

مقاله علمی - پژوهشی

توسعه یک مدل جدید رشد منطقه‌ای ذرت بر اساس تبخیر - تعرق گیاه مرجع

ایمان حاجی‌راد^۱، خالد احمدآلی^{۲*}، عبدالمجید لیاقت^۳، ساناز محمدی^۴، سید مجید میرلطیفی^۵ و حسین دهقانی سانج^۶

چکیده

شرایط آب و هوایی و میزان آبیاری از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر فرآیندهای رشد محصول هستند. اطلاع از میزان عملکرد بیولوژیک محصولات در مراحل مختلف رشد، می‌توان ابزار سودمندی برای برنامه‌ریزی و مدیریت آب و کود در مزرعه می‌باشد. تولید ذرت علوفه‌ای (*Zea mays L.*) یکی از مهم‌ترین محصولات زارعی است که تأثیرات گسترده‌ای بر اقتصاد کشاورزی دارد. در این مطالعه به بررسی برآورد عملکرد نسبی ذرت در دو حالت یکی با استفاده از متغیر تبخیر - تعرق مرجع تجمعی نسبی (R_{CET_0}) و دیگری با استفاده از متغیر درجه-روز-رشد تجمعی نسبی ($RCGDD$)، توسط مدل لجستیک پرداخته شد. نتایج نشان داد که بر اساس آماره‌های R^2 ، $RMSE$ و $MAPE$ مدل لجستیک در برآورد عملکرد بیولوژیک در طول دوره رشد، از صحت بالایی برخوردار است. همچنین با مقایسه نتیجه مدل برای دو متغیر مستقل R_{CET_0} و $RCGDD$ ، این نتیجه حاصل شد که مدلی که از تبخیر - تعرق گیاه مرجع تجمعی نسبی، دقیق‌تر از مدلی است که از درجه - روز - رشد تجمعی نسبی استفاده می‌کند. متغیر ورودی R_{CET_0} به این دلیل که می‌تواند به‌طور جامع اثرات عوامل هواشناسی بر رشد ذرت علوفه‌ای را منعکس کند، توانایی بالاتری در شبیه‌سازی فرآیند رشد ذرت علوفه‌ای دارد. هر چند که در شرایط کمبود داده مدل ارائه‌شده بر اساس درجه - روز - رشد نیز می‌تواند عملکرد ذرت را با دست مناسبی برآورد نماید. پیشنهاد می‌شود مدل ارائه شده در دستگاه‌های اجرایی کشور به‌منظور آمایش سرزمین، الگوی بهینه کشت و نهایتاً برنامه‌ریزی‌های کلان مدنظر قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: درجه - روز - رشد، عملکرد بیولوژیک، کم‌آبیاری، مدیریت آبیاری

مقدمه

با رشد سریع جمعیت در دهه‌های اخیر، تقاضا برای غلات و محصولات فروشی به‌طور مداوم افزایش یافته است. برای بهبود عملکرد و کیفیت محصول، توصیف دقیق فرآیندهای رشد محصول و کنترل بهتر عوامل تغذیه‌ای موردنیاز برای رشد محصول ضروری است. درک دقیق فعل‌وانفعالات پیچیده بین محصولات زراعی و محیط‌های اطراف آن‌ها برای پیش‌بینی چگونگی تأثیر شرایط محیطی بر فرآیندهای رشد محصول مهم است. برای این هدف، مدل‌های رشد محصول برای شبیه‌سازی رشد و توسعه محصول با استفاده از توابع پیچیده ریاضی و تکنیک‌های مدل‌سازی توسعه داده شده‌اند (Lin et al., 2023). این مدل‌ها می‌توانند به‌صورت کمی و پویا فرآیندهای توسعه رشد محصول و تشکیل عملکرد را توصیف کنند (Ewert, et al., 2015) که برای ارزیابی تأثیر خشک‌سالی بر عملکرد محصول در آینده مفید است. علاوه بر این،

^۱ دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (*-نویسنده مسئول: khahmadali@ut.ac.ir)
^۳ استاد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
^۴ دکتری گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۵ دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
^۶ استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، البرز، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

رشد محصول تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله ویژگی‌های خاک، شرایط آب و هوایی، وضعیت تغذیه و گونه‌های گیاهی است (Elnesr et al., 2013). درحالی‌که ویژگی‌های خاک، وضعیت تغذیه و گونه‌های محصول را می‌توان به راحتی تنظیم کرد، شرایط هواشناسی را نمی‌توان کنترل کرد. آن‌ها به طور قابل توجهی بر تولید کشاورزی تأثیر می‌گذارند و تنوع مکانی بالایی را در مقیاس منطقه‌ای و جهانی نشان می‌دهند. مطالعات متعددی اثرات تغییرپذیری آب و هوا بر رشد، توسعه و عملکرد محصول را بررسی کرده‌اند (Cammarano & Tian, 2018). به طور کلی، روزهای رشد، مانند روزهای پس از کاشت، به عنوان متغیر مستقل برای ایجاد مدل‌های رشد محصول استفاده می‌شود (Zhang et al., 2021). با این حال، به دلیل تفاوت در شرایط هواشناسی، زمان کاشت محصولات در مناطق مختلف متفاوت است. علاوه بر این، رشد محصول به شدت تحت تأثیر دما است (Undersander et al., 2009; Van Delden et al., 2001; Guan et al., 1986). دما نقش اساسی در چرخه زندگی محصولات دارد و بر رشد، نمو و عملکرد تأثیر می‌گذارد (Sawan, 2018). با این وجود، دما یک عامل بسیار متغیر است که چرخه‌های روزانه واضحی را نشان می‌دهد. برای بررسی اینکه چگونه تغییرات روزانه دما بر مراحل رشد محصول تأثیر می‌گذارد، مفهوم 'GDD' به عنوان یک شاخص اکوسیستم پیشنهاد شد (Anandhi, 2016). GDD نه تنها گرمای انباشته شده را اندازه‌گیری می‌کند، بلکه فرآیندهای رشد و توسعه محصول در یک منطقه کاشت ثابت را نیز مشخص می‌کند (Hinchliffe et al., 2011). از GDD می‌توان برای تجزیه و تحلیل شرایط حرارتی تحت شرایط خاص هواشناسی استفاده کرد که می‌تواند تاریخ کاشت بهینه، دوره رشد و ویژگی‌های رشد فیزیولوژیکی مربوطه را تعیین کند (Anandhi, 2016)؛ بنابراین، برخی از محققان از GDD به جای زمان برای ایجاد مدل‌های رشد محصول استفاده کرده‌اند. مدل‌های لجستیک مبتنی بر GDD به جای زمان، فرآیندهای تغییر را در شاخص‌های اصلی رشد محصول بهتر توصیف می‌کنند (Wang et al., 2021; Lin et al., 2023). با این حال، GDD مستقیماً تأثیرات تشعشعات

مدل‌های رشد محصول می‌توانند تخمین‌های دقیقی از وضعیت محصول، از جمله وضعیت، شاخص سطح برگ (LAI) و عملکرد انواع خاص محصول ارائه دهند (Maruyama et al., 2010). علاوه بر این، این مدل‌ها می‌توانند عملکرد محصول را به عنوان تابعی از شرایط خاک، آب و هوا و شیوه‌های مدیریتی پیش‌بینی کنند (Zúñiga et al., 2014)؛ بنابراین، مدل‌های رشد محصول به ابزارهای مهمی برای ارزیابی کمی روابط بین خاک، آب و هوا و پوشش گیاهی و تسهیل تنظیم به موقع رشد محصول تبدیل شده‌اند که توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. مدل‌های رشد محصول اشکال ساده‌ای دارند و برای استفاده راحت هستند و می‌توانند برای شبیه‌سازی فرآیندهای رشد محصول برای هدایت تولید کشاورزی استفاده شوند. برخی از مدل‌ها برای شبیه‌سازی اثرات تغییرات در ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی محصولات به اصلاح محصول اقتباس شده‌اند که به شناسایی فنوتیپ‌های بهینه در محیط‌های مختلف کمک می‌کند (Lin et al., 2023). علاوه بر این، برخی از مدل‌ها برای شبیه‌سازی فرآیندهای رشد محصول استفاده شده‌اند، از جمله مدل‌های گومپرتز (Akao et al., 2018)، ریچاردز (Chen et al., 2008) و لجستیک (Liu et al., 2020; Su et al., 2022).

پرانک و همکاران یک مدل پویا از ماده خشک تجمعی و شاخص سطح برگ را بر اساس رابطه بین گندم و کارایی استفاده از تابش ایجاد کرد (Pronk et al., 2003)، درحالی‌که ویلگاس و همکاران از معادله لجستیک برای مدل‌سازی ماده خشک تجمعی گیاه گندم بر اساس ویژگی‌های رشد محصول در آب و هوای مدیترانه‌ای استفاده نمود (Villegas et al., 2001). در مطالعه‌ای دیگر، وانگ و همکاران درجه روز رشد (GDD) را به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفت و فرآیند ماده خشک تجمعی در مزارع انگور را با استفاده از مدل‌های لجستیک و ریچاردز شبیه‌سازی کرد. ارزیابی نتایج مدل نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل لجستیک به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک‌ترین هستند که نشان می‌دهد مدل لجستیک دقیق‌ترین است (Wang et al., 2013).

ذرت را با استفاده از مدل لجستیک شبیه‌سازی کردند (Hocaoğlu et al., 2023). در پژوهشی دیگر، حاجی‌راد و همکاران (۱۴۰۲) از مدل لجستیک برای مدل‌سازی تبخیر - تعرق گیاهان استراتژیک در عرض‌های جغرافیای مختلف ایران استفاده کردند. اگرچه عوامل زیادی مانند طول فصل رشد و رطوبت خاک بر رشد ذرت تأثیر می‌گذارد، اما شرایط جوی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در فرآیند فیزیولوژیکی گیاه ذرت به حساب می‌آید (Sawan, 2018). چهار ویژگی اصلی آب و هوایی در تولید ذرت علوفه‌ای از همه مهم‌تر هستند عبارت‌اند: تابش خورشیدی، بارندگی، رطوبت و دما. گرم شدن کره زمین رشد و فنولوژی ذرت را تسریع کرده و دوره رشد ذرت کوتاه شده است (Peichl et al., 2019). بنابراین، ایجاد یک مدل جدید رشد ذرت علوفه‌ای که به‌طور جامع اثرات متغیرهای اقلیمی را بر فرآیندهای رشد ذرت علوفه‌ای منطقه‌ای در نظر بگیرد، ضروری است. در این پژوهش سعی شد که یک مدل جدید رشد ذرت علوفه‌ای را بر اساس ET_0 در مقیاس منطقه‌ای توسعه داده شود و صحت آن با استفاده از داده‌های میدانی جمع-آوری شده، ارزیابی گردد. این روش جدید می‌تواند بینش‌هایی را برای تجزیه و تحلیل رشد منطقه‌ای ذرت علوفه‌ای و پارامترهای تأثیرگذار آن ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در تابستان ۱۳۹۸ در زمینی به مساحت ۱۳۰۰ مترمربع در منطقه پیشوای ورامین با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب 35° شمالی و $51^{\circ} 41' 42''$ شرقی و $19^{\circ} 51' 19''$ شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۹۷۳ متر انجام شد. تیمارهای موردبررسی شامل دو رژیم آبیاری، یکی آبیاری کامل (تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، M_1) و دیگری کم‌آبیاری (شامل تأمین ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب M_2 و M_3) به‌عنوان فاکتور اصلی و دو مدیریت آبیاری پالسی^۱ (P) و پیوسته^۲ (C) به‌عنوان فاکتور فرعی بودند. هر تیمار شامل سه خط کشت دو ردیفه بود که دو خط کناری به‌عنوان حاشیه در نظر گرفته شد و داده‌های موردنیاز از

خورشیدی، رطوبت هوا و سرعت باد را بر محصولات کشاورزی منعکس نمی‌کند و به‌طور دقیق تأثیر دماهای بالا را بر رشد محصول نشان نمی‌دهد (حاجی‌راد و همکاران، ۱۴۰۳).

تبخیر - تعرق محصول مرجع (ET_0)، همان‌طور که از نام آن پیداست، تبخیر - تعرق از یک سطح مرجع مانند علف‌های خوب آبیاری شده است. این مقدار وقتی در ضریب محصول بر اساس محصول و مرحله رشد آن ضرب می‌شود، مقدار تبخیر - تعرق محصول را به دست می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان کل نیاز آبی در نظر گرفته شود، به‌این ترتیب، شاخص مهمی از اقلیم منطقه و وضعیت چرخه آب است (Jung et al., 2010; Su et al., 2013). ET_0 معمولاً با استفاده از معادله فائو - پنمن - مانتیث، که در سطح جهانی مقبولیت عام دارد، محاسبه می‌شود و دما، تابش خورشید، رطوبت و سرعت باد را در نظر می‌گیرد (Penman et al., 1948; Allen et al., 1998). تحقیقات مختلف نشان داده که ET_0 به‌طور کلی نتایج معقولی را تحت شرایط مختلف هواشناسی ارائه می‌دهد. در مقایسه با GDD که در درجه اول دما را در نظر می‌گیرد، ET_0 می‌تواند به‌طور جامع‌تری تغییرات در عوامل هواشناسی را مشخص کند. این بدان معنی است که تغییرات در متغیرهای آب و هوایی ناشی از اثرات گرمایش جهانی در ET_0 منعکس خواهد شد، بنابراین می‌توان به‌طور جامع بررسی کرد که چگونه شرایط هواشناسی بر فرآیندهای رشد محصول در مقیاس-های منطقه‌ای با استفاده از ET_0 تأثیر می‌گذارد. تولید ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.) تأثیرات گسترده‌ای بر اقتصاد کشاورزی دارد. ذرت علوفه‌ای به‌طور متداول در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران پس از برداشت گندم و جو کشت می‌شود که مدیریت و برنامه‌ریزی برای افزایش تولید این گیاه زراعی ضروری است (حاجی‌راد و همکاران، ۱۴۰۰). اخیراً، بسیاری از محققان مدل‌های لجستیک رشد ذرت را بر اساس زمان یا GDD استفاده کرده‌اند. به‌عنوان مثال، سپاس‌خواه و همکاران از مدل لجستیک برای پیش‌بینی عملکرد ذرت استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل لجستیک در شبیه‌سازی عملکرد ذرت دارای دقت قابل‌قبولی بود (Sepaskhah et al., 2011). هوکا اغلو و همکاران اثر کم‌آبیاری بر روی عملکرد

² Continuous

¹ Pulse

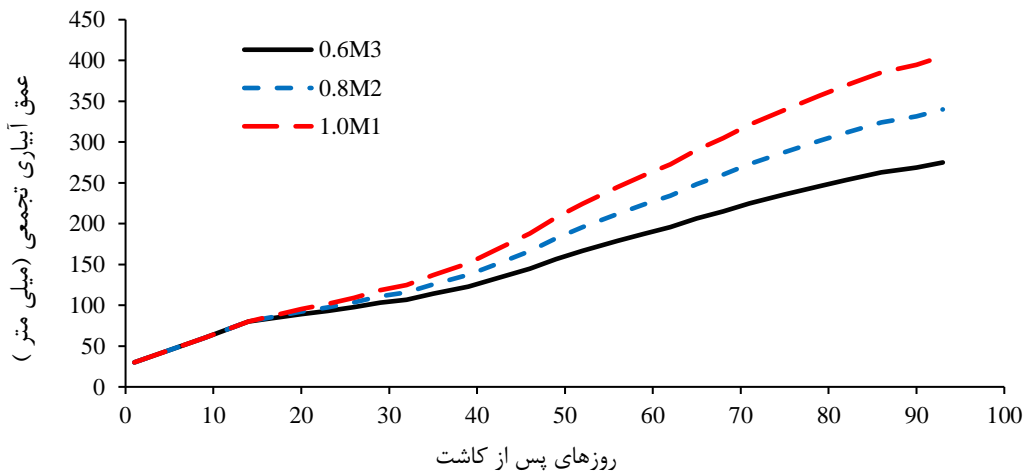
۱۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰، ۴۰-۳۰، ۵۰-۶۰ و ۹۰-۱۰۰ کالیبره شد و برای تعیین زمان و عمق آبیاری استفاده شد. عمق آب آبیاری، به منظور رساندن رطوبت منطقه توسعه ریشه گیاه به حد ظرفیت زراعی (FC) برای اعماق مختلف ذکر شده به صورت تجمعی و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه و اعمال گردید (حاجی‌راد و همکاران، ۱۴۰۰؛ Mohammadi et al., 2024).

$$d_n = MAD \times (\theta_{FC} - \theta_i) \times D_{rz} \quad (1)$$

در رابطه بالا d_n عمق خالص آبیاری بر حسب میلی‌متر، θ_{FC} رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت زراعی (درصد)، θ_i رطوبت وزنی خاک قبل از آبیاری (درصد)، D_{rz} عمق توسعه ریشه (میلی‌متر) و MAD بیانگر ضریب تخلیه مجاز رطوبتی می‌باشد. لازم به ذکر است که آبیاری کلیه تیمارها هم‌زمان انجام گرفت و عمق آب کاربردی در هر دو مدیریت آبیاری پالسی (P) و پیوسته (C) به صورت یکسان اعمال شد (شکل ۱). و همچنین در طی مراحل انجام پژوهش هیچ بارندگی رخ نداد.

خط میانی برداشت شد. طول خطوط کشت ۲۰ متر بود. در آبیاری با مدیریت پیوسته، آب به صورت مداوم، اما در آبیاری با مدیریت پالسی، عمق آبیاری محاسبه شده به سه بخش مساوی تقسیم و در طی سه مرحله با مدت‌زمان روشن و خاموش بودن یکسان در اختیار گیاه قرار گرفت.

سیستم آبیاری مورد استفاده شامل آبیاری موضعی نواری بود که در آن دبی گسیلنده‌ها ۰/۷ لیتر در ساعت و فاصله آن‌ها از هم ۲۰ سانتی‌متر بود. نوارهای تیپ در فاصله بین دو ردیف کشت قرار گرفت و آبیاری برای همه تیمارها ثابت با دور آبیاری دو روز بود. آبیاری تا زمان سبز شد کامل مزرعه (مرحله شش برگی) برای تمامی تیمارها یکسان انجام شد و مدیریت‌های پیوسته و پالسی پس از مرحله شش برگی اعمال گردید. اندازه‌گیری رطوبت خاک توسط دستگاه پروفایل پروب^۱ مدل PR2/6 انجام شد. لوله‌های دسترسی در وسط ردیف کشت نصب شدند به طوری که در وسط هر پلات، یک لوله PVC به طول ۱۲۰ سانتی‌متر که انتهای آن مسدود و عایق‌بندی شده بود، در داخل هر پلات نصب گردید. دستگاه پروفایل پروب برای شرایط مزرعه در اعماق مختلف -۰



شکل ۱- نمودار عمق آبیاری تجمعی در طول دوره رشد

مدل رشد ذرت علوفه‌ای بر اساس درجه -روز- رشد تجمعی^۳ (CGDD)

توسعه و ساخت مدل ریاضی

³ Cumulative Growing Degree Days

¹ Profile Probe

² Allowed Moisture Depletion

عملکرد بیولوژیک نسبی ($R_D = \frac{D}{D_{max}}$) به‌عنوان تابعی از متغیر مستقل CGDD نسبی ($CGDD = \frac{CGDD}{CGDD_{max}}$) و به‌صورت زیر بیان شد.

$$R_D = \frac{D}{D_{max}} = \frac{1}{1 + e^{A+B \times CGDD}} \quad (۳)$$

که در آن: R_D : عملکرد بیولوژیک تجمعی نسبی (تن بر هکتار / تن بر هکتار)، D_{max} : حداکثر عملکرد اندازه‌گیری شده (تن بر هکتار)، $CGDD$: درجه - روز - رشد تجمعی نسبی (درجه سانتی-گراد/درجه سانتی‌گراد) و A و B پارامترهای مدل هستند (Lin et al., 2023).

مدل رشد ذرت علوفه‌ای بر اساس تبخیر - تعرق گیاه مرجع تجمعی^۱ (CET_o)

یک مدل رشد گیاهی مبتنی بر GDD تنها تأثیر دما را بر رشد محصول به‌حساب می‌آورد، اما رشد ذرت علوفه‌ای تحت تأثیر سایر عوامل هواشناسی نیز قرار دارد؛ بنابراین، استفاده از GDD به-تنهایی برای مدل‌سازی دقیق رشد ذرت علوفه‌ای کافی نیست (Muswera, 2016). در عوض، در این پژوهش از تبخیر - تعرق مرجع (ET_o) استفاده شد که شرایط مختلف هواشناسی مانند دما، تابش خورشید، فشار بخار آب و سرعت باد را در نظر می‌گیرد. روش پنمن - مانتیث یک روش پذیرفته‌شده برای محاسبه ET_o است، زیرا پارامترهای فیزیولوژیکی و هواشناسی را در برمی‌گیرد. از طرفی، روش فائو - پنمن - مانتیث، یک رویکرد استاندارد و قابل‌اعتماد است که در سراسر جهان استفاده می‌شود. برای محاسبه تبخیر - تعرق تجمعی در طول دوره رشد گیاه، تبخیر - تعرق گیاه مرجع تجمعی (CET_o) با استفاده از داده‌های روزانه ET_o و معادله (۴) محاسبه شد.

$$CET_o = \sum ET_o = \sum \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (۴)$$

هر محصول از نظر بیولوژیکی دارای حدود درجه حرارت بالا و پایین تعریف شده است که فراتر از آن رشد و نمو آن می‌تواند تحت تأثیر نامطلوب قرار گیرد. برای ذرت علوفه‌ای، محدوده دمای بالا و پایین به ترتیب ۳۵ درجه سانتی‌گراد و ۵ درجه سانتی‌گراد است که توسط مطالعات متعدد نشان داده شده است. درجه - روز - رشد (GDD) معیاری برای انباشت گرما است که برای تخمین توسعه و رشد محصول استفاده می‌شود (Guo et al., 2023). در این مطالعه، داده‌های GDD روزانه را با استفاده از معادله (۳) به GDD تجمعی (CGDD) تبدیل شد:

$$CGDD = \sum (T_{avg} - T_{base}) \quad (۲)$$

که در آن، CGDD درجه - روز - رشد تجمعی (برحسب درجه سانتی‌گراد)، T_{avg} میانگین دمای روزانه (برحسب درجه سانتی‌گراد) و T_{base} حداقل دمای روزانه موردنیاز برای فعالیت گیاه (برحسب درجه سانتی‌گراد) است. مک مستر و ویلهلم (McMaster and Wilhelm, 1997) روشی را برای محاسبه میانگین دمای روزانه پیشنهاد کردند به این صورت است که اگر $T_{base} < T_{avg} < T_{upper}$ باشد (که در آن، T_{upper} حداکثر دمایی است که در آن فعالیت‌های گیاه ادامه می‌یابد (برحسب درجه سانتی‌گراد)) آنگاه $T_{avg} = \frac{(T_x + T_n)}{2}$ است که در آن T_x بالاترین دمای روزانه (برحسب درجه سانتی‌گراد) و T_n کمترین دمای روزانه (برحسب درجه سانتی‌گراد) است. اگر دمای میانگین از حداقل دمای روزانه موردنیاز برای فعالیت گیاه کمتر باشد میانگین معادل T_{base} و چنانچه دمای میانگین بزرگ‌تر مساوی حداکثر دمایی که در آن فعالیت‌های گیاه ادامه می‌یابد باشد، دمای میانگین برابر T_{upper} در نظر گرفته می‌شود (Guo et al., 2023).

برای توصیف چند و چون تغییرات عملکرد بیولوژیک (D) گیاه ذرت علوفه‌ای با استفاده از متغیر مستقل CGDD، یک مدل لجستیک در نظر گرفته شد (رابطه ۴). برای به حداقل رساندن تفاوت در شاخص‌های رشد ذرت علوفه‌ای ناشی از روش‌های آبیاری یا شرایط خاک در مناطق مختلف، متغیر وابسته به‌صورت شاخص

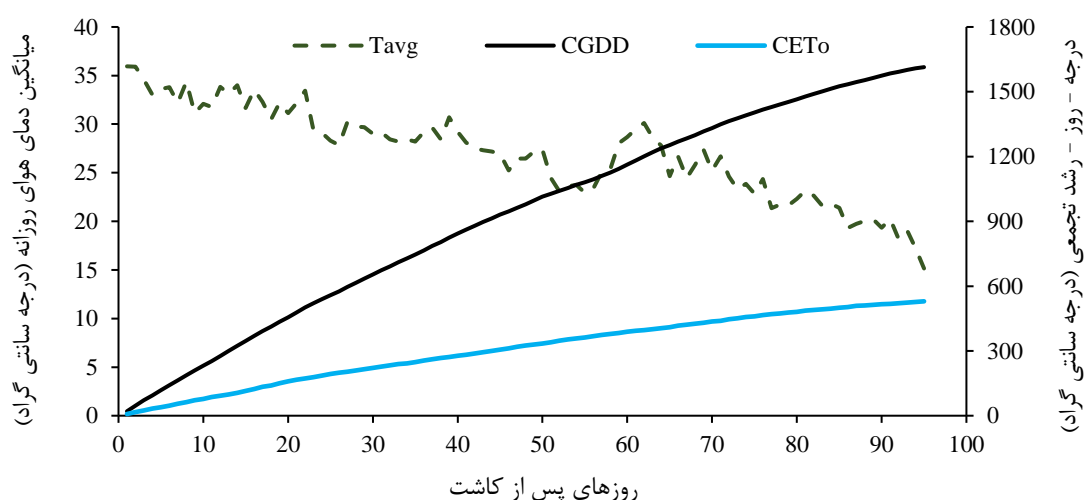
¹ Cumulative Reference Crop Evapotranspiration

مدل لجستیک توسعه داده شده بر اساس CET_0 (به عنوان متغیر مستقل) به صورت زیر تعریف می شود:

$$R_D = \frac{D}{D_{max}} = \frac{1}{1 + e^{A+B \times R_{CET_0}}} \quad (5)$$

که در آن: R_{CET_0} تبخیر - تعرق گیاه مرجع تجمعی نسبی و A و B پارامترهای معادله می باشند (Lin et al., 2023). در شکل (۲)، $CGDD$ ، CET_0 ، $CGDD$ ، دمای کمینه، دمای بیشینه و میانگین دمای ارائه شده است.

که در آن: ET_0 : تبخیر- تعرق مرجع (میلی متر بر روز)، R_n شار تشعشعات خالص (مگا ژول بر مترمربع بر روز)، G شار حرارتی خاک (مگا ژول بر مترمربع بر روز)، T دمای میانگین هوا در ارتفاع دو متری (درجه سانتی گراد)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e_s فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، e_a فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل منحنی دما، γ ثابت سایکرومتر و $e_s - e_a$ بیانگر کمبود فشار بخار (کیلو پاسکال) است (Allen et al., 1998).



شکل ۲- نمودار تغییرات دمای کمینه و بیشینه، درجه-روز- رشد و تبخیر - تعرق گیاه مرجع تجمعی در طول فصل رشد

معیارهای ارزیابی مدل‌ها

که در این روابط، O_i مقادیر مشاهداتی، P_i مقادیر پیش‌بینی شده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهداتی، \bar{P} میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها می‌باشند.

به منظور ارزیابی مدل‌های مورد استفاده، از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شد (Jamieson et al., 1991; Lin et al., 2023):

نتایج و بحث

مدل سازی عملکرد محصولات استراتژیک کشور نظیر ذرت علوفه‌ای با استفاده از متغیرهای مستقل سهل‌الوصول نظیر پارامترهای اقلیمی امری بسیار ضروری و پرکاربرد می‌تواند باشد. در این تحقیق به مدل سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در مراحل مختلف رشد با استفاده از دو متغیر درجه-روز-رشد تجمعی (CGDD) و تبخیر - تعرق مرجع تجمعی (CET_0) پرداخته شد. در

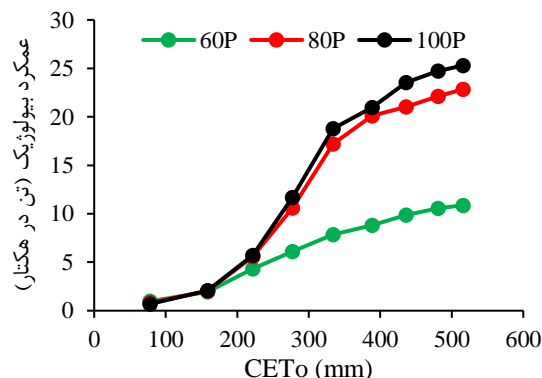
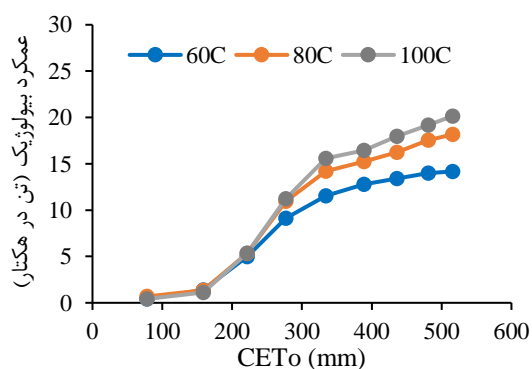
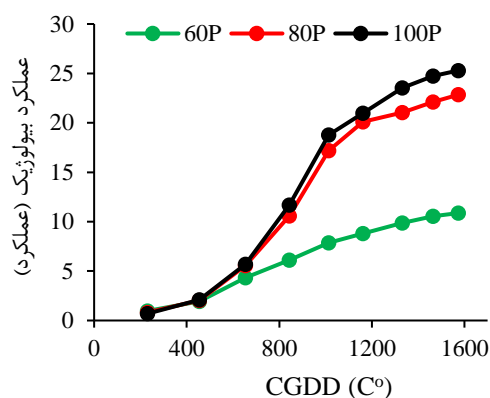
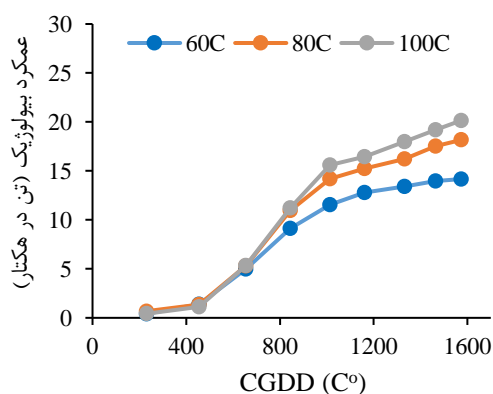
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - P_i|}{|O_i|} \quad (8)$$

پایانی روند نرخ رشد بیشتر شده است. این الگو نشان می‌دهد که وجود دمای بالا و نور کافی موجب رشد سریع در مراحل مختلف می‌شود، درحالی‌که دمای پایین و کاهش تابش آفتاب، موجب رشد کندتر و درنهایت کاهش عملکرد می‌شود. عملکرد بیولوژیک در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه به حداکثر مقدار خود رسید ($GDD > 1500$ و $CET_0 > 500$). با مقایسه عملکرد بیولوژیک در سطوح مختلف آبیاری ملاحظه می‌گردد که در هر دو مدیریت آبیاری پیوسته و پالسی، این شاخص در آبیاری ۱۰۰ درصد بیشتر از آبیاری ۸۰ درصد و آن هم بیشتر از آبیاری ۶۰ درصد است.

شکل (۳) تغییرات عملکرد بیولوژیک در طول دوره رشد محصول ذرت علوفه‌ای تحت دو مدیریت آبیاری پیوسته و پالسی برای سه سطح آبیاری (M_1, M_2, M_3) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳) ملاحظه می‌گردد که تغییرات عملکرد بیولوژیک برای هر دو تیمار آبیاری پیوسته و پالسی از روند نسبتاً مشابهی پیروی می‌کنند به این صورت که با افزایش درجه-روز-رشد تجمعی ($CGDD$) و تبخیر - تعرق مرجع تجمعی (CET_0)، مقدار عملکرد بیولوژیک افزایش پیدا کرده است. همچنین شکل (۳) نشان می‌دهد که در مراحل اولیه، نرخ رشد کم بوده و در مراحل میانی و



شکل ۳- روند تغییرات عملکرد بیولوژیک نسبت به درجه - روز - رشد تجمعی و تبخیر - تعرق مرجع تجمعی در سطوح مختلف آبیاری (P و C به ترتیب بیانگر مدیریت آبیاری پالسی و پیوسته و اعداد ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ بیانگر سطوح آبیاری است)

و پالسی در سه سطح آبیاری کامل، کم آبیاری (در سطح ۸۰ و ۶۰ درصد تأمین نیاز آبی گیاه) در جدول (۱) و (۲) آورده شده است.

نتیجه مدل‌سازی عملکرد بیولوژیک نسبت به درجه-روز-رشد تجمعی نسبی ($RCGDD$) و تبخیر - تعرق مرجع تجمعی نسبی ($RCET_0$) برای گیاه ذرت علوفه‌ای تحت دو مدیریت آبیاری پیوسته

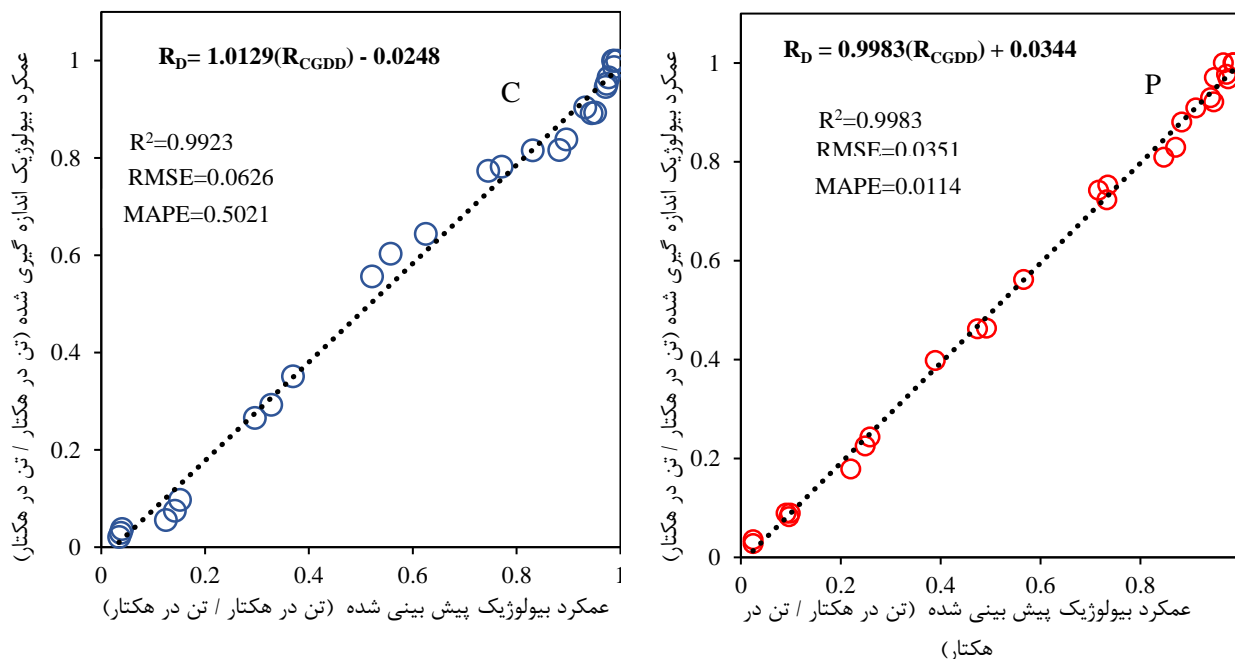
جدول ۱- مقادیر A و B معادله لجستیک بر اساس RCGDD برای عملکرد بیولوژیکی تحت سطوح مختلف آبیاری و مدیریت پالسی و پیوسته

MAPE	RMSE	R ²	B	A	معادله	مدل	تیمارها
۰/۱۹۸۱	۰/۰۳۵۶	۰/۹۹۰۴۱	-۹/۱۳۰۷۳	۴/۶۸۹۸۹	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times RCGDD})$		CM ₁
۰/۱۰۳۲	۰/۰۳۴۱	۰/۹۹۰۹۴	-۹/۰۹۶۹۶	۴/۵۲۸۶۱	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times RCGDD})$		CM ₂
۰/۰۷۷۱	۰/۰۱۷۷	۰/۹۹۷۶۴	-۱۰/۰۰۳۱	۴/۷۲۲۵۸	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times RCGDD})$	لجستیک	CM ₃
۰/۰۳۲۱	۰/۰۱۵۶	۰/۹۹۸۲۳	-۹/۵۴۶۵۴	۵/۰۹۷۴۴	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times RCGDD})$		PM ₁
۰/۰۶۴۸	۰/۰۱۷۳	۰/۹۹۷۸۰	-۹/۷۳۶۹۳	۵/۱۲۶۳۲	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times RCGDD})$		PM ₂
۰/۰۳۵۱	۰/۰۲۰۲	۰/۹۹۶۰۵	-۶/۸۵۸۰۰	۳/۳۱۹۰۸	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times RCGDD})$		PM ₃

شاخص‌های آماری R²، RMSE و MAPE برای مدل لجستیک تحت مدیریت آبیاری پالسی به ترتیب برابر ۰/۹۹۸۳، ۰/۰۳۵۱ و ۰/۰۶۲۶ و در مدیریت پیوسته به ترتیب برابر ۰/۹۹۲۳، ۰/۰۳۲۱ و ۰/۰۶۴۸ به دست آمد. نتایج نشان داد که عملکرد بیولوژیکی با دقت خوبی پیش‌بینی شد و تطابق خوبی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود داشت.

مقادیر A و B معادله (۶) برای سطوح مختلف آبیاری و مدیریت پالسی و پیوسته در جدول (۲) نشان داده شده است. مقادیر عملکرد بیولوژیک پیش‌بینی شده بر اساس معادله لجستیک با استفاده از تبخیر - تفرق مرجع تجمعی نسبی به‌عنوان متغیر مستقل محاسبه شده است. شکل (۵) مقایسه عملکرد بیولوژیک پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده توسط مدل را به ترتیب برای مدیریت پالسی و پیوسته نشان داده شده است. همبستگی خوبی بین عملکرد بیولوژیک اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مشاهده شد. شاخص‌های آماری تمام تیمارها در جدول (۲) نشان داده شده است. به طوریکه مقادیر R²، RMSE و MAPE در مدیریت آبیاری پیوسته، به ترتیب بین ۰/۹۸۸۶۱ تا ۰/۹۹۶۴۸، ۰/۰۲۱۶ تا ۰/۰۴۰۱ و ۰/۰۶۲۳ تا ۰/۰۲۷ و در مدیریت آبیاری پالسی به ترتیب بین ۰/۹۹۵۳۷ تا ۰/۹۹۸۴۱، ۰/۰۲۱۸ تا ۰/۰۱۸۸ و ۰/۰۴۶۱ تا ۰/۰۵۸۸ متغیر بود. این نتایج نشان داد که مدل پیش‌بینی شده ایجاد شده در مدل‌سازی عملکرد بیولوژیک ذرت علوفه‌ای تحت سطوح مختلف آبیاری به‌خوبی عمل کرد.

با توجه به جدول (۱) و شاخص‌های آماری مورد استفاده، ملاحظه می‌گردد که عملکرد مدل لجستیک در برآورد عملکرد بیولوژیک بر اساس درجه - روز - رشد تجمعی نسبی، در سطح مطلوبی قرار داشته و نتایج آن از دقت بالایی برخوردار است، به گونه‌ای که مقادیر R²، RMSE و MAPE در همه سطوح آبیاری، برای تیمار CM₁ به ترتیب برابر ۰/۹۹۰۴۱، ۰/۰۳۵۶ و ۰/۱۹۸۱، برای تیمار CM₂ به ترتیب ۰/۹۹۰۹۴، ۰/۰۳۴۱ و ۰/۱۰۳۲، برای تیمار CM₃ به ترتیب برابر ۰/۹۹۷۶۴، ۰/۰۱۷۷ و ۰/۰۷۷۱، برای تیمار PM₁ به ترتیب برابر ۰/۹۹۸۲۳، ۰/۰۱۵۶ و ۰/۰۳۲۱، برای تیمار PM₂ به ترتیب برابر ۰/۹۹۷۸۰، ۰/۰۱۷۳ و ۰/۰۶۴۸ و برای تیمار PM₃ به ترتیب برابر ۰/۹۹۶۰۵، ۰/۰۲۰۲ و ۰/۰۳۵۱ متغیر است. به‌طورکلی، مدل لجستیک قادر به شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی، تحت مدیریت آبیاری پالسی و پیوسته در سطوح مختلف آبیاری بود. از سوی دیگر، تفاوت جزئی بین تیمارهای مدیریت آبیاری پالسی و پیوسته مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد که در تیمارهای کم‌آبیاری با کاهش عمق آب آبیاری، مدیریت آبیاری پالسی می‌تواند نتایج بهتری نسبت به مدیریت آبیاری پیوسته ارائه دهد. مقادیر A و B معادله (۴) برای سطوح مختلف آبیاری تحت مدیریت پالسی و پیوسته در جدول (۱) نشان داده شده است. مقدار متوسط R² در مدل لجستیک بر اساس درجه - روز - رشد تجمعی نسبی تحت مدیریت آبیاری پالسی و پیوسته، نشان‌دهنده پراکندگی نسبتاً کم رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده برای عملکرد بیولوژیک است (شکل ۴). مقادیر



شکل ۴- ارتباط بین عملکرد بیولوژیک با درجه - روز - رشد تجمعی نسبی

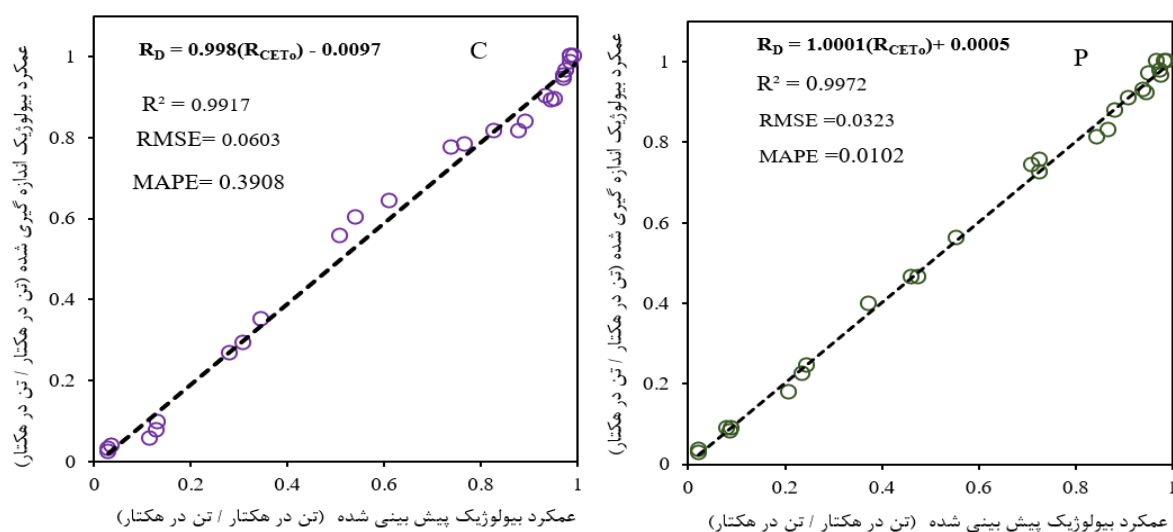
جدول ۲- مقادیر A و B معادله لجستیک بر اساس R_{CET_0} برای عملکرد بیولوژیکی تحت سطوح مختلف آبیاری و مدیریت پالسی و

پیوسته

MAPE	RMSE	R ²	B	A	معادله	مدل	تیمارها
۰/۰۲۰۲۷	۰/۰۴۰۱	۰/۹۸۷۶۱	-۹/۳۳۷۲۵	۴/۸۵۱۱۰	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times R_{CET_0}})$	لجستیک	CM ₁
۰/۱۲۵۸	۰/۰۳۹۲	۰/۹۸۸۰۱	-۹/۳۳۹۹۵	۴/۷۰۹۳۹	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times R_{CET_0}})$		CM ₂
۰/۰۶۲۳	۰/۰۲۱۶	۰/۹۹۶۴۸	-۱۰/۴۱۱۸	۴/۹۸۹۷۲	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times R_{CET_0}})$		CM ₃
۰/۰۵۱۲	۰/۰۱۸۸	۰/۹۹۷۴۲	-۹/۷۲۲۰۹	۵/۲۴۲۲۰	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times R_{CET_0}})$		PM ₁
۰/۰۵۸۸	۰/۰۱۴۷	۰/۹۹۸۴۱	-۹/۹۵۱۷۸	۵/۲۹۴۵۵	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times R_{CET_0}})$		PM ₂
۰/۰۴۶۱	۰/۰۲۱۸	۰/۹۹۵۳۷	-۷/۰۰۹۶۴	۳/۴۴۵۷۱	$R_D = 1/(1 + e^{A+B \times R_{CET_0}})$		PM ₃

و ۰/۳۹۰۸ و برای مدیریت آبیاری پالسی برابر با ۰/۹۹۷۲، ۰/۰۳۲۳ و ۰/۰۱۰۲ محاسبه شد. به طوری که این شاخص‌های آماری تخمین دقیقی از عملکرد بیولوژیک توسط مدل لجستیک را نشان داد.

مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده عملکرد بیولوژیک بر اساس تبخیر - تعرق مرجع تجمعی نسبی برای تمامی داده‌های مدیریت آبیاری پالسی و پیوسته در شکل (۵) ارائه شده است. مقادیر شاخص‌های R^2 ، $RMSE$ و $MAPE$ برای مدل لجستیک تحت مدیریت آبیاری پیوسته به ترتیب برابر با ۰/۹۹۱۷، ۰/۰۶۰۳



شکل ۵- ارتباط بین عملکرد بیولوژیک با تبخیر - تعرق مرجع تجمعی نسبی

توانستند در فرآیند شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیک در طول دوره رشد، نتایج خوبی ارائه دهند، اما نتایج مدل با ورودی R_{CET_0} نسبت به R_{CGDD} برتری داشت. متغیر ورودی R_{CET_0} به این دلیل که شامل متغیرهای اقلیمی بیشتری نسبت به R_{CGDD} است، توانایی بالاتری در برآورد عملکرد بیولوژیکی ذرت علوفه‌ای دارد. لذا در شرایط وجود داده استفاده از R_{CET_0} برای مدل‌سازی عملکرد توصیه می‌شود و در شرایط کمبود داده مدل ارائه شده بر اساس R_{CGDD} نیز می‌تواند عملکرد ذرت را با دست‌نمایی مناسبی برآورد نماید.

منابع

حاجی‌راد، ا.، میرلطیفی، س.م.، دهقانی‌سانبج، ح. و محمدی، س. ۱۴۰۰. تأثیر دو نوع مدیریت آبیاری بر شاخص‌های رشد ذرت علوفه‌ای در اقلیم خشک و نیمه‌خشک. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۶): ۱۴۴۴-۱۴۵۸.

حاجی‌راد، ا.، میرلطیفی، س.م.، دهقانی‌سانبج، ح.، و محمدی، س. ۱۴۰۰. برآورد ضریب گیاهی و ضریب تنش آبی ذرت علوفه‌ای تحت سطوح مختلف آبیاری به روش بیلان آب خاک (مطالعه موردی: دشت ورامین). مجله تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۲(۹): ۲۳۵۹-۲۳۷۱.

نتایج حاصل از این تحقیق هم‌راستا با مطالعه لین و همکاران است که برای برآورد عملکرد نسبی پنبه با استفاده از مدل لجستیک، استفاده از متغیر مستقل تبخیر-تعرق مرجع تجمعی نسبی را بهتر از متغیر مستقل درجه-روز-رشد تجمعی نسبی اعلام کرده بودند (Lin et al., 2023). در شرایط کمبود داده استفاده از متغیر مستقل درجه-روز-رشد نیز نتایج خوبی ارائه می‌دهد که این با تحقیقات حاجی‌راد و همکاران (۱۴۰۲) که برای برآورد تبخیر-تعرق محصولات مختلف، استفاده از متغیر درجه-روز-رشد را مناسب ارزیابی کرده بودند، هم‌راستا است.

نتیجه‌گیری

مدل لجستیک می‌تواند قانون جهانی تغییرات رشد یک شی را تحت یک محیط و منابع محدود آشکار سازد، همچنین می‌تواند ویژگی‌های پیچیده رشد پویا گیاه را توصیف کند، چرا که این مدل، ساختار ساده‌ای دارد. از طرفی سودمندی این مدل، در توصیف و پیش‌بینی مراحل رشد پدیده‌های مختلف، نهفته است. نتایج نشان داد که مدل لجستیک در شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیک در مراحل مختلف رشد، از صحت بالایی برخوردار است که این موضوع، مؤید کارایی مدل لجستیک در شبیه‌سازی عملکرد محصول است. با مقایسه مدل‌های توسعه داده شده با دو متغیر مستقل R_{CET_0} و R_{CGDD} ، ملاحظه گردید که هر دو متغیر

- IN NORTHWEST CHINA BASED ON LOGISTIC MODEL. *Applied Ecology & Environmental Research*. 21(1).
- Hinchliffe, D. J., Meredith, W. R., Delhom, C. D., Thibodeaux, D. P. and Fang, D. D. 2011. Elevated growing degree days influence transition stage timing during cotton fiber development resulting in increased fiber-bundle strength. *Crop science*. 51(4): 1683-1692.
- Jamieson, P. D., Porter, J. R. and Wilson, D. R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*. 27(4): 337-350.
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S. I., Sheffield, J., Goulden, M. L. and Zhang, K. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*. 467(7318): 951-954.
- Lin, S., Deng, M., Wei, K., Wang, Q. and Su, L. 2023. A new regional cotton growth model based on reference crop evapotranspiration for predicting growth processes. *Scientific Reports*. 13(1): 7368.
- Liu, Y., Su, L., Wang, Q., Zhang, J., Shan, Y. and Deng, M. 2020. Comprehensive and quantitative analysis of growth characteristics of winter wheat in China based on growing degree days. *Advances in agronomy*. 159: 237-273.
- Maruyama, A. and Kuwagata, T. 2010. Coupling land surface and crop growth models to estimate the effects of changes in the growing season on energy balance and water use of rice paddies. *Agricultural and Forest Meteorology*. 150(7-8): 919-930.
- McMaster, G. S. and Wilhelm, W. W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and forest meteorology*. 87(4): 291-300.
- Mohammadi, S., Mirlatifi, S. M., Homae, M., Dehghanisanij, H., and Hajirad, I. 2024. Evaluation of silage maize production under pulsed drip irrigation in a semi-arid region. *Irrigation Science*. 42(2), 269-283.
- Muswera, T. J. 2016. Modelling maize (*Zea Mays* L.) phenology using seasonal climate forecasts (Master's thesis, University of Twente).
- Peichl, M., Thober, S., Samaniego, L., Hansjürgens, B. and Marx, A. 2019. Climate impacts on long-term silage maize yield in Germany. *Scientific reports*. 9(1): 7674.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*.
- حاجی‌راد، ا.، احمدآلی، خ.، و لیاقت، ع. ۱۴۰۲. مدل‌سازی ریاضی تبخیر - تعرق محصولات استراتژیک در عرض‌های جغرافیایی مختلف کشور. *تحقیقات منابع آب ایران*. ۱۹(۵): ۵۱-۶۱
- حاجی‌راد، ا.، احمدآلی، خ. و لیاقت، ع. ۱۴۰۳. ارزیابی توابع غیرخطی رشد در توصیف شاخص سطح برگ. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۸(۱): ۱۷۳-۱۸۴.
- Akao, S., Yasutake, D., Kondo, K., Nagare, H., Maeda, M. and Fujiwara, T. 2018. Effects of cultivation period on catch crop chemical composition and potential for bioenergy production. *Industrial crops and products*. 111: 787-793.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*. 300(9): D05109.
- Anandhi, A. 2016. Growing degree days-Ecosystem indicator for changing diurnal temperatures and their impact on corn growth stages in Kansas. *Ecological Indicators*. 61: 149-158.
- Cammarano, D. and Tian, D. 2018. The effects of projected climate and climate extremes on a winter and summer crop in the southeast USA. *Agricultural and Forest Meteorology*. 248: 109-118.
- Chen SiLong, C. S., Li YuRong, L. Y., Xu GuiZhen, X. G., and Cheng ZengShu, C. Z. 2008. Simulation on oil accumulation characteristics in different high-oil peanut varieties.
- Elnesr, M. N., Alazba, A. A. and Alsadon, A. A. 2013. An arithmetic method to determine the most suitable planting dates for vegetables. *Computers and electronics in agriculture*. 90: 131-143.
- Ewert, F., Rötter, R. P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K. C. and Asseng, S. 2015. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. *Environmental Modelling & Software*. 72: 287-303.
- Guan, B. T., Chung, C. H., Lin, S. T. and Shen, C. W. 2009. Quantifying height growth and monthly growing degree days relationship of plantation Taiwan spruce. *Forest ecology and management*. 257(11): 2270-2276.
- Guo, Y., Wang, Q. J., Zhang, J. H. and Wei, K. 2023. PREDICTION OF DRY MATTER AND YIELD OF SPRING MAIZE (*ZEAMAYS* L.)

- Agricultural and Forest Meteorology. 38(1-3): 169-180.
- Van Delden, A., Kropff, M. J. and Haverkort, A. J. 2001. Modeling temperature-and radiation-driven leaf area expansion in the contrasting crops potato and wheat. *Field Crops Research*. 72(2): 119-141.
- Villegas, D., Aparicio, N., Blanco, R., and Royo, C. 2001. Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat grown under Mediterranean conditions. *Annals of Botany*. 88(4): 617-627.
- Wang, K., Su, L. and Wang, Q. 2021. Cotton growth model under drip irrigation with film mulching: A case study of Xinjiang, China. *Agronomy Journal*. 113(3): 2417-2436.
- Wang, Y. J., Zhang, J. H., Wang, Q. J., Su, L. J. and Feng, J. 2013. Comparative analysis of growth models of aboveground dry biomass of grape. *Agric. Res. Arid Areas*. 31: 257-263.
- Zhang, Z., Chattha, M. S., Ahmed, S., Liu, J., Liu, A., Yang, L. and Yang, G. 2021. Nitrogen reduction in high plant density cotton is feasible due to quicker biomass accumulation. *Industrial Crops and Products*. 172: 114070.
- Zúñiga, E. C. T., Cruz, I. L. L. and García, A. R. 2014. Parameter estimation for crop growth model using evolutionary and bio-inspired algorithms. *Applied Soft Computing*, 23: 474-482.
- Mathematical and Physical Sciences. 193(1032): 120-145.
- Pronk, A. A., Heuvelink, E. and Challa, H. 2003. Dry mass production and leaf area development of field-grown ornamental conifers: measurements and simulation. *Agricultural systems*. 78(3): 337-353.
- Sawan, Z. M. 2018. Climatic variables: Evaporation, sunshine, relative humidity, soil and air temperature and its adverse effects on cotton production. *Information processing in agriculture*. 5(1): 134-148.
- Sepaskhah, A. R., Fahandezh-Saadi, S., and Zand-Parsa, S. 2011. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management. *Agricultural Water Management*. 99(1), 51-57.
- Su, L., Tao, W., Sun, Y., Shan, Y. and Wang, Q. 2022. Mathematical models of leaf area index and yield for grapevines grown in the turpan area, xinjiang, China. *Agronomy*. 12(5): 988.
- Su, L., Wang, Q. and Bai, Y. 2013. An analysis of yearly trends in growing degree days and the relationship between growing degree day values and reference evapotranspiration in Turpan area, China. *Theoretical and applied climatology*. 113: 711-724.
- Undersander, D. J. and Christiansen, S. 1986. Interactions of water variables and growing degree days on heading phase of winter wheat.

Development of a New Regional Corn Growth Model based on Reference Crop Evapotranspiration

I.Hajirad¹, K. Ahmadaali^{2*}, A. Liaghat³, S. Mohammadi⁴, S.M. Mirlatifi⁵ and H. Dehghanisani⁶

Abstract

Weather conditions and the amount of irrigation are key factors influencing crop growth processes. Knowing the biological performance of crops at different growth stages can be a useful tool for planning and managing water and fertilizers on the farm. Forage corn production (*Zea mays* L.) is one of the most important agricultural crops, with significant impact on the agricultural economy. In this study, the relative performance of corn was estimated in two scenarios, one using the variable of cumulative relative reference crop evaporation-transpiration (R_{CET_0}) and the other using the variable of cumulative relative growing degree days (R_{CGDD}), by logistic model. The results showed that based on statistical indices such as R^2 , RMSE and MAPE, the logistic model has high accuracy in estimating biological performance during the growth period. Also, by comparing the results of the model for two independent variables R_{CET_0} and R_{CGDD} , indicated that the model using cumulative relative reference crop evapotranspiration-transpiration was more accurate than the model using cumulative growing degree days. The input variable R_{CET_0} has a higher capability to simulate the fodder corn growth process due to the fact that it can comprehensively reflect the effects of meteorological factors on the growth of fodder corn. Although, in the conditions of lack of data, the presented model based on growing degree days can also estimate the yield of corn with a suitable hand. It is recommended that the proposed model be considered by executive organizations in the country for land-use planning, optimal cropping patterns, and ultimately macro-scale agricultural planning.

Keywords: Biological Yield, Deficit Irrigation, Irrigation Management, Growing Degree Days

¹ Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

² Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran (*- Corresponding Author Email: khahmadauli@ut.ac.ir)

³ Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁴ Ph.D. Water Management and Engineering Department, Collage of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

⁵ Associate Professor, Water Management and Engineering Department, Collage of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

⁶ Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Alborz, Iran

Received: 7 May 2024

Accepted: 29 May 2024