

(OPEN ACCESS)

Evaluation of the capability of CERES-Maize model in estimating corn yield in different water and nitrogen levels

Maryam Kazemi Zadeh¹, Vahid Varshavian², Abdolrahim Hooshmand^{*3},
Abdali Naseri⁴, Mousa Meskarbasheh⁵, Mona Golabi⁶

1. Ph.D. Graduate in Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: maryamkazemizade@rocketmail.com
2. Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University of Hamedan, Hamedan, Iran. E-mail: v.varshavian@basu.ac.ir
3. Corresponding Author, Professor, Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: hooshmand_a@scu.ac.ir
4. Professor, Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: abdalinaseri@scu.ac.ir
5. Professor, Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: mmeskarbasheh@scu.ac.ir
6. Associate Prof., Dept. of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: mona_golabi@scu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 06.01.2025
Revised: 01.11.2026
Accepted: 02.01.2026

Keywords:
Biochar,
DSSAT,
Hydrochar,
Model Calibration,
Nitrogen Leaching

ABSTRACT

Background and Objectives: With population growth and limited expansion of agricultural land, it is necessary to find ways to increase agricultural productivity. Today, the need for a sustainable agricultural system that fully utilizes environmental resources while not causing environmental damage seems essential. In recent years, much attention has been paid to soil quality and to increasing crop production by using plant residues, organic, and green fertilizers as sources of soil organic matter and plant nutrients. Therefore, replacing or combining organic sources with chemical fertilizers to reduce the consumption of chemical inputs and achieve sustainable agriculture goals can be considered an appropriate solution. Since conducting field experiments is time-consuming and costly, plant simulation models are suitable options for evaluating different crop management strategies to optimize the use of available resources. The DSSAT model is a comprehensive tool for simulation and decision-making in agricultural crop management, which integrates climatic, soil, genetic, and management data to help researchers and managers assess and improve the efficiency and sustainability of agricultural production systems. In this study, in addition to evaluating the ability of the CERES-Maize model to simulate crop yield and growth and development stages, management of optimal water and nitrogen consumption, along with the use of biochar and hydrochar in corn cultivation, has been done; by estimating the amounts of nitrogen losses and absorption by the model, nitrogen leaching and the amount of effluent were also estimated.

Materials and Methods: To calibrate and evaluate the CERES-Maize model for simulating the production of SC-704 and SC-611 corn cultivars under two spring and summer cropping systems under the climatic conditions of Ahvaz, field experiments were conducted in a lysimeter using

a factorial randomized complete block design with three replications. To collect and create the database required for the model, field experiments were conducted, including measurements of dry matter weight at each stage, total biomass nitrogen, grain yield, effluent drainage rate, total drainage nitrogen, and leaf area. In this study, in addition to urea fertilizer, the effect of biochar and hydrochar derived from sugarcane bagasse on growth and development, grain yield, effluent drainage rate, and nitrogen leaching was also investigated. To quantify the plant reaction and calculate the efficiency of water and fertilizer consumption, two levels of irrigation, full (I_1) and deficit up to 30% (I_2), were considered as the first factor, and two levels of nitrogen, 200 (N_1) and 160 (N_2) kg ha⁻¹, were considered as the second factor. The indices of normalized root mean square error (NRMSE), Wilmot's agreement index (d), coefficient of determination (R^2), and mean absolute error (MAE) were used to evaluate the model's effectiveness in simulating the desired data and to compare it with the measured data.

Results: Based on the results of control treatments (optimal conditions and no stress) with the application of all three nitrogen sources (urea, biochar, and hydrochar), genetic coefficients were determined for both SC-611 and SC-704 cultivars in the Ahvaz region. The results of the model calibration for each of these sources showed that the model can simulate the growth and development characteristics of corn cultivars under the climatic conditions of Ahvaz with minimal differences, indicating the high accuracy of the calculated genetic coefficients. The simulation steps for other experimental treatments (except those used in the calibration phase) were repeated for all three nitrogen sources across both cropping seasons and compared with field-experiment observations to validate the model. Information on grain yield, maximum leaf area index, total biomass weight, total biomass nitrogen, total drainage water, and total drainage nitrogen extracted from other experimental treatments was used to assess the model's validity. The model validation results showed that the model has a high ability to predict dry matter weight, biomass nitrogen, grain yield, and maximum leaf area index. Although the model accurately simulated trends in effluent drainage across different water and nitrogen treatments, it performed poorly at predicting effluent drainage. Both in field and simulated conditions, the use of biochar and hydrochar instead of urea fertilizer increased grain yield, but leaf area index, total dry weight, and effluent drainage decreased. The results of fitting the linear regression between the observed and simulated data and comparing it with the 1:1 line also showed that by using different sources of nitrogen in both cropping seasons, the model can predict more than 90% of the changes in grain yield, nitrogen leaching, and the maximum observed leaf area index. Under optimal conditions and in the absence of stress, combining biochar and hydrochar with urea fertilizer (I_1B_1 and I_1H_1) significantly reduced runoff for spring and summer crops. This decrease, compared with the application of urea alone (I_1N_1), was 15.7 and 13.1 percent in spring cultivation and 17.4 and 14.4 percent in summer cultivation, respectively. In spring and summer cultivation using all three sources of urea, biochar, and hydrochar, the MAE for nitrogen leaching is between 0.53-1.73 and 0.31-2.43, respectively. The amount of nitrogen leaching is a function of drainage, and only the movement of nitrate and urea is considered in the model's simulation of nitrogen leaching from the soil layers. In general, across the experimental treatments in both cropping seasons, the model simulates nitrogen leaching slightly higher than the measured values.

Conclusion: The CERES-Maize model accurately predicted the growth and development characteristics of maize cultivars grown in the Ahvaz region, with minimal error. However, the results indicated that the model's accuracy in estimating drainage during both spring and summer cropping seasons was limited, highlighting the need for calibration or adjustment of parameters related to water and soil management. Despite this limitation, CERES-Maize can serve as an effective and reliable tool to support managerial decision-making and agricultural planning under the climatic conditions of Ahvaz. Using this model can significantly reduce the time and costs of field studies, enabling farmers and planners to develop optimal cultivation, irrigation, and soil management strategies through model simulations. Therefore, although improvements in drainage estimation are needed, the model holds substantial potential to enhance the efficiency and effectiveness of regional agricultural planning.

Cite this article: Kazemi Zadeh, Maryam, Varshavian, Vahid, Hooshmand, Abdolrahim, Naseri, Abdali, Meskarbashee, Mousa, Golabi, Mona. 2026. Evaluation of the capability of CERES-Maize model in estimating corn yield in different water and nitrogen levels. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (2), 115-139.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23723.3809

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

ارزیابی قابلیت مدل CERES-Maize در برآورد عملکرد ذرت در سطوح مختلف آب و نیتروژن

مریم کاظمی‌زاده^۱، وحید ورشایان^۲، عبدالرحیم هوشمند^{۳*}، عبدعلی ناصری^۴،
موسی مسکرباشی^۵، منا گلابی^۶

۱. دانش‌آموخته دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: maryamkazemizade@rocketmail.com
۲. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان، همدان، ایران. رایانامه: v.varshavian@basu.ac.ir
۳. نویسنده مسئول، استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: hooshmand_a@scu.ac.ir
۴. استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: abdalinaseri@scu.ac.ir
۵. استاد گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: mmeskarbashee@scu.ac.ir
۶. دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
رایانامه: mona_golabi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: با افزایش جمعیت و محدودیت گسترش اراضی کشاورزی یافتن راهکارهایی برای افزایش بهره‌وری کشاورزی ضروری است. امروزه، نیاز به سامانه‌ای پایدار برای کشاورزی که در آن از منابع زیست‌محیطی به‌طور کامل استفاده شود و در عین حال هیچ آسیبی به محیط‌زیست وارد نشود، بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر، به بهبود کیفیت خاک و افزایش تولید گیاهان زراعی با استفاده از بقایای گیاهی، کودهای آلی و کودهای سبز، به‌عنوان منابع تأمین‌کننده مواد آلی خاک و عناصر غذایی گیاهان، توجه بسیاری شده است. در نتیجه، جایگزینی یا تلفیق منابع آلی مناسب با کودهای شیمیایی به‌منظور کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و تحقق اهداف کشاورزی پایدار می‌تواند به‌عنوان راهکاری مناسب مطرح باشد. علاوه بر این، انجام آزمایش‌های مزرع‌ای زمان‌بر و پرهزینه است؛ از این‌رو مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی برای ارزیابی راهبردهای مختلف مدیریت زراعی در راستای بهینه‌سازی استفاده از منابع موجود، گزینه‌های مناسبی محسوب می‌شوند. مدل DSSAT ابزاری جامع برای شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری در مدیریت محصولات کشاورزی است که با تلفیق داده‌های اقلیمی، خاکی، ژنتیکی و مدیریتی به پژوهش‌گران و مدیران کمک می‌کند تا اثربخشی و پایداری سیستم‌های تولید کشاورزی
تاریخ دریافت: ۱۱/۰۳/۰۴ تاریخ ویرایش: ۲۱/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۲/۱۱/۰۴	
واژه‌های کلیدی: آبشویی نیتروژن، بیوجار، هیدروچار، واستنجی مدل، DSSAT	

را ارزیابی و بهبود دهند. در پژوهش حاضر، علاوه بر ارزیابی توانایی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد محصول و مراحل رشد و نمو، مدیریت مصرف بهینه آب و نیتروژن در کنار کاربرد بیوپچار و هیدروچار در کشت ذرت بررسی شد و با تخمین میزان تلفات و جذب نیتروژن توسط مدل، آبشویی نیتروژن و مقدار زه‌آب خروجی نیز برآورد گردید.

مواد و روش‌ها: به‌منظور واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی تولید ارقام ذرت سینگل‌کراس ۶۱۱ و سینگل‌کراس ۷۰۴ تحت دو نظام کشت بهاره و تابستانه در شرایط اقلیمی اهواز، آزمایش‌های صحرایی با استفاده از لایسمتر به‌صورت طرح آزمایشی فاکتوریل و در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. برای جمع‌آوری و ایجاد پایگاه داده‌های موردنیاز مدل، آزمایش‌های مزرعه‌ای شامل اندازه‌گیری وزن ماده خشک در هر مرحله، نیتروژن کل زیست‌توده، عملکرد دانه، میزان زه‌آب خروجی، نیتروژن کل زه‌آب و سطح برگ انجام شد. در این پژوهش، علاوه بر کود اوره تأثیر بیوپچار و هیدروچار حاصل از باگاس نیشکر نیز بر رشد و نمو، عملکرد دانه، میزان زه‌آب خروجی و آبشویی نیتروژن بررسی شد. جهت کمی‌سازی واکنش گیاه و محاسبه کارایی مصرف آب و کود، دو سطح آبیاری کامل (I_1) و کم‌آبیاری به‌اندازه ۳۰ درصد (I_2) به‌عنوان عامل اول و دو سطح نیتروژن ۲۰۰ (N_1) و ۱۶۰ (N_2) کیلوگرم در هکتار به‌عنوان عامل دوم در نظر گرفته شد. از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا نرمال‌شده (NRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d)، ضریب تبیین (R^2) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های موردنظر و مقایسه آن‌ها با داده‌های اندازه‌گیری‌شده استفاده شد.

یافته‌ها: بر اساس نتایج حاصل از تیمارهای شاهد (شرایط بهینه و بدون اعمال تنش) با کاربرد هر سه منبع نیتروژن (اوره، بیوپچار و هیدروچار)، ضرایب ژنتیکی برای هر دو رقم سینگل‌کراس ۶۱۱ و سینگل‌کراس ۷۰۴ در منطقه اهواز مشخص شد. نتایج واسنجی مدل برای کاربرد هریک از این منابع نشان داد که مدل توانست با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام ذرت در شرایط اقلیمی اهواز شبیه‌سازی کند که بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه‌شده بود. مراحل شبیه‌سازی برای سایر تیمارهای آزمایش (به‌جز تیمارهای استفاده‌شده در مرحله واسنجی) برای هر سه منبع نیتروژن در هر دو فصل کشت مجدداً انجام و با نتایج مشاهدات حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌منظور اعتبارسنجی مدل مقایسه شد. از اطلاعات عملکرد دانه، حداکثر شاخص سطح برگ، وزن کل زیست‌توده، نیتروژن کل زیست‌توده، زه‌آب خروجی و نیتروژن کل زه‌آب که از سایر تیمارهای آزمایش استخراج شده بود برای تعیین اعتبار مدل استفاده شد. نتایج اعتبارسنجی مدل نشان داد که مدل از توانایی بالایی برای پیش‌بینی وزن ماده خشک، نیتروژن زیست‌توده، عملکرد دانه و همچنین حداکثر شاخص سطح برگ برخوردار است. گرچه مدل روند تغییرات زه‌آب خروجی را در تیمارهای مختلف آب و نیتروژن به‌درستی شبیه‌سازی کرد، اما مدل در پیش‌بینی زه‌آب خروجی عملکرد ضعیفی داشت. هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی، با کاربرد بیوپچار و هیدروچار به‌جای کود اوره عملکرد دانه افزایش، اما شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و زه‌آب خروجی کاهش یافت. نتایج برازش

رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ نیز نشان داد که با کاربرد منابع مختلف نیتروژن در هر دو فصل کشت، مدل می‌تواند تا بیش از ۹۰ درصد از تغییرات عملکرد دانه، آبتیوی نیتروژن و حداکثر شاخص سطح برگ مشاهده‌شده را پیش‌بینی کند. در شرایط مطلوب و بدون تنش با ترکیب بیوچار و هیدروچار با کود اوره (I_1B_1) و I_1H_1 ، زه‌آب خروجی در کشت بهاره و تابستانه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. این کاهش در مقایسه با کاربرد اوره به‌تنهایی (I_1N_1)، در کشت بهاره به ترتیب ۱۵/۷ و ۱۳/۱ درصد و در کشت تابستانه به ترتیب ۱۷/۴ و ۱۴/۴ درصد بود. در کشت بهاره و تابستانه با کاربرد هر سه منبع اوره، بیوچار و هیدروچار، MAE برای آبتیوی نیتروژن به ترتیب بین $0.1-0.53/73 \text{ kg N ha}^{-1}$ و $0.31-2/43$ است. میزان آبتیوی نیتروژن تابعی از میزان زه‌آب خروجی است و فقط حرکت نترات و اوره در شبیه‌سازی آبتیوی نیتروژن از لایه‌های خاک توسط مدل در نظر گرفته می‌شود. به‌طور کلی در تیمارهای آزمایش در هر دو فصل کشت، مدل مقادیر آبتیوی نیتروژن را اندکی بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده، شبیه‌سازی می‌کند.

نتیجه‌گیری: مدل CERES-Maize توانست ویژگی‌های رشد و نمو ارقام ذرت کشت‌شده در منطقه اهواز را با دقت نسبتاً بالا و با حداقل خطا پیش‌بینی کند. با این حال، نتایج نشان داد که دقت مدل در تخمین میزان زه‌آب خروجی در هر دو فصل کشت بهاره و تابستانه محدود است و نیازمند بازبینی یا اصلاح پارامترهای مرتبط با مدیریت آب و خاک است. با وجود این محدودیت، مدل CERES-Maize می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر و قابل‌اعتماد برای حمایت از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی زراعی در شرایط اقلیمی اهواز مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این مدل می‌تواند زمان و هزینه‌های مرتبط با مطالعات میدانی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد و به کشاورزان و برنامه‌ریزان زراعی امکان دهد تا با تکیه بر شبیه‌سازی‌های مدل، استراتژی‌های بهینه کشت، آبیاری و مدیریت خاک را تدوین کنند؛ بنابراین، با وجود نیاز به بهبود دقت در برآورد زه‌آب، این مدل پتانسیل بالایی برای افزایش کارایی و اثربخشی برنامه‌ریزی زراعی در شرایط منطقه‌ای دارد.

استناد: کاظمی‌زاده، مریم، ورشاپیان، وحید، هوشمند، عبدالرحیم، ناصری، عبدعلی، مسکرباشی، موسی، گلابی، منا (۱۴۰۵). ارزیابی قابلیت مدل CERES-Maize در برآورد عملکرد ذرت در سطوح مختلف آب و نیتروژن. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۳ (۲)، ۱۱۵-۱۳۹.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23723.3809



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

با افزایش جمعیت و محدودیت گسترش اراضی کشاورزی، باید به دنبال راهکارهایی برای افزایش بهره‌وری کشاورزی بود. کشاورزان برای بالا بردن میزان تولید، معمولاً از کودهای شیمیایی زیاد استفاده می‌کنند تا رشد سریع و عملکرد بالای گیاهان زراعی را تأمین کنند. نیتروژن نقش مهمی در تولید محصولات کشاورزی ایفا می‌کند و از عوامل اصلی دستیابی به حداکثر محصول است که مدیریت صحیح استفاده از آن، علاوه بر کاهش هزینه، باعث افزایش کارایی مصرف آن نیز می‌شود (۱). استفاده از آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین بهترین شیوه مدیریت و کاربرد نیتروژن، نه تنها زمان‌بر و پرهزینه است، بلکه با محدودیت‌هایی مانند تعداد محدود سناریوها، مدت کوتاه آزمایش و محدود شدن اعتبار آزمایش‌ها با شرایط فیزیکی روبرو است. بنابراین، مدل‌های شبیه‌سازی می‌توانند به عنوان ابزاری تکمیلی برای غلبه بر این محدودیت‌ها به کار گرفته شوند (۲). یکی از پرکاربردترین مدل‌های گیاهی، مدل یا در واقع بسته نرم‌افزاری DSSAT^۱ است که به منظور سهولت در کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان، بیش از ۳۰ گیاه زراعی مختلف در یک بسته نرم‌افزاری جمع‌آوری شده است. علاوه بر مدل‌های گیاهی، مدل‌های شبیه‌سازی چرخه کربن و نیتروژن در خاک، مدل موازنه آب-خاک و تعداد زیادی از انتخاب‌های مدیریت گیاه و مزرعه برای شبیه‌سازی رشد و تولید محصول و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها در بسته نرم‌افزاری DSSAT ارائه شده است (۳). یکی از مدل‌های گیاهی این بسته نرم‌افزاری، مدل CERES-Maize است که برای انتخاب بهترین شیوه مدیریتی در تصمیم‌گیری‌های زراعی، بررسی ارقام مختلف و همچنین بررسی اثرات

عوامل محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات متعددی با استفاده از این مدل انجام شده است که نشان‌دهنده دقت بالای آن در شبیه‌سازی واکنش گیاه به تغییرات آب و نیتروژن است. با استفاده از این مدل، عملکرد دانه، تبخیر-تعرق و بهره‌وری مصرف آب سه وارسته ذرت با سه تراکم کشت و تحت کاربرد سطوح مختلف آبیاری توسط هائو و همکاران (۲۰۱۹) بررسی شد (۴). همچنین نیسی و همکاران (۲۰۲۲) و کرمی و همکاران (۲۰۲۵) به شبیه‌سازی اثر آب و کود نیتروژن بر تولید ذرت در استان‌های کرمانشاه و خوزستان توسط مدل CERES-Maize پرداختند و نتایج آن‌ها حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی واکنش ارقام مختلف ذرت نسبت به تغییرات آب و نیتروژن بود (۵ و ۶). البته نتایج مشابهی نیز برای ذرت در منطقه کرج و ارقام مختلف گندم در مشهد ارائه شده است (۷ و ۸). در تحقیق دیگری، مالیک و همکاران (۲۰۱۹) به شبیه‌سازی عملکرد ذرت تحت تأثیر سطوح مختلف نیتروژن با استفاده از مدل CERES-Maize پرداختند (۹). نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که با کاهش میزان نیتروژن مصرفی، آبشویی نیتروژن به طور قابل ملاحظه‌ای از ۳۳ تا ۵۳ درصد، بسته به نوع خاک کاهش می‌یابد. مدل‌های گیاهی DSSAT همچنین برای مطالعه سازگاری گیاهان زراعی و ارائه راهکارهای مناسب با تغییر اقلیم مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۰).

با این حال، دستیابی به افزایش پایدار در بهره‌وری کشاورزی تنها از طریق بهبود مدل‌سازی و مدیریت نیتروژن ممکن نیست، بلکه نیازمند تغییر در شیوه‌های تغذیه گیاه و استفاده از منابع مغذی پایدارتر نیز است. امروزه نیاز به سیستم کشاورزی پایداری که در آن از منابع زیست‌محیطی به طور کامل استفاده شود و به طور هم‌زمان هیچ آسیبی به محیط زیست وارد نسازد، بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر به جنبه‌های

1- Decision Support System for Agrotechnology Transfer

پایدار همسو شده و الگوهای مصرف جهانی را شکل می‌دهند. با این حال، تشویق به پذیرش گسترده این توصیه‌ها همچنان به صورت یک چالش اساسی مطرح است. بررسی تاریخی استراتژی‌های بهینه‌سازی میزان کود نیتروژن، روند روشنی را به سمت تأکید بیش‌تر بر حفاظت از محیط‌زیست و نوآوری‌های تکنولوژیکی نشان می‌دهد (۱۹). این استراتژی‌ها را می‌توان به طور کلی بر اساس داده‌های ورودی و روش‌های کمی‌سازی میزان نیتروژن، به سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: تکنیک‌های مبتنی بر آزمایش خاک/گیاه، تکنیک‌های مبتنی بر مدل‌سازی و ترکیب این دو روش. روش‌های مبتنی بر آزمایش بر ارزیابی‌های فصلی و در زمان واقعی شرایط محصول و خاک تکیه دارند، در حالی که رویکردهای مبتنی بر مدل‌سازی از داده‌های عملکرد مکانی و زمانی، به دنبال الگوی کاهش بازده استفاده می‌کنند؛ اما ترکیب این دو روش، از نقاط قوت هر یک بهره می‌برد و سازگاری و دقت بهینه‌سازی میزان کود نیتروژن را افزایش می‌دهد. برای پیشبرد و دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار، باید تلاش‌های آینده بر اصلاح مدل‌ها به منظور افزایش دقت، گسترش و بهبود کیفیت داده‌های ورودی و در نهایت بر افزایش اجرای توصیه‌های مصرف کود نیتروژن و ادغام مؤثرتر این توصیه‌ها در سیستم‌های کشاورزی عملی متمرکز شوند.

با توجه به اهمیت موضوع و وجود روابط متقابل بین آب و نیتروژن، هدف این پژوهش تعیین و واسنجی ضرایب ژنتیکی مدل CERES-Maize و ارزیابی آن در شبیه‌سازی رشد و نمو، عملکرد دانه و هم‌چنین آبشویی نیتروژن است. این ارزیابی برای دو واریته سینگل کراس ۶۱۱ و سینگل کراس ۷۰۴ تحت دو نظام کشت بهاره (بهاره‌کاری) و تابستانه در شرایط اقلیمی اهواز انجام شد. هم‌چنین سطوح مختلف نیتروژن و آب آبیاری به کار گرفته شد تا مدیریت آب

کیفی خاک و افزایش تولید گیاهان زراعی با استفاده از بقایای گیاهی، کودهای سبز و آلی دیگر به عنوان منابع تأمین‌کننده مواد آلی خاک و عناصر غذایی گیاهان توجه بسیاری شده است (۱۱). پس باید به دنبال سیستم‌های تلفیقی و یا جایگزینی منابع آلی با کودهای شیمیایی به منظور کاهش مصرف نهاده‌های شیمیایی و تحقق اهداف کشاورزی پایدار بود. از جمله این منابع آلی می‌توان بیوپچار و هیدروچار را نام برد. بیوپچار حاصل فرآیند گرماکافت ترکیبات زائد آلی مانند بقایای گیاهان زراعی و جنگلی و فضولات دامی در شرایط بدون اکسیژن یا اکسیژن محدود و دمای بالا است (۱۲). حرارت دادن این ترکیبات در یک محیط سر بسته تحت فشار و در حضور آب و در دمایی بین ۱۸۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس منجر به تولید زغال هیدروچار می‌شود (۱۳). بیوپچار نه تنها سبب بهبود ویژگی‌های خاک می‌شود؛ بلکه به دلیل دارا بودن ساختار متخلخل، سطح ویژه زیاد و بارهای منفی سطحی، شرایط بهینه برای رشد گیاه را نیز فراهم می‌سازد (۱۴). افزودن بیوپچار و هیدروچار در خاک با بافت سبک سبب تغییرات مثبت در برخی خصوصیات فیزیکی خاک از جمله وزن مخصوص ظاهری، تخلخل کل و درصد رطوبت خاک در مکش‌های مختلف می‌شود و هیدروچار در ایجاد این تغییرات توان بیش‌تری نسبت به بیوپچار دارد (۱۵). استفاده مناسب از بیوپچار و هیدروچار می‌تواند کربن آلی، مواد مغذی و باروری خاک و هم‌چنین عملکرد محصول را بهبود بخشد و به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند (۱۶ و ۱۷). بیوپچار و هیدروچار به دلیل دارا بودن ظرفیت جذب بالا، شستشوی مواد مغذی مانند نترات و فلزات سنگین را از خاک کاهش می‌دهند (۱۸). اخیراً تکنیک‌های توصیه جهانی مصرف کود نیتروژن به طور قابل توجهی تکامل یافته و به طور فزاینده‌ای با اهداف زیست‌محیطی و کشاورزی

و نیتروژن و همچنین توسعه سیستم‌های مناسب برای جایگزینی و یا تلفیق منابع آلی (بیوچار و هیدروچار حاصل از باگاس نیشکر) با کودهای شیمیایی در تولید ذرت به عنوان یک محصول استراتژیک در این منطقه توسعه یابد. در پژوهش حاضر، علاوه بر ارزیابی توانایی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد محصول و مراحل رشد ذرت، مدیریت بهینه آب و نیتروژن همراه با کاربرد بیوچار و هیدروچار بررسی و مقادیر آبشویی نیتروژن و زه‌آب خروجی نیز برآورد شده است.

مواد و روش‌ها

موقعیت محل آزمایش در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی قرار گرفته و ارتفاع آن از سطح دریای آزاد ۲۲/۵ متر است. ویژگی‌های خاک مورد استفاده در لایسیمترها در جدول ۱ آورده شده است، که در آن وزن مخصوص ظاهری ذرات به روش استوانه، بافت خاک به روش هیدرومتری (۲۲)، کربن

آلی به روش والکی بلک (۲۰)، نیتروژن کل به روش کجلدال (۲۱)، pH و EC هم در عصاره ۱۰ گرم خاک به ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر (۲۰) اندازه‌گیری شد. ارقام مورد استفاده، ذرت هیبرید ۶۱۱ و ۷۰۴ سینگل کراس بود که به ترتیب در دو فصل زراعی بهار (۱۰ اسفند ۹۶) و تابستانه (۱۵ مرداد ۹۷) کشت شد. مقادیر بارندگی در طول فصل کشت بهار و تابستانه به ترتیب برابر ۵۰ و ۲۱۵ میلی‌متر بود. برای کشت بهار رقم میان‌رس، سینگل کراس ۶۱۱ (SC-611) و برای کشت تابستانه رقم دیررس، سینگل کراس ۷۰۴ (SC-704) استفاده شد. دوره کشت ذرت بهار ۹۳ روز (از ۱۰ اسفند ۹۶ تا ۱۱ خرداد ۹۷) و دوره کشت ذرت تابستانه ۱۳۴ روز (از ۱۵ مرداد تا ۲۶ آذر ۹۷) ادامه داشت. روش کاشت به صورت دستی و در داخل لایسیمتر انجام شد. در هر دو فصل کشت، میزان کاشت بذر بر اساس تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار انجام گرفت (در هر لایسیمتر تقریباً ۴ بوته در عمق ۴ سانتی‌متری کاشته شد).

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده.

Table 1. Physical and chemical properties of the soil used.

نقطه پژمردگی PWP(%)	ظرفیت زراعی FC(%)	چگالی ظاهری Bulk Density (g cm ⁻³)	بافت خاک Soil Texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	نیتروژن کل Total N (%)	کربن آلی Organic Carbon (%)	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	pH
18	34	1.39	Silty- Loam	26.2	52.8	21	0.11	0.39	3.61	7.65

در گذشته قمری و همکاران (۲۰۱۱) به منظور شبیه‌سازی اثرات تنش خشکی و نیتروژن بر عملکرد و کارایی مصرف آب و نیتروژن در کشت ذرت از مدل CERES-Maize استفاده کردند (۲۲). نتایج آن‌ها حاکی از کارکرد خوب این مدل در شرایط اقلیمی و خاک اهواز بود و در نهایت توصیه کردند که

آبیاری کشت ذرت بعد از تخلیه ۴۰ درصد ظرفیت زراعی انجام گردد و مقدار کوددهی نیز به صورت ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار باشد. در پژوهش حاضر از نتایج این تحقیق برای تعریف تیمارهای آزمایش استفاده شد.

نوع و ترکیب تیمارهای آزمایش

تیمار شاهد: با استناد به نتایج تحقیق قمری و همکاران (۲۰۱۱)، در تیمار شاهد، آبیاری ذرت بعد از تخلیه ۴۰ درصد ظرفیت زراعی انجام شد و همچنین مقدار کوددهی نیز به صورت ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بود (۲۲).

با استفاده از مدل CERES-Maize دو سناریو دیگر به این طریق تعریف شد؛ در سناریوی اول کم آبیاری اعمال شد؛ ولی مقدار نیتروژن همان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار بود؛ اما در سناریوی دوم از مقدار آب آبیاری که از سناریوی اول به دست آمد، استفاده و میزان نیتروژن مصرفی نیز کاهش داده شد (چون میزان آبهویی نیتروژن به علت کاهش میزان آب آبیاری کاهش می‌یابد و همچنین از نیتروژن معدنی شده حاصل از مواد آلی نیز که توسط مدل شبیه‌سازی می‌شود، گیاه می‌تواند نهایت استفاده را بکند).

سناریو اول: مقدار آب آبیاری کاهش یافت و برابر $1 \text{ SMD } 0.7$ ولی مقدار نیتروژن مصرفی ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار بود.

سناریو دوم: از رژیم آبیاری به دست آمده از سناریوی اول یعنی $1 \text{ SMD } 0.7$ استفاده کرده و مقدار نیتروژن

مصرفی نیز کاهش یافت و مقدار آن با استفاده از مدل برابر ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد.

در کاربرد بیوچار و هیدروچار نیز تیمارهای آزمایش به همین شیوه مشخص شد، با این تفاوت که با داشتن درصد نیتروژن هر یک از این دو نوع ماده آلی (جدول ۲) و معادل‌سازی آن‌ها برحسب کود نیتروژن مصرفی، مقادیر کاربردی آن‌ها به منظور جایگزینی با یک‌دوم از نیتروژن در تیمارهای کود اوره، با در نظر گرفتن چگالی ظاهری خاک (g cm^{-3}) (۱/۳۹) برای عمق ۱۰-۰ سانتی‌متر برای هر لایسمتر به قطر ۰/۸ متر محاسبه شد؛ بنابراین برای تیمارهای شامل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن با کاربرد ۲۱۷ کیلوگرم اوره (۴۶٪ نیتروژن) تأمین و ۱۰۰ کیلوگرم دیگر نیز به ترتیب با کاربرد ۱/۳ و ۱/۴۵ گرم بیوچار یا هیدروچار در هر ۱۰۰ گرم خاک تأمین شد. همچنین برای تیمارهای شامل ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، ۸۰ کیلوگرم نیتروژن با کاربرد ۱۷۴ کیلوگرم اوره تأمین و ۸۰ کیلوگرم دیگر نیز به ترتیب با کاربرد ۱/۰۵ و ۱/۱۵ گرم بیوچار یا هیدروچار در هر ۱۰۰ گرم خاک تأمین شد.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بیوچار و هیدروچار.

Table 2. Physical and chemical properties of Biochar and Hydrochar.

هیدروچار Hydrochar	بیوچار Biochar	خصوصیات Characteristics
54.29	64.41	کربن C (%)
0.49	0.55	نیتروژن N (%)
4.31	4.76	هیدروژن H (%)
4.72	4.81	pH
3.57	3.85	هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})
34.89	40.64	سطح ویژه SS ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)

با توجه به این که ذرت دارای ریشه افشان بوده و تقریباً ۸۵ درصد ریشه آن در لایه سطحی خاک قرار دارد و از طرفی استفاده بیش از حد بیوپچار و هیدروچار به علت تأثیر منفی بر ساختار خاک منجر به عدم تعادل بین فازهای مایع و گازی موجود در خاک می شود (۲۳)، به همین منظور عمق ۱۰-۰ سانتی متر برای ترکیب کردن بیوپچار و هیدروچار با خاک در نظر گرفته شد. دو سطح آبیاری کامل (I_1) و کم آبیاری به اندازه ۳۰ درصد (I_2) به عنوان عامل آبیاری، دو سطح ۲۰۰ (N_1) و ۱۶۰ (N_2) کیلوگرم نیتروژن در هکتار به عنوان عامل کود نیتروژن و سه سطح از منابع

شامل اوره، بیوپچار و هیدروچار هم به عنوان عامل منبع تأمین نیتروژن برای گیاه در نظر گرفته شد. آزمایش ها به صورت تیمارهای صحرایی و در لایسیمترهایی به ارتفاع ۱/۲ و قطر ۰/۸ متر در مزرعه تحقیقاتی شماره (۲) دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. با این تفاسیر در مجموع ۳۶ تیمار در نظر گرفته شد. نوع و ترکیب تیمارهای آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- ترکیب تیمارهای طرح آماری.

Table 3. Combination of statistical design treatments.

مقادیر مصرفی اوره، بیوپچار و هیدروچار Consumption amounts of urea, biochar and hydrochar (kg N ha ⁻¹)						مقادیر آبیاری (تأمین نیاز آبی گیاه) Irrigation amounts (providing the plant's water needs)
$N_1=200$	$N_2=160$	$B_1=200$	$B_2=160$	$H_1=200$	$H_2=160$	
I_1N_1	I_1N_2	I_1B_1	I_1B_2	I_1H_1	I_1H_2	$I_1=100\%$
I_2N_1	I_2N_2	I_2B_1	I_2B_2	I_2H_1	I_2H_2	$I_2=70\%$

N , B و H به ترتیب تیمارهای شامل ۱۰۰ درصد کود اوره، جایگزینی ۵۰ درصد کود اوره با بیوپچار و جایگزینی ۵۰ درصد کود اوره با هیدروچار، I : تیمار درصد تأمین آب آبیاری، ۱ و ۲: سطوح مختلف تیمارهای کود مصرفی و آب آبیاری می باشند

تا زمان استقرار کامل گیاه، تمام تیمارها یکسان آبیاری ($SMD=$) و پس از آن تیمارهای کم آبیاری نیز تا پایان فصل رشد ذرت اعمال شدند. میزان آب مورد نیاز برای تأمین نیاز آبی گیاه (I_1) با هدف جایگزین کردن رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه تا ظرفیت زراعی (بعد از تخلیه ۴۰ درصد ظرفیت زراعی) محاسبه و ۷۰ درصد آن مقدار، به تیمار کم آبیاری (I_2) به روش سطحی داده شد. حجم آب مصرفی مورد نیاز برای تیمار شاهد (آبیاری کامل) با فرض راندمان آبیاری ۱۰۰٪ از رابطه ۱ محاسبه شد:

$$V = (F_c - \theta_i) \times D_{root} \times A \quad (1)$$

که V حجم آب آبیاری برای تیمار شاهد برحسب مترمکعب، F_c رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی، θ_i رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری، D_{root} عمق توسعه ریشه برحسب متر (متوسط ۸۰ سانتی متر در نظر گرفته شد) و A سطح مقطع لایسیمتر برحسب مترمربع است؛ اما زمان آبیاری بعد از تخلیه ۴۰ درصدی ظرفیت زراعی در تیمار شاهد بود و همه تیمارها هم زمان با هم آبیاری می شدند. با استفاده از رابطه ۲ و با توجه به تفاضل آب ورودی و خروجی به لایسیمتر شاهد، برنامه ریزی آبیاری انجام می شد.

$$\Delta S = (I + P) - D - ET_C \quad (2)$$

که در این رابطه ET_c تبخیر-تعرق گیاه ذرت، I عمق آب آبیاری، P ارتفاع بارندگی، D ارتفاع زه‌آب و ΔS اختلاف رطوبت حجمی در شروع و انتهای دوره موردنظر برحسب میلی‌متر است. با نصب تشت تبخیر کلاس A در فاصله ۱۰ متری تیمار شاهد، مقدار تبخیر-تعرق گیاه ذرت مشخص شد. با استفاده از آمار روزانه ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اهواز (سرعت باد و رطوبت نسبی) ضریب تشت به‌صورت روزانه با استفاده از روش آلن و پروت تعیین شد (۲۴). عمق آب زهکشی نیز با نصب ظروف مدرجی در محل خروجی لوله‌های زهکش قبل از هر آبیاری و با اندازه‌گیری حجمی زه‌آب و تقسیم آن بر مساحت لایسمترها محاسبه شد. متناسب با روش متداول منطقه مقدار ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب کود سولفات پتاسیم و سوپرفسفات تریپل در هنگام آماده‌سازی بستر کشت به خاک اضافه و تا عمق ۱۰ سانتی‌متری مخلوط شد. نیتروژن مورد نیاز نیز از سه منبع کود اوره، بیوجار و هیدروچار تأمین، که بیوجار و هیدروچار هم‌زمان با سولفات پتاسیم و سوپرفسفات تریپل به خاک اضافه شدند. اما کود اوره طی سه مرحله در زمان کاشت، مرحله شش‌برگی گیاه و قبل از ظهور گل‌آذین به‌صورت تقسیطی مورد استفاده قرار گرفت.

جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل:
اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل شامل داده‌های خاک (درصد رس، سیلت و شن خاک، شوری و اسیدیته خاک، وزن مخصوص ظاهری، ماده آلی خاک، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی در لایه‌های مختلف خاک)، داده‌های هواشناسی (بیشینه و کمینه دمای هوا، تعداد ساعات آفتابی و بارش) و اطلاعات مدیریت زراعی (تاریخ کاشت و برداشت، عمق و تراکم کاشت، زمان و مقدار کود مصرفی، عمق، زمان و نوع آبیاری، نوع واریته کشت‌شده، شرایط اولیه خاک و

تیمارهای شبیه‌سازی‌شده) است. با کاربرد سه منبع اوره، بیوجار و هیدروچار، به‌صورت جداگانه ضرایب ژنتیکی برای هر دو واریته مورد استفاده برای کشت بهاره و تابستانه استخراج شد. به‌منظور جمع‌آوری و ایجاد پایگاه داده‌های مورد نیاز مدل، آزمایش‌های مزرعه‌ای شامل اندازه‌گیری وزن ماده خشک در هر مرحله، نیتروژن کل زیست‌توده، عملکرد دانه، تعداد دانه، میزان زه‌آب خروجی، نیتروژن کل زه‌آب، دمای خاک در لایه‌های مختلف و سطح برگ انجام شد. نمونه‌برداری‌ها جهت اندازه‌گیری وزن خشک گیاه، نیتروژن زیست‌توده و شاخص سطح برگ از دو هفته پس از سبز شدن تا مرحله رسیدگی کامل انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک ابتدا نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و سپس توسط ترازو وزن آن‌ها تعیین شد. برای اندازه‌گیری عملکرد دانه و تعداد دانه هم‌زمان با تشکیل لایه سیاه در قاعده دانه‌ها، برداشت به‌صورت دستی در ۲۷ خرداد و ۲۶ آذر ۹۷ به‌ترتیب برای کشت بهاره و تابستانه صورت گرفت. سطح برگ با استفاده از رابطه $LA = L \times W \times 0.75$ محاسبه شد (۲۵) که LA ، L و W در این رابطه به‌ترتیب سطح برگ، طول برگ و پهن‌ترین قسمت عرض برگ (برحسب سانتی‌متر) هستند. در واقع برای اندازه‌گیری سطح برگ، سه برگ از قسمت میانی دو گیاه از هر لایسمتر از زمان استقرار کامل گیاه با فواصل زمانی ۱۵ روزه انتخاب و سطح برگ برای هر تیمار مشخص شد. مقادیر زه‌آب خروجی برای تعیین زمان آبیاری به‌صورت روزانه و نیتروژن کل زه‌آب نیز تقریباً هر ۱۵ روز یک‌بار اندازه‌گیری شد. نیتروژن کل زیست‌توده و زه‌آب خروجی با روش کج‌جدال مشخص شد. با کاربرد هر سه منبع تأمین نیتروژن از داده‌های جمع‌آوری‌شده در شرایط بهینه و عدم محدودیت آب و نیتروژن (تیمارهای شاهد)، به‌منظور

کالیبراسیون و واسنجی مدل استفاده و هم‌چنین از داده‌های جمع‌آوری شده از سایر تیمارهای آزمایش، برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. در این پژوهش از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، شاخص توافق ویلموت (d)، ضریب تبیین (R^2) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای ارزیابی کارایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های موردنظر و مقایسه آن‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل DSSAT: اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل شامل داده‌های خاک (درصد رس، سیلت و شن خاک، شوری و اسیدیته خاک، وزن مخصوص ظاهری، ماده آلی خاک، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی در لایه‌های مختلف خاک)، داده‌های هواشناسی (حداکثر و حداقل دمای هوا، تعداد ساعات آفتابی و بارش) و اطلاعات مدیریت زراعی (تاریخ کاشت و برداشت، عمق و تراکم کاشت، زمان و مقدار کود مصرفی، عمق، زمان و نوع آبیاری، نوع واریته کشت شده، شرایط اولیه خاک و تیمارهای شبیه‌سازی شده) وارد مدل شد. از آمار روزانه ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اهواز در بازه زمانی اسفند ۱۳۹۶ تا آذر ۱۳۹۷ برای ساخت فایل هواشناسی مدل استفاده شد. به‌منظور واسنجی مدل از نتایج حاصل از تیمارهای شاهد (شرایط بهینه و بدون اعمال تنش) برای هر سه منبع نیتروژن (اوره، بیوپچار و هیدروچار) استفاده شد. برای تخمین ضرایب ژنتیکی از بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT استفاده شد. ابتدا ضرایب ژنتیکی به‌دست‌آمده از تحقیق قمری و همکاران (۲۰۱۱)، به‌عنوان پیش‌فرض انتخاب شدند (۲۲). برنامه محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal)، ضرایب را از طریق اجرای متعدد مدل بر اساس شرایط آب و هوایی و خاک‌شناسی و هم‌چنین

مدیریت زراعی تعریف شده در مدل، برای هر یک از واریته‌های موردارزیابی به‌طور جداگانه تخمین می‌زند. سپس ضرایب ژنتیکی از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات مزرعه و انتخاب حداقل اختلاف بین آن‌ها تعیین و به‌طور خودکار در فایل ضرایب ژنتیکی مدل جایگزین می‌شود. برای بهینه کردن این پارامترها، از نتایج داده‌های جمع‌آوری شده از مزرعه شامل روند تغییرات عملکرد زیست‌توده کل، عملکرد دانه ذرت، روند تغییرات نیتروژن زیست‌توده، روند تغییرات شاخص سطح برگ و تعداد دانه در هر مترمربع برای شرایط مطلوب و بدون تنش با کاربرد هر سه منبع نیتروژن (تیمارهای I_1N_1 ، I_1B_1 و I_1H_1 با سه تکرار) استفاده و این ضرایب بعد از اصلاح و بهینه‌شدن، به‌منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد و هم‌چنین مراحل فنولوژیک گیاه ذرت و حرکت آب و نیتروژن در خاک به‌طور جداگانه برای کاربرد هر یک از منابع اوره، بیوپچار و هیدروچار در هر دو فصل کشت، در فایل ضرایب ژنوتیپ ذرت در مدل قرار داده شد. البته در حین کالیبراسیون مدل از روند تغییرات زه‌آب خروجی و هم‌چنین روند تغییرات آبشویی نیتروژن در طول دوره رشد گیاه برای شرایط بهینه (تیمارهای شاهد) با کاربرد هر سه منبع نیتروژن مصرفی در دو فصل کشت بهاره و تابستانه استفاده و مقدار ضریب NAF^1 برابر $0.5 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ برای تمامی لایه‌های خاک انتخاب شد (۲۶). مراحل شبیه‌سازی برای سایر تیمارهای آزمایش (به‌جز تیمارهای استفاده‌شده در مرحله واسنجی) برای هر منبع نیتروژن در هر فصل کشت مجدداً انجام و با نتایج مشاهدات حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌منظور ارزیابی مدل مقایسه شد. از اطلاعات عملکرد دانه، حداکثر شاخص سطح برگ، وزن کل زیست‌توده، نیتروژن کل زیست‌توده، تعداد دانه در هر مترمربع، زه‌آب خروجی

و نیتروژن زه آب که از سایر تیمارهای آزمایش استخراج شده بود برای تعیین اعتبار مدل استفاده شد.

نتایج و بحث

واسنجی مدل CERES-Maize: بر اساس نتایج حاصل از تیمارهای شاهد (شرایط بهینه و بدون اعمال تنش) برای هر سه منبع نیتروژن (اوره، بیوپچار و هیدروچار) ضرایب ژنتیکی برای هر دو رقم سینگل کراس ۶۱۱ و ۷۰۴ در منطقه اهواز مشخص شد (جدول ۴). ضرایب ژنتیکی مورد نیاز مدل CERES-Maize شامل P1: فاصله بین ظهور گیاهچه تا پایان مرحله جوانی بر اساس درجه‌روز رشد (GDD) و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد، P2: میزان تأخیر در نمو ذرت در صورت عدم تأمین طول روز مطلوب، P5: فاصله بین شروع گلدهی (ظهور ابریشم) تا رسیدگی فیزیولوژیک ذرت بر اساس درجه‌روز رشد و صفر فیزیولوژیک ۸ درجه سانتی‌گراد یا طول دوره پرشدن دانه، G2: حداکثر تعداد دانه تولیدشده در بوته، G3: سرعت پرشدن دانه در مرحله پرشدن خطی دانه تحت شرایط مطلوب رشد و PHINT: فاصله زمانی بین ظهور نوک دو برگ متوالی (فیلوکرون) است (۴). هوگنبوم و همکاران (۲۰۱۵) دامنه ضرایب ژنتیکی ارقام مختلف ذرت را برای ضرایب P1، P2، P5، G2، G3 و PHINT به ترتیب ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه‌روز رشد، ۰/۸ تا ۷۰۰ در هر ساعت، ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ درجه‌روز رشد، ۶۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گرم در روز و ۳۰ تا ۶۰ درجه‌روز گزارش کردند (۴). ضرایب ژنتیکی

تخمین زده شده توسط مدل در این تحقیق نیز در دامنه تغییرات ذکر شده قرار داشت. اما در کشت بهاره با کاربرد بیوپچار و هیدروچار مقدار ضریب G3 برابر ۱۶ میلی‌گرم در روز تخمین زده شد. مقدار ضریب G3 با کشت رقم سینگل کراس ۶۱۱ بیش‌تر از رقم سینگل کراس ۷۰۴ مشاهده شد. در واقع گرمای شدید در اواخر دوره کشت بهاره و در مرحله پرشدن دانه دلیل افزایش مقدار ضریب G3 در این فصل کشت نسبت به کشت تابستانه است. افزایش دما در دوره پرشدن دانه، باعث تسریع در رسیدگی فیزیولوژیکی می‌شود و از طرفی مشارکت دو عامل سرعت و طول دوره‌ی پرشدن دانه در میزان عملکرد نهایی دانه تعیین‌کننده است. در کشت بهاره همبستگی بین سرعت پرشدن دانه با وزن دانه مثبت و معنی‌دار گردید. اما همبستگی بین این صفت با دوره پرشدن دانه و تعداد دانه منفی بود. با ترکیب بیوپچار و هیدروچار با کود اوره در هر دو فصل کشت، سرعت رشد دانه در طول مرحله خطی پرشدن دانه (G3) نسبت به کاربرد اوره به‌تنهایی، بیش‌تر شد. کاربرد این مواد در کشت تابستانه، به‌طور هم‌زمان بر سرعت پرشدن دانه و تعداد دانه تأثیر مثبت داشت؛ به نظر می‌رسد افزایش تعداد گل‌های بارور سبب افزایش تعداد دانه در این فصل کشت شد. درحالی‌که در کشت بهاره علاوه بر طول دوره پرشدن دانه بر تولید دانه‌های بزرگ‌تر (به دلیل توزیع مواد فتوسنتزی بین تعداد دانه کم‌تر) نقش داشت.

جدول ۴- ضرایب ژنتیکی تخمین زده شده توسط مدل DSSAT برای دو نوع واریته کشت شده با کاربرد منابع مختلف نیتروژن.

Table 4. Genetic coefficients estimated by the DSSAT model for two varieties cultivated with different nitrogen sources.

(Nitrogen source) منبع نیتروژن					
فصل کشت Planting Season	ضرایب ژنتیکی Factors Genetic	پیش فرض Default	اوره Urea	بیوچار Biochar	هیدروچار Hydrochar
کشت بهاره (SC-611) Spring cultivation	P1 (GDD)	430	150	115	120
	P2 (day)	0.8	0.8	0.8	0.8
	P5 (GDD)	700	850	850	850
	G2	880	860	900	890
	G3 (mg day ⁻¹)	7.5	7.5	16.5	16
	PHINT (GDD)	60	30	30	30
کشت تابستانه (SC-704) Summer cultivation	P1 (GDD)	430	400.8	430.8	430.8
	(day) P2	0.8	0.8	0.8	0.8
	P5 (GDD)	700	950	850	850
	G2	880	850	870	860
	G3 (mg day ⁻¹)	7.5	6.2	9	8.5
	(GDD) PHINT	60	60	60	60

شد که مدل تخمین مناسبی برای پیش‌بینی زه‌آب خروجی برای دو فصل کشت بهاره و تابستانه نداشت. نتایج نشان داد که مدل در شبیه‌سازی زه‌آب خروجی ضعیف عمل می‌کند؛ گرچه مدل روند تغییرات (شاخص ویلموت و ضرایب تعیین بالا) زه‌آب خروجی را در تیمارهای شاهد (شرایط بدون تنش و بهینه) برای هر سه منبع نیتروژن، به‌درستی شبیه‌سازی می‌کند؛ اما اختلاف میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی زیاد است و مدل، زه‌آب خروجی را برای هر دو فصل کشت بیش‌تر تخمین می‌زند.

نتایج واسنجی مدل CERES-Maize با استفاده از شاخص‌های R^2 ، MAE، d، NRMSE برای مراحل نمو دو واریته کشت شده و هم‌چنین مقادیر زه‌آب خروجی و آبشویی نیتروژن در جداول ۵ و ۶ نشان داده شده است. برای هر سه منبع نیتروژن، نتایج حاصل از واسنجی و مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل برای تیمار شاهد با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد که مدل CERES-Maize با حداقل اختلاف توانست ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام موردنظر پیش‌بینی کند که این مطلب حاکی از دقت بالا در تعیین ضرایب ژنتیکی برای ارقام موردنظر است (۶). بر اساس شاخص‌های آماری مشخص

جدول ۵- مقدار شاخص‌های آماری NRMSE، d، MAE و R^2 برای صفات اندازه‌گیری‌شده، با کاربرد سطوح مختلف آب و نیتروژن در کشت بهاره برای واسنجی مدل.

Table 5. The value of statistical indices NRMSE, d, MAE and R^2 for the measured traits, with the application of different levels of water and nitrogen in spring cultivation to calibration the model.

صفات Characteristics	جذر میانگین مربعات خطا نرمال‌شده (NRMSE)			ضریب توافق ویلموت (d)			میانگین خطای مطلق (MAE)			ضریب تبیین (R^2)		
	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar
وزن کل ماده خشک Total Dry Weight (kg ha ⁻¹)	0.02	0.01	0.01	0.99	0.98	0.97	172.00	78.00	45.00	0.97	0.96	0.96
نیتروژن زیست‌توده N Biomass (kg ha ⁻¹)	0.02	0.04	0.06	0.99	0.99	0.99	1.60	1.60	2.00	0.96	0.98	0.99
عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	0.04	0.03	0.01	0.99	0.99	0.98	74.00	54.00	12.00	0.99	0.97	0.98
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum Leaf Area Index	0.16	0.07	0.08	0.93	0.99	0.99	0.24	0.05	0.06	0.97	0.99	0.99
زه‌آب خروجی Drainage (mm ha ⁻¹)	0.83	0.89	0.86	0.76	0.75	0.76	62.00	54.00	53.00	0.98	0.94	0.94
نیتروژن زه‌آب N Leaching (kg ha ⁻¹)	0.17	0.07	0.10	0.98	0.99	0.99	1.73	0.53	0.75	0.95	0.99	0.99

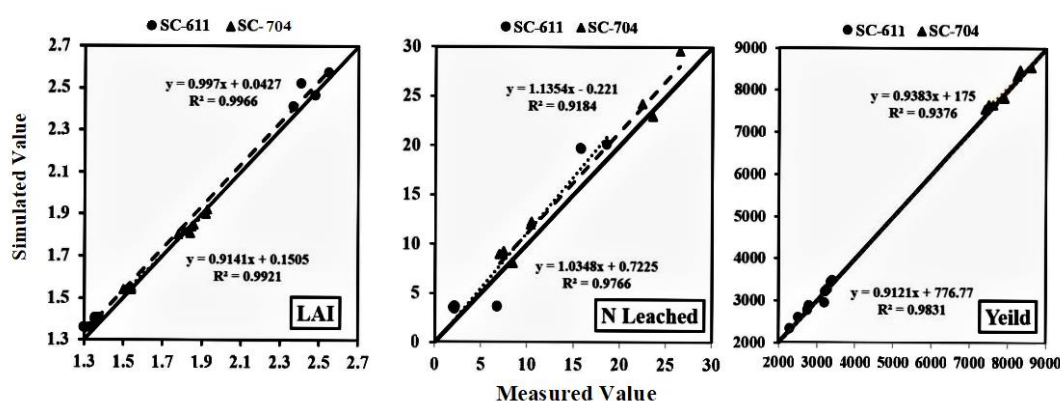
جدول ۶- مقدار شاخص‌های آماری NRMSE، d، MAE و R^2 برای صفات اندازه‌گیری شده، با کاربرد سطوح مختلف آب و نیتروژن در کشت تابستانه برای واسنجی مدل.

Table 6. The value of statistical indices NRMSE, d, MAE and R^2 for the measured traits, with the application of different levels of water and nitrogen in summer cultivation to calibration the model.

صفات Characteristics	جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)			ضریب توافق ویلموت (d)			میانگین خطای مطلق (MAE)			ضریب تبیین (R^2)		
	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar
وزن کل ماده خشک Total Dry Weight (kg ha ⁻¹)	0.01	0.01	0.02	0.98	0.97	0.99	48.00	21.00	84.00	0.98	0.99	0.98
نیتروژن زیست توده N Biomass (kg ha ⁻¹)	0.02	0.01	0.01	0.96	0.99	0.98	1.20	0.60	0.70	0.96	0.98	0.97
عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	0.03	0.01	0.01	0.99	0.97	0.98	56.00	34.00	26.00	0.97	0.97	0.95
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum Leaf Area Index	0.03	0.08	0.03	0.99	0.99	0.99	0.04	0.06	0.04	0.96	0.98	0.99
زه آب خروجی Drainage (mm ha ⁻¹)	7.35	8.13	7.13	0.24	0.23	0.26	223.00	216.00	208.00	0.50	0.51	0.46
نیتروژن زه آب N Leaching (kg ha ⁻¹)	0.14	0.06	0.02	0.98	0.96	0.99	2.28	2.43	0.31	0.98	0.95	0.99

زه‌آب که از سایر تیمارهای آزمایش استخراج شده بود؛ برای تعیین اعتبار مدل استفاده شد. نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و مقایسه آن با خط ۱:۱ نشان داد که با کاربرد منابع مختلف نیتروژن در هر دو فصل کشت، مدل می‌تواند تا بیش از ۹۰ درصد از تغییرات عملکرد دانه، آبشویی نیتروژن و حداکثر شاخص سطح برگ مشاهده‌شده را پیش‌بینی کند (شکل ۱).

اعتبارسنجی مدل **CERES-Maize**: مراحل شبیه‌سازی برای سایر تیمارهای آزمایش (به‌جز تیمارهای استفاده‌شده در مرحله واسنجی) برای هر سه منبع نیتروژن در هر دو فصل کشت مجدداً انجام و با نتایج مشاهدات حاصل از آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌منظور ارزیابی مدل مقایسه شد. از اطلاعات عملکرد دانه، حداکثر شاخص سطح برگ، وزن کل زیست‌توده، نیتروژن کل زیست‌توده، زه‌آب خروجی و نیتروژن کل



شکل ۱- تحلیل رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده شاخص سطح برگ (سانتی مترمربع)، آبشویی نیتروژن (کیلوگرم نیتروژن در هکتار) و عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) با کاربرد منابع مختلف نیتروژن برای ارزیابی مدل در کشت بهاره و تابستانه.

Figure 1. Regression analysis between simulated and measured values of leaf area index (Cm^2), nitrogen leaching (kg N ha^{-1}) and grain yield (kg ha^{-1}) using different nitrogen sources for model evaluation in spring and summer cultivations.

میزان آبشویی نیتروژن را با کاربرد هر سه منبع نیتروژن پیش‌بینی کند. نتایج حاصل از شاخص‌های آماری نشان داد که گرچه مدل روند تغییرات زه‌آب خروجی را در تیمارهای مختلف نیتروژن به‌درستی شبیه‌سازی می‌کند؛ اما اختلاف میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی زیاد است و در تمام تیمارها و برای هر دو فصل کشت، مدل زه‌آب خروجی را بیش‌تر تخمین می‌زند (شکل ۲). تقریباً نتایجی مشابه با نتایج حاصل از پژوهش انجام‌گرفته بر روی نیشکر در جنوب آفریقا برای تخمین زه‌آب خروجی با مدل DSSAT مشاهده شده است (۲۷).

نتایج حاصل از ارزیابی مدل CERES-Maize بر اساس شاخص‌های آماری نشان داد که این مدل تخمین مناسبی برای پیش‌بینی وزن کل زیست‌توده، نیتروژن زیست‌توده، عملکرد دانه و حداکثر شاخص سطح برگ در شرایط آب و هوایی اهواز را دارد (جداول ۷ و ۸). اما در ارزیابی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری مشخص شد که مدل تخمین مناسبی در پیش‌بینی زه‌آب خروجی با کاربرد منابع مختلف در هر دو فصل کشت نداشت و در تمام تیمارها مدل مقدار زه‌آب خروجی را بیش‌تر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده در مزرعه پیش‌بینی کرد. مدل هم‌چنین در هر دو فصل کشت توانست با دقت قابل‌قبولی

جدول ۷- مقدار شاخص های آماری NRMSE، d، MAE و R^2 برای صفات اندازه گیری شده، با کاربرد سطوح مختلف آب و نیتروژن در کشت بهاره برای اعتبارسنجی مدل.

Table 7. The value of statistical indices NRMSE, d, MAE and R^2 for the measured traits, with the application of different levels of water and nitrogen in spring cultivation to validation the model.

صفات Characteristics	جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)			ضریب توافق ویلموت (d)			میانگین خطای مطلق (MAE)			ضریب تبیین (R^2)		
	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar
وزن کل ماده خشک Total Dry Weight (kg ha ⁻¹)	0.13	0.11	0.10	0.99	0.99	0.99	14.25	10.25	9.75	0.99	0.99	0.99
نیتروژن زیست توده N Biomass (kg ha ⁻¹)	0.25	0.09	0.13	0.99	0.99	0.99	0.16	0.06	0.08	0.99	0.99	0.99
عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	0.27	0.17	0.29	0.99	0.99	0.99	8.75	6	9.25	0.99	0.99	0.99
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum Leaf Area Index	1.28	2.75	2.79	0.96	0.78	0.84	0.03	0.04	0.04	0.99	0.96	0.96
زه آب خروجی Drainage (mm ha ⁻¹)	136.82	172.96	165.28	0.66	0.66	0.68	112.38	100.07	98.37	0.99	0.99	0.99
نیتروژن زه آب N Leaching (kg ha ⁻¹)	17.76	20.07	21.33	0.97	0.98	0.98	2.06	2.16	2.33	0.99	0.99	0.99

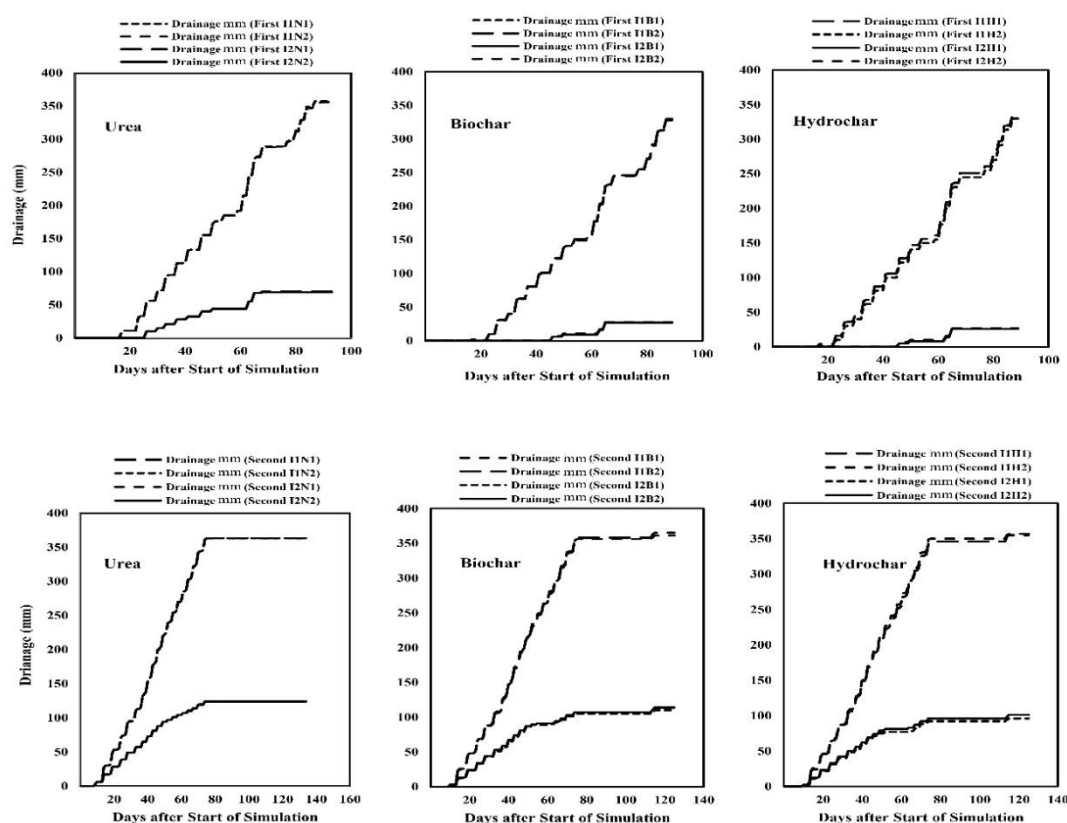
جدول ۸- مقدار شاخص‌های آماری NRMSE، d، MAE و R^2 برای صفات اندازه‌گیری‌شده، با کاربرد سطوح مختلف آب و نیتروژن در کشت تابستانه برای اعتبارسنجی مدل.

Table 8. The value of statistical indices NRMSE, d, MAE and R^2 for the measured traits, with the application of different levels of water and nitrogen in summer cultivation to validation the model.

صفات Characteristics	جذر میانگین مربعات خطا نرمال‌شده (NRMSE)			ضریب توافق ویلموت (d)			میانگین خطای مطلق (MAE)			ضریب تبیین (R^2)		
	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar	Urea	Biochar	Hydrochar
وزن کل ماده خشک Total Dry Weight (kg ha ⁻¹)	0.15	0.37	0.16	0.88	0.99	0.99	21.5	38.75	19	0.93	0.99	0.99
نیتروژن زیست‌توده N Biomass (kg ha ⁻¹)	0.29	0.51	0.32	0.99	0.99	0.99	0.35	0.57	0.30	0.99	0.99	0.99
عملکرد دانه Grain yield (kg ha ⁻¹)	0.15	0.12	0.67	0.87	0.98	0.99	9	8	33.75	0.66	0.99	0.97
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum Leaf Area Index	0.38	0.49	2.41	0.74	0.90	0.79	0.01	0.01	0.05	0.73	0.96	0.99
زه‌آب خروجی Drainage (mm ha ⁻¹)	125.47	131.62	122.30	0.58	0.59	0.63	129.27	128.05	116.57	0.99	0.99	0.99
نیتروژن زه‌آب N Leaching (kg ha ⁻¹)	1.08	10.11	6.68	0.99	0.99	0.99	0.20	1.47	1.05	0.99	0.99	0.99

در واقع مدل شرایط زهکشی خاک را بسیار ایده آل نسبت به شرایط مزرعه در نظر می گیرد و از طرفی میزان تبخیر-تعرق را کمتر از مقادیر مشاهده شده در مزرعه شبیه سازی می کند. دلیل تخمین بیش تر زه آب خروجی با توجه به توازن آب در خاک، به احتمال زیاد به علت تخمین کمتر تبخیر-تعرق توسط مدل است. در شرایط مطلوب و بدون تنش با ترکیب بیوچار و هیدروچار با کود اوره (I_1B_1 و I_1H_1)، زه آب خروجی در کشت بهاره و تابستانه به طور معنی داری کاهش یافت (شکل ۲). این کاهش در مقایسه با کاربرد اوره به تنهایی (I_1N_1)، در کشت بهاره به ترتیب ۱۵/۷ و ۱۳/۱ درصد و در کشت تابستانه به ترتیب ۱۷/۴ و ۱۴/۴ درصد بود. از آنجا که کربن دارای ماهیت بسیار متخلخل و قدرت نگهداشت مواد مغذی و رطوبت بالا است؛ در نتیجه کاربرد بیوچار و هیدروچار نقش اساسی در بهبود خصوصیات خاک دارد (۱۶). در پژوهش انجام شده توسط خدارحمی و همکاران (۲۰۱۹) نیز افزودن بیوچار به خاک موجب کاهش معنی دار زه آب خروجی شد (۲۸). در کشت بهاره و تابستانه با کاربرد هر سه منبع اوره، بیوچار و هیدروچار، MAE برای آبشویی نیتروژن به ترتیب بین $0.1-0.53/73 \text{ kg N ha}^{-1}$ و $0.31-2/43$ است. میزان آبشویی نیتروژن تابعی از میزان زه آب خروجی است و فقط حرکت نترات و اوره در شبیه سازی آبشویی نیتروژن از لایه های خاک توسط مدل در نظر گرفته می شود. به طور کلی در

تیمارهای آزمایش در هر دو فصل کشت مدل مقادیر آبشویی نیتروژن را اندکی بیش تر از مقادیر اندازه گیری شده، شبیه سازی می کند. البته نیتروژن در شرایط مزرعه و زمانی که لایه های بالایی خشک تر هستند، همراه آب به صورت عمودی به طرف بالا حرکت می کند؛ بنابراین میزان تخمین آبشویی نیتروژن توسط مدل نسبت به شرایط مزرعه بیش تر خواهد بود که با یافته های بوون و همکاران (۱۹۹۳) نیز مطابقت دارد (۲۹). در شرایط تنش رطوبتی (I_2B_1 ، I_2N_1 و I_2H_1) کاهش میزان آب آبیاری باعث کاهش زه آب خروجی و کاهش آبشویی نیتروژن شد (شکل ۲). در کشت بهاره و در تیمارهای I_1B_1 ، I_1N_1 و I_1H_1 به ترتیب ۹/۳، ۷/۸ و ۷/۹ درصد از کل نیتروژن مصرفی به صورت آبشویی نیتروژن خارج و این مقادیر برای کشت تابستانه به ترتیب برابر ۱۳/۵، ۱۰/۹ و ۱۱/۷ درصد بود. بیوچار و هیدروچار با افزایش مواد آلی خاک، باعث افزایش تخلخل و بهبود ساختمان خاک و همچنین افزایش ظرفیت نگهداشت آب در خاک و در نتیجه کاهش آبشویی نیتروژن می شوند. نتایج شبیه سازی مدل نیز همانند نتایج حاصل از مشاهدات مزرعه ای نشان داد که در هر دو فصل کشت، میزان آبشویی نیتروژن با کاربرد بیوچار و هیدروچار نسبت به کود اوره کاهش یافت. در پژوهش انجام شده توسط قربانی و همکاران (۲۰۱۶) نیز افزودن بیوچار به خاک موجب کاهش معنی دار آبشویی نیتروژن شد (۳۰).



شکل ۲- اثر سطوح مختلف آب و نیتروژن با کاربرد سه منبع اوره، بیوپچار و هیدروچار بر زه‌آب خروجی در دو کشت بهاره (First) و تابستانه (Second) ذرت.

Figure 2. Effect of different levels of water and nitrogen using three sources of urea, Biochar, and Hydrochar on effluent runoff in two spring (First) and summer (Second) Corn cultivation.

بالایی می‌توان از مدل‌های گیاهی بسته نرم‌افزار DSSAT با کاهش وقت و هزینه‌های تحقیقات کشاورزی استفاده کرد. اما مدل در شبیه‌سازی زه‌آب خروجی عملکرد ضعیفی داشت و زه‌آب خروجی را بیشتر تخمین زد. مدل هم‌چنین در هر دو فصل کشت توانست با دقت قابل‌قبولی میزان آبشویی نیتروژن را با کاربرد هر سه منبع نیتروژن پیش‌بینی کند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تمرکز بیشتری بر روی دستیابی به بیوپچار و هیدروچار با درصد نیتروژن بالاتر و کیفیت بهتر بشود و مطالعه‌های چندین ساله به‌منظور بررسی اثرات باقی‌مانده بیوپچار و هیدروچار بر خاک و گیاه انجام شود.

نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی مدل CERES-Maize نشان داد که مدل توانایی بالایی برای پیش‌بینی وزن ماده خشک، نیتروژن زیست‌توده، عملکرد دانه و هم‌چنین حداکثر شاخص سطح برگ با کاربرد سه منبع نیتروژن (اوره، بیوپچار و هیدروچار) برای دو وارته مورد بررسی در شرایط آب و هوایی اهواز را دارد. نتایج واسنجی برای صفات شبیه‌سازی‌شده مورد مطالعه و مقایسه آن‌ها با داده‌های اندازه‌گیری‌شده نشان داد که مدل می‌تواند با دقت بیشتری این صفات را در تیمار شرایط مطلوب و بدون تنش برای کاربرد هر یک از منابع نیتروژن در شرایط اقلیمی اهواز شبیه‌سازی کند. از این رو به‌منظور تصمیم‌گیری‌های صحیح مدیریت زراعی، با اطمینان

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب پایان نامه دکتری در دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفته است. نویسندگان این مقاله از دانشگاه بوعلی سینا همدان نیز که موجبات تسهیل انجام بخشی از این تحقیق را در قالب فرصت مطالعاتی فراهم نموده اند تشکر می نمایند.

داده ها، اطلاعات و دسترسی

داده های این تحقیق مربوط به پایان نامه دکتری نویسنده اول است که با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی هستند.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این متن به شکل ذیل است: نویسنده اول: تهیه و آماده سازی داده ها، مدل سازی و شبیه سازی، انجام محاسبات، تهیه پیش نویس مقاله و اصلاح و نهایی سازی مقاله، نویسنده دوم: نظارت بر شبیه سازی و مدل سازی

(به عنوان استاد مشاور در طی فرصت شش ماهه تحقیقاتی در دانشگاه بوعلی سینا)، بازبینی مقاله، نویسنده سوم: نویسنده مسئول، نظارت تحقیق (به عنوان استاد راهنمای دوم)، بازبینی مقاله، نویسنده چهارم: طرح تحقیق و روش شناسی و نظارت تحقیق (به عنوان استاد راهنمای اول)، نویسنده پنجم: مشاور آماری و روش شناسی (به عنوان استاد مشاور)، نویسنده ششم: طرح تحقیق و روش شناسی (به عنوان استاد مشاور).

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها است.

حمایت مالی

این تحقیق در قالب یک پایان نامه دکتری ذیل حمایت دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شده است. ولی از حمایت مستقیم مالی برخوردار نبوده است و از آزمایشگاه و امکانات این دانشگاه استفاده گردیده است.

منابع

1. Kropff, M. J., Cassman, K. G., Van Laar, H. H., & Peng, S. (1993). Nitrogen and yield potential of irrigated rice. *Plant and Soil*, 155(1), 391-394. <https://doi.org/10.1007/BF00025065>.
2. Yazdekhasti, M., Shayannejad, M., Eshghizadeh, H. R., & Feizi, M. (2018). The effect of different saline irrigation regimes on the yield of grain sorghum and yield simulation using SAWP model. *Journal of Water and Soil Science*, 22(3), 95-106. <https://doi.org/1029252/jstnar.22.3.95>.
3. Hoogenboom, G., Jones, J. W. P., Wilkens, W., Porter, C. H., Boote, K. J., Hunt, L. A., Singh, U., Lizaso, J. I., White, J. W., Uryasev, O., Ogoshi, R., Koo, J., Shelia, V., & Tsuji, G. Y. (2015). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (<http://dssat.net>). DSSAT Foundation. Prosser, Washington.
4. Hao, B., Xue, Q., Marek, T. H., Jessup, K. E., Becker, J. D., Hou, X., Xu, W., Bynum, E. D., Bean, B. W., Colaizzi, P. D., & Howell, T.A. (2019). Grain

- yield, evapotranspiration, and water-use efficiency of maize hybrids differing in drought tolerance. *Irrigation Science*, 37(1), 25-34. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0597-5>.
5. Neysi, K., Egdernezhad, A., & Abassi, F. (2022). Evaluation of ceres-maize model for simulation of maize under different scenarios of irrigation and nitrogen fertilizer management. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(10), 2295-2310. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.344865.669300>.
6. Karami, P., Mondani, F., & Ghobadi, R. (2025). The Effect of Different Irrigation Levels on Phenology, Grain Yield and Their Components and Some Physiological Traits of Different Corn (*Zea mays* L.) Hybrids under Climatic Conditions of Kermanshah. *Journal of Crops Improvement*, 27(1), 1-18. <https://doi.org/10.22059/jci.2025.36842.0.2866>.
7. Paknejad, F., Moayeripor, Sh., Aghayari, F., & Nabi Ilkai, M. (2017). Simulation of Maize yield with different levels of Nitrogen by using DSSAT model. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(3), 503-518.
8. Feyzbakhsh, M. T., Kamkar, B., Mokhtarpour, H., & Asadi, M. E. (2016). Calibration and evaluation of the CERES-Maize model in Gorgan climatic conditions. *Crop Production*, 8(4), 25-49. <https://doi.org/20.1001.1.2008739.1394.8.4.2.8>.
9. Malik, W., Isla, R., & Dechmi, F. (2019). DSSAT-CERES-Maize modeling to improve irrigation and nitrogen management practices under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 213, 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.022>.
10. Matthews, R. B., Kropff, M. J., Horie, T., & Bachelet, D. (1997). Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. *Agricultural Systems*, 54(3), 399-425. [https://doi.org/10.1016/S0308521X\(95\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0308521X(95)00060-1).
11. Kumar, K., & Goh, K. M. (2000). Crop residue and management practice: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery. *Advances of Agronomy*, 68(1), 49-59. [https://doi.org/10.1016/S00652113\(08\)60846-9](https://doi.org/10.1016/S00652113(08)60846-9).
12. Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., & Das, K. et al. (2009). Characterization of designer Biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*. <https://www.researchgate.net/publication/38444634>.
13. Zhang, Z., Zhu, Z., Shen, B., & Liu, L. (2019). Insights into Biochar and Hydrochar production and applications: A review. *Energy*, 171, 581-598. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.035>.
14. Abbaspour, F., Asghari, H. R., Rezvani Moghadam, P., Abbasdokht, H., & Shabahang, J. (2018). Effect of Biochar and chemical fertilizers on some soil properties, yield and quality characteristics of black seed (*Nigella sativa*) under water deficit. *Journal of Water Research in Agriculture*, 32(3), 441-457. <https://doi.org/10.22092/jwra.2018.117801>.
15. Nikraves, I., Boroomandnasab, S., Naseri, A., & Soltani Mohammadi, A. (2018). Investigating the effect of Wheat Straw Biochar and Hydrochar on physical properties of a Sandy Loam soil. *Journal of Water and Soil*, 32(2), 387-397. <https://jsw.um.ac.ir/index.php/jsw/article/view/70445>.
16. Bento, L. R., Castro, A. J. R., Moreira, A. B., Ferreira, O. P., Bisinoti, M. C., & Melo, C. A. (2019). Release of nutrients and organic carbon in different soil types from Hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinasse. *Geoderma*, 334, 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.34>.
17. Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of Biochar, compost and biochar-compost

- for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543, 295-306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>.
18. Li, Y., Tsend, N., Li, T., Liu, H., Yang, R., Gai, X., ... & Shan, S. (2019). Microwave assisted hydrothermal preparation of rice straw hydrochars for adsorption of organics and heavy metals. *Bioresource Technology*, 273, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.06>.
19. Cai, S., Zhao, X., & Yan, X. (2025). Towards precise nitrogen fertilizer management for sustainable agriculture. *Earth Critical Zone*, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.ecz.2025.100026>.
20. Mosaddeghi, M. R., Sinegani, A. S., Farhangi, M. B., Mahboubi, A. A., & Unc, A. (2010). Saturated and unsaturated transport of cow manure-borne *Escherichia coli* through in situ clay loam lysimeters. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137(1-2), 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.018>.
21. Santibanez, C., Ginocchio, R., & Teresa Varnero, M. (2007). Evaluation of nitrate leaching from mine tailings amended with biosolids under Mediterranean type climate conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 93, 1333-1340. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.12.009>.
22. Ghamari Asl, M., Andarzian, B., Bakhshand, A., Gharineh, M. H., & Fathi, Gh. (2011). Simulating the effects of drought and nitrogen stress on yield, water use efficiency, and nitrogen of corn using the CERES-Maize simulation model. *Crop Physiology Journal*, 30(11), 21-31.
23. Fungo, B., Lehmann, J., Kalbitz, K., Thiongo, M., Tenywa, M., Okeyo, I., & Neufeldt, H. (2019). Ammonia and nitrous oxide emissions from a field Ultisol amended with tithonia green manure, urea, and biochar. *Biology and fertility of soils*, 55(2), 135-148. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-01338-3>.
24. Shokri, S., Hooshmand, A. R., & Ghorbani, M. (2017). The Estimation Evaporation Pan Coefficient For Calculating Reference Evapotranspiration in Ahvaz. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 40(1), 1-12.
25. Moll, R. H., & Kamparth, E. J. (1977). Effect of population density up on agronomic traits associated with genetic increases in yield of *Zea mays* L. *Agronomy journal*, 69, 81-84. <https://doi.org/10.2134/agronj1977.00021962006900010021x>Digital Object Identifier (DOI).
26. Wild, A. (1981). Mass flow and diffusion. In: Greenland DJ, Hayes MHB (eds) *The chemistry of soil processes*. Wiley, New York, pp 37-80.
27. Van Der Laan, M., & Miles, N. (2011). Identification of opportunities for improved nitrogen management in sugarcane cropping systems using the newly developed Canegro-N model. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 90(3), 391-404. <https://doi.org/10.1007/s10705-011-9440-6>.
28. Khodarahmi, Y., Boroomand Nasab, S., Soltani Mohamadi, A., & Naseri, A. (2019). Evaluation and comparison of modified hydrochar and superabsorbent on some of physical and chemical properties soil. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(13), 500-511. <https://doi.org/10.1001.1.20087942.1398.13.2.20.8>.
29. Bowen, W. T., Jones, J. W., Carsky, R. J., & Quintana, J. O. (1993). Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation. *Agronomy Journal*, 85, 153-159. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500010028x>.
30. Ghorbani, M., Asadi, H., & Abrishamkesh, S. (2016). Effect of Rice Husk Biochar on Nitrate in a clayey soil. *Journal of Soil Research*, 29(4), 427-434. <https://doi.org/10.22092/ijrsr.2016.105902>.

