

Parameterization and Evaluation of the DSSAT-CANEGRO Model for Sugarcane CP57-614 in Khuzestan Climate Condition

MAHBOOBE GHASEMI ZANIANI^{1*}, ABDALI NASERI², HADI MOAZED³

1. Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
 2. Professor of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
 3. Retired professor of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
- (Received: Sep. 25, 2018- Revised: Nov. 4, 2018- Accepted: Nov. 30, 2018)

ABSTRACT

The purpose of this study was to calibrate and evaluate DSSAT-CANEGRO Model using field data from two datasets for cultivar CP57-614, in Khuzestan. The experimental plan was performed at three levels of irrigation water (full and deficit irrigation) with three replicates in a completely randomized block design during cultivation years of 85-86 and 94-95. First of all, model calibration was done to find out the important input parameters by GLUE method. DSSAT-CANEGRO Model consists of 20 Genetic parameters. In order to reduce some parameters, parameterization was conducted using field data. The comparison between predicted and measured data showed that the model efficiency was 0.69 to 0.75 for aerial dry mass, 0.67 to 0.7 for stalk dry mass and 0.18 to 0.25 for sucrose. The results indicated that the sucrose prediction by CANEGRO model is weak as compared to other parameters. This is due to measuring sucrose at the end of grown season.

Keyword: Aerial Dry Mass, Crop Modeling, Leaf Area Index, Stalk Dry Mass, Sucrose

پارامتریابی و ارزیابی مدل DSSAT/CANEGRO برای نیشکر رقم CP57-614 در شرایط اقلیمی خوزستان

محبوبه قاسمی زانیانی^{۱*}، عبدعلی ناصری^۲، هادی معاضد^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲. استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۳. استاد بازنشسته گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۸/۱۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۹/۹)

چکیده

هدف از این پژوهش واسنجی مدل DSSAT/CANEGRO با استفاده از داده‌های دو کشت از رقم CP57-614 در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر خوزستان و ارزیابی آن برای سطوح مختلف آبیاری است. طرح آزمایشی اجرا شده در سال‌های زراعی ۸۵-۸۶ و ۹۴-۹۵ در سه سطح آبیاری شامل دو سطح تنش آبی و یک سطح آبیاری کامل در سه تکرار در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا گردیده است. به‌منظور دستیابی به برخی ضرایب ورودی، ابتدا واسنجی مدل با روش GLUE انجام شد. مدل CANEGRO دارای ۲۰ پارامتر ژنتیکی می‌باشد که به‌منظور کاهش تعداد آن‌ها، پارامتریابی انجام شد. مقایسه پیش‌بینی‌ها و شبیه‌سازی‌های مدل نشان داد که راندمان مدل برای وزن خشک هوایی برابر با ۰/۶۹ تا ۰/۷۵، وزن خشک ساقه برابر با ۰/۶۷ تا ۰/۷ و ساکارز برابر با ۰/۱۸ تا ۰/۲۵ است. دقت مدل در پیش‌بینی ساکارز نسبت به بقیه متغیرها کمتر بود که به سبب اندازه‌گیری‌های ساکارز در اواخر فصل است.

واژه‌های کلیدی: ساکارز، شاخص سطح برگ، مدل‌سازی زراعی، وزن خشک ساقه، وزن خشک هوایی

مقدمه

نیشکر یکی از مهم‌ترین محصولات اقتصادی و اجتماعی و از کالاهای مهم در تجارت محصولات کشاورزی است به طوری که انرژی و مواد غذایی مثل شکر، اتانول و زیست‌توده از این گیاه تولید می‌شوند. نیشکر گیاهی مختص مناطق گرمسیری با نیاز آبی بالا می‌باشد. ایران بعد از استرالیا بهترین عملکرد نیشکر را در سطح جهان دارد. این گیاه در ایران عمدتاً در استان خوزستان کشت می‌گردد که از نظر اقلیمی در جهان استثنایی است. خوزستان تنها منطقه‌ای از جهان است که تولید نی در آن به ۲۲۰ تن در هکتار می‌رسد (Mokhtaran, 2014).

مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب، تعیین ویژگی‌های گیاهی، تعیین بهترین مدیریت زراعی، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول و تخمین عملکرد بالقوه به کار رفته‌اند (Marin Fabio et al., 2011). با استفاده از این مدل‌ها، هزینه و زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها کاهش می‌یابد و علاوه بر آن می‌توان به جای چند سال آزمایش در مزرعه، با کمک آمار بلندمدت هواشناسی، ارزیابی‌های لازم را انجام داد (Soltani and Hoogenboom, 2007).

مدل‌های شبیه‌سازی گیاه نیشکر ضمن افزایش دانش

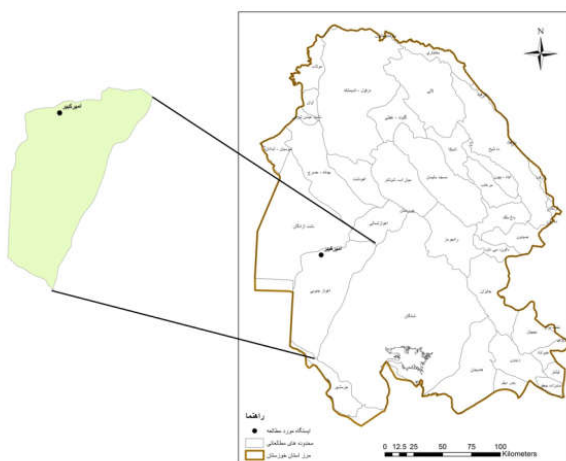
نسبت به مراحل رشد و عملکرد نیشکر، به منظور پایش محصول و عملکرد آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. به همین منظور مدل‌های مختلفی در سراسر جهان توسعه یافته‌اند (Inman-Bamber, Martine, 1991; Jones et al., 1989; Liu and Kingston, 1995; Singels et al., 2008; 2003).

ارزیابی مدل‌های FAO-AZM, DSSAT/CANEGRO, APSIM-Sugarcane در برآورد عملکرد نیشکر در مزارع مدیریت شده، توسط تعدادی محققین انجام شده است (Dias and Sentelhas, 2017). این مدل‌ها برای شرایط مختلف دیم و آبیاری واسنجی و صحت‌سنجی شده‌اند. نتایج این ارزیابی نشان داد که عملکرد همه مدل‌ها به لحاظ شبیه‌سازی محصول، رضایت‌بخش بوده است. در مطالعه دیگری، مدل فرایندمحور ساده‌ای برای شبیه‌سازی نیشکر توسعه یافته و واسنجی شده است. روش‌های قبلی مدل‌سازی گیاهی، به عنوان یک چارچوب برای این مدل استفاده و الگوریتم‌های شبیه‌سازی تجمع ساکارز و توسعه برگ با روش source-sink ارائه شده است (Marin and Jones, 2014). همچنین، مدل‌های (AS) APSIM-Sugar و (DC) DSSAT/CANEGRO به منظور تعیین تفاوت‌های ساختاری آن‌ها و چگونگی این اثرات بر پیش‌بینی رشد محصول و تولید آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Marin et al., 2015).

صحت‌سنجی مدل DSSAT/CANEGRO انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه، مزرعه آزمایشی ARC-14 واقع در کشت و صنعت امیرکبیر، یکی از واحدهای هفتگانه نیشکر در استان خوزستان بوده که جمع‌آوری داده‌ها در سال‌های زراعی ۹۴-۹۵ و ۸۵-۸۶ انجام شده است. این منطقه در طول جغرافیایی ۴۸° ۳۰' شرقی و عرض جغرافیایی ۱۵° ۳۱' تا ۳۱° ۴۰' شمالی قرار گرفته است. مساحت کل این کشت و صنعت ۱۴۰۰۰ هکتار و سطح زیر کشت آن ۱۲۰۰۰ هکتار است. این واحد دارای ۴۸۰ مزرعه ۲۵ هکتاری می‌باشد. در این منطقه، متوسط سالانه دما ۲۴ درجه سلسیوس، بارندگی ۲۶۶ میلی‌متر، تبخیر ۲۸۰۰ میلی‌متر و ارتفاع متوسط از سطح دریا ۴۲ متر است. شکل (۱) شمای کلی از منطقه مورد مطالعه و جدول (۱) شرایط آب و هوایی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه در استان خوزستان (کشت و صنعت امیرکبیر)

مدل DSSAT/CANEGRO به‌عنوان یکی از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، توسط محققین مختلفی در سطح دنیا واسنجی و صحت‌سنجی شده است (Bezuidenhout and Singels, 2007a و Singels, 2007b, Marin et al., 2015, Villegas et al., 2005). این مدل در آفریقای جنوبی به منظور شبیه‌سازی عملکرد نیشکر مورد استفاده قرار گرفته و صنعت شکر در این منطقه را به خوبی شبیه‌سازی کرده است (Bezuidenhout and Singels, 2007b; Singels, 2007a). همچنین مدل DSSAT/CANEGRO برای نیشکر برزیلی واسنجی و پیش‌بینی‌های آن ارزیابی شده است (Marin et al., 2011). در مطالعات انجام شده در برزیل، با کاربرد مدل مذکور به شبیه‌سازی و تعیین بهترین زمان کاشت نیشکر در منطقه ریولارگو در شمال شرقی برزیل پرداخته شده است (De Carvalho et al., 2018). در تعدادی از منابع بررسی شده با هدف بررسی کاربرد مدل‌های اقلیمی و مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم روی تولید نیشکر، از مدل CANEGRO استفاده شده است (Zhao and yang, 2015).

تلاش‌های صورت گرفته به منظور بررسی نیشکر و مدل‌سازی رشد و توسعه آن نشان می‌دهند که بیشتر مدل‌های شبیه‌سازی، باید برای منطقه مورد نظر واسنجی و صحت‌سنجی شوند. برای استفاده از مدل برای یک گیاه خاص، ابتدا باید پارامترهای فیزیولوژیک کنترل‌کننده رشد و توسعه آن محصول تعیین شده، مدل پارامتریابی شود و سپس پیش‌بینی‌های مدل ارزیابی شوند. با توجه به اهمیت محصول نیشکر برای استان خوزستان، مدل‌سازی آن به‌منظور بررسی و تخمین عملکرد، موضوع بسیار مهمی برای آینده‌نگری و مدیریت‌های مختلف زراعی است. بنابراین، این پژوهش با هدف تعیین پارامترهای کنترل رشد و توسعه رقم CP57-614 کشت شده در خوزستان و واسنجی و

جدول ۱. آمار میانگین ماهانه پارامترهای هواشناسی کشت و صنعت امیرکبیر

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
دمای متوسط (°C)	۲۵/۳۳	۳۰/۹۵	۳۴/۲۴	۳۵/۹۱	۳۵/۷۱	۳۱/۶۶	۲۶/۹۷	۱۸/۵	۱۳/۲۱	۱۱/۷۸	۱۴/۳۹	۱۹/۱۹
بارش متوسط سالانه (mm)	۹/۲۳	۲/۱۹	۰	۰	۰	۰/۱۱	۱/۶۴	۲۲/۶۴	۴۹/۱۳	۴۱/۶۷	۲۱/۲۶	۱۳/۶۸
متوسط رطوبت نسبی (%)	۴۵/۱	۲۸/۵	۲۳/۵	۲۳/۹	۲۹/۱	۳۳/۹	۴۳/۷	۴۵/۱	۶۳/۶	۶۸/۶	۶۵/۹	۵۰
متوسط تبخیر از تشت (mm)	۸/۱	۱۰/۹	۱۵/۷	۱۴/۹	۱۳/۹	۱۳/۶	۸/۵	۵/۶	۲/۷	۱/۷	۲/۶	۸/۳

(جدول ۱). فاصله ردیف‌های کشت بین ۱/۵ تا ۱/۸۵ متر متغیر بود. آب آبیاری از طریق رودخانه کارون تأمین و برنامه آبیاری با تانسیموتر پایش شده است. طرح آزمایشی در سه سطح آبیاری

مدل CANEGRO، با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده روی رقم CP57-614 در سال‌های زراعی ۸۵-۸۶ و ۹۴-۹۵ در کشت و صنعت نیشکر امیرکبیر پارامتریابی و ارزیابی گردید

داده‌های ورودی مورد نیاز مدل

یکی از ورودی‌های هر مدل شبیه‌سازی آب و خاک، داده‌های مربوط به خاک شامل لایه‌های پروفیل خاک، ضریب هدایت هیدرولیکی، بافت خاک و خصوصیات شیمیایی می‌باشد. با هدف تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کشت، یکی از زمین‌های طرح انتخاب و از پنج نقطه آن به شکل W از اعماق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰، ۹۰-۱۲۰ سانتی‌متری به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌برداری انجام شد. سپس نمونه‌ها برای تعیین بافت، اسیدیته، هدایت الکتریکی، وزن مخصوص ظاهری، آنیون‌ها و کاتیون‌های نمونه مرکب به آزمایشگاه منتقل شدند. جدول (۲) خصوصیات خاک مورد استفاده برای مدل DSSAT/CANEGRO را نشان می‌دهد.

جدول ۲. ویژگی‌های خاک مزرعه مورد مطالعه

pH	سیلت (%)	رس (%)	کربن آلی (%)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	رطوبت ظرفیت (زراعی %)	رطوبت پژمردگی (%)	عمق لایه (cm)
آزمایش‌های سری ۱-سال زراعی ۸۵-۸۶							
۷/۷	۱۷/۸	۲۲/۶	۱/۶۸	۱/۶۲	۲۴/۷۲	۱۶/۰۱	۳۰-۰
۷/۹	۲۶	۳۳/۸	۱/۰۴	۱/۶۳	۲۶/۸۲	۱۷/۰۷	۳۰-۶۰
۷/۹	۳۰/۲	۲۶/۸	۰/۷۴	۱/۶۲	۲۳/۸۶	۱۶/۳۲	۶۰-۹۰
۷/۸	۳۳	۴۰/۲	۰/۵۷	۱/۶۱	۲۳/۷	۱۶/۰۷	۹۰-۱۲۰
آزمایش‌های سری ۲-سال زراعی ۹۴-۹۵							
۷/۷۲	۴۹	۳۲	۱/۵۴	۱/۶۱	۲۰/۴۳	۱۴/۱۱	۳۰-۰
۷/۸۱	۴۶	۳۵	۱/۱۲	۱/۶۲	۲۲/۱	۱۶/۲۱	۳۰-۶۰
۷/۹	۴۳	۳۸	۰/۶۷	۱/۶	۲۰/۳۲	۱۵/۸	۶۰-۹۰
۷/۹	۴۷	۳۴	۰/۵۴	۱/۶۱	۲۰/۱	۱۵/۰۱	۹۰-۱۲۰

شامل دو سطح تنش آبی کمتر از تخلیه مجاز رطوبتی (۰/۷) و (۰/۸۵) و یک سطح آبیاری کامل در سه تکرار در قالب بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شده است.

در این پژوهش، هدف واسنجی و صحت‌سنجی مدل CANEGRO در زمین‌های تحت کشت نیشکر با مدیریت‌های مختلف آبیاری بوده است. به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی این مدل نیاز به اطلاعاتی شامل وزن خشک برگ، وزن خشک ساقه و میزان ساکارز می‌باشد. این اطلاعات در سال زراعی ۸۵-۸۶ برداشت شده است. در سال زراعی ۹۴-۹۵ نیز اطلاعات جدید شامل سطح برگ، تعداد برگ، وزن برگ، وزن ساقه و تعداد ساقه تحت تیمار بدون تنش برداشت شدند.

GLUE براساس تخمین بیزین است که روش مونت کارلو را برای توزیع‌ها استفاده می‌کند. الگوریتم GLUE برای تولید ۶۰۰۰ نمونه تصادفی از پارامترها می‌باشد. ۳۰۰۰ تا از این نمونه‌ها برای پارامترهای فنولوژی و ۳۰۰۰ تا برای پارامترهای رشد می‌باشند. پارامترهای ژنتیکی مورد نیاز برای بهینه‌سازی مدل شامل Parcemax راندمان مصرف تابش به‌عنوان مواد پرورده تولید شده قبل از تنفس، Apfmx حداکثر نرخ ماده خشک افزایش یافته که می‌تواند به وزن خشک اندام هوایی اختصاص یابد، Stkpfmax کسری از افزایش وزن خشک اندام هوایی روزانه در دماهای بالا در یک گیاه بالغ، Suca حداکثر میزان ساکارز در ساقه، Tbft دمایی که در آن وزن ساقه، بدون تنش افزایش می‌یابد تا ساکارز به ۵۰ درصد مقدار حداکثر برسد، Tthalfو زمان حرارتی برای نصف تاج، Tbase دمای پایه برای توسعه تاج، Lfmax حداکثر تعداد برگ سبز برای یک گیاه سالم و آبیاری شده، Mxlfarea

یکی دیگر از ورودی‌های مهم در مدل، داده‌های روزانه هواشناسی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، تشعشع خورشیدی و رطوبت نسبی می‌باشد که از طریق ابزار weatherman به مدل وارد شده‌اند.

اطلاعات مورد نیاز مدیریت زراعی شامل تاریخ کاشت و برداشت، تاریخ‌های مهم فنولوژی گیاه، مشخصات کاشت نظیر عمق و تراکم کاشت، فعالیت‌های مدیریتی نظیر عمق و زمان آبیاری، زمان و مقدار کود مصرفی و شرایط اولیه خاک از نظر مقدار نیتروژن و رطوبت موجود، نوع واریته کشت شده و تیمارهای شبیه‌سازی نیز باید به‌عنوان یک فایل به مدل وارد شوند.

ضرایب ژنتیکی نیشکر در مدل

نرم‌افزار DSSAT دارای ابزار GLUE coefficient estimator بوده که برای تخمین پارامترهای ژنتیکی گیاهان مختلف به‌کار می‌رود.

کیفیت شربت (Q. R.) را از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$Q. R. = P. F. / Pol \quad (\text{رابطه ۳})$$

P. F. ضریب تصحیح بوده که از جداول مربوطه استخراج می‌گردد. درصد شکر زرد و ساکاروز از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$Yield = 100/Q. R. \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$R. S. = 0.83 Yield \quad (\text{رابطه ۵})$$

برای اندازه‌گیری وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ساقه نمونه‌ها به صورت طبیعی و در آزمایشگاه خشک شده و توزین شدند.

به منظور تعیین شاخص سطح برگ (LAI) از روش مستقیم اندازه‌گیری مساحت برگ استفاده گردید.

ارزیابی مدل CANEGRO

برای ارزیابی مدل، مقایسه داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده روی شاخص سطح برگ، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ساقه و میزان ساکارز انجام شده است. بخشی از داده‌ها برای مرحله واسنجی و بخش دیگر برای صحت‌سنجی استفاده شد.

برای ارزیابی مدل‌ها از شاخص‌های آماری مختلفی استفاده می‌گردد. از آماره‌های لازم برای این منظور، ضریب تعیین (R^2)، شاخص آماری توافق و یلموت (d)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و راندمان مدل‌سازی (eff) را می‌توان نام برد (Marin *et al.*, 2011).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{|O_i| + |P_i|} \right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$Eff = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}_i} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن‌ها P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده شده)، n تعداد نمونه‌های به کار رفته و \bar{O}_i مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد.

حداکثر سطح برگ اختصاص یافته به همه برگ‌های بالاتر از MXLFARNO، MXLFARNO تعداد برگ در بالای سطح برگ محدود شده به Pswitch، MXLFAREA، تعداد برگ در نقطه تغییر فیلوکورن، PII فیلوکورن در تعداد برگ زیر Pswitch، PII2، فیلوکورن در تعداد برگ بالای Pswitch، Chupibase زمان حرارتی از پیدایش تا شروع رشد ساقه، Max_Pop حداکثر پنجه-زنی، Poptt1 تعداد ساقه بعد از $1600^\circ \text{Cd}^{-1}$ ، Lg_Ambase جرم اندام هوایی در شروع پیدایش، Ttplntem زمان حرارتی برای پیدایش گیاه در محصول گیاهی، Ttratnem زمان حرارتی برای پیدایش گیاه در محصول راتون و Tt_Popgrowth زمان حرارتی برای حداکثر تعداد پنجه می‌باشد.

با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده و در دسترس، پارامترهای ژنتیکی لازم برای بهینه‌سازی مشخص گردیدند تا از کار روی پارامترهای غیرضروری جلوگیری شود. برای تشخیص پارامترهای لازم برای بهینه‌سازی ابتدا آنالیز حساسیت انجام شد. همچنین پارامترهایی که به طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌گردند یا به خوبی شناخته شده‌اند، مثل زمان پایه برای توسعه تاج برابر با مقدار ثابت در نظر گرفته شده‌اند. دامنه تغییرات ضرایب ژنتیکی نیشکر، براساس داده‌های مزرعه‌ای، بررسی منابع نیشکر و توصیه‌های مدل مشخص شده‌اند (Sinclair *et al.*, 2004).

برای محاسبه درجه روز رشد که به اختصار (GDD growth degree day) نوشته می‌شود از معادله زیر استفاده می‌گردد که در آن T_{max} درجه حرارت حداکثر، T_{min} درجه حرارت حداقل، T_{base} دمای پایه می‌باشد.

$$GDD = \sum \frac{T_{max} - T_{min}}{2} - T_{base} \quad (\text{رابطه ۱})$$

به منظور اندازه‌گیری ساکارز نیاز به محاسبه درصد قند موجود در عصاره (پل) و نسبت کیفیت شربت (Q. R.) می‌باشد. برای اندازه‌گیری پارامتر پل، ۱۰۰ میلی‌لیتر از عصاره شربت را برداشته و دو گرم اسنات سرب به آن اضافه و محلول را به وسیله کاغذ صافی، صاف نموده و عصاره صاف شده را درون دستگاه ساکاری‌متر قرار می‌دهند. قرائت پس از ثابت شدن صفحه دیجیتال دستگاه انجام می‌گیرد. عدد قرائت شده از دستگاه را قرائت پل (Pol) می‌نامند. به منظور به دست آوردن پولاریزاسیون واقعی شربت، بر اساس میزان پارامتر بریکس شربت، از جدول مربوط ضریب اصلاحی پل استخراج گردیده و با ضرب کردن عدد ساکاری‌متر در ضریب اصلاحی میزان پل واقعی طبق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\%Pol = \text{Saccharimeter Reading} \times \text{Pol Factor} \quad (\text{رابطه ۲})$$

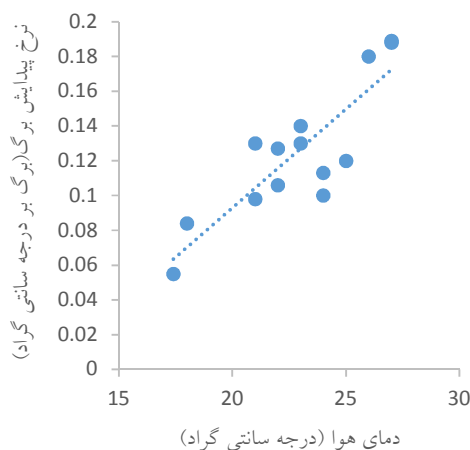
پس از به دست آوردن پارامتر پل شربت می‌توان نسبت

نتایج و بحث

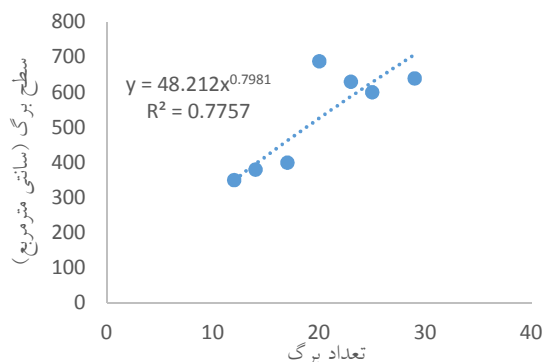
پارامتریابی رقم CP57-614

در این قسمت به تخمین پارامترها شامل Maxpop، MXIfarea، Poptt16، PI1 و PI2 به منظور پارامتریابی، پرداخته شده است. برای تعیین پارامتر MXIfarea، معادله رگرسیون تعداد برگ و اندازه برگ ترسیم گردید. مطابق با شکل (۲) ماکزیمم اندازه برگ برابر با ۶۸۹ سانتی مترمربع می باشد که در مقایسه با آن در مدل برای رقم NC0376 نزدیک به دو برابر شده است. حداکثر سطح برگ برای رقم مورد بررسی در این پژوهش در ۲۰ برگی گیاه مشاهده شده است. این نتیجه شبیه نتایج به دست آمده برای رقم CP72-2086 در فلوریدا (O'Leary, 2000) و متفاوت از نتایج Marin *et al.* (2011) می باشد.

الگوریتم ظاهری برگ در مدل DSSAT/CANEGRO براساس مفهوم فیلوکورن است (Dias and Sentelhas, 2017)، این الگوریتم، زمان حرارتی در پیدایش برگها روی پنجه را توضیح می دهد (Soltani and Hoogenboom, 2007) و چرخه گیاه در آن به دو بخش PI1 و PI2 تقسیم می شود. مطابق با شکل (۴)، مقدار PI1 در این پژوهش برابر با ۱۱۱ درجه روز برای هر برگ تخمین زده شده است که بیشتر از مقدار پیش فرض در DSSAT/CANEGRO می باشد. پارامتر PI2 نیز برابر ۱۱۷ به دست آمده که کمتر از مقدار پیش فرض در DSSAT/CANEGRO می باشد.



شکل ۴. نمودار تعیین PI1 و PI2 بر اساس نرخ پیدایش برگ در مقابل دمای هوا



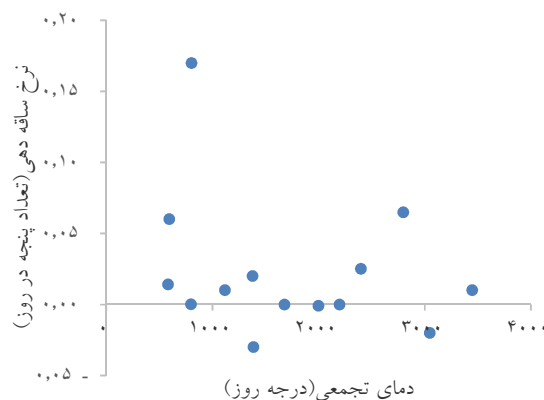
شکل ۲. نمودار سطح و تعداد برگ برای رقم مورد بررسی در طول دوره رشد برای تخمین MXIfarea

واسنجی مدل

بعد از انجام پارامتریابی، واسنجی مدل با استفاده از ۱۰ پارامتر ژنتیکی در مدل انجام گرفت. مقادیر پارامترهای Tbase، Tbst و Lg-Ambase به دلیل عدم دسترسی به داده های آزمایشگاهی در مدل بدون تغییر باقی ماندند. به منظور واسنجی مدل DSSAT/CANEGRO از داده های تیمار بدون تنش آزمایش مزرعه ای استفاده گردید. واسنجی مدل با ابزار GLUE coefficient estimator در مدل انجام شده است.

نتایج بهینه سازی ضرایب ژنتیکی مورد نیاز برای واسنجی مدل، در جدول (۳) ارائه شده است. در این جدول، پارامترهای ژنتیکی رقم NC0376 که در مدل CANEGRO به عنوان پیش-فرض درج شده است نیز ارائه شده اند. تفاوت برخی پارامترهای تعیین شده در این پژوهش با پارامترهای رقم NC0376 قابل توجه است. به طور کلی پارامترهای مرتبط با رشد گیاه نسبت به مقادیر پیش فرض مدل برای رقم NC0376 افزایش یافته اند. در حالی که پارامترهای کنترل کننده فنولوژی در مقایسه با مقادیر

مطابق با شکل (۳)، آغاز پنجه زنی در ۵۰۰-۶۰۰ درجه روز، پس از کاشت بوده که مقدار ماکزیمم آن Maxpop در ۸۹۵ درجه روز مشاهده شده است.



شکل ۳. نمودار نرخ پنجه زنی در طول دوره رشد گیاه نیشکر رقم CP57-614 به منظور تعیین Maxpop

مطابق با جدول (۳) مقدار پارامتر Suca بیشتر از معادل آن برای پیش‌فرض تخمین زده شده است و با نتایج سایر محققین متفاوت می‌باشد (Singels and Bezuidenhout, 2002). پارامترهای مرتبط با پنجه‌زنی شامل Maxpop و Poptt16 می‌باشند که به ترتیب به اندازه یک‌سوم و تقریباً برابر با مقادیر برای رقم NC0376 براساس داده‌های آزمایشگاهی کاهش یافته‌اند.

پیش‌فرض کاهش یافته‌اند. برای مثال MaxParce در مقایسه با NCO376 تا ۴۴/۵ درصد افزایش یافته است. در حالی که Maxpop کاهش بیشتری نشان می‌دهد. شبیه‌سازی با استفاده از مقدار MaxParce پیش‌فرض برای رقم NC0376، باعث تخمین بیش از اندازه عناصر گیاهی برای رقم مورد بررسی در این تحقیق می‌شود.

جدول ۳. پارامترهای ژنتیکی برای نیشکر رقم CP57-614

پارامتر	مقادیر پیش‌فرض مدل برای رقم NC0376	رقم CP57-614	دامنه بهینه‌سازی مستخرج از بررسی منابع	واحد
Parcemax	۹/۹	۱۴/۳۱	۱۵-۹	g MJ-1
Apfmx	۰/۸۸	۰/۹۱۳	۰/۰-۹۲/۸۴	t t-1
Stkpfmax	۰/۶۵	۰/۶۵۵	۰/۰-۹/۶	t t-1
Suca	۰/۵۸	۰/۶۰۲	۰/۰-۷۵/۴۸	t t-1
Tbft	۲۵	۲۵	*	°C
Tthalf	۲۵۰	۲۰۲	۱۸۰-۳۰۰	°C d
Tbase	۱۶	۱۵/۳	*	°C
Lfmax	۴۲۸	۲۹۵	**	leaves
Mxlfarea	۳۶۰	۶۸۹	**	cm ²
Mxlfarno	۲۳	۲۱	**	leaf
PI1	۶۹	۱۱۵	**	°C d
PI2	۱۶۹	۱۲۱/۲	**	°C d
Pswitch	۱۴	۱۷	**	leaf
Chupibase	۶۰۰	۶۲۴	۴۰۰-۱۰۵۰	°C d
Max_Pop	۳۰	۹/۳	۹-۱۳	stalks m ⁻²
Poptt16	۱۳/۳	۱۳	۵-۱۶	stalks m ⁻²
Lg_Ambase	۲۲۰	۲۲۰	*	t ha ⁻¹
Ttplntem	۲۰۳	۲۰۳	***	stalks m ⁻²
Ttratnem	۱۰۵۰	۴۷۶/۳	۲۰۳-۳۰۳	°C d
Tt_Popgrowth	۳۰	۱۵	۴۰۰-۷۰۰	°C d

پارامترهایی که با علامت * نشان داده شده از طریق داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند و علامت * نشان‌دهنده آن است که این پارامترها برابر مقدار معرفی شده در مدل در نظر گرفته شده‌اند *** رقم مورد بررسی را تون می‌باشد

کارایی مدل است مقادیر مناسبی دارد.

مدل DSSAT/CANEGRO اصولاً برای شبیه‌سازی اجزای گیاه از جمله وزن خشک ساقه و ساکارز به کار می‌رود. مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند که راندمان مدل در مورد وزن خشک ساقه ۶۷ درصد است. RMSE وزن خشک ساقه برای تیمار شاهد و دو تیمار تنش آبی I1 و I2 به ترتیب ۱۰/۴، ۹/۳ و ۹/۶۴ تن برهکتار تخمین زده شده است. این شاخص برای رقم NCO376 با مدل DSSAT/CANEGRO بیشتر از مقدار به دست آمده در تحقیق حاضر است (Singels

ارزیابی مدل DSSAT/CANEGRO

در این تحقیق برای ارزیابی مدل، از داده‌های مربوط به وزن ساقه، وزن اندام هوایی و ساکارز مربوط به تیمارها تنش آبی آزمایش‌های انجام گرفته در سال‌های زراعی ۸۵-۸۶ و ۹۴-۹۵ در کشت و صنعت امیرکبیر استفاده گردید. نتایج شاخص‌های ارزیابی مندرج در جدول (۴) نشان می‌دهد که مدل DSSAT/CANEGRO به خوبی مراحل فنولوژی، عملکرد و اجزای عملکرد را برای منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی نموده است. با توجه به جدول (۴) شاخص RMSE که نشان‌دهنده

الگوریتم موجود در ورژن فعلی را ندارد. شکل (۵-الف) داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی وزن خشک ساقه را نشان می‌دهد (O'Leary, 2000). برای تیمار شاهد و دو تیمار تنش آبی I1 و I2 NRMSE به ترتیب ۴، ۳ و ۲/۶ درصد به دست آمده است که نشان دهنده دقیق بودن مدل می‌باشد.

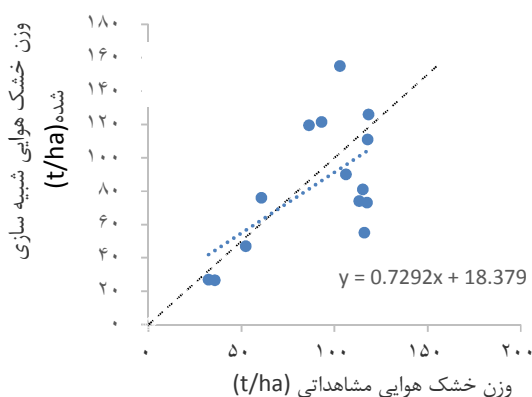
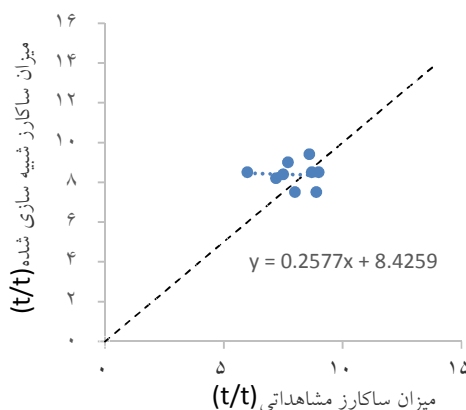
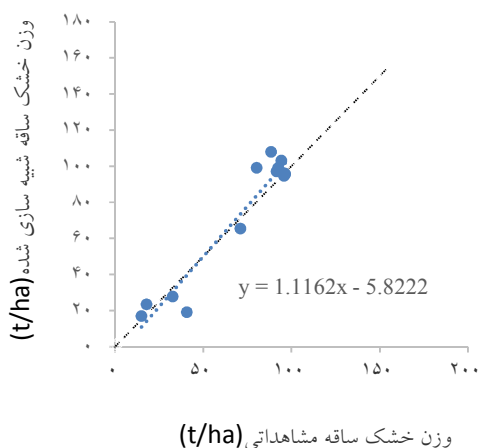
and Bezuidenhout, 2002). شاخص ذکر شده بیشتر از مقادیر به دست آمده توسط مدل APSIM برای شبیه‌سازی رشد نیشکر در مرحله بلوغ (RSME=6t/ha) است (Cheeroo-Nayamuth *et al.*, 2000). در مطالعه صورت گرفته با ورژن قدیمی‌تر CANEGRO این شاخص بیشتر از مقدار به دست آمده در این تحقیق می‌باشد. این موضوع به دلیل این است که ورژن قدیمی

جدول ۴. شاخص‌های آماری مقادیر متوسط داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده (AELH وزن اندام هوایی، LAI شاخص سطح برگ، SUCH میزان ساکارز، STKH وزن خشک ساقه)

تیمار	آماره	وزن اندام هوایی AELH t/ha	ساکارز SUCH t/t	شاخص سطح برگ LAI	وزن خشک ساقه STKH t/ha
تیمار	RMSE	۱۰/۴	۳	۴	۹/۶
شاهد	NRMSE eff	۷	۲۱	۹	۴
	R ²	۰/۶۷	۰/۱۸	۰/۳۱	۰/۷۵
	d-index	۰/۹۳	۰/۵۶	۰/۶۳	۰/۹۵
	RMSE	۰/۸۴	۰/۵۵	۰/۷۴	۰/۹۳
I1	RMSE	۹/۶۴	۲	۶	۸/۸
	NRMSE eff	۵	۱۹	۱۱	۳
	R ²	۰/۶۹	۰/۲	۰/۳۵	۰/۷۱
	d-index	۰/۸۸	۰/۵۹	۰/۶۶	۰/۹۵
	RMSE	۰/۷۸	۰/۵۹	۰/۷۹	۰/۹۵
	RMSE	۹/۳	۲/۵	۵	۸/۵
I2	NRMSE Eff	۴/۵	۲۰	۱۰/۲	۲/۶
	R ²	۰/۷	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۶۹
	d-index	۰/۸۶	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۹۵
	d-index	۰/۸۱	۰/۶	۰/۷۶	۰/۹۶

شکل (۵-ج) مقایسه بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی را برای وزن خشک هوایی نشان می‌دهد. RMSE برای وزن خشک هوایی بین ۸/۵ تا ۹/۶ تن بر هکتار به دست آمده است که با توجه به ضرایب بالای راندمان مدل می‌توان گفت که نسبت به سایر متغیرهای بررسی شده رضایت‌بخش‌تر بوده است. شاخص RMSE به دست آمده برای وزن خشک اندام هوایی بیشتر از مقادیر مشاهده شده در برخی پژوهش‌ها مانند Singels and Bezuidenhout (2002) و تقریباً مشابه کار انجام شده توسط Marin *et al.* (2011) می‌باشد. مقادیر NRMSE برای وزن خشک هوایی ۷-۴/۵ به دست آمده است که نشان دهنده دقیق بودن مدل در تخمین این پارامتر است.

کارایی مدل برای شبیه‌سازی میزان ساکارز نسبت به دیگر متغیرها کمتر بوده و بین ۰/۱۸ تا ۰/۲۵ به دست آمده است. شاخص *r* و شاخص *d* کمتر از مقادیر مشاهده شده توسط محققین دیگر بوده و شکل آن با داده‌های مشاهده شده در این مقاله یکسان می‌باشد. (شکل ۵-ب) (Singels and Bezuidenhout, 2002) و (Singels *et al.*, 2008). علت این امر را می‌توان به اندازه‌گیری ساکارز در اواخر فصل مربوط دانست. در کل، مدل‌سازی تجمع ساکارز به سبب فهم ضعیف آن در سطح گیاه به عنوان یک چالش باقی مانده است. Inman-Bamber *et al.* (2009). مقادیر NRMSE برای ساکارز نیز بین ۲۱-۱۹ می‌باشند که نشان دهنده دقت متوسط مدل در برآورد ساکارز می‌باشد.



شکل ۵. مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده در همه تیمارها الف- وزن خشک ساقه ب- میزان ساکارز ج- وزن خشک هوایی

یافته‌اند.

مدل وزن خشک ساقه و وزن اندام هوایی گیاه را به خوبی شبیه‌سازی نموده است. برای وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ساقه و میزان ساکارز راندمان مدل‌سازی به ترتیب برابر با ۰/۶۹ تا ۰/۷۵، ۰/۶۷ تا ۰/۷ و ۰/۱۸ تا ۰/۲۵ تخمین زده شده است. دقت مدل برای پیش‌بینی میزان ساکارز نسبت به بقیه متغیرها کمتر است. این موضوع می‌تواند به دلیل اندازه‌گیری آن در اواخر فصل باشد. به طور کلی می‌توان گفت که مدل با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده با کمک روش GLUE، محصول نیشکر را در کشت و صنعت نیشکر خوزستان به خوبی شبیه‌سازی نموده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل DSSAT/CANEGRO به منظور پیش‌بینی عملکرد نیشکر تحت تنش آبی استفاده شد. مدل DSSAT/CANEGRO رشد نیشکر را با استفاده از داده‌های اقلیمی و آبی بر اساس مدل‌های فرآیند محور در رشد و توسعه نیشکر شامل فنولوژی، توسعه تاج، پنجه‌زنی و تجمع زیست‌توده شبیه‌سازی می‌کند.

نتایج مرحله واسنجی نشان داده است که به طور کلی پارامترهای مرتبط با رشد گیاه نسبت به مقادیر پیش‌فرض مدل برای رقم NCO376 افزایش یافته‌اند. در حالی که پارامترهای کنترل‌کننده فنولوژی در مقایسه با مقادیر پیش‌فرض کاهش

REFERENCES

- Bezuidenhout, C N. and Singels, A. (2007a). Operational forecasting of South African sugarcane production: Part 1. System description. *Agric. Systems* 92, no. 1 (January):23–38.
- Bezuidenhout, C N. and Singels, A. (2007b). Operational forecasting of South African sugarcane production: Part 2. System evaluation. *Agric. Systems* 92, no. 1 (January):39–51.
- Cheeroo-Nayamuth, F., CRobertson, M J., Wegener, M K. and Nayamuth, A. R. H. (2000). Using a simulation model to assess potential and attainable sugar cane yield in Mauritius. *Field Crops Res.* 66(3):225–243.
- De Carvalho, A. L., De Souza, J. L., Almeida, A. C. D. S., Lyra, G. B., Lyra, G. B., Teodoro, I., and Santos., L. R. (2018). Sugarcane productivity simulation under different planting times by DSSAT/CANEGRO model in Alagoas,

- Brazil. *Emirates Journal of Food and Agriculture*.
- Dias, H. B., and Sentelhas, P. C. (2017). Evaluation of three sugarcane simulation models and their ensemble for yield estimation in commercially managed fields. *Field Crops Research*, 213, 174-185.
- Inman-Bamber, N. G. (1991). a growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. *S. Afr. J. Plant Soil* 8(2):93-99.
- Inman-Bamber, N. G., Bonnett, G. D., Spillman, M. F., Hewitt, M. L. and Xu., J. (2009). Source-sink differences in genotypes and water regimes influencing sucrose accumulation in sugarcane stalks. *Crop Pasture Sci.* 60:316-327.
- Jones., C. A., Wegener., M. K., Russell., J. S., McLeod., I. M., and Williams., J. R. (1989). AUSCANE, Simulation of Australian sugarcane with EPIC. *In Tech. Paper 29. Div. of Tropical Crops and Pastures*. CSIRO, Canberra, Australia.
- Liu., D. L. and Kingston., G. (1995). QCANE: A simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation: QCANE. p. 25-29. In M.J. Robertson (ed.) *Research and modeling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints*. Workshop Proc., Univ. of Queensland, St. Lucia, Brisbane. 10-11 Nov. 1994. Univ. of Queensland, St. Lucia, Brisbane.
- Marin., F. R. Jones., J. W., Royce. F. Suguitani, C. Jorge, L., Donzeli, J. Filho, P. W. and Nassif, D. S. P. (2011). Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. *Agronomy Journal* 103 (2): 304-315.
- Marin., F. R. and Jones., J. W. (2014). Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. *Scientia Agricola*, 71(1), pp.1-16.
- Marin., F. R, Thorburn, P. J. Nassif., D. S. and Costa., L. G. (2015). Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. *Environmental Modelling & Software*, 72: 372-386.
- Martine., J. F. (2003). Modelisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle. Ph.D. thesis. Inst. Natl. Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Mokhtaran, R. (2014). Dynamic study of freshwater and saltwater interface in irrigated lands of sugarcane. Ph. D. dissertation, University of Chamran, Ahwaz. (In Farsi).
- O'Leary., G. J. (2000). A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. *Field Crops Res.* 68, no. 2: 97-111.
- Sinclair., T. R. Gilbert., R. A. Perdomo., R. E. Shine., J. M. Powell., G. and Montes., G. (2004). Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. *Field Crops Res.* 88(2), (Agosto 10):171-178.
- Singels., A. and Bezuidenhout., C. N. (2002). A new method of simulating dry matter partitioning in the CANEGRO sugarcane model. *Field Crops Res.* 78(2-3):151-164.
- Singels., A., Jones, M. and van den Berg., M. (2008). DSSAT v4.5 Canegro Sugarcane Plant Module Scientific Documentation. International Consortium for Sugarcane Modelling.
- Soltani A, Hoogenboom G (2007) Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, 103(3), 198-207.
- Villegas., F. D. Daza., O. H. Jones., J. W. and Royce. F. W. (2005). CASUPRO: An industry-driven sugarcane model. *ASAE paper no. 053025*. ASAE, St. Joseph, MI.
- Zhao D, Yang R L (2015). Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. *International Journal of Agronomy*.