



مدل سازی رشد گیاهان زراعی و کاربرد آن در نظارت و تولید بذر

محمد رحمانی

محقق مؤسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال

زمانی که فناوری مکان یابی جهانی در سال ۱۹۷۸ معرفی شد، انتظار نصب گیرنده‌های اطلاعات ماهواره بر روی ادوات کشاورزی ایده ای دور از ذهن به نظر می رسید اما امروزه کشاورزی دقیق به عنوان شاخه جدیدی از علم کشاورزی بر دوش فناوری مکان یابی جهانی استوار شده است. فناوری‌های نوین در کشورهای پیشرفته به سرعت جذب و بهره برداری می شوند و مدل سازی رشد گیاهان زراعی نیز به دلیل مزایای بسیار در تحلیل و ارائه گزینه‌های مدیریتی قابل اعتماد به سرعت رو به گسترش خواهد گذاشت و به ابزاری هوشمند در اختیار پژوهشگران، برنامه ریزان و سیاستگذاران و تولیدکنندگان محصولات کشاورزی تبدیل خواهد شد.

به تصمیم‌سازی و پیش‌بینی‌های قابل اعتماد برای این تصمیم‌سازی‌ها در همه سطوح به میزان زیادی افزایش یابد. مدل‌های گیاهان زراعی علاوه بر پیش‌بینی عملکرد می‌توانند برای ارزیابی خطرات ناشی از استراتژی‌های مختلف مدیریتی در شرایط اقلیمی و مکان‌های مختلف به کار گرفته شوند.

مدل سازی رشد گیاهان زراعی چندین هدف را دنبال می‌نماید؛

- (۱) مدل‌ها می‌توانند با مدیریت زمان، ترکیب و میزان مصرف نهاده‌ها به مدیریت بهینه زراعی کمک نمایند.
- (۲) مدل‌ها با بهره‌گیری از قدرت نرم افزارهای شبیه‌سازی کامپیوتری می‌توانند مکمل آزمایش‌های واقعی پیچیده باشند و به اعتبار تفسیر نتایج آزمایش‌ها بیافزایند.
- (۳) مدل به‌عنوان ابزار سنجش زراعی، امکان درک، پیش‌گویی و

زبان ریاضی، بستر دانش جدید است و روز به روز مصادیق و کاربردهای آن در بیولوژی بیشتر می‌شود و مدل‌های رشد و نمو گیاهان، یکی از ایده‌های عمومیت یافته و کاربردی شده قوانین ریاضی هستند. مدل، نمایش ساده شده‌ای از رفتار یک سیستم واقعی با استفاده از اصول ریاضی و در قالب مجموعه‌ای از معادلات است که به شناخت و استفاده از آن سیستم کمک می‌کند.

سالهاسست که مدل‌های شبیه‌سازی در کشورهای مختلف با اهداف و کاربردهای متنوعی استفاده می‌شوند. مدل‌های گیاهان زراعی علاوه بر پیش‌بینی عملکرد می‌توانند برای ارزیابی تنوع و خطرات ناشی از روش‌های مختلف مدیریتی در شرایط اقلیمی و مکان‌های مختلف به کار گرفته شوند. نیاز روز افزون به فرآورده‌های کشاورزی، فشار بر زمین‌ها، آب و سایر نهاده‌های طبیعی باعث شده است که نیاز

کنترل سیستم را با روش بسیار سازماندهی شده فراهم می‌آورد. (۴) مدل‌های گیاهان زراعی در ملموس‌ترین کاربرد خود، به‌عنوان ابزار برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در سطوح سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان، متخصصین و کشاورزان قرار می‌گیرند و جایگزین روش‌های آزمون و خطا می‌شوند. داده‌های حاصل از روش‌های سنتی، کمکی به برطرف کردن نیازهای فزاینده نمی‌نماید و لازم است تصمیم‌سازی با کمک پیش‌بینی رفتار اکوسیستم‌های زراعی و طبیعی در واکنش به عوامل اقلیمی و خاکی (مثل تغییر اقلیم، آب مصرفی، فرسایش، مواد غذایی خاک و استفاده آفت‌کشها) انجام گیرد.

مدل‌های ریاضی از جنبه‌های مختلف به مدل‌های تشریحی و توصیفی یا دینامیک و استاتیک و نیز پیوسته و ناپیوسته طبقه‌بندی می‌شوند. مدل‌های ریاضی مورد استفاده در علوم زیست‌شناسی و کشاورزی می‌توانند مدل‌های ساده رگرسیونی یک یا چند متغیره‌ای باشند که با چشم‌پوشی زیاد، الگوی کلی واکنش گیاه برای صفت خاصی را نسبت به تغییر یک یا چند متغیر نشان می‌دهند و یا مدل‌های شبیه‌سازی رشد و عملکرد باشند که رشد و نمو گیاه و پویایی سیستم گیاه-خاک را با استفاده از مجموعه‌ای از توابع ریاضی توصیف و پیش‌بینی می‌نمایند. در مدل‌های دینامیک رشد و نمو همیشه بخشی از اطلاعات به دلیل الزام ساده‌سازی سیستم، از بیسن می‌رود و بخش ضروری رفتار سیستم مدل‌سازی می‌شود. در واقع از مدلی که یک سیستم پیچیده را به‌طور جامع توصیف نماید انتظار کارآمدی نمی‌رود، چرا که مدل طراحی شده به اندازه خود سیستم، پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی خواهد بود. یک نمونه از یک مدل ساده رگرسیونی در شکل ۱ نشان داده شده است.

توصیف مطالعه رفتار سیستم به‌وسیله مدل، به شبیه‌سازی موسوم است. کیفیت کارکرد مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی

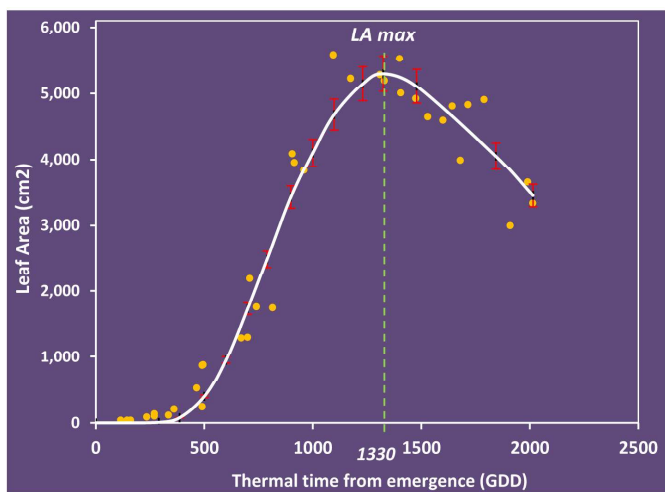
به ورودی‌های قابل دسترس برای اجرای این مدل‌ها بستگی دارد. پیشینه ارائه این گروه از مدل‌ها به پس از جنگ جهانی دوم می‌رسد و گام‌های نخستین در مدل‌سازی گیاهان زراعی تهیه مدل‌هایی بود که توانایی تخمین دریافت نور و فتوسنتز را در جوامع گیاهی داشتند.

شکل ۱- مدل $LA = \frac{a}{T_{T_{min}}} \exp[-0.5 \frac{(\ln(T_{T_{in}}/T_{T_{min}}))^2}{b}]$ که مؤلف برای پیش‌بینی سطح برگ اینبردلاین ذرت B73 بدست آورده است و در آن زمان حداکثر سطح برگ با دوره پر شدن بذر (۱۳۳۰ درجه روز رشد) مطابقت دارد ($R^2_{adjusted} = 0.978$) و پیش‌بینی انجام شده در تاریخ‌های کشت مختلف با دقت قابل قبولی صورت گرفته است. با استفاده از این مدل می‌توان تاریخ‌های کشت مختلف را برای داشتن بیشترین سطح فتوسنتزکننده در زمان تشکیل بذر با یکدیگر مقایسه و تصمیم‌گیری نمود.

در دوره نوجوانی و جوانی مدل‌سازی، با گسترش امیدواری به کارایی مدل‌های گیاهان زراعی به ابداع ابزارهای آمار برداری و سنجش فتوسنتز و فرایندهای سیستم خاک-گیاه-اتمسفر منجر شد و از سال ۱۹۹۰ با امکان سنجش ماهیت و اثر عوامل محدودکننده رشد در مدل‌ها، مدل‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی به دوره بلوغ خود رسید و امروزه به‌عنوان ابزاری کارگشا در پیش‌بینی و تفسیر سیستم‌ها در آمده است.

در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی دو شیوه کلی وجود دارد. در شیوه اول از مدل‌های شبیه‌سازی عمومی که مبتنی بر فرایندهای کلی رشد هستند مثل مدل‌های WOFOST و CROPSYST استفاده می‌شود. در این مدل‌ها تولید ماده خشک به‌طور مستقیم از طریق تابش خورشیدی جذب‌شده یا کارایی مصرف نور تعیین می‌شود. در شیوه دوم رشد و عملکرد هر محصول با توجه به ویژگی‌های ژنتیکی گیاه، شبیه‌سازی می‌شود. از جمله مدل‌های CERES، CROPGRO و APSIM برای شبیه‌سازی رشد گندم، جو، ذرت، سویا، سورگوم، آفتابگردان و گیاهان زراعی دیگر طراحی شده‌اند. این مدل‌ها در مجموعه نرم‌افزارهای مدل‌سازی گیاهان زراعی DSSAT و APSIM به‌عنوان رابط کاربری ماژول‌زادگراوری و قابل استفاده هستند.

برای اینکه در مدل شبیه‌سازی شده، اثر اقلیم و شرایط زراعی از جنبه ژنتیکی رقم تفکیک گردد، لازم است رشد و نمو و عملکرد رقم زراعی در مناطق اقلیمی مختلف و در شرایط متفاوت مدیریت زراعی مطالعه شود و مدل شبیه‌سازی شده بر اساس ضرایب مرتبط با ژنتیک رقم واسنجی یا کالیبره شود. ضرایب ژنتیکی رقم، اکوتیپ و گونه یک مدل زراعی پیش از اینکه برای یک رقم جدید مورد استفاده قرار گیرند باید واسنجی شود. برای واسنجی مدل، به



گردآوری داده‌های دقیق از مراحل فنولوژیک (روابط بیولوژی گیاه و محیط) محصول و تولید و توزیع ماده خشک در طول دوره رشد در تاریخ‌های کشت متفاوت در یک یا چند مکان جغرافیایی با ویژگی‌های اقلیمی متفاوت نیاز است. ضرایب حاصل از واسنجی قادر خواهند بود ویژگی‌های رشد و توسعه سبزینه، گل‌دهی و گرده‌افشانی، توزیع مواد در اندام‌های اصلی و تولید دانه در زمان رسیدگی و نیز اجزاء عملکرد یک رقم خاص را توضیح دهند.

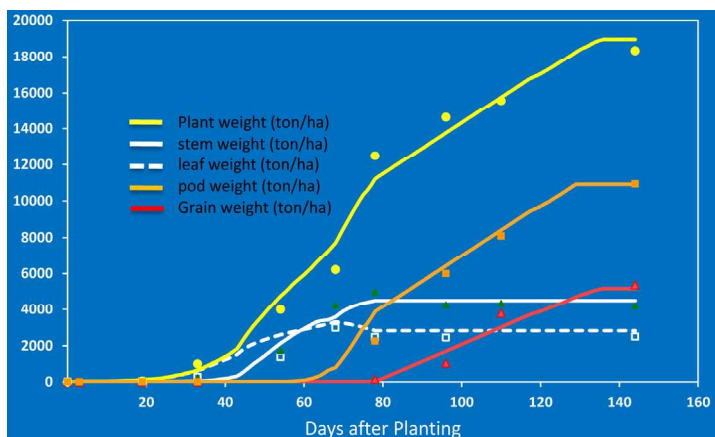
شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی می‌تواند در تصمیم‌گیری تولید بذر به همان اندازه اهداف تولیدی دیگر سودمند باشد. به‌عنوان مثال، تولیدکنندگان بذر را در هنگام تصمیم‌گیری برای مدیریت مزارع تولید بذر در شرایط اقلیمی در حال تغییر و یا برگزیدن مناطق تولید جدید پشتیبانی می‌نماید. تولیدکنندگان بذر گیاهان زراعی اغلب در انتخاب بهترین زمان کشت، انتخاب منطقه جدید تولید رقم خاص، مدیریت مصرف کودهای شیمیایی، پیش‌بینی زمان گرده‌افشانی و مهم‌تر از آن تعیین سطح کشت لازم برای رسیدن به میزان تولید مورد نظر، دچار سردرگمی می‌شوند.

تجربه‌های متعددی از شکست برنامه تولید بذر که در یک منطقه جدید انجام شده است و یا انتخاب زمان کشت نامناسب که دوره گلدهی با گرمای سقف تحمل برخورد نموده است، در اختیار هست. استفاده از ابزار مدل‌سازی، می‌تواند شرکت‌های تولیدکننده بذر را متقاعد سازد که چگونه تولید بذر رقم مورد نظرشان را در منطقه خاص و در سال معینی مدیریت نمایند تا برنامه تولید آنها به نتایج دلخواه نزدیک شود. یک نمونه از یک مدل ساده پیش‌بینی عملکرد در تاریخ‌های مختلف کاشت در شکل ۲ نشان داده شده است.

نیازسنجی تقاضای بازار بذر ارقام زراعی یکی از اقداماتی است که پیش از برنامه‌ریزی سالیانه تولید انجام می‌شود. به دلیل هزینه‌های مترتب بر حفظ

پشتوانه است. شبیه‌سازی رشد و نمو با بهره‌بردن از قابلیت پیش‌بینی شرایط اقلیمی با استفاده از تحلیل آمار بلند مدت، می‌تواند سطح کشت مورد نیاز برای رسیدن به تولید معین را با تقریب مناسبی در اختیار برنامه‌ریزان قرار دهد. به این ترتیب اختصاص اراضی به محصولات مختلف با اطلاعات قابل اعتمادتری انجام شده و به سوددهی اقتصادی بیشتری منتهی می‌گردد.

مدل‌های گیاهان زراعی علاوه بر پیش‌بینی عملکرد می‌توانند برای پیش‌بینی خطرات ناشی از استراتژی‌های مختلف مدیریتی در شرایط اقلیمی متفاوت و مکان‌های جدید به کار گرفته شوند. با توجه به هزینه بالای تولید بذر در مقایسه با سایر اهداف تولید، مخاطرات برنامه‌های تولید بذر با حساسیت بیشتری روبرو است. در حال حاضر که بذر بسیاری از ارقام جدید محصول دورگ‌گیری والدین این‌بردلاین هستند، مدل‌سازی رشد و نمو این‌بردلاین‌های ملاری می‌تواند در مدیریت شرایطی مانند هم‌زمانی فنولوژیک لاین‌های پدری و مادری و مدیریت شرایط محیطی مساعد گرده‌افشانی، تلقیح و رشد کمک شایان



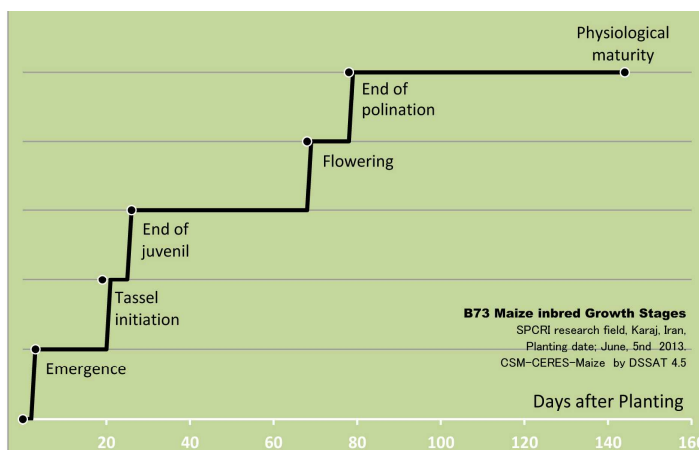
شکل ۲- خروجی مدل شبیه‌سازی شده CSM-CERES-Maize از ماده خشک انباشته در اندام‌های هوایی، ساقه، برگ، بلال و عملکرد بذر ذرت هیبرید ۷۰۴ با استفاده از مدل برای شرایط اقلیمی کرج توسط مؤلف که با استفاده از نرم افزار مدل‌سازی گیاهان زراعی DSSAT برای تاریخ کشت پانزده خرداد شبیه‌سازی شده است.

توجهی بنماید.

مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو می‌توانند به عنوان ابزارهای کارآمدی در پیش‌بینی زمان تقریبی وقوع مراحل رشدی که به لحاظ تولید بذر دارای اهمیت هستند استفاده شوند. این تصمیم‌گیری در حال حاضر بر اساس تجارب فردی و مبتنی بر محاسبات غیر دقیق تاریخ تقویمی انجام می‌شوند. به عنوان مثال، دانستن تاریخ گل‌دهی برای برنامه‌ریزی تولیدکننده بذر از نظر عدم تلاقی با دوره اوج گرما و خشکی منطقه خاص حائز اهمیت است. زمانی که تولید

خلیوص ژنتیکی رقم، حفظ سلامت بذر و خللی‌های فیزیکی محصول برای دریافت گواهی‌های ملی و اعتبار تجاری در مقایسه با برنامه‌های تولید دانه یا الیاف و علوفه، تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در برنامه تولید بذر گیاهان زراعی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. گاه حتی شرایط اقلیمی مناسب‌تر از انتظار برنامه‌ریزان تولید بذر، باعث تولید بیش از نیاز بذر و افزایش حساب نشده ذخایر بذر برای مدت چند سال شده است که به دلیل اثر زوال بذر و خسروج آن از چرخه تجارت بذر شده است. چنین زبانی ناشی از پیش‌بینی‌های غیر قابل اعتماد و بدون

یا نظارت بر تولید بذر در مقیاس وسیع، مانند چند صد هکتار برای یک شرکت تولیدکننده بذر و یا چند هزار هکتار برای مؤسسات ناظر، انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی رشد بسیار ارزشمندتر و کارگشایتر خواهد بود. عملیات کنترل گرده‌افشانی برای حفظ خلوص ژنتیکی مانند حذف گل‌های تاجی، کوددهی تکمیلی، مدیریت آبیاری در گیاهان هیبرید مانند ذرت امری حیاتی است. مؤسسات ناظر می‌توانند برنامه‌های بازدید مزارع تولید بذر تحت پوشش خود در مناطق مختلف که در تاریخ‌های متفاوت کشت شده‌اند را بر اساس پیش‌بینی زمان‌های فنولوژیک محصولات مختلف با دقت تنظیم نمایند به گونه‌ای که بازدیدها بدون فوت وقت و یا بدون نیاز به تکرار مراجعات به مزرعه انجام شوند. این پیش‌بینی‌ها به‌ویژه در سازمان‌های با وسعت کاری زیاد که از سیستم‌های اتوماسیونی برنامه‌ریزی و نظارت بهره می‌گیرند سودمندی بالاتری نشان می‌دهند نمونه‌ای از این شبیه‌سازی انجام شده برای پیش‌بینی زمان وقوع مراحل فنولوژیک رشد در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- شبیه‌سازی وقوع مراحل فنولوژیک رشد اینبردلاین ذرت B73 توسط مؤلف. در این نمودار نقاط مجزا داده‌های مراحل رشد مشاهده شده و نمودار خطی، سیر مراحل فنولوژیک شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. مرحله اول؛ سبز، مرحله دوم؛ پیدایش آغاز تاسل، مرحله سوم؛ پایان دوره جوانی، مرحله چهارم؛ ظهور سیلک، مرحله پنجم آغاز پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیک است. تعیین زمان وقوع هر یک از مراحل رشد و نموی گیاه زراعی اطلاعات بسیار مفیدی در خصوص آمادگی برای انجام عملیات زراعی مربوط به هر مرحله مانند دوره گرده‌افشانی و تلقیح و یا رسیدگی و برداشت در اختیار تولیدکننده بذر قرار می‌دهد.

مدیریت زراعی مورد نظر کشاورزان از جمله زمان کشت، میزان کوددهی و آبیاری شبیه‌سازی می‌شود و کشاورزان بر اساس نتایج اطلاعات شبیه‌سازی شده اقدام به تصمیم‌گیری و مدیریت مزرعه می‌نمایند.

در دسترس‌ترین شیوه گردآوری داده‌های مورد نیاز مدل‌سازی رشد و تولید بذر ارقام، بهره‌گیری از قابلیت طرح‌های تحقیقاتی DUS و VCU ارقام می‌باشد. در حال حاضر در فرآیند معرفی، ثبت و تجاری‌سازی ارقام گیاهی در فهرست ملی ارقام گیاهی کشور، آزمایشات ارزش زراعی و سازگاری در چند منطقه و چند سال انجام می‌شود. با تمهید تغییراتی در پیاده‌سازی این آزمایشات و افزودن موارد مورد نیاز به طرح پژوهشی و ثبت داده‌ها، اطلاعات مورد نیاز برای مطالعات الگوی رشد و نمو و شبیه‌سازی رشد و تولید بذر نیز گردآوری خواهد شد. به این ترتیب، ضرایب ژنتیکی ارقام نیز به عنوان صفات ثابت و غیر وابسته به محیط با استفاده از نرم افزارهای GLUE و GENCALAC قابل محاسبه بوده و می‌توان از آنها در کالیبراسیون یا واسنجی مدل‌های رشد و نمو و شبیه‌سازی رشد و عملکرد استفاده نمود. با توجه به اینکه این طرح‌ها در چند مکان و چند سال انجام می‌شوند، واسنجی و اعتبارسنجی مدل ایجاد شده با دقت و اعتبار بسیار خوبی قابل انجام است و مدل‌های ایجاد شده هم می‌توانند با دقت قابل قبولی در برنامه‌ریزی نظارت مزارع تولید بذر مورد استفاده قرار گیرند و هم به عنوان ابزار قابل اعتمادی به کمک شرکت‌های تولیدکننده بذر آمده و علاوه بر پشتیبانی تصمیم‌گیری، امکان تهیه تقویم زمان‌بندی عملیات زراعی را در ابتدای فصل زراعی فراهم آورند.

منابع:

- Boote, K. J., Jones, J. W., and Pickering, N. B. (1996). Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal*, 88, 704-716.
- Teh, C. B. (2006). «Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer model» Dissertation. com.
- Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., and Thornton, P. K. (1998). «Understanding options for agricultural production.» Springer Science & Business Media.
- White, J. W., Boote, K. J., Hoogenboom, G., and Jones, P. G. (2007). Regression-based evaluation of ecophysiological models. *Agronomy journal* 99, 419-427.