاگرم در هکتار محاسبه گردید، در حالی‌که در نجف‌آباد و زرین‌شهر مقادیر پتانسیل عملکرد کمتر از ۱۹/۳ مگاگرم در هکتار به‌دست آمد. به نظر می‌رسد کاهش عملکرد در این مناطق ناشی از کاهش میانگین انرژی دریافتی روزانه طی دوره رشد، وقوع دماهای بیشینه زیاد و یا نامناسب‌بودن طول دوره رشد برای تکمیل چرخه فنولوژیک گیاه است. بیشترین مقادیر شاخص بهره‌وری آب در ایستگاه‌های خوانسار (۴/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب) و گلپایگان (۴/۴۳ کیلوگرم بر متر مکعب) و کمترین مقدار در زرین‌شهر (۳/۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب) به‌دست آمد.

–ارزیابی پتانسیل تولید تحت تأثیر شرایط آب‌وهوا، خاک‌رخ و شوری واقعی آب چاه (با محدودیت کیفی آب)

نتایج شبیه‌سازی اثر شوری بر اساس اطلاعات شوری خاک‌رخ

جدول ۴. اطلاعات آب‌وهوایی در طول دوره رشد، پتانسیل بیشینه عملکرد و بهره‌وری آب هیبرید میان‌رس SC606 و هیبرید دیررس SC704 در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب استان

Table 4. Climatic data during the growing period, maximum potential yield, and crop water productivity of the mid-maturing hybrid SC606 and the late-maturing hybrid SC704 at selected meteorological stations in the province

هیبرید ذرت Maize hybrid	پارامتر Parameter	نام ایستگاه Station name								
		FR	DN	CN	KR	ME	GN	KD	ND	ZR
SC606	میانگین دمای بیشینه در دوره رشد (ºC) Mean maximum temperature during the growing period (°C)	26.3	28.2	28.8	26.5	30.5	29.6	33.0	30.3	32.6
	میانگین دمای کمینه در دوره رشد (ºC) Mean minimum temperature during the growing period (°C)	12.4	12.7	13.3	14.5	12.6	15.4	13.5	14.5	13/7
	میانگین انرژی دریافتی در دوره رشد ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) Mean energy reception during the growing period ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)	22.4	23.3	23.8	20.1	23.5	21.1	22.7	21.1	22.3
	عملکرد زیست‌توده ($Mg\ ha^{-1}$) Biomass yield ($Mg\ ha^{-1}$)	25.8	26.2	24.4	24.3	26.1	24.3	24.2	22.6	20.0
	بهره‌وری آب ($kg\ m^{-3}$) Water productivity ($kg\ m^{-3}$)	5.1	5.0	4.9	5.5	4.9	5.3	4.6	4.9	4.4
SC704	میانگین دمای بیشینه در دوره رشد (ºC) Mean maximum temperature during the growing period (°C)	25.5	28.1	28.6	26.7	30.5	30.0	33.0	30.3	32.6
	میانگین دمای کمینه در دوره رشد (ºC) Mean minimum temperature during the growing period (°C)	11.8	12.6	13.1	14.6	12.6	15.7	13.5	14.5	13.7
	میانگین انرژی دریافتی در دوره رشد ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) Mean energy reception during the growing period ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)	22.7	23.8	24.4	20.5	23.8	21.4	22.7	21.1	22.3
	عملکرد زیست‌توده ($Mg\ ha^{-1}$) Biomass yield ($Mg\ ha^{-1}$)	24.6	24.9	23.8	21.7	24.2	23.1	20.8	19.3	17.2
	بهره‌وری آب ($kg\ m^{-3}$) Water productivity ($kg\ m^{-3}$)	3.9	4.0	4.0	4.4	4.1	4.4	4.0	4.1	3.7

نشان داد که عملکرد هیبرید SC606 در کبوترآباد، نجف‌آباد، گلپایگان و زرین‌شهر به‌ترتیب ۳۸/۹، ۴۱/۱، ۲۶/۱ و ۱۶/۲ درصد کاهش یافت. در این شرایط، میانگین بهره‌وری آب در مناطق مرکزی و شرقی ۳/۴۲ و در مناطق غربی ۵/۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. در مقابل، نتایج شبیه‌سازی اثر شوری بر اساس تبدیل شوری آب چاه به شوری عصاره اشباع خاک نشان داد که عملکرد در کبوترآباد، زرین‌شهر، نجف‌آباد و گلپایگان به میزان ۷۵/۶، ۵۲/۷، ۱۲/۵ و ۱۰/۴ درصد کاهش یافت. در این شرایط میانگین بهره‌وری آب در مناطق مرکزی و شرقی ۲/۶۶ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. در هیبرید SC704 نیز نتایج شبیه‌سازی الگوی مشابهی را نشان داد؛ به‌طوری‌که بر اساس اطلاعات شوری خاک‌رخ، کاهش عملکرد در کبوترآباد، نجف‌آباد، گلپایگان و زرین‌شهر به‌ترتیب ۴۶/۷، ۴۱/۱، ۲۸/۱ و ۲۷/۷ درصد، و میانگین بهره‌وری آب در مناطق مرکزی و شرقی، و غربی به‌ترتیب برابر ۳/۰۹ و ۴/۰۸ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. همچنین در شرایط محاسبه شوری عصاره اشباع خاک بر اساس شوری آب چاه، کاهش عملکرد در کبوترآباد، زرین‌شهر، نجف‌آباد و گلپایگان به‌ترتیب ۷۸/۷، ۵۹/۴، ۲۵/۵ و ۱۴/۸ درصد و بهره‌وری آب در مناطق مرکزی و شرقی به‌طور میانگین برابر ۲/۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب بود (جدول ۵).

با توجه به اهمیت استفاده بهینه از منابع آب، گزینش سامانه آبیاری نوین مناسب می‌تواند در بهبود بهره‌وری آب آبیاری مؤثر باشد. بر این اساس، با استفاده از داده‌های شوری عصاره اشباع، نیاز آبشویی و عمق آبیاری برآورد شد. سپس بهره‌وری آب آبیاری در سامانه‌های بارانی (WP_{ISP}) و قطره‌ای (WP_{IDR}) برای هیبریدهای SC606 و SC704 در مناطق مورد بررسی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که در مناطق انتخاب‌شده برای کشت، سامانه آبیاری قطره‌ای نسبت به سامانه بارانی موجب افزایش بهره‌وری آب آبیاری می‌شود. در هر دو هیبرید میان‌رس و دیررس، بیشترین بهره‌وری آب آبیاری در خوانسار ثبت شد (مقادیر WP_{IDR} برابر ۴/۸۶ و ۳/۹۱؛ مقادیر WP_{ISP} برابر ۳/۱۴ و ۲/۵۳ کیلوگرم بر متر مکعب). همچنین در فریدون‌شهر و داران، مقادیر بهره‌وری آب آبیاری قطره‌ای به‌ترتیب ۳/۷۹ و ۲/۹۸ و نیز ۳/۶۵ و ۲/۸۹ کیلوگرم بر متر مکعب، برای هیبریدهای میان‌رس و دیررس به‌دست آمد. در مجموع، مدیریت آبیاری قطره‌ای با فواصل کوتاه آبیاری و عمق آب کم، برای مناطق غربی مناسب کشت ذرت، راهبردی کارآمد برای افزایش تولید به ازای آب مصرفی است.

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی اقلیمی نشان داد مناطق شرقی، بخش‌هایی از نواحی مرکزی و جنوبی استان اصفهان، با دمای بیشینه بیشتر از ۴۰ درجه سلسیوس و بارش کمتر از ۶۰ میلی‌متر، پتانسیل تولید و بهره‌وری آب کمتر از میانگین استانی دارند. نتایج شبیه‌سازی تحت ترکیب شرایط آب‌وهوا و بافت خاک نشان داد مناطق غربی و بخش‌هایی از نواحی مرکزی استان، با تشعشع خورشیدی بیش از ۲۵ مگاژول بر متر مربع بر روز، دامنه دمایی ۱۲ تا ۲۸ درجه سلسیوس طی دوره رشد ذرت و بافت خاک متوسط، استعداد بیشتری برای تولید پتانسیل عملکرد علوفه‌ای در هر دو هیبرید SC606 و SC704 دارند. همچنین در این مناطق، میانگین شاخص بهره‌وری آب زیست‌توده برای هیبریدهای SC606 و SC704 به‌ترتیب برابر ۴/۹۷ و ۴/۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب بود. علاوه‌بر اثر انرژی تشعشعی و دما، افزایش شوری آب در نواحی مرکزی و شرقی، موجب کاهش عملکرد و بهره‌وری آب بیشتر شد، به‌طوری‌که در کبوترآباد بیش از ۵۰ درصد کاهش عملکرد مشاهده گردید.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

جدول ۵. مقایسه مقادیر پتانسیل عملکرد زیست‌توده و بهره‌وری آب با عملکرد کاهش‌یافته در شرایط استفاده از آب چاه برای هیبرید SC606 و SC704 در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب استان

Table 5. Comparison of potential biomass yield and crop water productivity with the reduced yield under well water irrigation conditions for hybrids SC606 and SC704 at selected meteorological stations in the province

هیبرید ذرت Maize hybrid	ایستگاه Station	پتانسیل عملکرد زیست‌توده ($Mg\ ha^{-1}$) Potential biomass yield ($Mg\ ha^{-1}$)	پتانسیل بهره‌وری آب ($kg\ m^{-3}$) Potential water productivity ($kg\ m^{-3}$)	عملکرد زیست‌توده در شرایط استفاده از آب چاه ($Mg\ ha^{-1}$) Biomass yield under well water irrigation conditions ($Mg\ ha^{-1}$)		بهره‌وری آب در شرایط استفاده از آب چاه ($kg\ m^{-3}$) Water productivity under well water irrigation conditions ($kg\ m^{-3}$)	
				بر اساس اطلاعات شوری خاک خاک‌رخ‌ها Based on soil profile salinity data	بر اساس تبدیل شوری آب به شوری عصاره اشباع خاک Based on the conversion of water salinity to soil saturation extract salinity	بر اساس اطلاعات شوری خاک خاک‌رخ‌ها Based on soil profile salinity data	بر اساس تبدیل شوری آب به شوری عصاره اشباع خاک Based on the conversion of water salinity to soil saturation extract salinity
SC606	FR	25.8 ± 0.11	5.0 ± 0.07	25.7 ± 0.0	25.7 ± 0.1	4.9 ± 0.08	5.0 ± 0.07
	DN	26.2 ± 0.71	5.0 ± 0.07	26.2 ± 0.0	26.2 ± 0.71	5.0 ± 0.07	5.0 ±0.07
	CN	24.4 ± 0.06	4.9 ± 0.04	24.4 ± 0.0	24.4 ± 0.06	4.9 ± 0.04	4.9 ± 0.04
	KR	24.3 ± 0.0	5.5 ± 0.0	24.3 ± 0.0	24.3 ± 0.0	5.5 ± 0.0	5.5 ± 0.0
	ME	26.1 ± 0.11	4.9 ± 0.0	26.1 ± 0.01	25.9 ± 0.18	4.8 ± 0.01	4.8 ± 0.04
	GN	24.3 ± 0.0	5.3 ± 0.20	17.9 ± 9.43	21.8 ± 4.13	3.8 ± 1.91	4.7 ± 0.97
	KD	24.2 ± 0.0	4.6 ± 0.33	14.8 ± 9.93	5.9 ± 5.44	3.1 ± 1.77	1.1 ± 1.08
	ND	22.6 ± 0.73	4.9 ± 0.09	13.3 ± 7.69	19.7 ± 1.27	3.0 ± 1.76	4.5 ± 0.35
	ZR	20.0 ± 0.83	4.4 ± 0.22	16.7 ±5.67	9.5 ± 6.87	4.1 ± 1.26	2.3 ± 1.60
SC704	FR	24.6 ± 0.07	3.9 ± 0.04	24.6 ± 0.01	24.6 ± 0.01	3.9 ± 0.04	3.9 ± 0.04
	DN	24.9 ± 0.46	4.0 ± 0.04	24.9 ± 0.04	24.9 ± 0.04	4.0 ± 0.04	4.0 ± 0.04
	CN	23.8 ± 0.05	4.0 ± 0.02	23.8 ± 0.01	23.8 ± 0.01	4.0 ± 0.02	4.0 ± 0.02
	KR	21.7 ± 0.0	4.4 ± 0.0	21.7 ± 0.0	21.7 ± 0.0	4.4 ± 0.0	4.4 ± 0.01
	ME	24.2 ± 0.09	4.1 ± 0.01	24.2 ± 0.09	24.0 ± 0.17	4.1 ± 0.01	4.1 ± 0.03
	GN	23.1 ± 0.01	4.4 ± 0.15	17.5 ± 9.20	20.7 ± 3.93	3.5 ± 1.70	3.9 ± 0.80
	KD	20.8 ± 0.0	3.9 ± 0.28	12.7 ± 8.51	5.0 ± 4.67	2.6 ± 1.52	1.0 ± 0.92
	ND	19.3 ± 0.02	4.1 ± 0.07	13.3 ± 7.69	16.8 ± 0.54	3.0 ± 1.76	3.9 ± 0.18
	ZR	17.2 ± 0.0	3.7 ± 0.19	14.4 ± 4.80	8.1 ± 5.85	3.6 ± 1.08	1.9 ± 1.37

اعداد به‌صورت میانگین ± انحراف معیار (SD) گزارش شده‌اند.

Data are reported as mean ± standard deviation (SD).

منابع مورد استفاده References

1. Adnan, A.A., Jibrin, J.M., Kamara, A.Y., Abdulrahman, B.L., Shaibu, A.S., Garba, I.I., 2017. CERES–Maize model for determining the optimum planting dates of early maturing maize varieties in Northern Nigeria. Front. Plant Sci. 8, 1118. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01118.
2. Agricultural Jihad Organization of Isfahan Province. 2021. Isfahan, Iran. (In Persian)
3. Ahmad, S., Hussain, S., Fatima, Z., Abbas, G., Ur Rehman, A., Khan, M.R., Younis, H., Naz, S., Muhammad, S., Ajmal, M., Abbas, N., Akhtar, M., Rauf, A., Khan, M., Ali, Z., Hassan, M., Rizwan, M., Bajwa, R., Ajmal, A., Hasanuzzaman, M., 2016. Application of DSSAT model for sowing date management of C4 summer cereals for fodder and grain crops under irrigated arid environment. Pak. J. Life Soc. Sci. 14(2), 104–114.
4. Ahmadee, M., Ghanbarpouri, M., Egdernezhad, A., 2021. Applied irrigation water of Wheat using sensitivity analysis and evaluation of AquaCrop. Water Manag. Agric. 8(1), 15–30. https://doi.org/20.1001.1.24764531.2021.8.1.2.0. (In Persian with English abstract)
5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
6. Bert, F.E., Laciana, C.E., Podestá, G.P., Satorre, E.H., Menéndez, A.N., 2007. Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation. Agric. Syst. 94(2), 141–150. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.08.003.
7. Fernández, J.E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V., Cuevas, M.V., 2020. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. Agric. Water Manag. 237, 106074. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106074.
8. Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupai, J., Bavani, A.M., Madani, K., 2013. Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can backfire. J. Hydrol. 491, 23–39. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.021.
9. Hammad, H.M., Abbas, F., Ahmad, A., Farhad, W., Anothai, J., Hoogenboom, G., 2018. Predicting water and nitrogen requirements for maize under semi-arid conditions using the CSM–CERES-Maize model. Eur. J. Agron. 100, 56–66. https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.008.
10. Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Batchelor, W.D., Bowen, W.T., Hunt, L.A., Pickering, N.B., Singh, U., Godwin, D.C., Baer, B., Boote, K.J., Ritchie, J.T., White, J.W., 1994. Crop models. In: Tsuji, G.Y., Uehara, G., Balas, S. (Eds.), DSSAT Version 3.5. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, pp. 95–244.
11. Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Shelia, V., Wilkens, P.W., Singh, U., White, J.W., Asseng, S., Lizaso, J.I., Moreno, L.P., Pavan, W., Ogoshi, R., Hunt, L.A., Tsuji, G.Y., Jones, J.W., 2019a. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: Boote, K.J. (Ed.), Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom, pp. 173–216. https://doi.org/10.19103/AS.2019.0061.10.
12. Hoogenboom, G., Porter, C.H., Shelia, V., Boote, K.J., Singh, U., White, J.W., Hunt, L.A., Ogoshi, R., Lizaso, J.I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L.P., Jones, J.W., 2019b. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7.5. DSSAT Foundation, Gainesville, Florida, USA.
13. Isfahan Agricultural and Natural Resources Research Center. 2018. Soil and Water Research Department. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran. (In Persian)
14. Jha, P.K., Ines, A.V., Singh, M.P., 2021. A multiple and ensembling approach for calibration and evaluation of genetic coefficients of CERES-Maize to simulate maize phenology and yield in Michigan. Environ. Model. Softw. 135, 104901. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104901.
15. Keller, J., Bliesner, R.D., 1990. Sprinkler and Trickle Irrigation. Springer US, New York, USA.
16. Maresma, A., Ballesta, A., Santiveri, F., Lloveras, J., 2019. Sowing date affects maize development and yield in irrigated Mediterranean environments. Agriculture 9(3), 67. https://doi.org/10.3390/agriculture9030067.
17. Ministry of Agriculture Jihad. 2024. Agricultural Statistics Yearbook 2022-2023, Volume 1: Field Crops, Information and Communication Technology Center, Tehran, Iran [Online]. Available: https://dpe.maj.ir/uploads/21/2024/Aug/27/AJ1-1401-1402.pdf. (In Persian)
18. Mohamadzade, F., 2022. Plan of Agricultural Water Management with an Emphasis on The Increasing Water Use Efficiency of Maize in Isfahan Province Based on Field Research and Using DSSAT. PhD Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian with English abstract)
19. Mohamadzade, F., Gheysari, M., Eshghizadeh, H., Tabatabaei, M.S., Hoogenboom, G., 2022. The effect of water and nitrogen on drip tape irrigated silage maize grown under arid conditions: Experimental and simulations. Agric. Water Manag. 271, 107821. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107821.
20. Mozaffari, S., 2015. Improving The Water Use Efficiency of Wheat and Corn Using DSSAT in Miandoab Watershed Basin. MSc Thesis, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian with English abstract)
21. Muchow, R.C., Sinclair, T.R., Bennett, J.M., 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. Agron. J. 82(2), 338–343. https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200020017x.

22. Norooz –Valashedi, R., Bararkhanpour Ahmadi, S., 2026. Projecting the impact of climate change on temperature extreme indices and phenological stages of key agricultural crops in Mazandaran province, Iran. J. Soil Plant Interact. 17(1), 95–117. https://doi.org/10.47176/jspi.17.1.21881. (In Persian with English abstract)
23. Noroozi, M., Chavoshi, E., Ghajar Sepanlou, M., 2023. Evaluation of several empirical salinity-yield models for sorghum plant response to irrigation water and soil salinity. J. Soil Plant Interact. 14(2), 1–20. https://doi.org/ 10.47176/jspi.14.2.08883. (In Persian with English abstract)
24. Prevey, J., Vellend, M., Ruger, N., Hollister, R.D., Bjorkman, A.D., Myers-Smith, I.H., Elmendorf, S.C., Clark, K., Cooper, E.J., Elberling, B., Fosaa, A.M., Henry, G.H.R., Hoye, T.T., Jonsdottir, I.S., Klanderud, K., Levesque, E., Mauritz, M., Molau, U., Natali, S.M., Oberbauer, S.F., Panchen, Z.A., Post, E., Rumpf, S.B., Schmidt, N.M., Schuur, E.A.G., Semenchuk, P.R., Troxler, T., Welker, J.M., Rixen, C., 2017. Greater temperature sensitivity of plant phenology at colder sites: Implications for convergence across northern latitudes. Glob. Change Biol. 23(7), 2660–2671. https://doi.org/10.1111/gcb.13619.
25. Regional Water Company of Isfahan Province. 2018. Isfahan, Iran. (In Persian)
26. Ritchie, J.T., 1998. Soil water balance and plant water stress. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 41–54.
27. Rugira, P., Ma, J., Zheng, L., Wu, C., Liu, E., 2021. Application of DSSAT CERES-Maize to identify the optimum irrigation management and sowing dates on improving maize yield in Northern China. Agronomy 11(4), 674. https://doi.org/10.3390/agronomy11040674.
28. Soltani, S., Saboohi, R., Yaghmaei, L., 2012. Rainfall and temperatures change within the last 50 years in Isfahan province, Iran. Theor. Appl. Climatol. 107(3-4), 529–539. https://doi.org/10.1007/s00704-011-0484-9.
29. Xiao, D., Zhang, Y., Bai, H., Tang, J., 2021. Trends and climate response in the phenology of crops in northeast China. Front. Earth Sci. 9, 811621. https://doi.org/10.3389/feart.2021.811621.
30. Yang, Y., Guo, X., Liu, G., Liu, W., Xue, J., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Hou, P., Li, S., 2021. Solar radiation effects on dry matter accumulations and transfer in maize. Front. Plant Sci. 12, 727134. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.727134.
31. Yang, Y., Xu, W., Hou, P., Liu, G., Liu, W., Wang, Y., Zhao, R., Ming, B., Xie, R., Wang, K., Li, S., 2019. Improving maize grain yield by matching maize growth and solar radiation. Sci. Rep. 9(1), 3635. https://doi.org/10.1038/s41598-019-40081-z.