

شبیه‌سازی شاخص سطح برگ و عملکرد کلزا تحت شرایط تنش آب در اقلیم نیمه‌خشک

سیده ملیحه میرهاشمی^{۱*} - محمد بنایان اول^۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۹۱/۱/۱۶

چکیده

یکی از راه‌های آزمون جنبه‌های مختلف مدیریت گیاهان زراعی، مدل‌سازی رشد آنها با هدف پیش‌بینی عملکرد گیاه تحت شرایط متفاوت می‌باشد. پیش‌بینی صحیح عملکرد گیاه زراعی جهت مدیریت مناسب سیستم‌های زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با در نظر گرفتن کمبود آب ضرورت دارد. هدف از این مطالعه ارائه مدلی ساده برای پیش‌بینی عملکرد کلزا بر اساس شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در شرایط تنش آب بود. در این مدل شاخص سطح برگ بر اساس درجه روز تجمعی و شاخص تنش آب شبیه‌سازی شد. موازنه آب خاک توسط مقدار تخلیه رطوبت از منطقه توسعه ریشه‌ها، تبخیر و تعرق واقعی گیاه، رواناب و نفوذ عمقی شبیه‌سازی شد. داده‌های ورودی مورد نیاز مدل شامل داده‌های آب و هوا (میزان تشعشع خورشیدی، درجه حرارت حداقل و حداکثر و بارندگی)، اطلاعات مربوط به خاک و گیاه می‌باشد. مدل برای رقم زرفام تحت شرایط تنش و عدم تنش در سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ برای شرایط مشهد ساخته شد و در سال ۸۵-۱۳۸۴ برای تیمارهای مربوطه ارزیابی شد. مدل در کلیه تیمارها و طی هر دو سال پیش‌بینی قابل قبولی از شبیه‌سازی شاخص سطح برگ و عملکرد کلزا نشان داد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، شاخص تنش آب، شاخص سطح برگ، درجه روز تجمعی

مقدمه

بودن میزان تبخیر و تعرق باعث توجه بیشتر به مطالعه اثرات تنش آب در این مناطق شده است.

عوامل محیطی بر عملکرد گیاهان زراعی تاثیر می‌گذارد. تنش آب یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده عملکرد محصولات در سیستم‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. یکی از مشکلات توسعه کشت کلزا در بسیاری از مناطق دنیا نیز تنش آب عنوان شده است (۲۱). گیاهان تحت شرایط تنش آب شاخص سطح برگ خود را از طریق لوله کردن برگ‌ها (۲۰) و (۳۴) و یا پیری و ریزش زود هنگام آنها (۲۷) کاهش می‌دهند. در کلزا نیز کاهش سطح برگ از اولین و مشهودترین پدیده‌های فیزیولوژیکی در واکنش به تنش آب است (۵). اساساً تغییر هر یک از عوامل محیطی می‌تواند بر فرآیندهای رشد و نمو گیاه و در نهایت بر تولید و عملکرد گیاه زراعی مؤثر باشد (۲۲). پژوهشگران مختلف اثر تنش آب را روی کاهش سطح برگ و در نهایت کاهش عملکرد ذرت گزارش کردند (۹، ۳۴ و ۳۵). سیت سنگ (۲۷) نیز گزارش کرد که هر تنش محیطی که فرآیندهای رشدی کلزا را تحت تاثیر قرار دهد، ممکن است بر عملکرد نهایی آن مؤثر واقع شود.

یکی از ابزارهای مطالعه و بهبود جنبه‌های مختلف مدیریت آب، مدل‌سازی رشد گیاهان تحت شرایط تنش جهت شناخت بهتر

کلزا (*Brassica napus* L.) متعلق به خانواده Brassicaceae یکی از گیاهان روغنی مهم است که به دلیل اسیدچرب غیراشباع زیاد و وجود پروتئین بعنوان یکی از سالم‌ترین روغن‌های خوراکی کاربرد دارد. این روغن حاوی امگاتری بوده و سرشار از ویتامین‌ها و مواد معدنی ضروری است (۳۹). در سال‌های اخیر توسعه کشت کلزا به دلیل سازگاری با شرایط اقلیمی اغلب نقاط کشور مورد توجه قرار گرفته است (۴). کلزا بعد از سویا با تولید ۵۶/۵ میلیون تن دومین گیاه روغنی دنیا است (۱۰). بر اساس آمار وزارت جهاد کشاورزی سطح زیر کشت کلزا کشور در سال زراعی ۸۸-۱۳۸۷ حدود ۸۶ هزار هکتار، با تولید ۱۶۴۰۰۰ تن برآورد شده است که ۵۹/۵۶ درصد آن اراضی آبی و بقیه بصورت دیم بوده است (۱). ایران با متوسط نزولات ۲۴۰ میلی‌متر در سال جزء یکی از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود (۵). محدودیت منابع آبی و بالا

۱- دانشجوی دکتری و دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: mmi1383@yahoo.com

*) نویسنده مسئول:

3- Root Mean Squared Error

برگ اعمال می‌شود (۲۰). شاخص تنش آب بعنوان تابعی از تبخیر - تعرق نسبی تعریف می‌شود. در گیاهان سرعت نمو توسط درجه حرارت کنترل می‌شود. بیشتر مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی مراحل نمو را بر اساس درجه حرارت بعنوان اولین متغیر محرک شبیه‌سازی می‌کنند (۲۳). در مطالعه حاضر شاخص سطح برگ کلزا بعنوان تابعی از درجه حرارت تجمعی با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد.

$$LAI_{(j)} = LAI_{max} \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^j TT - T_c}{T_m} \right)^2 \exp \left\{ \frac{2}{\alpha} \left[1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^j TT - T_c}{T_m} \right)^{\alpha} \right] \right\} - (1 - stress^{\lambda}) \right] \quad (1)$$

که در آن LAI_j : شاخص سطح برگ در روز j ام، LAI_{max} : حداکثر شاخص سطح برگ قابل حصول توسط گیاه، TT : درجه روز رشد کلزا، T_c : درجه روز مورد نیاز برای سبز شدن، T_m : درجه روز مورد نیاز برای رسیدن به LAI_{max} : شاخص تنش آب می‌باشد، α و λ : پارامترهایی هستند که از طریق واسنجی بدست می‌آیند. α : پارامتری که رشد و پیری گیاه را کنترل می‌کند. λ : پارامتر تجربی است که حساسیت گیاه به تنش آب را کمی می‌کند. در مطالعات قبلی مقدار $\lambda = 1/25$ برای گیاهانی نظیر سورگوم، آفتابگردان، سویا، ذرت و گندم پیشنهاد شد (۱۸ و ۲۰).

درجه روز رشد کلزا در هر روز با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد:

$$TT_j = \sum_{i=1}^j (T - T_b) \quad (2)$$

که در آن T : میانگین دمای روزانه برحسب درجه سانتیگراد، T_b : دمای پایه رشد برحسب درجه سانتیگراد، Z : تعداد روزهای بعد از کاشت است (۱۶ و ۱۸). دمای پایه کلزا ۲ درجه در نظر گرفته شد (۵).

شبیه‌سازی عملکرد دانه

عملکرد دانه طبق معادله ۳ ارائه شده توسط مایلهول و همکاران (۲۰)، خالدیان و همکاران (۱۸) پیش‌بینی شد.

$$Y_a = Y_m \min \{ 1; LAI_{av} / LAI_{opt} \} \quad (3)$$

که در آن Y_m : عملکرد نهایی دانه تحت شرایط مطلوب رشد برحسب گرم در مترمربع، LAI_{av} : میانگین شاخص سطح برگ در طول دوره تنش آب، LAI_{opt} : حداکثر شاخص سطح برگ تیمار شاهد به منظور بدست آوردن حداکثر عملکرد می‌باشد. LAI_{av} ، از طریق معادله ۴ بدست آمد (۱۸ و ۲۰):

$$LAI_{av} = 1/N \sum LAI_j \quad (4)$$

که در آن N : تعداد روزهایی است که گیاه تحت شرایط تنش قرار دارد.

فرایندهای مختلف گیاهی و سهم آنها در میزان عملکرد گیاهان می‌باشد. این مدل‌ها نشان می‌دهند که چطور گیاهان به شرایط محیطی واکنش نشان می‌دهند (۱۵). مدل‌های گیاهان زراعی که مصرف آب، رشد و عملکرد گیاه را شبیه‌سازی می‌کنند برای درک واکنش گیاهان زراعی به پویایی سیستم‌های گیاه، خاک و اتمسفر و همچنین برای کمک به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در راستای استفاده بهینه از منابع قابل دسترس استفاده می‌شوند (۱۴، ۲۸ و ۳۱). گسترش سطح برگ یک فاکتور کلیدی در دریافت تشعشع خورشیدی (۸ و ۳۰) و تبادل انرژی و آب (۸) در گیاه می‌باشد. سینکلر و همکاران (۳۰)، گزارش کردند که در تولید محصولات زراعی، گسترش سطح برگ برای افزایش دریافت تشعشع خورشیدی و تجمع زیست توده ضروری است. بنابراین در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی تخمین صحیح شاخص سطح برگ به منظور پیش‌بینی تولید بیومس و عملکرد دانه ضروری است (۳۱ و ۳۷).

دما یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی است که رشد، نمو و عملکرد گیاه را کنترل می‌کند (۳۶). محققین مختلف یک مدل ساده شبیه‌سازی رشد را برای گیاهانی نظیر سورگوم، آفتابگردان، سویا، ذرت و گندم بکار بردند که در این مدل‌ها شاخص سطح برگ بعنوان تابعی از درجه حرارت شبیه‌سازی شد (۱۸، ۲۰ و ۲۹). مدل‌های سورگوم و آفتابگردان (۲۰)، ذرت و گندم (۱۸) عملکرد دانه را بر اساس شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده پیش‌بینی کردند. فرجی و همکاران (۱۱)، بیان نمودند که عملکرد کلزا تحت تاثیر درجه حرارت قرار می‌گیرد. بنابراین به نظر می‌رسد شبیه‌سازی شاخص سطح برگ کلزا بر اساس درجه حرارت و کاربرد آن برای پیش‌بینی عملکرد دانه کلزا امکان پذیر باشد.

هدف این مطالعه پیش‌بینی عملکرد دانه کلزا بر اساس شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده تحت شرایط تنش آب بود. بر این اساس کل شاخص سطح برگ بعنوان تابعی از درجه حرارت تجمعی از زمان سبز شدن تعیین شد و اثر کمبود آب در طی دوره رشد گیاه در این معادله توسط یک شاخص تنش آب اعمال شد.

مواد و روش‌ها

مدل در قالب یک برنامه کامپیوتری در محیط مخصوص مدل‌سازی نرم افزار Model Maker نوشته شد.

شبیه‌سازی شاخص سطح برگ

در این مطالعه شاخص سطح برگ طبق معادله پیشنهادی توسط مایلهول و همکاران (۲۰)، خالدیان و همکاران (۱۸) شبیه‌سازی شد. در این رابطه فرض بر این است که همه عوامل موثر در تولید گیاه بجز آب در حد مطلوب هستند و اثر تنش آب روی شاخص سطح

تنش آب و تبخیر- تعرق

تنش آب: تنش آب برای هر روز از رابطه زیر محاسبه شد (۲۰):

$$stress = \frac{ET_a}{ET_o} \quad (10)$$

که ET_o و ET_a به ترتیب تبخیر- تعرق واقعی گیاه و تبخیر و تعرق مرجع برحسب میلی‌متر می‌باشند.

تبخیر - تعرق: برای پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع در هر روز از روش پرستلی و تیلور (۲۴) تغییر یافته توسط ریچی (۲۵) استفاده شد.

تبخیر - تعرق واقعی گیاه با اعمال یک ضریب اصلاحی بر اساس آنچه توسط آلن و همکاران (۶) ارائه شده است، محاسبه شد (معادلات ۱۱ و ۱۲).

$$ET_a = K_c ET_o \quad \text{اگر} \quad D_r \leq RAW \quad (11)$$

$$ET_a = \left(\frac{TWA - D_r}{(1-P)TAW} \right) K_c ET_o \quad \text{اگر}$$

$$RAW < D_r < TAW \quad (12)$$

که در آن K_c : ضریب گیاهی است و در این مدل مقدار حداکثر آن بکار برده شد. D_r : مقدار تخلیه رطوبت از منطقه توسعه ریشه‌ها می‌باشد. همانطور که در معادله ۱۲ ارائه شده است در شرایطی که محتوی رطوبت آب خاک کاهش می‌یابد اعمال تصحیح در معادله ET_a ضروری است.

موازنه آب خاک

موازنه آب خاک در انتهای هر روز برحسب میلی‌متر طبق معادله ۱۳ محاسبه شد:

$$D_{r,j} = D_{r,j-1} - (R - RO)_j - I_j + ET_{a,j} + DP_j \quad (13)$$

که در آن $D_{r,j}$: مقدار تخلیه رطوبت از منطقه توسعه ریشه‌ها در انتهای روز j ام، $D_{r,j-1}$: مقدار تخلیه رطوبت از منطقه توسعه ریشه‌ها در انتهای روز $j-1$ ام، R_j : بارندگی در روز j ام، RO_j : رواناب از سطح خاک در روز j ام، I_j : مقدار آبیاری در روز j ام، $ET_{a,j}$: تبخیر- تعرق واقعی گیاه در روز j ام و DP_j : تلفات ناشی از نفوذ عمقی از منطقه نفوذ ریشه‌ها در روز j ام هستند. همه مقادیر ذکر شده برحسب میلی‌متر می‌باشند.

تخلیه ابتدایی از منطقه توسعه ریشه ($D_{r,j-1}$)

برای شبیه‌سازی موازنه آب خاک، مقدار تخلیه اولیه از منطقه توسعه ریشه ($D_{r,j-1}$) باید تخمین زده شود. بنابراین این مقدار در شروع روز اول معادل مقدار آب سهل الوصول فرض شد (۶).

عملکرد نهایی دانه تحت شرایط مطلوب رشد بر اساس معادله ۵ محاسبه شد (۲۰):

$$Y_m = HI RUE \sum R_j F_j \quad (5)$$

که در آن HI : شاخص برداشت، RUE : کارایی مصرف نور برحسب گرم در مگاژول، R_j : تشعشع خورشیدی رسیده در هرروز برحسب مگاژول در مترمربع، F_j : کسری از تشعشع خورشیدی که توسط کانوبی گیاه دریافت می‌شود (بدون واحد) می‌باشد.

میزان تشعشع روزانه خورشیدی به روش ارائه شده توسط خودریان و وان لار (۱۲) محاسبه گردید. سپس این مقادیر برای عرض جغرافیایی مشهد و بر اساس تعداد ساعات آفتابی استخراج شده از داده‌های ایستگاه هواشناسی مرکز اقلیم‌شناسی مشهد و فرمول انگسترم (۳۲) اصلاح گردید.

F_j نیز بصورت تابعی نمایی از شاخص سطح برگ تعریف شد:

$$F_j = 1 - \exp(-K LAI_j) \quad (6)$$

که در آن K ضریب خاموشی است و بر اساس معادله ارائه شده توسط زعفرانی و اسنیر (۳۸) و خالدیان و همکاران (۱۸) محاسبه شد (معادله ۷).

$$K = \min(1.0; 1.43 \times LAI^{-0.5}) \quad (7)$$

فراهمی آب خاک

مقدار رطوبت موجود برای گیاه بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم، کل آب قابل استفاده گیاه (TAW) نامیده می‌شود و از رابطه زیر برحسب میلی‌متر محاسبه شد:

$$TAW = 1000(\theta_{fc} - \theta_{wp})Z_r \quad (8)$$

که در آن θ_{fc} : رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی برحسب مترمکعب در مترمکعب، θ_{wp} : رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم برحسب مترمکعب در مترمکعب و Z_r : عمق ریشه گیاه برحسب متر است. مقدار θ_{wp} و θ_{fc} برای خاک‌های با بافت متفاوت و عمق ریشه گیاهان مختلف توسط آلن و همکاران (۶) ارائه شده است. در این مدل مقدار حداکثر عمق موثر ریشه کلزا (۱/۲۵ متر) برای شبیه‌سازی موازنه آب خاک استفاده شد.

کسری از کل آب قابل استفاده که گیاه به راحتی می‌تواند جذب کند را آب سهل الوصول (RAW) می‌گویند و از رابطه زیر برحسب میلی‌متر محاسبه شد:

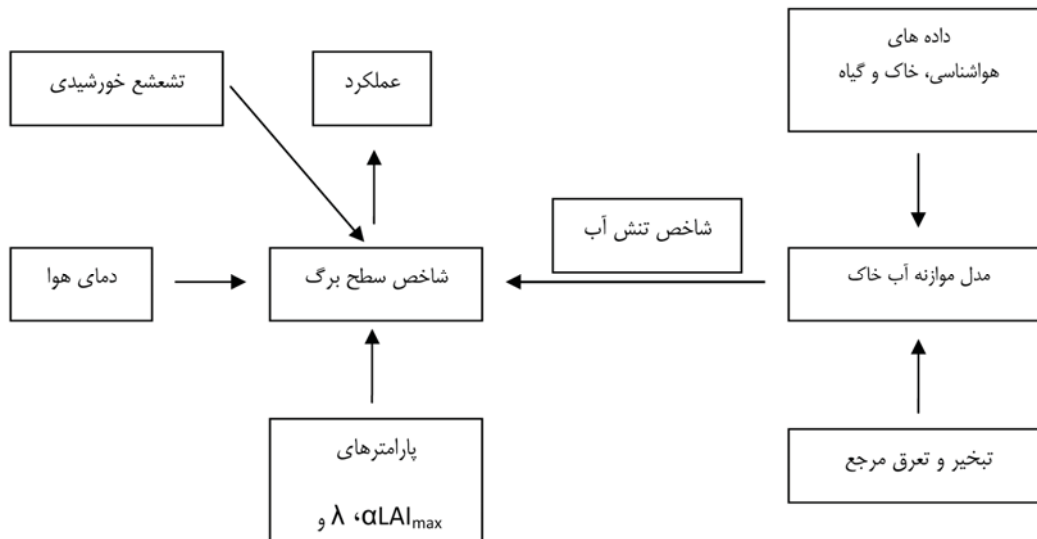
$$RAW = P \cdot TAW \quad (9)$$

که در آن P جزء متوسطی از کل آب قابل استفاده که قبل از وارد آمدن تنش به گیاه، می‌تواند از منطقه توسعه ریشه‌ها تخلیه شود. این مقدار برای گیاهان مختلف نیز توسط آلن و همکاران (۶) ارائه شده است. این مقدار برای کلزا ۰/۶ بیان شده است.

خشک) و سیستم آبیاری قطره‌ای برابر با صفر فرض شد. نمودار کلی مدل در شکل ۱ ارائه شده است.

اطلاعات آب و هوا

داده‌های آب و هوایی شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر، ساعت آفتابی و بارندگی برای سال‌های ۱۳۸۳-۱۳۸۵ از ایستگاه هواشناسی مرکز اقلیم‌شناسی مشهد جمع‌آوری شد (جدول ۱).



شکل ۱- نمودار مربوط به ساختار مدل شبیه‌سازی عملکرد کلزا تحت شرایط تنش آب

جدول ۱- میانگین ماهانه دمای حداکثر (°C)، دمای حداقل (°C)، کل بارندگی ماهانه (میلی‌متر) و کل ساعت آفتابی ماهانه (ساعت در روز) در سال‌های آزمایش

ماه‌های سال	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۱۳۸۳												
دمای حداکثر	۱۹/۱	۲۸/۳	۳۳/۶	۳۳/۷	۳۴/۳	۲۹/۶	۲۲/۷	۱۷/۶	۸/۷	۱۰/۲	۱۵/۱	۱۶/۴
دمای حداقل	۱/۷	۱۴/۴	۱۸/۰	۲۰/۴	۱۸/۸	۱۳/۷	۷/۵	۵/۶	-۰/۴	۱/۲	۲/۵	۴/۵
بارندگی	۵۶/۵	۲۳/۷	۰	۵/۰	۰	-/۴	۶/۹	۱۶/۷	۵۶/۰	۵۴/۳	۱۰/۶	۵۶/۶
ساعت آفتابی	۲۰۰/۲	۲۸۳/۹	۳۳۷/۵	۳۵۰/۴	۳۷۶/۴	۳۱۵/۷	۲۵۰/۷	۱۸۱/۴	۱۳۵/۷	۱۳۸/۹	۲۱۴/۱	۱۷۱/۱
۱۳۸۴												
دمای حداکثر	۲۱/۴	۲۵/۶	۳۲/۶	۳۵/۶	۳۲/۶	۳۰/۹	۲۳/۵	۱۴/۸	۱۲/۵	۸/۰	۷/۸	۱۶/۶
دمای حداقل	۹/۴	۱۳/۶	۱۸/۹	۲۱/۴	۱۸/۹	۱۵/۲	۸/۹	۳/۹	۱/۴	-۰/۴	-۱/۲	۶/۲
بارندگی	۳۰/۰	۴۳/۱	۸/۰	۰/۲	۵/۳	۰	۰	۲۷/۷	۱/۹	۲۰/۸	۲۲/۱	۹۶/۵
ساعت آفتابی	۲۴۶/۲	۲۵۹/۳	۳۳۷/۵	۳۸۵/۳	۳۵۶/۷	۳۲۸/۱	۲۶۹/۹	۱۹۰/۷	۱۸۲/۱	۱۴۵/۷	۱۳۲/۳	۱۷۸/۵
۱۳۸۵												
دمای حداکثر	۲۴/۲	۲۹/۸	۳۴/۵	۳۴/۷	۳۵/۱	۲۸/۸	۲۷/۰	۱۶/۱	۷/۰	۱۸/۶	۱۳/۸	۱۶/۲
دمای حداقل	۱۰/۹	۱۶/۷	۱۹/۶	۲۰/۸	۱۹/۲	۱۳/۷	۱۳/۰	۵/۱	-۰/۷	-۴/۴	۳/۵	۵/۸
بارندگی	۳۸/۲	۷/۰	۰	۵/۰	۰	۰	۱/۸	۱۹/۴	۴۳/۹	۴۹/۱	۱۱/۶	۳۴/۵
ساعت آفتابی	۲۷۳/۳	۳۲۸/۸	۳۸۶/۳	۳۷۲/۶	۳۷۸/۱	۳۰۹/۴	۲۴۶/۵	۱۷۹/۱	۱۱۵/۸	۱۱۲/۳	۱۳۴/۹	۱۹۳/۱

داده‌های مزرعه

به منظور ارزیابی مدل از داده‌های آزمایشی دو ساله که در سال‌های ۸۴-۱۳۸۳ و ۸۵-۱۳۸۴ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی طرق (طول و عرض جغرافیایی ۱۴' ۳۸' ۵۹° E و ۱۳' ۱۳' ۳۶° N) مشهد در استان خراسان رضوی انجام شده بود استفاده شد (۵). در این آزمایش عملکرد ارقام کلزا در پاسخ به تنش آبی مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مربوط به شاخص سطح برگ و عملکرد رقم زرفام کلزا در سه سطح تامین نیاز آبی شامل ۱۰۰ (شاهد)، ۸۰ و ۶۵ درصد نیاز آبی کلزا از اطلاعات ارائه شده در این مطالعه بدست آمد. نیاز آبی کلزا در شرایط مشهد با استفاده از محاسبات نرم افزار OPTIWAT تعیین گردید (۳). مقادیر آب مصرفی در سطوح مختلف به ترتیب ۳۵۰۰، ۲۸۰۰ و ۲۲۷۵ مترمکعب در هکتار برای تیمارهای شاهد، ۸۰ و ۶۵ درصد نیاز آبی بکار برده شد. سیستم آبیاری به صورت قطره‌ای تحت فشار همراه با کنتور حجمی با دقت ۰/۰۰۰۱ مترمکعب و مستقل برای هر کدام از تیمارها بکار برده شد. تیمارهای تنش آبی در هر دو سال آزمایش از اول اسفندماه اعمال شد. بافت خاک محل آزمایش سیلتی لومی بود. قبل از کاشت و بر اساس نتایج تجزیه خاک و توصیه کودی کلزا، به ترتیب ۵۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم اوره، فسفات آمونیوم و سولفات پتاسیم به خاک داده شد. کشت به روش جوی و پشته‌ای با فواصل ردیف ۳۰ سانتی‌متر و تراکم ۸۰ بوته در مترمربع در تاریخ کشت ۱۵ مهرماه در هر دو سال آزمایش انجام شد.

برآورد پارامتر و تعیین اعتبار مدل

مدل بر اساس اطلاعات فصل رشد سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ رقم زرفام ساخته شد و توسط اطلاعات فصل رشد سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ تعیین اعتبار شد. بر این اساس جهت واسنجی پارامترهای α و λ مقادیر مختلفی در مدل قرار داده شد سپس مدل اجرا شد و مقادیر شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در سال ۸۴-۱۳۸۳ مقایسه گردید، مقداری که بهترین شبیه‌سازی و کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^3$) را داشت بعنوان برآورد نهایی پارامترها انتخاب شد. سپس به منظور تعیین اعتبار مدل، مدل حاضر بر اساس داده‌های آب و هوایی سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ اجرا شد و مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ و عملکرد دانه با مقادیر اندازه‌گیری شده در این سال مقایسه شد.

به منظور شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، پارامتر α بر اساس اطلاعات تیمار شاهد برای بدست آوردن T_m برابر با ۹۲۰ درجه روز کالیبره شد. این مقدار T_m با نیاز حرارتی مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ که توسط وفابخش (۵) گزارش شده بود،

مطابقت داشت. بر این اساس مقدار پارامتر α برابر با ۶ برآورد شد. بیشترین مقدار شاخص سطح برگ نزدیک به زمان گلدهی بدست آمده و سپس کاهش می‌یابد، به‌منظور برآورد این پارامتر از مقادیر ارائه شده در مطالعه وفابخش (۵) استفاده شد. پارامتر λ بر اساس اطلاعات تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی برآورد شد و مقدار آن ۰/۷۵ بدست آمد.

شاخص برداشت از میانگین مقادیر مشاهده شده برای هر تیمار بدست آمد، مقدار 0.2 ± 0.3 برای این پارامتر برآورد شد. کارایی مصرف نور یک پارامتر کلیدی در بیشتر مدل‌های رشد گیاهان زراعی است و نشان می‌دهد که به ازاء هر واحد تشعشع دریافت شده چه میزان ماده خشک توسط گیاه تولید می‌شود (۱۸ و ۲۶). خالدیان و همکاران (۱۸) پیشنهاد کردند که بکاربردن یک مقدار ثابت برای این پارامتر بهتر است، در بعضی از منابع کارایی مصرف نور را حدود ۱/۴ گرم ماده خشک به ازاء یک مگاژول تشعشع جذب شده گزارش کردند (۵).

برای آزمون مدل، مقادیر شاخص سطح برگ و عملکرد شبیه‌سازی شده با مشاهده شده توسط شاخص‌های متفاوتی مقایسه شدند. برای مقایسه انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مشاهده شده، از رگرسیون خطی و خط ۱:۱ استفاده شد، تعیین دقت کلی مدل توسط $RMSE(\%)$ مطابق معادله ۱۶ محاسبه شد (۳۳) و صحت کلی مدل بر اساس کارایی مدل‌سازی (ME^1) بدست آمد (معادله ۱۷) (۱۹).

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \cdot \frac{100}{O} \quad (16)$$

$$ME = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right]}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (17)$$

که در آن S و O به ترتیب داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، \bar{O} میانگین داده‌های مشاهده شده و n تعداد مشاهدات می‌باشد. $RMSE(\%)$ که اختلاف نسبی بین شبیه‌سازی و مشاهدات را نشان می‌دهد، توصیف بهتری از قابلیت مدل دارد. چنانچه مقدار $RMSE(\%)$ کمتر از ۱۰ درصد باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۲۰-۱۰ درصد خوب، بین ۳۰-۲۰ درصد متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد ضعیف خواهد بود (۷ و ۱۷).

ME تغییرات موجود در داده‌های شبیه‌سازی شده را با تغییرات درون داده‌های مشاهده شده مقایسه می‌کند (۱۷). حداکثر مقدار ME

آبی بدست آمد. این در حالی بود که دقت و کارایی مدل با مقادیر به ترتیب ۰/۹۱، ۰/۹۸ و ۰/۷۷ برای تیمار شاهد، ۸۰ درصد نیاز آبی و ۶۵ درصد نیاز آبی، واریانس کمی را بین مقادیر شبیه‌سازی شده نشان داد. شکل ۳ ب، مقایسه شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و مشاهده شده تحت تیمارهای مختلف در سال دوم را نشان می‌دهد. همبستگی بالا بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده شاخص سطح برگ به ترتیب با R^2 ۰/۹۱، ۰/۹۶ و ۰/۵۹ برای تیمار شاهد، ۸۰ درصد نیاز آبی و ۶۵ درصد نیاز آبی بدست آمد (جدول ۲).

به طور کلی مدل، شاخص سطح برگ کلزا را به نحو نسبتاً خوبی پیش‌بینی کرد (شکل ۴) و همبستگی بالا ($R^2 = 0/84$) بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها بدست آمد ($P < 0/01$).

شبییه‌سازی عملکرد

مدل، عملکرد دانه تحت شرایط مطلوب رشد و تنش آبی را بخوبی پیش‌بینی کرد و تطابق خوبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده بدست آمد. در سال اول عملکردهای شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای مختلف به منظور تعیین اعتبار اولیه مدل استفاده شدند. دقت و صحت مدل به ترتیب با مقادیر $RMSE(\%) = 15/1$ و $ME = 0/04$ بدست آمد. به طور کلی مدل عملکرد کلزا را با تعداد مشاهدات برابر با ۶ (کلیه اطلاعات تیمارهای مختلف در دو سال آزمایش) و جذر میانگین مربعات خطا برابر با ۱۷ درصد بخوبی پیش‌بینی کرد (شکل ۵) و همبستگی بالا ($R^2 = 0/73$) و معنی داری ($P < 0/05$) بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها بدست آمد. بررسی شکل ۵ نشان می‌دهد که مدل در زمانی که عملکرد کمتر از ۲/۱ تن در هکتار است پیش‌بینی کمی پایین‌تر و در زمانی که عملکرد بیشتر از ۲/۱ تن در هکتار است پیش‌بینی کمی بالاتر را نشان می‌دهد. با این حال، مدل حاضر از کفایت مناسب برای پیش‌بینی عملکرد برخوردار است زیرا بر اساس آنچه توسط هم و ماچو (۱۳) و سلطانی و همکاران (۲) ارائه شده است، در به‌کارگیری مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد بیان شده است که مقدار R^2 باید بیش از ۶۰ درصد باشد، که این شرط در مدل حاضر وجود دارد. بنابراین می‌توان از مدل حاضر برای پیش‌بینی عملکرد استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

این مدل عملکرد کلزای پاییزه را بر اساس شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده تحت شرایط مطلوب رشد و تنش آبی پیش‌بینی کرد. نتایج مطالعه نشان داد که شاخص سطح برگ می‌تواند بر اساس درجه حرارت و تحت تاثیر تنش آب شبیه‌سازی شود. تعیین اعتبار مدل نشان داد که معادله پیشنهادی برای شبیه‌سازی شاخص سطح برگ اثرات تنش آب را روی پیش‌بینی عملکرد بخوبی تخمین می‌زند. نتایج این مطالعه با نتایج بدست آمده توسط مایلپهول و همکاران (۲۰)،

معادل یک می‌باشد که مطلوبترین مقدار ME است. مقدار ME می‌تواند منفی نیز باشد ولی مقادیر منفی نشان دهنده واریانس بیشتر در نتایج شبیه‌سازی نسبت به مشاهدات می‌باشند (۱۹).

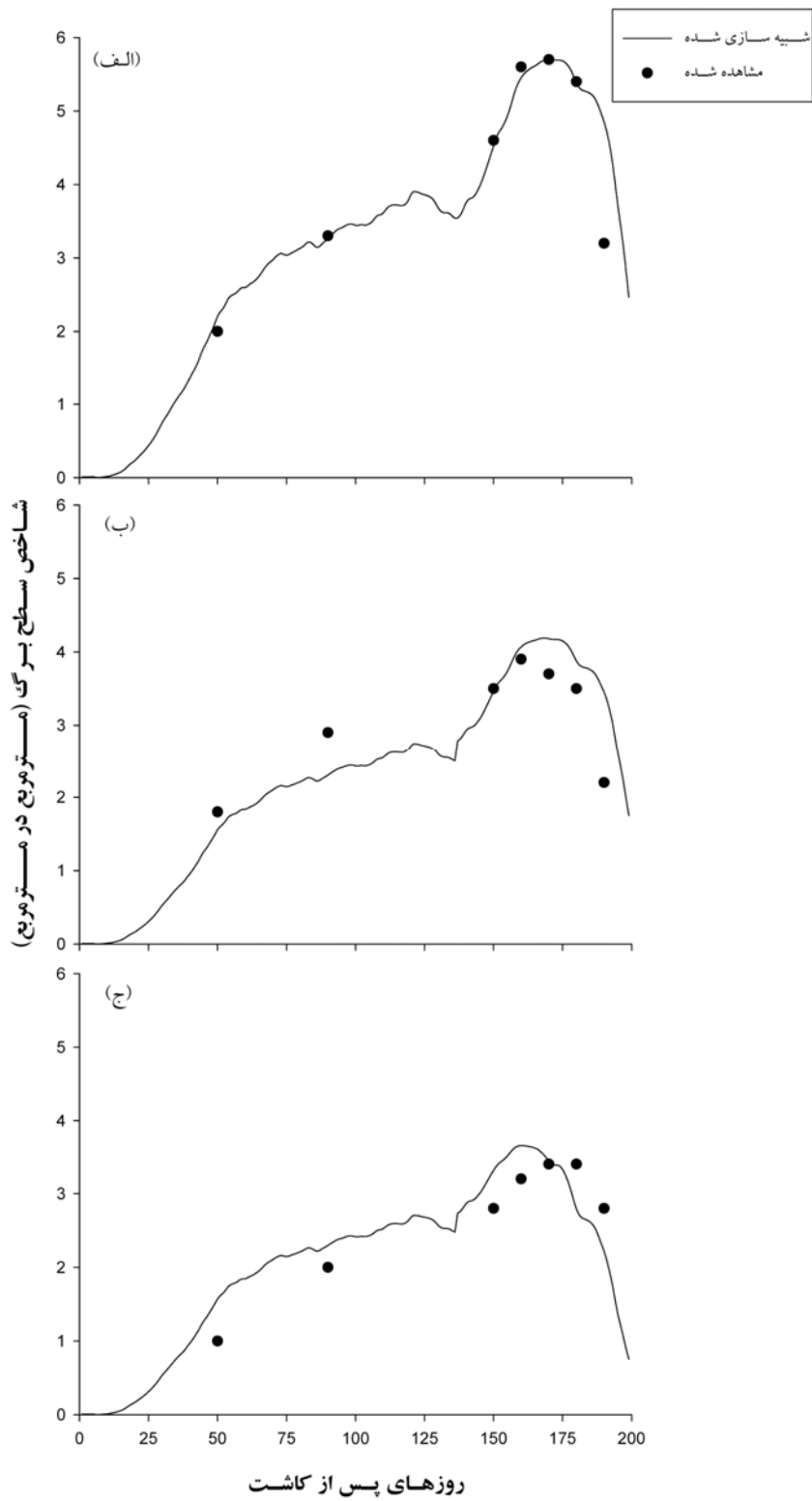
نتایج و بحث

شبییه‌سازی شاخص سطح برگ

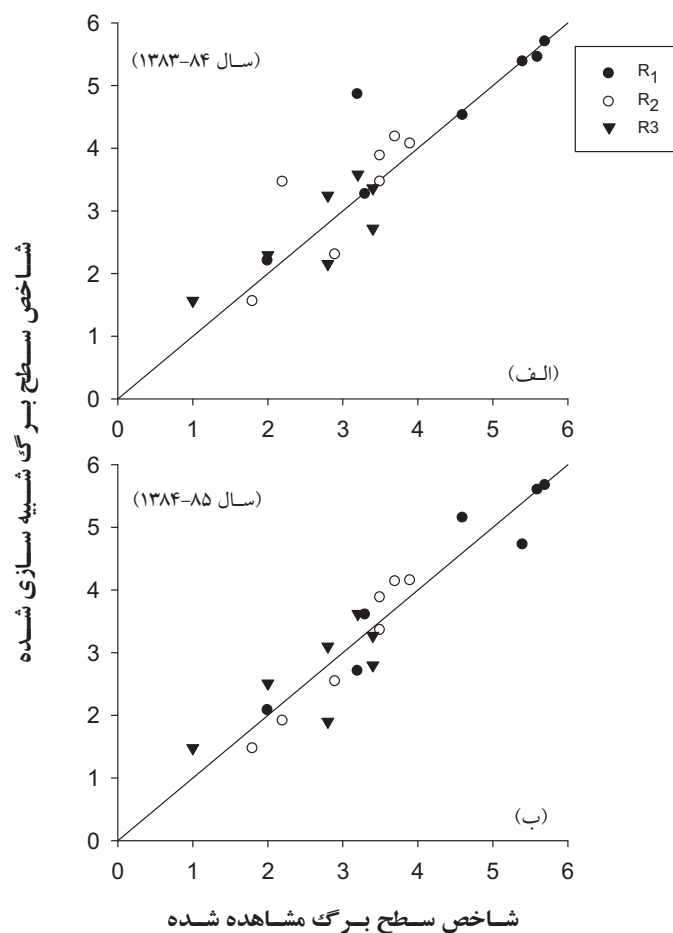
در حال حاضر مفهوم شاخص سطح برگ یک متغیر ضروری در مدل‌های مبتنی بر مکانیسم رشد گیاهان زراعی است (۸)، لذا تخمین درست آن ضروری می‌باشد (۳۷). شبیه‌سازی و ارزیابی ابتدایی مدل برای تیمارهای مختلف رقم زرفام در سال اول آزمایش انجام شد. شکل ۲ شبیه‌سازی شاخص سطح برگ را برای تیمار شاهد (الف)، ۸۰ درصد نیاز آبی (ب) و ۶۵ درصد نیاز آبی (ج) نشان می‌دهد. مدل شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده در همه تیمارها را نزدیک به مقادیر مشاهده شده نشان داد ولی در تیمار ۸۰ و ۶۵ درصد، تخمین کمی بالاتری بود. شکل ۳ الف، اطلاعات مربوط به تیمار شاهد و تیمارهای تنش آب را نشان می‌دهد، که این مقایسه به منظور آزمون اولیه مدل بکار برده شد. شاخص سطح برگ‌های شبیه‌سازی شده تحت تیمارهای مختلف جهت تعیین اعتبار مدل استفاده شدند. دامنه شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده بین ۲/۲۰ تا ۵/۷۰ برای تیمار شاهد، بین ۱/۵۵ تا ۴/۱۸ برای تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی و بین ۱/۵۷ تا ۳/۵۸ برای تیمار ۶۵ درصد نیاز آبی بود، که با مقادیر مشاهده شده تطابق داشت (شکل ۳ الف). تطابق بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای همه تیمارها بر اساس مقادیر بدست آمده برای RMSE و ME معنی‌دار بود. $RMSE(\%)$ به ترتیب ۱۴/۹، ۱۹/۱ و ۱۸/۲ برای تیمار شاهد، ۸۰ درصد نیاز آبی و ۶۵ درصد نیاز آبی بدست آمد. این در حالی بود که کارایی مدل با مقادیر به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۳۸ و ۰/۶۵ برای تیمار شاهد، ۸۰ درصد نیاز آبی و ۶۵ درصد نیاز آبی، واریانس کمی را بین مقادیر شبیه‌سازی شده نشان داد. شکل ۳ الف رگرسیون خطی شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را برای همه تیمارها در سال اول نشان می‌دهد. همبستگی بالا (R^2) ارائه شده در جدول ۲) بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای این پارامتر در همه تیمارها بدست آمد. بطور کلی تعیین اعتبار مدل نشان داد که مدل قادر است شاخص سطح برگ را در شرایط مطلوب رشد و شرایط تنش آبی به خوبی شبیه‌سازی کند.

تعیین اعتبار نهایی مدل در سال ۸۵-۱۳۸۴ انجام شد. بدین منظور ورودی‌های خاک و گیاه مشابه سال قبل و داده‌های آب و هوایی سال دوم مورد استفاده قرار گرفت. دقت شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده بر اساس RMSE برای تیمارهای شاهد و تنش آبی به ترتیب عالی و خوب بود. مقادیر $RMSE(\%)$ به ترتیب ۹/۳۳، ۱۰/۵۷ و ۱۹/۸۳ برای تیمار شاهد، ۸۰ درصد نیاز آبی و ۶۵ درصد نیاز

خالدیان و همکاران (۱۸) مطابقت دارد.



شکل ۲- شبیه سازی شاخص سطح برگ تحت سه تیمار شاهد (الف)، ۸۰ درصد نیاز آبی (ب) و ۶۵ درصد نیاز آبی (ج) در سال ۱۳۸۳-۸۴

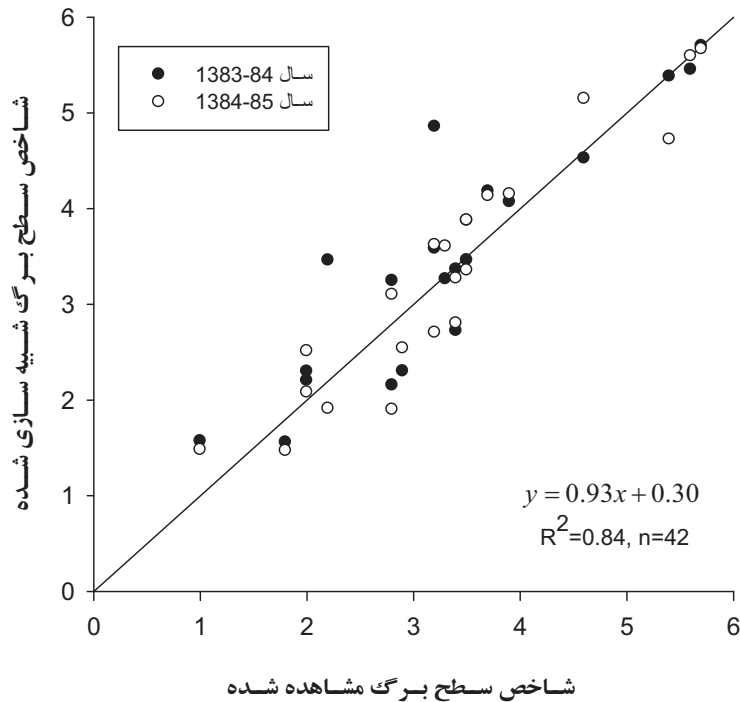


شکل ۳- شاخص سطح برگ مشاهده شده در مقابل شبیه‌سازی شده در سال ۱۳۸۳-۸۴ (الف) و سال ۱۳۸۴-۸۵ (ب)، تیمار شاهد، R_2 : تیمار ۸۰ درصد نیاز آبی، R_3 : تیمار ۶۵ درصد نیاز آبی. خط پر، خط ۱:۱ است.

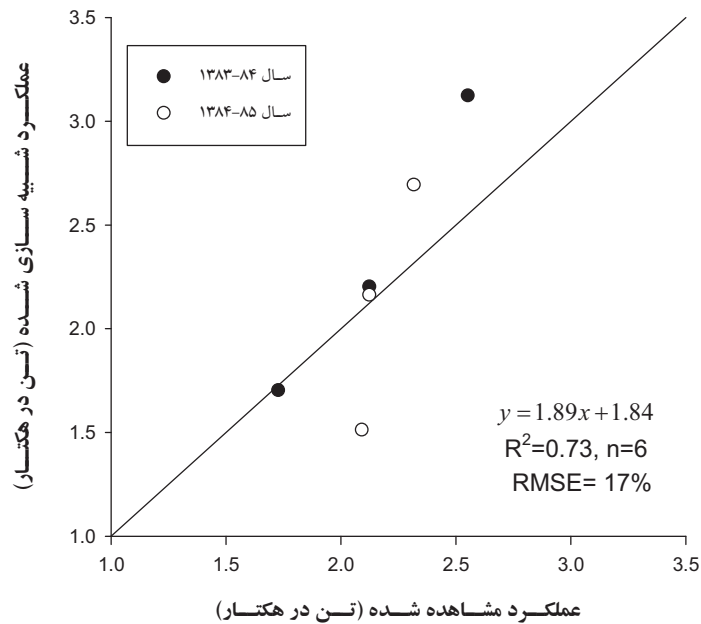
جدول ۲- خصوصیات آماری شاخص سطح برگ تحت تیمارهای مختلف در دو سال آزمایش

تیمارهای آزمایش	شیب خط	عرض از مبدا	R^2 ضریب تبیین
۱۳۸۳-۸۴			
۱۰۰ درصد نیاز آبی (شاهد)	۰/۸۱	۱/۰۵	۰/۸۰**
۸۰ درصد نیاز آبی	۰/۹۷	۰/۲۸	۰/۶۳*
۶۵ درصد نیاز آبی	۰/۶۸	۰/۹۰	۰/۶۵*
۱۳۸۴-۸۵			
۱۰۰ درصد نیاز آبی (شاهد)	۰/۹۵	۰/۱۶	۰/۹۱**
۸۰ درصد نیاز آبی	۱/۳۰	۱/۰۲	۰/۹۶**
۶۵ درصد نیاز آبی	۰/۶۶	۰/۸۹	۰/۵۹*

** : معنی داری در سطح ۱٪، * : معنی داری در سطح ۵٪



شکل ۴- مقایسه شاخص سطح برگ مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در دو سال زراعی



شکل ۵- عملکرد شبیه‌سازی شده در مقابل مشاهده شده

مطلوب و تنش آب نشان داد. البته در مدل حاضر پارامترهای گیاهی مانند حداکثر شاخص سطح برگ، α و λ بر مبنای مشاهدات منطقه‌ای تخمین زده شدند. چنانچه بر اساس مشاهدات سایر

بعلاوه شاخص سطح برگ و عملکرد پیش‌بینی شده کلزا با مقادیر مشاهده شده آنها در کلیه تیمارها اختلاف معنی‌داری نداشتند. بطور کلی مدل پیش‌بینی قابل قبولی از عملکرد دانه کلزا تحت شرایط

کاشت پیدا کرد. نگارندگان چنین آماری در دست نداشتند.

شهرهای کشور نیز شبیه‌سازی انجام شود شاید بتوان روابطی بین این پارامترها با خصوصیات گیاهی و اطلاعات کاشت شامل تاریخ و تراکم

منابع

- ۱- آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۸۹. جلد اول محصولات زراعی سال ۸۸-۱۳۸۷. دفتر آمار و فناوری اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی.
- ۲- سلطانی ا.، قلی پور م. و حاجی زاده آزاد ح. ۱۳۸۴. SBEET: یک مدل ساده برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد چغندر قند. مجله علوم و صنایع کشاورزی. ۱۹(۲): ۲۶-۱۱.
- ۳- علیزاده ا. و کمالی غ. ۱۳۸۶. نیاز آبی گیاهان در ایران. انتشارات آستان قدس رضوی. مشهد.
- ۴- فنایی ح.ر.، اکبری مقدم ح.، کبخا غ.ع.، نارویی راد م.ر. و مدرس نجف آبادی س. ۱۳۸۶. اثر زمین برداشت بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا در منطقه سیستان. مجله نهال و بذر، ۲۲(۱): ۷۴-۵۹.
- ۵- وفابخش ج. ۱۳۸۶. مطالعه جنبه‌های اکوفیزیولوژیک گیاه زراعی کلزا (*Brassica napus* L.) در شرایط تنش خشکی. پایان نامه دکتری زراعت. دانشکده کشاورزی. دانشگاه فردوسی مشهد.
- 6- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper, Crop-Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO publication. No.56.
- 7- Bannayan M., and Hoogenboom G. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. Field Crops Research, 111: 290-302.
- 8- De Jesus Jr. W.C., Do Vale F.X.R., Coelho R.R., and Costa L.C. 2001. Comparison of two methods for estimating leaf area index on common bean. Agronomy Journal, 93: 989-991.
- 9- Earl H.J., and 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.
- 10- FAO. 2010. Food outlook, Global Market Analysis. <http://www.fao.Food outlook.com>. 2 May 2011.
- 11- Faraji A., Latifi N., Soltani A., and Shirani Rad A.H. 2009. Seed yield and water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.) as affected by high temperature stress and supplemental irrigation. Agricultural Water Management, 96: 132-140.
- 12- Goudriaan J., and Van Laar H.H. 1993. Modelling Potential Crop Growth Processes. Kluwer Academic Press.
- 13- Hammer G.L., and Muchow R.C. 1994. Assessing climatic risk to sorghum production in water-limited subtropical environments: I. Development and testing of assimilation model. Field Crops Research, 36: 221-234.
- 14- Hammer G.L. 1998. Crop modeling: current status and opportunities to advance. Acta Horticulturae, 456: 27-36.
- 15- Hammer G.L., Kropff M.J., Sinclair T.R., and Porter J.R. 2002. Future contributions of crop modeling-from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. European Journal of Agronomy, 18: 15-31.
- 16- Jame Y.W., and Cutforth H.W. 2004. Simulating the effects of temperature and seeding depth on germination and emergence of spring wheat. Agric. For. Meteorol. 124: 207-218.
- 17- 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: 337-350.
- 18- Khaledian M.R., Mailhol J.C., Ruelle P., and Rosique P. 2009. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: the case of corn and durum wheat in a Mediterranean context. Agricultural Water Management, 96(5): 757-770.
- 19- Loague K., and Green R.E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. Journal of Contaminant Hydrology, 7: 51-73.
- 20- Mailhol J.C., Olufayo A.A., and Ruelle P. 1997. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. Agricultural Water Management, 35: 167-182.
- 21- Mendham N.J., and Salisbury P.A. 1995. Physiology, crop development, growth and yield of Brassica oilseeds. CAB International, pp. 11-64.
- 22- Meza F.J., Silva D., and Vigil H. 2008. Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. Agricultural Systems, 98: 21-30.
- 23- Olivier F.C., and Annandale J.G. 1998. Thermal time requirements for the development of green pea *Pisum sativum* L. Field Crops Research, 56: 301-307.
- 24- Priestly C.H.B., and Taylor R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 100: 81-92.
- 25- Ritchie J.T. 1985. A user-oriented model of soil water balance in wheat. pp. 293-305. In W. Day, P.K. Arkin, (Eds), Wheat Growth and Modeling. Plenum, New York.

- 26- Robertson M.J., Carberry P.S., Chauhan Y.S., Ranganathan R., and O'Leary G.L. 2001. Predicting growth and development of pigeonpea: a simulation model. *Field Crops Research*, 71: 195- 210.
- 27- Seetseng K.A. 2008. Effect of water application and plant density on canola (*Brassica napus* L.) in the free state. M.S. thesis, University of the Free State Bloemfontein.
- 28- Sinclair T.R., and Seligman N.G. 1996. Crop modelling: from infancy to maturity. *Agronomy Journal*, 88: 698-704.
- 29- Sinclair T.R., Farias J.R., Neumaier N., and Nepomuceno A.L. 2003. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. *Field Crops Research*, 81: 149-158.
- 30- Sinclair T.R., Gilbert R.A., Perdomo R.E., Shine Jr. J.M., Powell G., and Montes G. 2004. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. *Field Crops Research*, 88: 171-178.
- 31- Soltani A., Robertson M.J., Mohammad-Nejad Y., and Rahemi-Karizaki A. 2006. Modeling chickpea growth and development: Leaf production and senescence. *Field Crops Research*. 99: 14-23.
- 32- Van Laar H.H., Goudriaan J., and Van Keulen H. 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen, The Netherlands.
- 33- Willmott C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63: 1309-1313.
- 34- Wolfe D.W., Henderson D.W., Hsiao T.C., and Alvino A. 1988. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize: I. Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. *Agronomy Journal*, 80: 859-864.
- 35- Xianshi G., Sinclair T.R., and Ray J.D. 1998. Effect of drought history on recovery of transpiration, photosynthesis, and leaf area development in maize. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*, 57: 83-87.
- 36- Yan W., and Hunt L.A. 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany*, 84: 607-614.
- 37- Yin X., Schapendonk A.H.C.M., Krooff M.J., Van Oijen M., and Bindraban P.S. 2000. A generic equation for nitrogen-limited leaf area index and its application in crop growth models for predicting leaf senescence. *Annals of Botany*, 85: 579-585.
- 38- Zaffaroni E., and Schneiter A.A. 1989. Water-use efficiency and light interception of semi-dwarf and standard height sunflower hybrids grown in different row arrangements. *Agronomy Journal*, 81: 831-886.
- 39- Zomorodian A., Kavooosi Z., and Momenzadeh L. 2010. Determination of EMC isotherms and appropriate Mathematical models for canola. *Food and Bioproducts Processing*. In Press.

Model for Simulating Canola Yield Under Water Stress Conditions

S.M. Mirhashemi^{1*} - M. Bannayan Awal²

Received:3-7-2011

Accepted:4-4-2012

Abstract

One possible means of achieving better agronomic management is the use of crop models for yield prediction under different conditions. Accurate prediction of crop yield is essential for suitable water management in arid and semi arid regions. The objective of this study was developing a model for grain yield prediction of canola based on simulated leaf area index under water stress conditions. In this study, leaf area index was simulated based on cumulative temperature and water stress index. Soil water balance was also simulated based on root zone depletion, actual evapotranspiration, runoff from the soil surface and deep percolation. The model used crop and soil data and meteorological data including daily maximum and minimum air temperature ($^{\circ}\text{C}$), precipitation (mm) and solar radiation ($\text{MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$). The model was developed based on the 2004–2005 growing season data for Zarfam cultivar under full irrigation and water stress conditions, and validated with 2005–2006 growing season data. The simulation results showed that across all water levels, model performed well for grain yield simulation based on simulated LAI.

Keywords: Cumulative temperature, Evapotranspiration, Leaf area index, Water stress index

1,2- PhD Student and Associate Professor, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*-Corresponding Author Email: mmi1383@yahoo.com)