



Simulation different indices of sweet corn under variable levels of subsurface drip irrigation

Milad Ebrahimi¹ | Javad Behmanesh^{2✉} | Vahid Rezaverdinejad³ |
Vahid Varshavian⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: miladebrahimi354@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: j.behmanesh@urmia.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. E-mail: v.verdinejad@urmia.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran. E-mail: v.varshavian@basu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 6 January 2025
Received in revised form
19 April 2025
Accepted 27 July 2025
Published online 10 December 2025

Keywords:

Ceres-Maize
Deficit Irrigation
Drought Stress
Precision Irrigation

ABSTRACT

Drought stress and the increasing need for food production have raised serious concerns about the sustainability of water resources and agricultural systems in the arid regions of the Middle East, particularly Iran. Field experiments were conducted in four replicates at four irrigation levels including 120%, 100%, 80%, and 60% of the full irrigation requirement for sweet corn. The Decision Support System for Agricultural Technology Transfer (DSSAT) model was calibrated and validated to evaluate various irrigation management strategies and their effects on yield, leaf area index, and biomass of sweet corn. The study revealed that the model displayed moderate accuracy (NRMSE between 20-30%) in simulating the impact of severe irrigation stress on the growth and development of sweet corn. The evaluation of the Ceres-Maize model in capturing dynamic growth trends of leaf area index, height, and aerial biomass showed that this model successfully simulated the biomass growth process. During calibration and validation under the 20% deficit treatment, the model reduced the maximum leaf area index by 0.52 and 0.71, respectively. However, the model exhibited significant errors in simulating initial plant growth stages under intense drought stress. The study also indicated that in deficit treatments, measured values reached their final levels more rapidly a trend evident for the plant height index as well. In the 40% deficit regime, the model showed substantial errors in grain yield simulation, with NRMSE values of 27.03 during the validation stage. Overall, the findings demonstrated that the Ceres-Maize model performs adequately in simulating yield and biomass of sweet corn.

Cite this article: Ebrahimi, M., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., & Varshavian, V. (2025). Simulation different indices of sweet corn under variable levels of subsurface drip irrigation. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (2), 479-495. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387972.1200>





شبیه‌سازی شاخص‌های مختلف گیاه ذرت شیرین تحت سطوح مختلف آبیاری قطره‌ای زیرسطحی

میلاذ ابراهیمی^۱ | جواد بهمنش^۲ | وحید رضاوردی‌نژاد^۳ | وحید ورشایان^۴

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: miladebrahimi354@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: j.behmanesh@urmia.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: v.verdinejad@urmia.ac.ir

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: v.varshavian@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تنش خشکی و نیاز روزافزون به تولید مواد غذایی باعث نگرانی جدی در مورد پایداری منابع آبی و سیستم‌های کشاورزی در مناطق خشک خاورمیانه به‌ویژه ایران شده است. آزمایش‌های مزرعه‌ای در چهار تکرار و در چهار سطح به مقدار ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبیاری کامل برای محصول ذرت شیرین، انجام شد. واسنجی و اعتباریابی مدل سیستم پشتیبانی تصمیم برای انتقال فناوری کشاورزی (DSSAT) برای ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی مختلف برای برنامه‌ریزی آبیاری بر عملکرد، شاخص سطح برگ و زیست‌توده ذرت شیرین موردبررسی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که مدل از نظر شبیه‌سازی اثر تنش شدید آبیاری بر رشدونمو ذرت شیرین در محدوده متوسط (NRMSE بین ۲۰ تا ۳۰ درصد) قرار دارد. نتایج ارزیابی مدل Ceres-Maize برای بررسی روند رشد پویا شاخص سطح برگ، ارتفاع و زیست‌توده قسمت هوایی ذرت شیرین نشان داد که مدل فرایند رشد زیست‌توده را شبیه‌سازی می‌کند. بر این اساس، مدل در مرحله واسنجی و اعتباریابی تیمار ۲۰ درصد کم‌آبیاری، شاخص سطح برگ حداکثر را ۰/۵۲ و ۰/۷۱ کاهش داد. مدل در مراحل واسنجی و اعتباریابی، زمانی که گیاه در مرحله اولیه رشد قرار داشت با اعمال تنش خشکی شدیدتر، خطای زیادی نشان داد. نتایج نشان داد در تیمارهای کم‌آبیاری، مقادیر اندازه‌گیری‌شده سریع‌تر به مقادیر نهایی خود نزدیک می‌شوند. در رژیم ۴۰ درصد کم‌آبیاری مدل با خطای زیادی شبیه‌سازی عملکرد دانه را انجام داد، به‌طوری‌که مقادیر NRMSE در مرحله اعتباریابی ۲۷/۰۳ به‌دست آمد. به‌طورکلی این تحقیق نشان داد که مدل Ceres_Maize برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده محصول ذرت شیرین عملکرد قابل‌قبولی دارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹	
کلیدواژه‌ها:	
آبیاری دقیق	
تنش خشکی	
کم‌آبیاری	
Ceres Maize	

استناد: ابراهیمی، میلاذ؛ بهمنش، جواد؛ رضاوردی‌نژاد، وحید و ورشایان، وحید (۱۴۰۴). شبیه‌سازی شاخص‌های مختلف گیاه ذرت شیرین تحت سطوح مختلف آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۲)، ۴۷۹-۴۹۵. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387972.1200>



۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین اجزای اقتصاد جهانی، بخش کشاورزی است که وظیفه تولید غذای جمعیت روبه‌رشد را بر عهده دارد. این در حالی است که بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین جهانی نیز مربوط به همین بخش است (Chen and Yada, 2015; Ditta et al., 2011). با وجود نیاز به کاهش مصرف آب کشاورزی، به دلیل افزایش رشد جمعیت، تقاضا برای آب شیرین افزایش پیدا کرده است. بنا بر پیش‌بینی‌های انجام‌شده تا سال ۲۰۵۰ استفاده آب شیرین موجود تا ۱۹ درصد افزایش خواهد یافت (UN World Water Assessment Programme, 2012). یکی از روش‌های جبران‌کننده افزایش مصرف آب شیرین موجود، استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری است (Levidow et al., 2014; Perry et al., 2009; Tan and Zhang, 2018).

امروزه در دنیا ذرت یکی از اجزای ضروری غذای جهانی محسوب می‌شود (Campos et al., 2004). ذرت یکی از مهم‌ترین و پر توزیع‌ترین محصولات غلات در جهان است که حدود ۱/۱۳ میلیارد تن از تولید جهانی محصولات کشاورزی را به خود اختصاص می‌دهد (Erenstein et al., 2022). ذرت شیرین یکی از محصولات مهم غذایی است که به‌طور عمده به‌منظور بلال کاشته می‌شود و در میان دسته‌ای از گیاهان زراعی که به‌عنوان سبزی طبقه‌بندی شده‌اند، قرار گرفته است. تولید این محصول به‌صورت تازه و در صنایع غذایی و تبدیلی اهمیت دارد (Oktem et al., 2005). مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد دانه ذرت در شرایط مدیریتی آبیاری به‌صورت مکرر با حجم کم در مقایسه با آبیاری به‌دفعات کم اما با حجم زیاد، افزایش می‌یابد (Hokam et al., 2011). یکی از این راهبردها (آبیاری با دفعات زیاد و حجم کم) استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI)^۱ است. آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به‌صورت کاربرد آب در زیرسطح خاک از طریق قطره‌چکان‌ها با شدت جریان عموماً مشابه با آبیاری قطره‌ای سطحی تعریف می‌شود. آبیاری قطره‌ای زیرسطحی تحت شرایط مشخصی سودمندترین روش برای آبیاری گیاهان و مزارع است. از دلایل استفاده از SDI که سبب افزایش بهره‌وری استفاده از آب یا صرفه‌جویی آب می‌شود می‌توان به کاهش یا حذف تلفات نفوذ عمقی، رواناب آبیاری و تبخیر آب، بهبود وضعیت نفوذ، ذخیره و استفاده از بارندگی، بهبود یکنواختی در مزرعه و تزریق آب به ناحیه ریشه گیاه و بهبود سلامت، افزایش عملکرد و کیفیت گیاه اشاره کرد (Lamm, 2014). همچنین یکی از روش‌های مدیریت آب کشاورزی، کم‌آبیاری (DI)^۲ است که در آن مقدار آب آبیاری کم‌تر از نیاز گیاه به محصول داده می‌شود. کم‌آبیاری در واقع یک روش مدیریت استرس آبی گیاه در برابر کاهش جزئی در کیفیت و کمیت محصول است (Bayabil et al., 2023; Fereres and Soriano, 2006; Kang and Zhang, 2004; Taghvaeian et al., 2014; Kullberg et al., 2017). استفاده از روش‌های کم‌آبیاری با وجود منفی که در کاهش مصرف آب دارد اغلب به دلایل مختلفی از جمله فقدان مطالعات کافی در مورد واکنش گیاهان زراعی به سطوح مختلف آبیاری، مورد استفاده قرار نمی‌گیرد (Edgerton, 2009; Levidow et al., 2014; Lybbert and Shen et al., 2012; Mark et al., 2014).

بررسی واکنش گیاهان به سطوح مختلف آبیاری برای تعیین تحمل تنش‌های آبی محصولات کشاورزی ضروری است. با این حال، کسب این دانش مستلزم مطالعه میدانی پرهزینه و زمان‌بر است (Hansen, 2005; Lobell and Burke, 2005; Yin et al., 2014). همچنین در طول ۳۰ سال اخیر برای شبیه‌سازی واکنش‌های گیاه به عوامل مدیریتی و ارزیابی روابط محیطی تأثیرگذار بر گیاه (تنش‌های محیطی و زیستی) از مدل‌های شبیه رشد گیاه استفاده شده است. این مدل‌ها شبیه‌سازی‌های مبتنی بر مدیریت بخش‌های مختلف زراعی را امکان‌پذیر می‌سازند و امکان بررسی واکنش‌های گیاهان را به استراتژی‌های مدیریتی مصرف آب را فراهم می‌کنند (Abi Saab et al., 2015; DeJonge et al., 2012; Di Paola et al., 2016; Gul et al., 2020; Palosuo et al., 2011; Rauff and Bello, 2015). برخی از این مدل‌ها مبتنی

بر فرایند هستند، یعنی قادر هستند به صورت دینامیک فرایندهای طول دوره رشد گیاه را به صورت روزانه پیش‌بینی کنند (Jones *et al.*, 2003). در طول سال‌های گذشته، مدل‌های زراعی مختلفی توسعه داده شده‌اند که از نظر دقت و پارامترهای ورودی با یکدیگر تفاوت دارند. DSSAT^۳ (سیستم پشتیبانی تصمیم برای انتقال فناوری کشاورزی)، یکی از پرکاربردترین آن‌هاست. هدف اولیه DSSAT ادغام مشخصات آب‌وهوا، خاک، نوع محصول و شیوه‌های مدیریتی برای انتقال فناوری تولید است (Hoogenboom *et al.*, 2010; Yakoub *et al.*, 2017). این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد بیش از ۴۲ محصول در شرایط مختلف محیطی و مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Getachew *et al.*, 2021; Gunawat *et al.*, 2022; Hoogenboom *et al.*, 2019). ماژول CERES-Maize که بخشی از سیستم پشتیبانی تصمیم DSSAT هستند، برای شبیه‌سازی مراحل مختلف توسعه و تولید ذرت استفاده می‌شود. مطالعات متعددی در مناطق مختلف، برای ارزیابی مدل CERES-Maize در شبیه‌سازی عملکرد محصول، زیست‌توده و شاخص سطح برگ تحت شرایط مختلف مدیریتی انجام شده است. در این پژوهش‌ها نشان داده شده است که مدل CERES-Maize، مقادیر شاخص سطح برگ، زیست‌توده و عملکرد محصول را برای شرایط بدون تنش خشکی، نسبت به شرایط تنش خشکی، بهتر شبیه‌سازی می‌کند (Marek *et al.*, 2017; Saddique *et al.*, 2019; Song and Jin, 2020; Attia *et al.*, 2016; Saseendran *et al.*, 2008; Mubeen *et al.*, 2016). در حالت کلی مدل CERES-Maize می‌تواند برای ارزیابی اثرات تنش خشکی بر رشد، توسعه و عملکرد محصول استفاده شود. اگرچه مدل‌های محصول پویا و مبتنی بر فرایند به طور گسترده به عنوان ابزار پشتیبانی تصمیم برای مدیریت محصول و برای شبیه‌سازی عملکرد در سطح مزرعه استفاده شده‌اند، اما بسیاری از پارامترهای ورودی مدل به طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شوند. عدم اندازه‌گیری اغلب پارامترهای ورودی مدل‌ها به این دلیل است که تعیین مقادیر آن‌ها به دلیل تنوع ذاتی، مکانی، زمانی و خطاهای اندازه‌گیری داده‌ها اغلب دشوار است (Bogena *et al.*, 2010; Panda *et al.*, 2010). در نتیجه، مدل‌سازی محصول اغلب براساس اطلاعات یا داده‌هایی است که به صورت پیش‌فرض در مدل وجود دارد و این می‌تواند منجر به پیش‌بینی بیش یا کم‌تر از حد شود، بنابراین لزوم واسنجی دقیق مدل‌ها برای استفاده از آن‌ها در شرایط مختلف مدیریتی ضروری است.

کاشت ذرت شیرین در ایران به عنوان یک گیاه زراعی معمول نبوده و به همین خاطر پژوهش‌های انجام‌شده در مورد این گیاه بسیار محدود است. همچنین براساس بررسی منابع انجام‌گرفته، این پژوهش اولین و مهم‌ترین منبع برای ارزیابی سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای محصول ذرت شیرین در سطوح مختلف مدیریت آبیاری با استفاده از مدل CERES-Maize است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند کشاورزان و مدیران آبیاری را برای اجرای کم‌آبیاری به عنوان یک راهبرد حفظ آب برای تولید ذرت شیرین آگاه کند و پژوهش‌گران را در مورد اثربخشی مدل رشد محصول به عنوان ابزاری برای شناسایی استراتژی مناسب حفاظت از آب روشن کند. همچنین استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به عنوان یک روش آبیاری جدید و مؤثر در جهت کاهش مصرف آب آبیاری به عنوان جایگزین سایر روش‌های آبیاری متداول در منطقه مورد مطالعه (حوضه آبریز دریاچه ارومیه) مورد ارزیابی قرار دهد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. آماده‌سازی زمین و ایستگاه تحقیقاتی

این پروژه تحقیقاتی در دانشگاه ارومیه، مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب، ارومیه، ایران، انجام شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای به منظور بررسی تأثیر سطوح مختلف آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر روی گیاه ذرت شیرین با تعداد ۶۷۰۰۰ بوته در هکتار، انجام شد (شکل ۱).

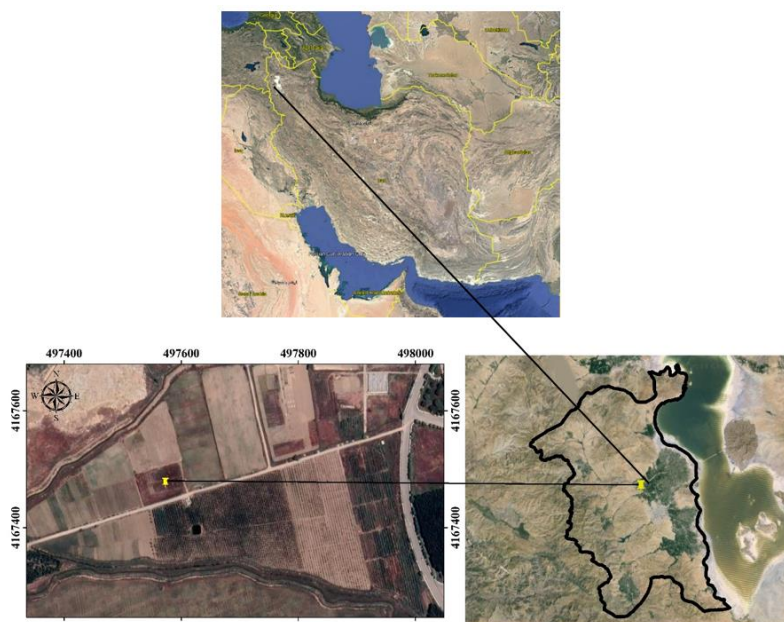


Figure 1. The location of the study area and field (UTM zone 38, X=497669, Y=4166993)

۲.۲. داده‌های آب آبیاری، خاک و هواشناسی

در این پژوهش نمونه‌برداری از سه عمق صفر-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متر در سه تکرار مختلف انجام شد و آب آبیاری از چاه عمیق مزرعه تأمین گردید. اجزای بافت خاک با روش هیدرومتری (ASTM, 2009) و خواص شیمیایی خاک با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شد (Bray and Kurtz, 1945). جدول (۱) نتایج آزمایش خاک مزرعه تحت کشت محصول را نشان می‌دهد.

Table 1. Physical and chemical characteristics of the tested farm soil

Depth of sampling (cm)	Soil texture	Field capacity ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Permanent wilting point ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	Organic carbon	Electrical conductivity (dSm^{-1})	Total nitrogen (%)	pH	Absorbable phosphorus (ppm)	Absorbable potassium (ppm)
0-30	Clay loam	0.39	0.22	1.2	2.5	0.1	8.1	11.8	816.3
30-60	Silty Clay loam	0.38	0.21	0.85	1.9	0.8	8	9.5	714.5
60-90	Silty Clay loam	0.37	0.23	0.5	1.7	0.5	7.9	9.1	685.4

ارومیه با متوسط بارش سالانه ۳۰۸ میلی‌متر، حداکثر و حداقل دمای بلندمدت به ترتیب ۱۸/۱ و ۵/۴ درجه سانتی‌گراد در شمال غربی ایران قرار دارد. آب‌وهوای منطقه براساس روش آمبرژه سرد و خشک است (Hessari and Zeynalzadeh, 2020; Ebrahimi et al., 2022). داده‌های آب‌وهوا در سال آزمایش (۱۳۹۸)، شامل حداقل و حداکثر دما ($^{\circ}\text{C}$)، ساعت آفتابی، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی و سرعت باد (ms^{-1})، از ایستگاه‌های هواشناسی نازلو در نزدیکی محل پژوهش (۵۰۰ متری) جمع‌آوری شد. بارش تابستان ناچیز بود (جدول ۲).

Table 2. Mean meteorological parameters of the study area during the growing season

Month	Maximum temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Minimum temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Maximum humidity (%)	Minimum humidity (%)	Hours of sun (hr)	Wind speed (ms^{-1})
July	31.9	18.4	48	25	11.7	2.1
August	32.6	19.4	49	28	10.9	1.9
September	27.9	15	57	33	9.7	2
October	26.8	11.7	50	24	10.7	2.2

۳.۲. آزمایش‌های مزرعه‌ای تیمارهای آبیاری

این پژوهش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار انجام شد. تیمارهای آبیاری در چهار سطح به مقدار ۱۲۰ (I1)، ۱۰۰ (I2)، ۸۰ (I3) و ۶۰ (I4) درصد نیاز آبیاری کامل روی رقم CHASE ذرت شیرین، انجام شد. بذرها در فواصل ۳۰ سانتی‌متری در یک ردیف و در فواصل ۲۵ سانتی‌متری از لوله‌های آبد، کاشته شد. آبیاری با سیستم آبیاری قطره‌ای نواری زیرسطحی با قطره‌چکان‌هایی با دبی دو لیتر بر ساعت انجام شد. مقدار کود مصرفی در تمامی تیمارها یکسان و براساس نتایج آزمایشگاهی خاک برای پیش‌بینی حداکثر عملکرد برنامه‌ریزی شد. مبارزه با علف‌های هرز پهن‌برگ و باریک‌برگ با وجین دستی انجام شد و از سم استفاده نشد. از نظر آفات و بیماری‌ها در طول دوره رشد مراقبت‌های لازم انجام شد و آفات یا بیماری خاصی مشاهده نشد. شکل (۲) وضعیت طرح آزمایشی مزرعه‌ای را نشان می‌دهد.

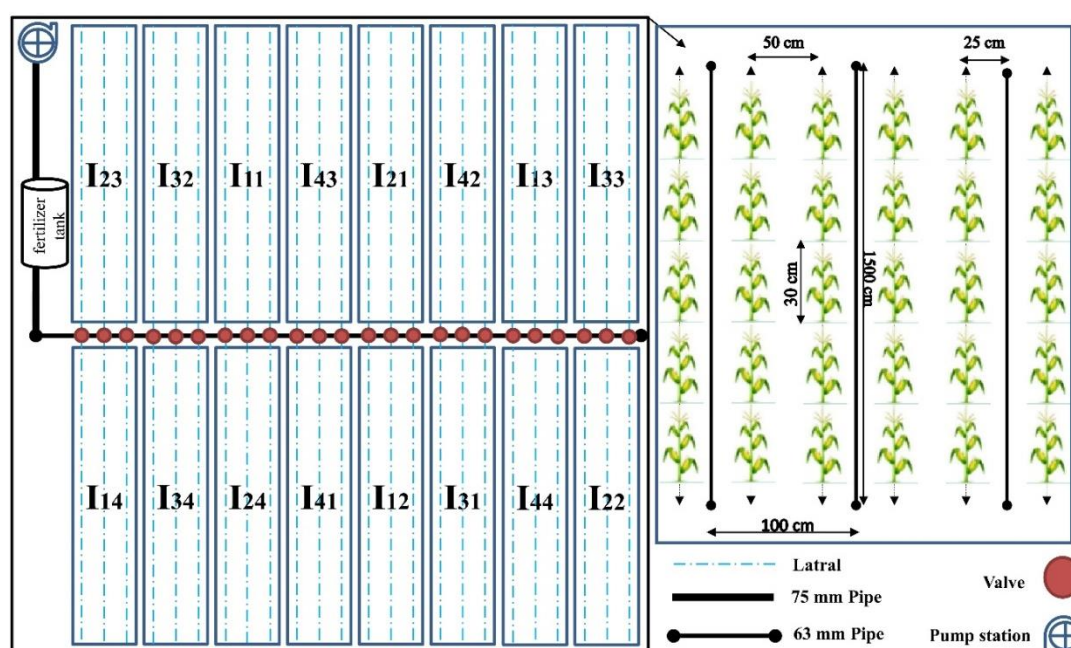


Figure 2. Status of pilot project, irrigation system and experimental treatments

در این پژوهش از تبخیر- تعرق بالقوه ذرت شیرین برای تعیین و مدت‌زمان آبیاری در هر دوره آبیاری استفاده شد. در این فرایند، مقدار آب آبیاری در هر رویداد آبیاری براساس تبخیر- تعرق پتانسیل تجمعی روزانه گیاه محاسبه شد. تیمارهای آبیاری براساس تأمین ۸۰، ۶۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبیاری کامل اعمال شد. با محاسبه تبخیر- تعرق بالقوه گیاه در فاصله بین دو آبیاری، مدت زمان آبیاری براساس حجم و دبی قطره‌چکان‌ها تعیین شد. به دلیل ناچیز بودن بارندگی در فصل کشت، میزان بارندگی مؤثر در محاسبه میزان نیازآبی در نظر گرفته نشد. این تحقیق با برنامه آبیاری منظم به صورت دو بار در هفته (با دور آبیاری سه و چهار روز) انجام شد و به منظور تعیین عمق موردنیاز آبیاری، از مقادیر تبخیر- تعرق گیاه استفاده شد. جهت محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه (ET_p)، از روش ضریب گیاه دوجزئی طبق رابطه (۱) استفاده شد (Allen et al., 1998):

$$ET_p = E_p + T_p = K_{cb}ET_0 + K_eET_0 = (K_{cb} + K_e) ET_0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، E_p و T_p به ترتیب تبخیر پتانسیل از سطح خاک و تعرق پتانسیل توسط گیاه ($mm \ day^{-1}$)، ET_0 تبخیر- تعرق

گیاه مرجع (mm day^{-1}) K_{cb} ضریب گیاهی پایه (-) و K_e ضریب تبخیر از خاک (-) است. در این پژوهش به منظور محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_0) از روش فائو پنمن - مونتیث استفاده شد (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) \gamma C_n \frac{U_{21}}{(T_{mean} + 273)} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن، ET_0 تبخیر- تعرق مرجع (mm day^{-1})، R_n تابش خالص ورودی به گیاه ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)، G شار گرمای خاک ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)، T_{mean} میانگین روزانه دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$)، e_s فشار بخار اشباع (KPa)، e_a فشار بخار واقعی (KPa)، $es-ea$ کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (m s^{-1})، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($\text{KPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$)، $C_d = 0.34$ ضریب باد برای گیاه مرجع (s m^{-1}) هستند. ضریب گیاهی دوجزئی شامل دو جز تبخیر- تعرق است که باتوجه به این که در این مطالعه آبیاری به صورت زیرسطحی بود از بخش تبخیر صرف نظر گردید.

۴.۲. اندازه‌گیری داده‌های گیاهی

اولین نمونه‌برداری برای تعیین شاخص سطح برگ، وزن خشک اندام‌ها و ارتفاع گیاه در مرحله پنج‌برگی و سپس به صورت هفتگی تا زمان برداشت انجام شد. نمونه‌های برداشت‌شده در مراحل مختلف فنولوژیکی در آزمایشگاه جداگانه توزین و وزن تر آن‌ها ثبت شد. به منظور تسریع در خشک‌شدن نمونه‌ها پس از برداشت و جداسازی اندام‌ها، نمونه‌ها به مدت ۳۶ تا ۴۸ ساعت در محیط باز و در تماس با هوا، نگهداری شدند تا درصد رطوبت آن‌ها به مقدار زیادی کاهش یابد (این کار برای جلوگیری از پوسیدگی نمونه‌ها در آون انجام شد)، سپس تمامی اندام‌ها (برگ، ساقه، بلال و دانه) به طور جداگانه و در آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند تا وزن خشک نمونه‌ها ثابت شود. بعد از خشک‌شدن، نمونه‌ها مجدداً توزین شدند. شاخص سطح برگ طی انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی با استفاده از عکس‌برداری سطوح برگ‌ها و به وسیله نرم‌افزار کامپیوتری Digimizer اندازه‌گیری شد. اولین نمونه‌برداری جهت تعیین شاخص سطح برگ در مرحله پنج‌برگی و پس از ۳۷ روز بعد از کاشت، انجام شد.

۵.۲. مدل شبیه‌سازی رشد گیاه

ماژول DSSAT-CERES-Maize، بخشی از DSSAT نسخه ۴.۸.۲ است که پارامترهای مختلفی از جمله عملکرد محصول، تجمع زیست‌توده، شاخص سطح برگ و ارتفاع گیاه را در طول فصل رشد و روز برداشت شبیه‌سازی می‌کند. این مدل از معادلات ریاضی برای توصیف فرایندهای تبدیل کربن، آب و مواد مغذی خاک به صورت روزانه استفاده می‌کند و تغییرات زمانی در جذب مواد مغذی، مصرف آب، رشد و عملکرد محصول را پیش‌بینی می‌کند (Hoogenboom et al., 2019; Jones et al., 2003). مدل CERES-Maize براساس شاخص درجه روز رشد (GDD)^۴، رشدونمو ذرت را شبیه‌سازی می‌کند. تعداد GDD موردنیاز برای عبور از یک مرحله رشد به مرحله دیگر با استفاده از ضرایب رقم خاص محصول که توسط کاربر وارد شده یا با استفاده از داده‌های تجربی توسط مدل محاسبه می‌شود، تعریف می‌شود. هر رقم محصول در شرایط زراعی متفاوتی کشت می‌شود و رشدونمو آن تحت‌تأثیر آن شرایط قرار می‌گیرد. برای این که مدل شبیه‌سازی‌شده اثرات شرایط زراعی را از بنیه ژنتیکی آن رقم تفکیک نماید لازم است، براساس ضرایب مشخصی واسنجی شود. واسنجی مدل عبارت است از برآورد تعداد مشخصی ضرایب و پارامترهای ویژه رقم موردنظر به گونه‌ای که بیش‌ترین انطباق بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در رشد و عملکرد به وجود آید. واسنجی مدل نیاز به در اختیارداشتن داده‌های دقیقی از مراحل رشدونموی یا فنولوژیک رقم، هم‌چنین عملکرد و توزیع ماده خشک طی دوره‌های رشد رقم دارد. بسته نرم‌افزاری DSSAT از نسخه ۴/۵ به بعد یک برنامه جانبی

برای برآورد ضرایب ژنتیکی ارقام زراعی با استفاده از این روش ارائه کرده است که به اختصار GLUE خوانده می شود (Hoogenboom *et al.*, 2010). نرم افزار محاسبه گر ضرایب ژنتیکی GenCale یکی دیگر از زیر برنامه های DSSAT است که با روش تجزیه حساسیت عمومی ضرایب ژنتیکی را برآورد می نماید (Anothai *et al.*, 2013). در این پژوهش برای کالیبره کردن ضرایب ژنتیکی مدل CERES-Maize از ابزار تخمین گر ضریب احتمال تعمیم یافته (GLUE) استفاده شد.

۲.۶. شاخص های خطا

برای بررسی کارایی DSSAT در پیش بینی شاخص های عملکرد و پارامترهای رشد دینامیک و مقایسه آن با داده های اندازه گیری شده از معیارهای خطا شامل معیارهای میانگین خطای مطلق (MAE)^۵، ضریب باقیمانده (CRM)^۶، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)^۷ استفاده شد (Willmott, 1982).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Xm - Xp| \quad \text{رابطه ۳}$$

$$NRMSE = \frac{1}{n} \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Xm - Xp)^2} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n Xp}{\sum_{i=1}^n Xm} \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، Xp مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، Xm مقادیر اندازه گیری شده است. $\bar{X}$ میانگین پارامترها و N تعداد اندازه گیری ها می باشند. مقادیر NRMSE در بازه های ۱۰-، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ درصد به ترتیب نشانگر وضعیت ایده آل، مناسب و متوسط مدل در پیش بینی و بیش تر از ۳۰ درصد نشانگر عدم کارا بودن مدل می باشد (Anothai *et al.*, 2013; Singh *et al.*, 2008). آماره CRM نشانگر تمایل مدل (در حالت کلی) برای بیش برآورد (مقادیر منفی) و یا کم برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه گیری ها می باشد (Moriassi *et al.*, 2007).

۳. نتایج و بحث

۳.۱. شاخص سطح برگ و ارتفاع گیاه

براساس نتایج مشاهده شد، مقادیر شاخص سطح برگ شبیه سازی شده و مشاهده شده با کاهش مقدار آب آبیاری، کاهش می یابد (جدول ۳). مقادیر شاخص خطای NRMSE در شبیه سازی شاخص سطح برگ در سه تیمار I_1 ، I_2 و I_3 در محدوده ایده آل قرار گرفتند. کم ترین مقدار این خطا در تیمار آبیاری کامل (مرحله واسنجی) و بیش ترین مقدار آن در تیمار ۴۰ درصد کم آبیاری (مرحله اعتباریابی)، به دست آمد. براساس نتایج در هر دو مرحله واسنجی و اعتباریابی اعمال ۲۰ درصد کم آبیاری ۰/۵۲ و ۰/۷۱ از شاخص سطح برگ حداکثر را کاهش داد. مدل عملکرد خوبی را در شبیه سازی تیمار ۶۰ درصد نیاز آبیاری کامل (I_4)، در مرحله اعتباریابی نداشت. در حالت کلی مدل در شبیه سازی LAI، تیمارهای با تنش خشکی زیاد در هر دو مرحله، خوب عمل نکرد و در تیمارهای کم آبیاری مقادیر LAI را بیش تر از مقادیر اندازه گیری شده، شبیه سازی کرد (برعکس تیمار آبیاری کامل و ۲۰ درصد بیش آبیاری). Mubeen *et al.* (2013) و Panda *et al.* (2010) نیز بیان کردند که مدل CERES-Maize شاخص سطح برگ را در تیمارهای کم آبیاری با خطای زیادی شبیه سازی می کند. برخی از پژوهشگران نیز پیشنهاد کردند در معادلاتی که توسعه و زوال برگ را در شرایط خشکی شبیه سازی می کنند تجدیدنظر شود (Carberry, 1989; Hodges, 1987; Xie *et al.*, 2001; Soler *et al.*, 2007). براساس نتایج، مدل CERES-Maize شبیه سازی ارتفاع گیاه را در هر دو

مرحله واسنجی و اعتباریابی و در تمامی تیمارهای آبیاری با دقت مطلوبی شبیه‌سازی کرد ($NRMSE < 20\%$). کم‌ترین مقدار Canopy height در هر دو مرحله آزمایش، در تیمار ۴۰ درصد کم‌آبیاری (I_4) و بیش‌ترین مقدار آن در تیمار آبیاری کامل (I_2)، به‌دست آمد. در واقع مدل مقدار Canopy height را در همه تیمارها کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده شبیه‌سازی کرد. با توجه به واسنجی مدل با پارامترهای عملکرد محصول ذرت شیرین و نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که مدل و معادلات به‌کاررفته در آن برای شبیه‌سازی Canopy height به‌خوبی عمل نمی‌کند. در واقع خطای کم محاسبه‌شده برای تیمار I_4 نسبت به تیمار I_2 مربوط به ضعف مدل در شبیه‌سازی Canopy height است.

Table 3. Calibration and Validation of the Ceres_Maize model for the leaf area index of sweet corn in different irrigation regimes in Urmia weather conditions

Calibration						Validation				
Treatment	Attribute values		Statistical indicators			Attribute values		Statistical indicators		
Irrigation level	Prediction	Measurement	MAE	CRM	NRMSE	Prediction	Measurement	MAE	CRM	NRMSE
Leaf area index										
I1	5.17	5.31	0.21	0.03	3.9	5.42	5.69	0.26	0.07	4.59
I2	5.06	5.11	0.04	0.008	0.84	5.31	5.42	0.1	0.01	1.83
I3	4.91	4.59	0.32	-0.07	7.11	5.15	4.71	0.44	-0.09	9.49
I4	4.65	3.96	0.69	-0.17	17.51	4.88	3.91	0.97	-0.25	24.95
Canopy height										
	(metre)	(metre)								
I1	1.6	1.9	0.3	0.15	15.78	1.65	1.93	0.28	0.14	14.61
I2	1.54	1.83	0.3	0.16	16.52	1.58	1.91	0.32	0.17	17.16
I3	1.49	1.71	0.21	0.12	12.66	1.53	1.73	0.2	0.11	11.37
I4	1.42	1.51	0.09	0.05	5.67	1.47	1.53	0.06	0.04	4.28

باتوجه به نتایج تغییرات مقادیر LAI^A در تمامی تیمارهای آزمایشی از یک مدل لجستیک تبعیت می‌کند، به‌طوری‌که در اوایل فصل زراعی روند صعودی داشته و در ادامه در اواخر سن گیاه به‌دلیل پیری و ریزش برگ‌ها از قسمت‌های پایین ساقه گیاه، روند نزولی را طی می‌کند. در تمامی تیمارها، بیش‌ترین مقدار شاخص سطح برگ در مرحله بلوغ و تاسل‌دهی به‌دست آمد و بعد از مرحله گرده‌افشانی، شروع به کاهش کرد (شکل ۳). نتایج Ma et al. (2007) نیز با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. تیمار I_2 (برابر با نیاز آبی) بیش‌ترین تطابق را بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده، دارد. در تیمار I_4 ، چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله اعتباریابی مدل مقادیر روند شاخص سطح برگ را بیش‌تر از مقادیر مشاهداتی شبیه‌سازی کرد. پژوهش‌گران زیادی گزارش نمودند که توانایی مدل CERES-Maize در رطوبت ناکافی خاک (تیمارهای کم‌آبیاری) در شبیه‌سازی سطح برگ ضعیف است. Dejonge (2011)، Dogan (2006) و Saseendran et al. (2005)، نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. براساس نتایج، در تمامی تیمارهای آزمایش در ابتدای فصل کشت مدل ارتفاع پوشش سبز گیاه را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد، اما با افزایش روزهای بعد از کاشت مقادیر این صفت را با خطای بیش‌تری پیش‌بینی کرد، به‌طوری‌که در تیمار I_1 و I_2 زودتر به مقدار ثابتی رسید. هم‌چنین مدل در سطوح کم‌آبیاری حداکثر ارتفاع را با دقت خوبی برآورد کرده است. در تمامی تیمارهای آبیاری و در هر دو مرحله واسنجی و اعتباریابی شیب خط رسیدن به حداکثر مقدار ارتفاع گیاه با مقدار بیش‌تری نسبت به مقادیر مشاهداتی، شبیه‌سازی شد. به‌نظر می‌رسد تأثیر مقادیر کم‌آبیاری بین تیمارهای آزمایشی توسط مدل نسبت به داده‌های اندازه‌گیری‌شده کم‌تر بوده و مدل در مورد این صفت نتوانسته اختلافی بین مقادیر سطوح مختلف، اعمال کند. علت این امر می‌تواند مربوط به معادلات به‌کاررفته برای شبیه‌سازی ارتفاع گیاه توسط مدل باشد. در حالت کلی مدل تیمار ۲۰ درصد کم‌آبیاری را در مرحله واسنجی نسبت به سایر سطوح بهتر شبیه‌سازی کرد و تیمار ۴۰ درصد کم‌آبیاری را در مرحله اعتباریابی با خطای بیش‌تری نسبت به سایر تیمارها پیش‌بینی کرد.

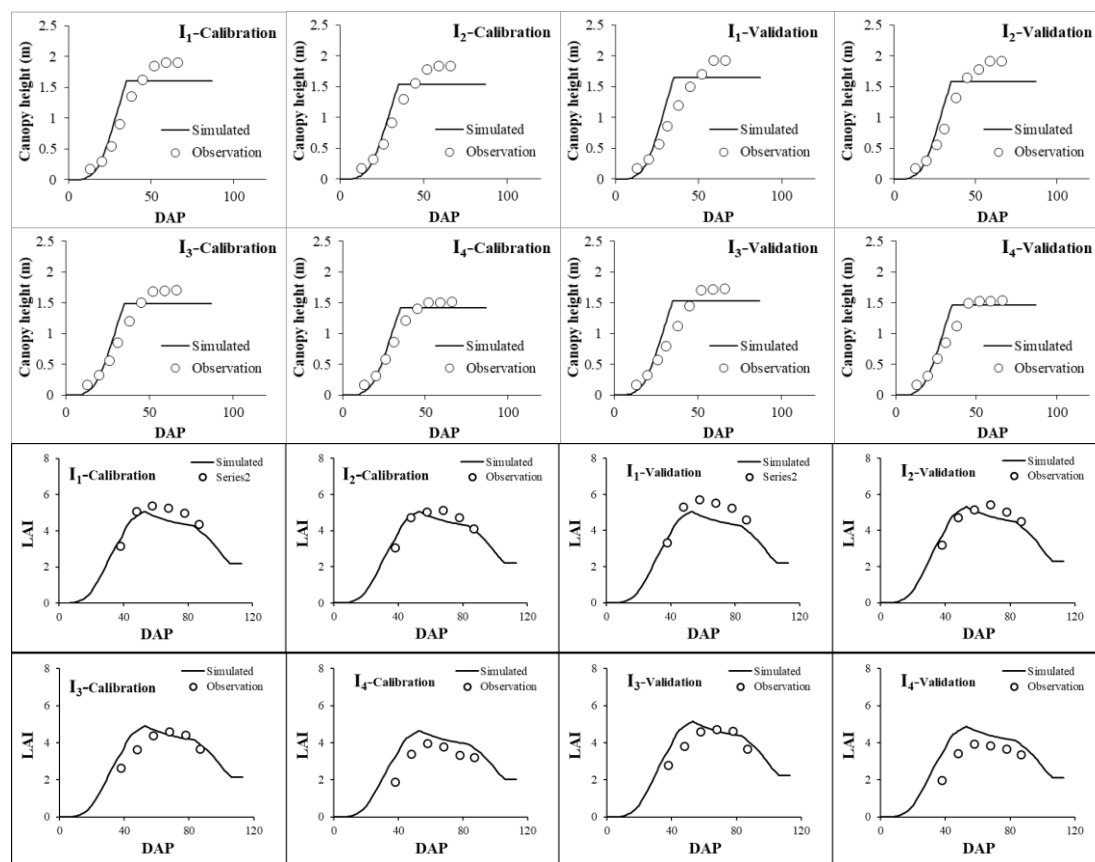


Figure 3. Calibration and validation of the measured and predicted values by the Ceres_Mazie model for the growth trend of sweet corn leaf area index (LAI) and canopy height at different irrigation levels for day after planting (DAP)

۲.۳. زیست توده هوایی ذرت شیرین

براساس نتایج، مقادیر داده‌های اندازه‌گیری، زیست توده هوایی با کاهش سطح آبیاری، کاهش می‌یابد. نتایج مقادیر پیش‌بینی توسط مدل نیز حاکی از کاهش مقادیر این صفت با کاهش سطح آبیاری است، اما نسبت کاهش آن در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده، کمتر است. فتوسنتز و در کل تولید زیست توده گیاه به میزان آب قابل دسترس گیاه بستگی دارد و با افزایش میزان آبیاری، این عملکرد افزایش می‌یابد. مقادیر خطای CRM نشان داده که در تمامی رژیم‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی، مدل با بیش‌برآورد مقادیر زیست توده ذرت شیرین را شبیه‌سازی می‌کند (جدول ۴). به نظر می‌رسد علت بیش برآورد مدل در مقابل داده‌های مزرعه‌ای، مربوط به شبیه‌سازی تاریخ‌های فیزیولوژیکی گیاه است، به طوری که مدل با اختلاف حداقل دو روز، فاصله زمانی روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه را شبیه‌سازی کرد و این اختلاف می‌تواند سبب افزایش شاخص‌های اجزای عملکرد گیاه توسط مدل شود. در حالت کلی حداکثر اختلاف میانگین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در هر مرحله واسنجی، مربوط به تیمار ۴۰ درصد کم‌آبیاری و برابر با ۴/۸۲ تن بر هکتار به دست آمد. Dejonge (2011) بیان نمود که عدم توجه به دمای برگ و مقاومت روزنه‌ای در تیمارهای مختلف تحت تنش از دلایلی هستند که باعث کاهش دقت مدل شبیه‌سازی میزان تبخیر-تعرق می‌شود و همین امر باعث می‌گردد تا میزان زیست توده شبیه‌سازی شده افزایش یابد. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داد در مرحله واسنجی و اعتباریابی مدل توانسته است مقادیر وزن قسمت هوایی را در تیمارهای I_1 ، I_2 و I_3 با دقت خوبی شبیه‌سازی کند ($NRMSE < 20\%$). در تیمار ۶۰

درصد نیاز آبیاری کامل مدل با خطای زیادی شبه‌سازی این شاخص را انجام داد، به‌طوری که NRMSE در تیمار I₄ در مراحل واسنجی و اعتباریابی به‌ترتیب ۲۳/۸ و ۲۶/۰۷ به‌دست آمد.

Table 4. Calibration and validation of the Ceres_Maize model for the above-ground biomass of sweet corn in different irrigation regimes in the climatic conditions of Urmia

Calibration											Validation				
Treatment		Attribute values		Statistical indicators			Attribute values		Statistical indicators						
Irrigation level	Prediction (Mg/Ha)	Measurement (Mg/Ha)	MAE	CRM	NRMSE	Prediction	Measurement	MAE	CRM	NRMSE					
I1	29.49	27.33	2.15	-0.07	7.89	30.67	28.94	1.73	-0.05	5.98					
I2	28.6	27.12	1.48	-0.05	5.48	29.75	28.43	1.32	-0.46	4.64					
I3	26.54	23.65	2.88	-0.12	12.2	27.6	25.02	2.58	-0.1	10.33					
I4	25.06	20.24	4.82	-0.23	23.8	26.07	21.26	4.81	-0.22	26.07					

شکل (۴) روند تجمع زیست‌توده شبه‌سازی‌شده و مشاهداتی را در سطوح مختلف آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در مراحل واسنجی و اعتباریابی نشان می‌دهد. با توجه به نتایج در تمامی تیمارهای آزمایشی در ابتدای فصل کشت به‌علت اعمال‌نشدن تنش‌های آبیاری (تیمارهای آبیاری بعد از مرحله چهاربرگی و استقرار گیاه اعمال شدند)، مقادیر مشاهداتی و شبه‌سازی‌شده بادقت بالایی برآورد شده‌اند. با افزایش سن گیاه، مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل CERES-Maize در تیمارهای مختلف، تغییرات متفاوتی را نشان داد، به‌طوری که بهترین شبه‌سازی از لحاظ روند رشد زیست‌توده در تیمار I₂ در مرحله واسنجی مشاهده شده است. علت این امر را می‌توان به وضعیت مناسب رشد گیاه و افزایش شاخص سطح برگ در این تیمار نسبت داد. زمان رسیدن به حداکثر وزن زیست‌توده در تیمارهای آبیاری متفاوت بود، به‌طوری که در تیمارهای I₁ و I₂ مدل توانست در زمان‌های نزدیک‌تری نسبت به تیمارهای I₃ و I₄ مقادیر زیست‌توده هوایی ذرت شیرین را شبه‌سازی کند. علت این اختلاف را می‌توان به تخمین با اختلاف مراحل رسیدن به بلوغ و رسیدگی فیزیولوژیکی در مدل CERES-Maize نسبت داد. در حالت کلی در تمامی تیمارهای مورد آزمایش و در هر دو مرحله واسنجی و اعتباریابی در مراحل ابتدایی رشد شبه‌سازی بادقت بالایی انجام گرفت، اما با افزایش روزهای بعد از کاشت در تمامی تیمارها مقادیر پیش‌بینی‌شده با خطای بیش‌تری نسبت به مقادیر اندازه‌گیری‌شده شبه‌سازی شدند. این وضعیت در تیمارهای با تنش‌های آبیاری شدیدتر، بدتر بود.

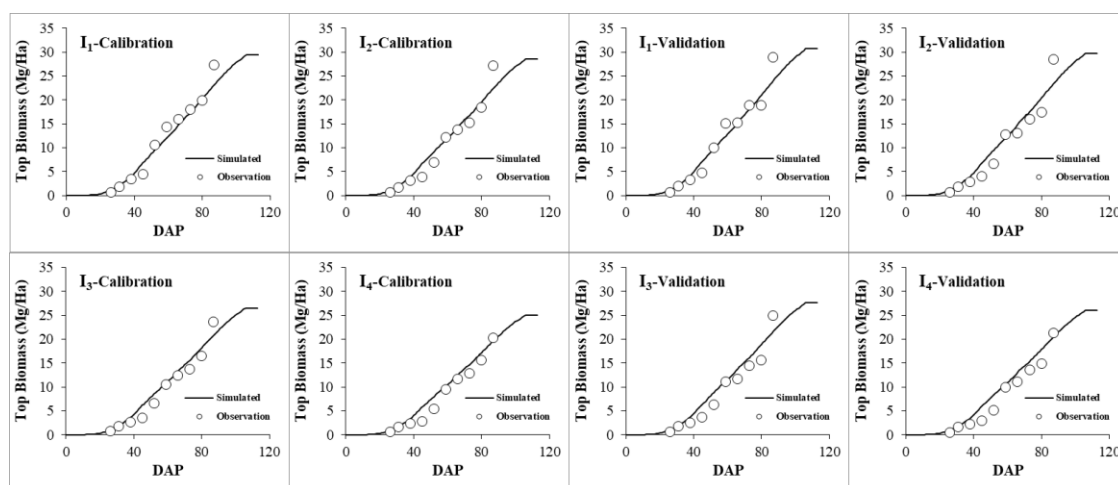


Figure 4. calibration and validation of measured and predicted values by Ceres_Maize model for the growth trend of the above-ground biomass of sweet corn at different irrigation levels for day after planting (DAP)

۳.۳. عملکرد بلال

براساس نتایج، افزایش تنش خشکی در مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی، مقادیر صفت عملکرد ذرت شیرین کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، بین آب مصرفی ذرت شیرین و عملکرد دانه رابطه مستقیم وجود دارد، به طوری که با کاهش آب آبیاری، مقادیر عملکرد دانه کاهش می‌یابد (جدول ۵). بررسی منابع نشان داد عملکرد ذرت شیرین در سطوح مختلف کم‌آبیاری، کاهش قابل‌ملاحظه‌ای ندارد. Stone et al. (2001) و Farsiani (2011) دریافتند ذرت شیرین حساسیت زیادی به کمبود آب ندارد و این محصول می‌تواند سطوح متوسط تنش خشکی را بدون کاهش قابل‌توجه در عملکرد، تحمل کند. مقادیر خطای NRMSE نشان داد که مدل در تیمار آبیاری کامل چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله اعتباریابی توانست عملکرد دانه را با دقت بسیار بالایی شبیه‌سازی کند به طوری که این خطا در مرحله اعتباریابی ۱/۶۱ به دست آمد. در رژیم ۴۰ درصد کم‌آبیاری مدل با خطای زیادی شبیه‌سازی عملکرد دانه را انجام داد، به طوری که مقادیر NRMSE در مرحله اعتباریابی ۲۷/۰۳ به دست آمد. شاخص خطای CRM نشان داد مدل در تیمار I₁، عملکرد دانه را با کم‌برآورد نسبت به داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی کرد اما در سایر تیمارهای آزمایشی (کم‌آبیاری‌ها)، مقادیر به صورت بیش‌برآورد محاسبه شد. Yang (2008) و Mubeen et al. (2013) نیز گزارش نمودند که مدل CERES-Maize تحت شرایط کم‌آبیاری عملکرد دانه را بیش‌تر از مقدار مشاهده‌شده شبیه‌سازی می‌کند. در حالت کلی حداکثر اختلاف میانگین عملکرد دانه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در تیمار I₄ و در مرحله واسنجی با مقدار ۲/۶۹ تن بر هکتار و حداقل خطای MAE در تیمار I₂ و در مرحله واسنجی با ۰/۲۶ تن بر هکتار به دست آمد. مطالعات پژوهش‌های مختلف نشان داد ذرت شیرین در تمامی مراحل رشد خود می‌تواند سطوح کم تنش خشکی را بدون کاهش قابل‌توجه در عملکرد خود تحمل کند (Stone et al., 2001). Oktem (2008) بیان کرد که با تنش کم‌آبی ۱۰ درصدی، عملکرد دانه ذرت شیرین در دشت حران ترکیه قابل‌قبول است. در مقابل پژوهش‌هایی نشان دادند که تنش خشکی در ذرت شیرین موجب کاهش عملکرد محصول می‌شود. Ertick and Kar (2013) گزارش کردند، کمبود آب تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد بلال تازه ذرت دارد که منجر به کاهش عملکرد بلال در سطوح کم‌آبیاری می‌شود. هم‌چنین نتایج پژوهش‌های Van Donk and Shaver (2016) نیز حاکی از این است که دلیل اصلی کاهش عملکرد در ذرت می‌تواند به علت کم‌آبیاری در مقایسه با آبیاری کامل باشد. پژوهش‌گران کاهش عملکرد دانه ذرت در نتیجه تنش کم‌آبی در مرحله‌های زایشی را به کاهش کارایی فتوسنتز و کوتاه‌شدن طول دوره رشد نسبت داده‌اند (Earl and Davis, 2003). برخی از پژوهش‌گران بر اهمیت تأمین آب کافی در مرحله رشد رویشی ذرت تأکید کرده‌اند، به اعتقاد آن‌ها نقش آب در مرحله رشد رویشی و قبل از گرده‌افشانی گرچه تأثیر کم‌تری بر عملکرد نهایی نسبت به کمبود آب در مرحله گلدهی و پرشدن دانه‌ها دارد، اما از این نظر که بر گسترش برگ و توسعه ساقه تأثیر گذاشته و میزان تجمع مواد در این اندام را به شدت تغییر می‌دهد دارای اهمیت خاصی است (Lobell et al., 2014). Scot and Aboudrare (2009) بر این باورند که در روش‌های کم‌آبیاری ذرت، افت عملکرد محصول بسیار کم‌تر از میزان آب صرفه‌جویی شده است. Ertick and Kar (2013) با بررسی سطوح آبیاری بر عملکرد ذرت شیرین بیان کردند که بیش‌ترین عملکرد بلال در تیمار آبیاری مطلوب و کم‌ترین عملکرد بلال در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب معادل ۱۴/۸ و ۱۱/۵ تن در هکتار به دست آمد. Lamm (2005) اعلام کرد عملکرد ذرت با آبیاری به میزان ۸۰ درصد نیاز آبی گیاه با استفاده از سیستم قطره‌ای زیرسطحی، تفاوت معنی‌داری با آبیاری کامل و بیش‌آبیاری ندارد. Vories et al. (2009) دو سطح آبیاری ۱۰۰ و ۶۰ درصد تبخیر- تعرق روزانه گیاه ذرت و یک تیمار بدون آبیاری را در نواحی جنوبی آمریکا با اقلیم مرطوب

بررسی کردند. آن‌ها پیشنهاد کردند که آبیاری به میزان ۶۰ درصد تبخیر- تعرق روزانه با سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی می‌تواند برای دستیابی به حداکثر محصول کافی باشد. He et al. (2011) گزارش کردند مدل CERES-Maize به خوبی می‌تواند عملکرد و رشد ذرت شیرین را در شرایط مختلف مدیریتی، شبیه‌سازی کند.

Table 5. Calibration and validation of Ceres_Maize model for sweet corn grain yield in different irrigation regimes in Urmia weather conditions

Grain yield under different weather conditions										
Calibration						Validation				
Treatment	Attribute values		Statistical indicators			Attribute values		Statistical indicators		
Irrigation level	Prediction (Ton/Ha)	Measurement (Ton/Ha)	MAE	CRM	NRMSE	Prediction	Measurement	MAE	CRM	NRMSE
I1	16.87	17.37	0.5	0.02	2.87	17.03	17.89	0.86	0.04	4.8
I2	16.18	15.62	0.56	-0.03	3.58	16.34	16.08	0.26	-0.01	1.61
I3	17.76	13.74	1.02	-0.07	7.42	14.9	14.13	0.77	-0.05	5.44
I4	11.92	9.23	2.69	-0.29	29.14	12.03	9.47	2.56	-0.27	27.03

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پرکردن شکاف پژوهش‌های موجود برای ارزیابی سیستم قطره‌ای زیرسطحی برای محصول ذرت شیرین در شمال غربی ایران با استفاده از مدل CERES-Maize انجام شد. این مطالعه نشان داد که مدل از نظر شبیه‌سازی تأثیر تنش‌های آبیاری شدید بر رشدونمو محصول ذرت شیرین نیاز به بهبود دارد. نتایج ارزیابی مدل CERES-Maize برای بررسی روند رشد دینامیکی شاخص سطح برگ، ارتفاع گیاه و زیست‌توده قسمت هوایی ذرت شیرین نشان داد که در مراحل واسنجی و اعتباریابی روند رشد ماده خشک گیاه در شرایطی که سن گیاه کم باشد با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند و با افزایش روزهای بعد از کاشت و اعمال تنش‌های آبی شدیدتر، با خطای زیادی روبه‌رو می‌شود و در تیمارهای کم‌آبیاری مقادیر اندازه‌گیری‌شده سریع‌تر به مقادیر نهایی خود نزدیک می‌شوند. این شرایط برای صفت ارتفاع پوشش سبز گیاه نیز برقرار است. این یافته‌ها می‌تواند برای آگاهی‌بخشی کشاورزان و مدیران بخش کشاورزی برای افزایش صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری مفید باشد. به‌طورکلی، این مدل در تصمیم‌گیری و ارزیابی عملکرد محصول، قبل از کاشت می‌تواند مورد استفاده سیاست‌گذاران بخش کشاورزی قرار گیرد. علاوه بر این، پژوهش حاضر نشان داد که مدل CERES-Maize می‌تواند به‌طور مؤثر برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده نهایی محصول ذرت شیرین مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده از روش کم‌آبیاری به‌عنوان یک استراتژی مؤثر جهت صرفه‌جویی آب می‌تواند مورد استفاده مدیران و سیاست‌گذاران بخش آبیاری قرار گیرد.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Subsurface Drip Irrigation
2. Deficit irrigation
3. Decision Support System for Agrotechnology Transfer
4. Growing degree days
5. Mean absolute error
6. Coefficient of Residual Mass
7. Normalized Root Mean Square Error
8. Leaf area index

۶. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abi Saab, M.T., Todorovic, M., & Albrizio, R. (2015). Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barley growth and yield under different water and nitrogen regimes. Does calibration year influence the performance of crop growth models? *Agric. Water Manag.*, 147, 21-33.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage*. paper 56.
- Anothai, J., Soler, C.M.T., Green, A., Trout, T.J., & Hoogenboom, G. (2013). Evaluation of two evapotranspiration approaches simulated with the CSM-CERES-Maize model under different irrigation strategies and the impact on maize growth, development and soil moisture content for semi-arid conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 176, 64-76.
- ASTM D7263-09. (2009). Standard test methods for laboratory determination of density unit weight of soil specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Attia, A., Rajan, N., Xue, Q., Nair, S., Ibrahim, A., & Hays, D. (2016). Application of DSSAT- CERES-Wheat model to simulate winter wheat response to irrigation management in the Texas High Plains. *Agric. Water Manag.*, 165, 50-60.
- Bayabil, H.K., Teshome, F.T., Guzman, S.M., & Schaffer, B. (2023). Evapotranspiration Rates of Three Sweet Corn Cultivars under Different Irrigation Levels. *HortTechnology*, 33, 16-26.
- Bogena, H. R., Herbst, M., Huisman, J. A., Rosenbaum, U., Weuthen, A., & Vereecken, H. (2010). Potential of wireless sensor networks for measuring soil water content variability. *Vadose Zone Journal*, 9(4), 1002-1013.
- Bray, R.H., & Kurtz, L.T. (1945). Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil. *Soil Soc*, 59, 39-45.
- Carberry, P.R., Muchow, C., & Mc Cown, R.L. (1989). Testing the CERES- Maize simulation model in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*, 20, 297-315.
- Chen, H., & Yada, R. (2011). Nanotechnologies in agriculture: New tools for sustainable development. *Trends Food Sci. Technol. Agric. -Food Nano Appl.: Ensuring Soc.*
- DeJonge, K.C., Andales, A.A., Ascough II, J.C., & Hansen, N.C. (2011). Modeling of full and limited irrigation scenarios for corn in a semiarid environment. *Trans. ASABE*, 54 (2), 481-492.
- DeJonge, K.C., Ascough, J.C., Ahmadi, M., Andales, A.A., & Arabi, M. (2012). Global sensitivity and uncertainty analysis of a dynamic agroecosystem model under different irrigation treatments. *Ecol. Model*, 231, 113-125.
- Di Paola, A., Valentini, R., & Santini, M. (2016). An overview of available crop growth and yield models for studies and assessments in agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(3), 709-714.
- Ditta, A., Arshad, M., & Ibrahim, M. (2015). Nanoparticles in sustainable agricultural crop production: applications and perspectives. In: Siddiqui, M.H., Al-Whaibi, M.H., Mohammad, F. (Eds.) , *Nanotechnology and Plant Sciences: Nanoparticles and Their Impact on Plants. Springer International Publishing, Cham*, pp. 55-75.
- Dogan, E., Clark, G.A., Rogers, D.H., Martin, V., & Vanderlip, R.L. (2006). Onfarm scheduling studies and CERES-Maize simulation of irrigated corn. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(4), 509-516.
- Earl, H.J., & Davis, R.F. (2003). Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation, use efficiency and yield of maize. *Agronomy Journal*, 95, 688-696.
- Ebrahimi, M., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Varshavian, V., Azad, N., & Bahmani, O. (2022). Dynamic indices and yield of sweet corn under subsurface drip irrigation system. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29(4), 115-123. doi: 10.22069/jwsc.2023.20734.3590
- Edgerton, M.D. (2009). Increasing crop productivity to meet global needs for feed, food, and fuel. *Plant Physiol.*, 149, 7-13.
- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K & Prasanna, B.M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Sec.*, 14, 1295-1319.

- Ertick, A., & Kar, B. (2013). Yield and quality of sweet corn under deficit irrigation, *Agriculture Water Management*, 129, 138-144.
- Farsiani, A., Ghobadi, M. E., & Jalali-Honarmand, S. (2011). The effect of water deficit and sowing date on yield components and seed sugar contents of sweet corn (*Zea mays* L.). *African Journal of Agricultural Research*, 6(26), 5769-5774. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1242>.
- Fereres, E., & Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of experimental botany*, 58(2), 147-159.
- Getachew, F., Bayabil, H. K., Hoogenboom, G., Teshome, F. T., & Zewdu, E. (2021). Irrigation and shifting planting date as climate change adaptation strategies for sorghum. *Agricultural Water Management*, 255, 106988.
- Gul, F., Ahmed, I., Ashfaq, M., Jan, D., Fahad, S., Li, X., ... & Shah, S. A. (2020). Use of crop growth model to simulate the impact of climate change on yield of various wheat cultivars under different agro-environmental conditions in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(3), 112.
- Gunawat, A., Sharma, D., Sharma, A., & Dubey, S. K. (2022). Assessment of climate change impact and potential adaptation measures on wheat yield using the DSSAT model in the semi-arid environment. *Natural Hazards*, 111(2), 2077-2096.
- Hansen, J. W. (2005). Integrating seasonal climate prediction and agricultural models for insights into agricultural practice. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2037-2047.
- He, J., Dukes, M. D., Hochmuth, G. J., Jones, J. W., & Graham, W. D. (2011). Evaluation of sweet corn yield and nitrogen leaching with CERES-Maize considering input parameter uncertainties. *Transactions of the ASABE*, 54(4), 1257-1268.
- Hessari, B., & Zeynalzadeh, K. (2020). Investigation on human activities effects on water resources trend of Urmia Plain. *Watershed Engineering and Management*, 12(2), 415-427. doi: 10.22092/ijwmse.2019.124426.1580
- Hodges, T., Botner, D., Sakamoto, C., & Haug, J.H. (1987). Using the CERES-Maize model to estimate production for the U.S. Cornbelt. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40, 293-303.
- Hokam, E. M., El-Hendawy, S. E., & Schmidhalter, U. (2011). Drip irrigation frequency: The effects and their interaction with nitrogen fertilization on maize growth and nitrogen use efficiency under arid conditions. *Journal of agronomy and crop science*, 197(3), 186-201.
- Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Thornton, P. K., Wilkens, P. W., ... & Singh, U. (1998). Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. In *Understanding options for agricultural production* (pp. 157-177). Dordrecht: Springer Netherlands.
- 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. (2019). 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.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., & Gijsman, A.J. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, 235-265.
- Kang, S., & Zhang, J. (2004). Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *Journal of experimental botany*, 55(407), 2437-2446.
- Kullberg, E. G., DeJonge, K. C., & Chávez, J. L. (2017). Evaluation of thermal remote sensing indices to estimate crop evapotranspiration coefficients. *Agricultural water management*, 179, 64-73.
- Lamm, F. R. (2005). SDI for conserving water in corn production. In Proc. ASCE-EWRI Water Congress, May 15-19, 2005, Anchorage, AK. 12 pp.
- Lamm, F. R. (2014). Irrigation and Nitrogen Management for Subsurface Drip Irrigated Corn -25 years of K-State's Efforts. ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting. Montreal, Quebec Canada, 13-16 July.
- Levidow, L., Zaccaria, D., Maia, R., Vivas, E., Todorovic, M., & Scardigno, A. (2014). Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural Water Management*, 146, 84-94.

- Lobell, D.B., Roberts, M.J., Schlenker, W., Braun, N., Little, B.B., Rejesus, R.M., & Hammer, G.L., (2014). Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the US Midwest. *Science*, 344, 516-519.
- Lybbert, T.J., & Sumner, D.A. (2012). Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. *Food Policy*, 37, 114-123.
- Ma, G.S., Xue, J.Q., Lu, H.D., Zhang, R.H., Tai, S.J., & Ren, J.H. (2007). Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays* L.) in central Shaanxi irrigation area, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 6, 1247-1253.
- Marek, G.W., Marek, T.H., Xue, Q., Gowda, P.H., Evett, S.R., & Brauer, D.K. (2017). Simulating evapotranspiration and yield response of selected corn varieties under full and limited irrigation in the Texas High Plains using DSSAT-CERES-Maize. *Trans. ASABE*, 60 (3), 837-846.
- Rosegrant, M.W., Koo, J., Cenacchi, N., Ringler, C., Robertson, R.D., Fisher, M., Cox, C.M., Garrett, K., Perez, N.D., & Sabbagh, P. (2014). *Food security in a world of natural resource scarcity: The role of agricultural technologies*. Intl Food Policy Res Inst.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.
- Mubeen, M., Ahmad, A., Wajid, A., Khaliq, T., & Bakhsh, A. (2013). Evaluating CSM-CERES-Maize model for irrigation scheduling in semi-arid conditions of Punjab. Pakistan. *International Journal of Agricultural and Biology*, 15, 1-10.
- Mubeen, M., Ahmad, A., Wajid, A., Khaliq, T., Hammad, H.M., Sultana, S.R., Ahmad, S., Fahad, S., & Nasim, W. (2016). Application of CSM-CERES-Maize model in optimizing irrigated conditions. *Outlook Agric*, 45 (3), 173-184.
- Oktem, A. (2008). Effect of water shortage on yield, and protein and mineral compositions of drip-irrigated sweet corn in sustainable agricultural systems. *Agricultural water management*, 95(9), 1003-1010.
- Oktem, A., Eulgun, A., & Coskun, Y., (2005). Determination of sowing dates of sweet corn (*Zea mays* L. Saccharata Sturt.) under Sanliurfa conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28, 83-91.
- Palosuo, T., Kersebaum, K.C., Angulo, C., Hlavinka, P., Moriondo, M., Olesen, J.E., Patil, R.H., Ruget, F., Rumbaur, C., Takáč, J., & Trnka, M. (2011). Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy*, 35(3), 103-114.
- Panda, S. S., Ames, D. P., & Panigrahi, S. (2010). Application of vegetation indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote sensing*, 2(3), 673-696.
- Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., & Burt, C. M. (2009). Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural water management*, 96(11), 1517-1524.
- Rauff, K. O., & Bello, R. (2015). A review of crop growth simulation models as tools for agricultural meteorology. *Agricultural Sciences*, 6(9), 1098-1105.
- Saddique, Q., Cai, H., Ishaque, W., Chen, H., Chau, H.W., Chattha, M.U., Hassan, M.U., Khan, M.I., & He, J. (2019). Optimizing the sowing date and irrigation strategy to improve maize yield by using CERES (crop estimation through resource and environment synthesis)-maize model. *Agronomy*, 9 (2), 109.
- Saseendran, S., Ahuja, L., Ma, L., Timlin, D., Stockle, C., Boote, K., & Hoogenboom, G. (2008). Current water deficit stress simulations in selected agricultural system models. Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes, 1, pp. 1-38.
- Saseendran, S.A., Ma, L., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., & Ahuja, L.R. (2005). Simulating planting date effects on corn production using RZWQM and CERES-Maize models. *Agronomy Journal*, 97, 58-71.
- Scot, P., & Aboudrare, A. (2009). Adaptation of crop management to water-limited environment. *European Journal of Agronomy*, 21, 433-446.
- Singh A. K., Tripathy, R., & Chopra, U. K. (2008). Evaluation of CERESWheat and CropSyst models for water-Nitrogen interactions in Wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95, 776-786.
- Soler, C.M.T., Sentelhas, P.C., & Hoogenboom, G. (2007). Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, 27, 165-177.
- Song, L., & Jin, J. (2020). Improving CERES-Maize for simulating maize growth and yield under water stress conditions. *European Journal of Agronomy*, 117, 126072.

- Stone, P.J., Wilson, D.R., Reid, J. B., & Gillespie, R.N. (2001). Water deficit effects summer maize. *Agricultural Science China*, 5, 228-291.
- Taghvaeian, S., Chávez, J. L., Bausch, W. C., DeJonge, K. C., & Trout, T. J. (2014). Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize. *Irrigation Science*, 32(1), 53-65.
- Tan, Q., & Zhang, T. (2018). Robust fractional programming approach for improving agricultural water-use efficiency under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 564, 1110-1119.
- UN World Water Assessment Programme. (2012). WWDR4 Background Briefing Note_ ENG.
- van Donk, S. J., & Shaver, T. M. (2016). Effects of nitrogen application frequency via subsurface drip irrigation on corn development and grain yield. *Journal of Plant Nutrition*, 39(13), 1830-1839. DOI: 10.1080/01904167.2016.1143506.
- Vories, E. D., Tacker, P. L., Lancaster, S. W., & Glover, R. E. (2009). Subsurface drip irrigation of corn in the United States Mid-South. *Agricultural Water Management*, 96(6), 912-916.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- Xie, Y., Kiniry, J.R., Naylor, V., & Rosenthal, W.D. (2001). Maize and sorghum simulations with CERES- Maize, SORKAM, and ALMANAC under water limiting conditions. *Agronomy Journal*, 93, 1148-1155.
- Yakoub, A., Lloveras, J., Biau, A., Lindquist, J. L., & Lizaso, J. I. (2017). Testing and improving the maize models in DSSAT: Development, growth, yield, and N uptake. *Field Crops Research*, 212, 95-106.
- Yang, Z. (2008). *Estimating CSM-CERES-maize genetic coefficients and soil parameters and evaluating model response to varying nitrogen management strategies under North Carolina conditions*. North Carolina State University.