

CDSS-Model: مدلی برای شبیه‌سازی مراحل نمو گیاهان زراعی

• بهرام اندرزبان

دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین

• عبدالمهدی بخشنده

• قدرت‌اله فتحی و • خلیل عالمی سعید

اعضاء هیأت علمی دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین

• محمد بنایان

عضو هیأت علمی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

• یحیی امام

عضو هیأت علمی دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

تاریخ دریافت: خردادماه ۱۳۸۵ تاریخ پذیرش: بهمن ماه ۱۳۸۵

Email: bandarzian@yahoo.com

چکیده

نمو، عبارت است از تغییرات کیفی برنامه‌ریزی شده که گیاه را به سمت رسیدگی هدایت می‌نمایند و محققان آن را پدیده شناسی می‌نامند. شناخت زمان وقوع هر یک از این مراحل به منظور اعمال مدیریت مناسب برای افزایش عملکرد ضروری است. تعیین زمان وقوع مراحل نمو در سطح وسیع که دربرگیرنده ی اقلیم‌ها، ژنوتیپ‌ها و تاریخ‌های کاشت متفاوت می‌باشد، کار بسیار دشواری است. پیش‌بینی مراحل پدیده شناسی به روش‌های معمول میسر نمی‌باشد و تنها از طریق بکارگیری مدل‌های شبیه‌سازی، که با تلفیق عوامل موثر بر نمو می‌توانند زمان وقوع مراحل نمو را پیش‌بینی نماید، امکان‌پذیر است. این مدل بر مبنای معادله‌ی خطی پاسخ‌دمایی نمو گیاه ساخته شد. به منظور ارزیابی مدل، دو آزمایش مزرعه‌ای در سال‌های زراعی ۸۳-۸۲ و ۸۴-۸۳ اجرا گردید. مراحل نمو گندم بر مبنای مقیاس کربی و اپلیارد و به کمک میکروسکوپ تشریح مشخص و میزان درجه-روز رشد جمعی مورد نیاز هر مرحله نمو تعیین گردید. سپس با استفاده از داده‌های آزمایش‌های مذکور، مدل واسنجی و ارزیابی گردید. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج واقعی (مشاهده شده) نشان داد که مدل با توانایی بالایی مراحل نمو گندم را پیش‌بینی می‌نماید.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی، شبیه‌سازی، گندم، مراحل نمو، پدیده شناسی

Pajouhesh & Sazandegi No 76 pp: 71-79

CDSS-Model: A simulation model for simulating crop development stages

By: B. Andarzian, Agricultural and Natural Resources Research Center of Khuzestan. Ahvaz

Bakhshandeh A.M. Agricultural and Natural Resources University of Ramin Ahwaz

Bannayan M. Ferdowsi University of Mashhad. . Mashhad

Emam Y. Agricultural College of Shiraz University, Shiraz

Fathi Gh. Agricultural and Natural Resources University of Ramin. Ahvaz

Alami Saeed Kh. Agricultural and Natural Resources University of Ramin Ahvaz

Plant development can be defined as a programmed qualitative change in plant form, which leads plant to maturity, and researchers call it as phasic development or phenology. Recognizing the timing of occurring each development stage is necessary for managing system in order to yield increment. The timing of occurring development stages depend on climate, genotype specifications and sowing date then determination of these times in different regions is difficult and it is only possible through the using of crop simulation models which can predict the timing of occurrence each development stage by integrating effective factors. The model was constructed based on linear equation of plant temperature response. In order to model evaluation two experiments were carried out in agricultural and natural resources research center of Khuzistan in 2003-2004 and 2004-2005 cropping years. Wheat development stages were determined based on Kirby and Appleyard's scale by stereoscopic microscope and required GDD for each development stage as well. The constructed model was calibrated and run for simulation. Comparison of simulated and observed data showed that the model can strongly predict wheat development stages.

Key words: Modeling, Wheat, Development Stages, Pohenology

مقدمه

می‌باشد، کار بسیار دشواری است، چون بررسی و شناخت مراحل نمو مریستم انتهایی گندم که تنها با کمک میکروسکوپ تشریح^۱ امکان پذیر است، کار طاقت فرسایی است که نیاز به مهارت خاص و زمان زیاد دارد. همچنین تعیین مراحل نمو بعد از تمایز سنبلچه انتهایی مستلزم بررسی مستمر مزارع می‌باشد که خود نیز به نیروهای متخصص و زمان زیاد نیاز دارد. مسئله دیگر پیش‌بینی مراحل نمو گندم در شروع فصل رویش است که جهت برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای اعمال تمهیدات مدیریتی، ضروری است. پیش‌بینی مراحل پدیده شناسی، به روش‌های معمول میسر نمی‌باشد و تنها از طریق بکارگیری مدل‌های شبیه‌سازی، که با تلفیق عوامل موثر بر نمو می‌توانند زمان وقوع مراحل نمو را پیش‌بینی نمایند، امکان پذیر است.

مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی، ابزارهای کمی هستند که براساس اصول علمی و روابط ریاضی استوار بوده و می‌توانند اثرات متفاوت اقلیم، خاک، آب و عوامل مدیریت زراعی را روی رشد و نمو گیاهان زراعی مورد ارزیابی قرار دهند (۳، ۲۱). براساس پیشرفت‌های به عمل آمده، امروزه رهیافت DSS که عبارت است از استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری برای مدیریت سیستم‌های تولیدی کشاورزی، به عنوان یک ابزار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدیریت تولید گیاهان زراعی آبیاری، کود دهی، مبارزه با آفات و بیماری‌های گیاهی، تغییر اقلیم، نوسانات اقلیمی، پیش‌بینی عملکرد، آلودگی محیط زیست، کشاورزی پایدار و بسیاری از جنبه‌های دیگر با رویکرد فوق مورد مطالعه قرار می‌گیرند (۱۱). مدل‌سازی مراحل نمو گیاهان زراعی و به کارگیری مدل برای

نمو، عبارت است از تغییرات کیفی برنامه‌ریزی شده که گیاه را به سمت رسیدگی^۱ هدایت می‌نمایند و محققان آن را پدیده شناسی^۲ یا مراحل نمو^۳ می‌نامند. از نظر فیزیولوژیکی مراحل نمو گندم شامل: جوانه‌زنی، سبز شدن، پنجه‌زنی، تمایز گل یا حلقه مضاعف، سنبلچه انتهایی، اولین گره یا شروع طویل شدن ساقه، آبستنی، ظهور سنبله، گل‌دهی و رسیدگی می‌باشد^۴ که با صورت زیر گروه‌بندی می‌شوند: جوانه‌زنی تا سبز شدن (E)، مرحله رشدی یک (GS1) از سبز شدن تا حلقه مضاعف، مرحله رشدی دو (GS2) از حلقه مضاعف تا گل‌دهی و مرحله رشدی سه (GS3) از گل‌دهی تا رسیدگی (بلوغ) که دربرگیرنده دوره پر شدن دانه است. با توجه به اینکه هر یک از اجزاء تشکیل دهنده عملکرد دانه گندم در مرحله خاصی از مراحل نمو تشکیل و تثبیت می‌شود، شناخت زمان وقوع هر یک از این مراحل به منظور اعمال مدیریت مناسب برای افزایش و یا حفظ اجزاء عملکرد و نهایتاً دستیابی به عملکرد بیشتر ضروری است. برای مثال کاربرد نهاده‌هایی همچون کود نیتروژن، علف‌کش‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد باید در مرحله نمو ویژه‌ای انجام پذیرد تا بتواند مؤثر واقع شده و منجر به افزایش عملکرد گردد. همچنین شناخت تأثیر تنش‌های محیطی بر عملکرد، در طی هر یک از مراحل نمو دارای اهمیت به سزایی است (۱).

از آنجایی که زمان وقوع هر یک از مراحل نمو به ژنوتیپ، دما، طول روز و تاریخ کاشت بستگی دارد (۱۲)، تعیین زمان وقوع مراحل نمو در سطح وسیع که دربرگیرنده اقلیم‌ها، ژنوتیپ‌ها و تاریخ‌های کاشت متفاوت

مواد و روش‌ها

۱- آزمایش‌های مزرعه‌ای

برای تعیین مراحل نمو مریستم انتهایی و دیگر مراحل فنولوژی گندم (از ساقه رفتن تا رسیدگی فیزیولوژیکی دانه) به منظور واسنجی^۵ و بررسی صحت مدل^۶ دو آزمایش مزرعه‌ای در سال‌های زراعی ۸۳-۱۳۸۲ و ۸۴-۱۳۸۳ در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا گردید. مختصات جغرافیایی این ایستگاه دارای عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و ۱۸ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ یک آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا گردید که تاریخ‌های کاشت گندم (۱ آذر و ۲۵ آذر) به عنوان عامل اصلی و ارقام گندم (استار، چمران و فونگ) به عنوان عامل فرعی منظور گردیدند. در سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ یک آزمایش به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه رقم گندم (استار، چمران و فونگ) در چهار منطقه اجرا گردید. تراکم بذر براساس ۴۰۰ دانه در مترمربع در نظر گرفته شد و هر کرت آزمایشی شامل ۱۲ خط کاشت به طول ۶ متر و فاصله ۲۰ سانتیمتر بود. کلیه عملیات زراعی (تغذیه، آبیاری، مبارزه با آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز و...) بطور یکنواخت برای همه کرت‌های آزمایشی اعمال گردید. بعد از جوانه‌زنی و استقرار گیاهچه‌ها برای تعیین مراحل نمو مریستم انتهایی براساس مقیاس Kirby و Applyard (۱۲)، هر دو روز یک بار از هر پلات آزمایشی پنج بوته برداشت و به کمک میکروسکوپ، تشریح و بررسی می‌شد و به محض نائل شدن گیاه به

شبیه‌سازی این مراحل، می‌تواند کمک مؤثری به محققان در ارزیابی مراحل نموی ژنوتیپ‌ها و به مدیران مزرعه، جهت اعمال تمهیدات مدیریتی برای افزایش عملکرد گیاهان زراعی داشته باشد. به این ترتیب که با تعیین مراحل نمو هر رقم در یک منطقه و در یک دوره زمانی، به کمک مدل می‌توان آنها را در مناطق و دوره‌های زمانی دیگر، شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمود تا براساس آنها تمهیدات مدیریتی لازم برای افزایش عملکرد سیستم به کار گرفته شوند. بررسی نوشتجات گوناگون نشان می‌دهد که تاکنون بیش از ۷۰ مدل برای گندم ساخته شده است (۲) و مؤید آن است که مدل‌ها به عنوان ابزاری جهت ارزیابی و تفسیر آزمایش‌های مزرعه‌ای و فرموله کردن روش‌های مدیریتی برای یک مزرعه خاص و اهداف معینی به کار برده شده‌اند. در اکثر مدل‌های ساخته شده مدل‌سازی براساس رشد و عملکرد محصول و نمو آن بر مبنای چند مرحله از مراحل رشد مورفولوژیکی گیاه انجام گردیده است و به مدل‌سازی مراحل نمو مریستم انتهایی ساقه، که مورد توجه خاص فیزیولوژیست‌های گیاهان زراعی است، کم‌تر توجه شده است. لذا هدف این تحقیق ساخت یک مدل شبیه‌سازی در قالب یک برنامه رایانه‌ای بود تا بتواند مراحل نمو مریستم انتهایی ساقه و دیگر مراحل نمو گیاه گندم، از ساقه رفتن تا رسیدگی فیزیولوژیکی دانه را شبیه‌سازی و پیش‌بینی نماید. لیکن این مدل طوری ساخته شده است که قادر می‌باشد علاوه بر شبیه‌سازی مراحل نمو گندم و دیگر غلات بهاره، مراحل رشد و نمو گیاهان زراعی دیگر را براساس مقیاس‌های موجود رشد و نمو، شبیه‌سازی نماید.

جدول شماره ۱: خصوصیات زراعی ارقام گندم

رقم	خصوصیات	ارتفاع (سانتیمتر)	کاشت تا سنبله دهی (روز)	کاشت تا رسیدگی (روز)	وزن هزاردانه (گرم)	عملکرد دانه (تن در هکتار)	تیپ زراعی
فونگ	۸۵-۹۰	۸۰-۸۵	۱۳۰-۱۲۵	۳۸-۴۰	۵/۵-۴	زودرس	
چمران	۸۵-۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۱۵۰-۱۳۵	۳۸-۴۲	۶/۵-۷	میان رس	
استار	۹۰-۱۰۵	۱۰۵-۱۱۰	۱۶۰-۱۵۰	۴۰-۴۵	۵-۶/۷	دیررس	

برای ارقام گندم مذکور مقدار $Tb=0$ و $Tmax=30$ می‌باشد.

جدول شماره ۲: وضعیت آب و هوایی فصل‌های زراعی ۸۳-۱۳۸۲ و ۸۴-۱۳۸۳

ماه	میانگین دما (سانتیگراد)		متوسط دمای حداکثر (سانتیگراد)		متوسط دمای حداقل (سانتیگراد)		بارندگی (میلیمتر)		تشنه خورشیدی (مگاژول در مترمربع در روز)	
	۸۲-۸۳	۸۳-۸۴	۸۲-۸۳	۸۳-۸۴	۸۲-۸۳	۸۳-۸۴	۸۲-۸۳	۸۳-۸۴	۸۲-۸۳	۸۳-۸۴
آبان	۲۳/۵	۲۴/۸	۳۱	۳۲/۱	۱۶	۱۷/۵	۰/۹	۱۵/۷	۱۵/۰۶	۱۴/۰۶
آذر	۱۷/۵	۱۳/۱	۲۲/۶	۱۸/۲	۸	۱۲/۳	۹۰/۶	۷۳/۸	۹/۴۰	۱۰/۱۷
دی	۱۴/۹	۱۲/۳	۱۹	۱۷/۶	۷/۱	۱۰/۸	۱۲۷/۱	۱۲۱/۵	۸/۲۵	۸/۸۰
بهمن	۱۵/۸	۱۲/۵	۲۰/۶	۱۷/۵	۱۱	۷/۵	۲۴/۳	۴۳/۵	۱۲/۱۶	۱۲/۷۱
اسفند	۲۰	۱۸/۱	۲۶/۷	۲۴	۱۳/۲	۱۲/۳	۱/۵	۴۱	۱۷/۷۶	۱۴/۲۸
فروردین	۲۴/۲	۲۲/۶	۳۱/۳	۳۰	۱۷/۲	۱۵/۳	۱۳/۵	۱/۵	۱۸/۴۳	۱۸/۳
اردیبهشت	۳۰/۷	۳۰/۲	۳۸/۳	۳۸	۲۳/۲	۲۲/۵	۸/۸	۴/۲	۱۸/۸۱	۱۸/۶۶

معادله (۴)

$$f(T) = 0 \quad \text{If } T \leq T_{\min} \text{ یا } T \geq T_{\max}$$

$$a = \frac{\ln 2}{\ln \left[\frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right]} \quad \text{معادله (۵)}$$

که T_{\min} ، T_{opt} و T_{\max} دماهای اصلی و به ترتیب دمای حداقل، مطلوب و حداکثر می‌باشند و T میانگین دمای روزانه (محاسبه شده از دماهای حداکثر و حداقل روزانه) است. در صورتیکه هیچ داده اندازه‌گیری شده‌ای موجود نباشد، تابع پاسخ دمایی بوسیله سه دمای اصلی (حداقل، مطلوب و حداکثر) براساس معادله ۴ و ۵ تعیین می‌شود. اگر داده‌های اندازه‌گیری شده در دسترس باشد با استفاده از تابع میان‌یابی^۱ می‌توان منحنی پاسخ دمایی را شبیه‌سازی نمود (۱۵).

تابع پاسخ دوره نوری (P):

دوره نوری روی سرعت نمو تعداد زیادی از گیاهان زراعی تأثیر می‌گذارد. Angus و همکاران (۵)، برای شبیه‌سازی واکنش دوره نوری گندم بهاره چند تابع را ارزیابی نمودند و چنین نتیجه گرفتند که یک معادله نمایی منفی واکنش دوره نوری را توصیف می‌نماید.

Stapper (۱۸) و Horie (۱۰) نیز از معادله ۶ برای شبیه‌سازی واکنش دوره نوری گندم، برنج، سویا و جو استفاده نمودند:

$$f(P) = 1 - \exp \left[-\alpha W (P - PC) \right] \quad \text{معادله (۶)}$$

که اگر $0 < f(P) < 1$ باشد، برای گیاهان روز بلند $X=1$ و برای گیاهان روز کوتاه $X=-1$ می‌باشد. در این معادله، P ، دوره نوری برحسب ساعت، PC دوره نوری بحرانی (در دوره نوری کم‌تر از PC هیچ نموی انجام نمی‌گیرد) و W ، عامل حساسیت به دوره نوری است. در بررسی‌های گوناگون Stapper (۸) نتیجه گرفت که W و PC وابسته به ژنوتیپ هستند و طول روز غیر مطلوب سرعت نمو را کاهش می‌دهد.

از معادله (۱)، چنین استنباط می‌شود که در یک ترکیب بهینه یا مطلوب از دما، دوره نوری و بهاره سازی سرعت نمو دارای حداکثر میزان خود می‌باشد و فراتر از دامنه بهینه هر یک از این عوامل، سرعت نمو کاهش می‌یابد. در واقع دماهای بالا و پائین و دوره نوری به عنوان عوامل کاهنده^۱ حداکثر سرعت نمو عمل می‌نمایند (۱۵).

باتوجه به خصوصیات ژنوتیپ‌های گندم کنونی در طی روند تکامل و سازگار شدن آنها به محیط‌های مختلف، حساسیت به دوره نوری آنها برطرف شده است و با توجه به نوع گندم‌های قابل کشت در اقلیم خوزستان (تیپ بهاره) نیاز به بهاره سازی نیز ندارند. لذا در ساخت این مدل، از معادله خطی پاسخ دمایی نمو گیاه و درجه-روز رشد^{۱۱} استفاده شده است، زیرا محققان زیادی در چنین شرایطی مدل خطی را مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی مراحل نمو معرفی نموده‌اند (۵، ۸، ۱۴، ۱۶، ۱۷).

دما مهمترین عامل محیطی مؤثر بر سرعت نمو گیاهان زراعی است (۷، ۱۳، ۲۰، ۲۲). در بیش‌تر مدل‌های گندم و گیاهان زراعی دیگر که

هر یک از مراحل نمو، زمان آن یادداشت می‌گردید. برای تعیین دیگر مراحل نمو (مرحله ساقه رفتن تا رسیدگی فیزیولوژیکی دانه) زمانی که ۵۰ درصد گیاهان موجود در هر کرت آزمایشی به مرحله مورد نظر رسیده بودند، آن زمان به عنوان زمان وقوع آن مرحله خاص تلقی می‌گردید (۱). از داده‌های آزمایشی تاریخ کاشت اول سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ برای واسنجی مدل و از داده‌های آزمایشی تاریخ کاشت دوم سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ و آزمایش سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ برای بررسی صحت مدل استفاده گردید.

توصیف مدل

سرعت نمو بین دو مرحله نمو، معکوس مدت زمان سپری شده بین آن دو مرحله نمو است و حداکثر آن در یک ترکیب مطلوب دما و دوره نوری حاصل می‌شود. حداکثر سرعت نمو، به ژنوتیپ گیاه بستگی دارد. شکل کلی معادله مراحل نمو به صورت معادله ۱- است (۱۹).

$$r = r_{\max 1v1} f(T) f(P) f(V) \quad \text{معادله (۱)}$$

که این معادله برای دوره بین مراحل جوانه‌زنی تا ظهور سنبله انتهایی^{۱۲} به کار می‌رود. به عبارت دیگر، سرعت نمو از مرحله جوانه‌زنی تا ظهور سنبله انتهایی تحت تأثیر دما، دوره نوری و بهاره سازی (برای گندم‌های تیپ زمستانه) است. برای دوره بین مراحل ظهور سنبله انتهایی تا گل‌دهی^{۱۳} معادله پیشنهادی عبارت است از:

$$r = r_{\max 2v2} f(T) f(P) \quad \text{معادله (۲)}$$

و برای مرحله گل‌دهی تا رسیدگی فیزیولوژیکی، سرعت نمو فقط تابع دما است (۱۵).

$$r = r_{\max 3v3} f(T) \quad \text{معادله (۳)}$$

که در این معادلات، r سرعت نمو روزانه، r_{\max} حداکثر سرعت نمو هر مرحله و $f(T)$ ، $f(P)$ و $f(V)$ به ترتیب توابع پاسخ به دما، دوره نوری و بهاره سازی می‌باشند. تابع پاسخ دمایی $f(T)$:

معادله کلی تابع پاسخ دمایی برای مراحل نمو گیاه گندم معادلات ۵ و ۴ است (۱۵):

$$f(T) = \frac{2(T - T_{\min})^a (T_{\text{opt}} - T_{\min})^a - (T - T_{\min})^{2a}}{(T_{\text{opt}} - T_{\min})^{2a}}$$

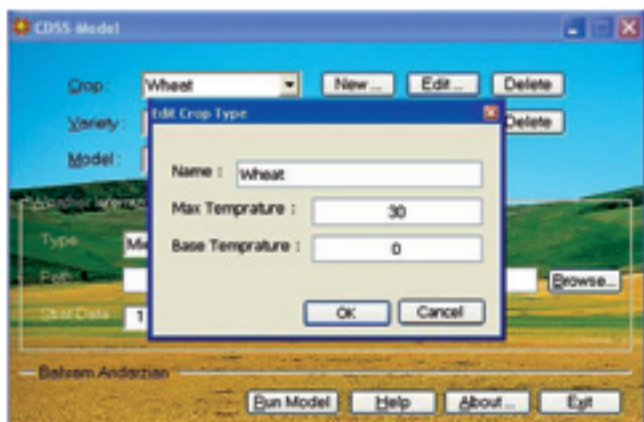
$$\text{If } T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$$



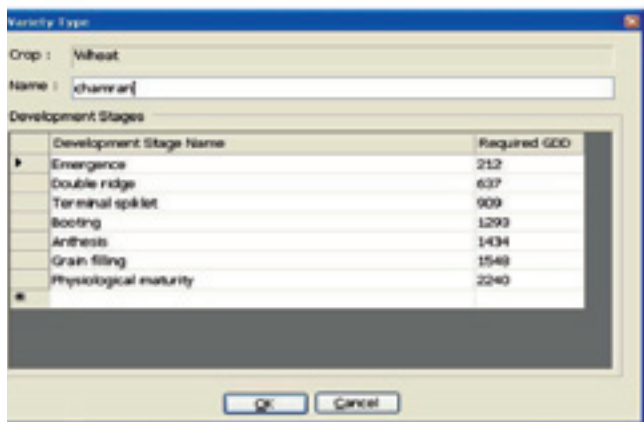
شکل (۱): پنجره اصلی CDSS-Model

دستورکار تکنیکی CDSS-Model:

با دوبار کلیک نمودن روی آیکن مربوطه که بر روی دسکتاپ است. پنجره اصلی مدل ظاهر می‌شود (شکل ۱).
با کلیک نمودن روی دکمه New مقابل Crop (گیاه زراعی) و ظاهر



شکل (۲): پنجره گیاه زراعی



شکل (۳): پنجره رقم یا ژنوتیپ گیاه زراعی

بر مبنای ساز و کارهای فیزیولوژیکی گیاه ساخته شده‌اند، فرض بر آن است که سرعت نمو گیاه به دما بستگی دارد (۲) و مدل‌ها بر مبنای دما ساخته شده‌اند (۷)، هر چند روش‌های مدل‌سازی متفاوت هستند (۲۲). دمای جمعی یک شاخص خوب برای تخمین مراحل رشد و نمو گندم است (۱۴)، که برای هر مرحله نمودی نسبتاً ثابت و مستقل از تاریخ کاشت بوده و بطور قابل توجهی بین ژنوتیپ‌ها متغیر می‌باشد (۸). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که رابطه سرعت نمو و دما تقریباً خطی است و این رابطه در محدوده وسیعی از دما برقرار می‌باشد (۴، ۷، ۱۶، ۲۰، ۲۲). در صورتیکه دمای هوا، T_a ، بین دمای پایه، T_b ، و دمای مطلوب، T_{opt} ، باشد، سرعت نمو با $T_a - T_b$ متناسب است. بنابراین، مرحله نمو با انتگرال این دما یعنی $\int (T_a - T_b) dt$ متناسب خواهد بود. در عمل، این انتگرال به صورت مجموع دما بر حسب درجه-روز رشد بیان می‌شود (۴ و ۱۶).

$$GDD = \sum_{j=1}^n (T_{a_j} - T_b) \quad \text{معادله (۹)}$$

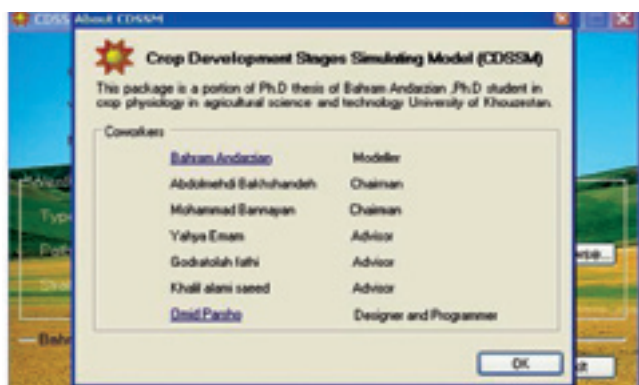
که در آن T_a ، دمای هوا (میانگین دمای حداقل و حداکثر روزانه)، T_b ، دمای پایه که پایین‌تر از آن نمو متوقف می‌شود و n تعداد روزهایی است که دما اندازه‌گیری می‌شود. این روش محاسبه درجه-روز بسته به شرایط زیر مناسب پیشگویی نمو گیاهان است (۲، ۱۶).
۱. واکنش سرعت نمو به دما خطی باشد.
۲. دمای روزانه در طی بخش عمده‌ای از روز کم‌تر از T_b نشود.
۳. دمای روزانه در طی بخش عمده‌ای از روز از حد بالایی دما، تجاوز نکند.
۴. بخش‌های در حال رشد گیاه هم دما با T_a باشد.

نتایج نرم‌افزار CDSs-Model

هدف از ساخت این مدل، شبیه‌سازی و پیش‌بینی مراحل نمو گندم بود تا بتواند مراحل نموی مریستم انتهایی ساقه و دیگر مراحل پدیده شناختی گندم را به تفصیل بر مبنای مقیاس‌های موجود شبیه‌سازی نماید. ولی این مدل طوری طراحی شده است که می‌تواند مراحل رشد و نمو گیاهان زراعی دیگر را بر مبنای مقیاس‌های مربوطه شبیه‌سازی نماید. CDSS-Model در قالب برنامه Visual.Studio.net مدل‌نویسی شده و می‌تواند مراحل رشد و نمو گیاهان زراعی را در مناطق مختلف (داده‌های هواشناسی) و تاریخ‌های کاشت متفاوت (تغییر تاریخ کاشت بصورت گام‌های یک روزه تا چند روزه) شبیه‌سازی و ارزیابی نماید. همچنین این مدل قادر است از طریق مرتبط شدن با نرم‌افزارهای شبیه‌ساز داده‌های هواشناسی نظیر 12 SIMMETEO و 13 WGEN مراحل رشد و نمو را پیش‌بینی نماید.

نصب مدل

CDSS-Model بر روی سیستم عامل ویندوز (۹۸، Win ۲۰۰۰ و Xp) قابل اجراء است و برای نصب مدل بر روی دیسک کامپیوتر نیاز به ۲۶ مگابایت فضای خالی است.



شکل (۵): افرادی که در ساخت مدل همکاری داشته‌اند

می‌توان با آنها ارتباط برقرار نمود (شکل ۵).
ارزیابی مدل

برای ارزیابی کارکرد مدل قبل از استفاده از آن، بایستی نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهده شده (واقعی) که از آزمایش‌ها بدست آمده‌اند، مقایسه شوند تا میزان صحت و اعتبار مدل سنجیده شود (۲). بدین منظور با استفاده از داده‌های آزمایش سال اول (تاریخ کاشت اول سال ۸۳-۸۲) مدل و اسنچی گردید (جدول ۳)، پس از آن مدل برای تاریخ کاشت دوم سال اول و سال دوم اجراء و مراحل نمو شبیه‌سازی شد، سپس نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهده شده (مراحل نمو) مقایسه و اعتبار مدل با آزمون‌های آماری $RMSD^{15}$ و رگرسیون خطی یک به یک ارزیابی گردید (۶، ۲۲).

$$RMSD = \left[\sum_{i=1}^n (simulated_i - observed_i)^2 / n \right]^{0.5} \quad \text{معادله ۱۰}$$

RMSD: ریشه اختلاف میانگین مربعات

Simulated_i: داده شبیه‌سازی شده

Observed_i: داده مشاهده شده

n: تعداد مشاهدات

همانطور که جدول ۳ نشان می‌دهد میزان GDD مورد نیاز مراحل نمو ارقام گندم فونگ، چمران و استار متفاوت است و این به ساختار ژنتیکی ارقام بستگی دارد. زیرا ارقام فونگ، چمران و استار از نظر زراعی به ترتیب جزء ارقام زودرس، میان‌رس و دیررس می‌باشند. تنها میزان GDD مورد نیاز مرحله جوانه‌زنی در سه رقم گندم یکسان می‌باشد. و مراحل دیگر نیاز به GDDهای متفاوتی دارند. برای مثال میزان GDD مورد نیاز مرحله سنبلچه انتهایی (۷۳۳ درجه روز) در رقم فونگ معادل GDD مورد نیاز برای وقوع مرحله برجستگی دوگانه در رقم استار می‌باشد، که مؤید تفاوت ژنتیکی ارقام از نظر وقوع مراحل پدیده شناختی می‌باشد.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی زمان وقوع مراحل نمو بوسیله مدل با زمان وقوع مراحل نمو مشاهده شده (جدول ۴) نشان می‌دهد که مدل با توانایی بالایی زمان وقوع مراحل نمو را پیش‌بینی می‌نماید. و مدل فقط زمان وقوع بعضی از مراحل را حداکثر تا سه روز بیش‌تر برآورد می‌نماید. وقوع مرحله جوانه‌زنی در هر سه رقم با یک روز تأخیر توسط مدل پیش‌بینی شده است

شدن پنجره مورد نظر (شکل ۲)، نام گیاه زراعی، دمای حداکثر و دمای پایه مربوط به آن وارد می‌شوند.

با کلیک نمودن روی دکمه Edit می‌توان این اطلاعات را اصلاح و یا تغییر داد و با کلیک نمودن روی دکمه Delete می‌توان اطلاعات را حذف نمود. با کلیک کردن روی دکمه New در مقابل Variety (رقم) پنجره مربوطه ظاهر می‌شود (شکل ۳)، نام رقم (ژنوتیپ)، مراحل نمو یا مراحل رشد (برمبنای مقیاس مربوطه) همراه با درجه-روز جمعی (GDD) مورد نیاز هر مرحله وارد می‌گردد.

همچنین با کلیک نمودن روی دکمه‌های Edit و Delete مقابل Variety می‌توان اطلاعات مربوط به هر رقم (ژنوتیپ) را اصلاح و حذف نمود. با وارد نمودن اطلاعات مربوط به گیاهان زراعی مختلف و ارقام آنها اطلاعات در پوشه‌های مربوطه ذخیره می‌شوند، که می‌توان گیاه و رقم مورد نظر را انتخاب نمود. در قسمت پنجره مربوطه به Model، نوع تابع پاسخ دمایی مراحل نمو به دما را تعیین می‌کند. که در این مدل برای گندم، تابع خطی در نظر گرفته شده است که مبین وجود رابطه خطی بین مراحل نمو و دمای بین T_{max} و T_{base} می‌باشد. در صورت تغییر نوع تابع واکنش دمایی مراحل نمو بسته به گیاه زراعی می‌توان تابع مربوطه را به برنامه اضافه نمود و پیش‌بینی مراحل نمو را توسط آن شبیه‌سازی کرد.

در قسمت مربوط به اطلاعات هواشناسی^{۱۴}، مسیر یا محل ذخیره اطلاعات هواشناسی هر منطقه یا سال زراعی مشخص می‌شود. که داده‌های هواشناسی شامل دماهای حداکثر و حداقل روزانه می‌باشد، که به صورت فایل‌های Excel ذخیره شده‌اند. و با انتخاب نام فایل با دکمه Browse، مدل آن را جهت اجرای برنامه شبیه‌سازی فرا می‌خواند (شکل ۱). قسمت Start date، تاریخ شروع شبیه‌سازی یا کاشت گیاه زراعی را نشان می‌دهد، که می‌توان آن را به دلخواه تغییر داد و اثر تاریخ کاشت را روی مراحل نمو شبیه‌سازی شده، مشاهده نمود. با کلیک نمودن روی دکمه Run Model، مدل براساس رقم گیاه زراعی، اطلاعات هواشناسی (منطقه یا سال زراعی) و تاریخ کاشت تعیین شده، اجراء می‌شود و نتایج شبیه‌سازی بصورت فایل

Development Stage Name	Required GDD	Day it start after planting	Final GDD
Emergence	252.00	42	252.00
Double ridge	457.00	49	457.00
Terminal spike	599.00	59	599.00
Heading	1,203.00	66	1,203.00
Anthesis	1,429.00	70	1,429.00
Grain filling	1,748.00	80	1,748.00
Physiological maturity	2,048.00	87	2,048.00

شکل (۴): فایل خروجی، نتایج شبیه‌سازی شده

Pdf ظاهر می‌شوند (شکل ۴).

نتایج شبیه‌سازی را می‌توان چاپ و یا به صورت فایل‌های text، Pdf و یا Excell ذخیره نمود. با کلیک نمودن روی دکمه about، نام و نشانی افرادی را که در ساخت مدل مشارکت داشته‌اند را نشان می‌دهد که

جدول ۳: درجه- روز رشد تجمعی (GDD) مورد نیاز هریک از مراحل رشد در سه رقم گندم

مرحله نمو	رقم	استار	چمران	فونگ
سبز شدن (Emergence)	۲۱۲	۲۱۲	۲۱۲	۲۱۲
برجستگی دوگانه (Double ridge)	۷۷۳	۶۳۷	۵۵۲	۵۵۲
سنبلچه انتهایی (Terminal spiklet)	۱۰۲۵	۹۱۰	۷۷۳	۷۷۳
متورم شدن انتهای ساقه (Booting)	۱۴۵۷	۱۲۹۲	۱۱۴۷	۱۱۴۷
گل‌دهی (Anthesis)	۱۶۱۵	۱۴۳۴	۱۲۷۰	۱۲۷۰
پرشدن دانه (Grain filling)	۱۷۴۶	۱۵۴۸	۱۳۸۲	۱۳۸۲
رسیدگی فیزیولوژیکی (Physiological maturity)	۲۴۳۱	۲۲۴۰	۲۱۲۸	۲۱۲۸

جدول ۴: تعداد روز مشاهده شده و شبیه‌سازی شده از کاشت تا وقوع هر مرحله نمودی در سه رقم گندم

مرحله نمودی	رقم		استار		چمران		فونگ		
	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده	
سبز شدن (Emergence)	۱۴	۱۵	۱۴	۱۵	۱۴	۱۵	۱۴	۱۵	
برجستگی دوگانه (Double ridge)	۵۴	۵۴	۴۳	۴۴	۳۸	۳۸	۳۸	۳۸	
سنبلچه انتهایی (Terminal spiklet)	۶۸	۷۰	۶۱	۶۲	۵۴	۵۳	۵۴	۵۴	
متورم شدن انتهای ساقه (Booting)	۹۱	۹۳	۸۳	۸۵	۷۸	۷۷	۷۸	۷۸	
گل‌دهی (Anthesis)	۹۸	۱۰۱	۹۰	۹۱	۸۴	۸۲	۸۴	۸۴	
شروع پرشدن دانه (Grain filling)	۱۰۵	۱۰۷	۹۶	۹۸	۸۹	۸۶	۸۹	۸۹	
رسیدگی فیزیولوژیکی (Physiological maturity)	۱۳۹	۱۳۷	۱۲۸	۱۲۹	۱۲۴	۱۲۲	۱۲۴	۱۲۴	
ریشه اختلاف میانگین مربعات ($RMSD^{1/92}$)		ریشه اختلاف میانگین مربعات ($RMSD^{1/36}$)		ریشه اختلاف میانگین مربعات ($RMSD^{1/69}$)					

که این پیش‌بینی توسط مدل برای سه رقم یکسان بود. پیش‌بینی زمان وقوع مرحله برجستگی دو گانه با زمان مشاهده شده در ارقام فونگ و استار با یکدیگر منطبق بود. ولی در رقم چمران این مرحله یک روز بیش‌تر برآورد گردید. زمان وقوع همین مرحله (مرحله برجستگی دوگانه) در ارقام فونگ، چمران و استار به ترتیب ۳۸، ۴۳ و ۵۴ روز بعد از کاشت می‌باشد که این تفاوت ناشی از تفاوت در خصوصیات ژنتیکی ارقام می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی زمان وقوع مرحله

سنبلچه انتهایی با زمان پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که مدل این مرحله را در ارقام فونگ، چمران و استار به ترتیب با یک، یک و دو روز بیش‌تر برآورد نموده است. زمان وقوع مرحله آبستنی^{۱۶} در ارقام فونگ، چمران و استار نیز به ترتیب با یک، دو و دو روز بیش‌تر پیش‌بینی شده است. مرحله گل‌دهی که یکی از مهمترین مراحل اصلی نمو گیاه گندم می‌باشد در ارقام فونگ، چمران و استار به ترتیب دو، یک و سه روز بیش‌تر برآورد شده است. زمان شروع پر شدن دانه

و تاریخ کاشت‌های متفاوت مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری می‌تواند برای کارشناسان اجرایی جهت پیش‌بینی مراحل رشد و نمو گیاهان زراعی در مناطق مختلف به منظور اعمال عملیات مدیریت مزرعه (مصرف کودها، علف‌کش‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد و...) و اتخاذ تمهیدات مدیریتی لازم برای افزایش عملکرد بکار گرفته شود.

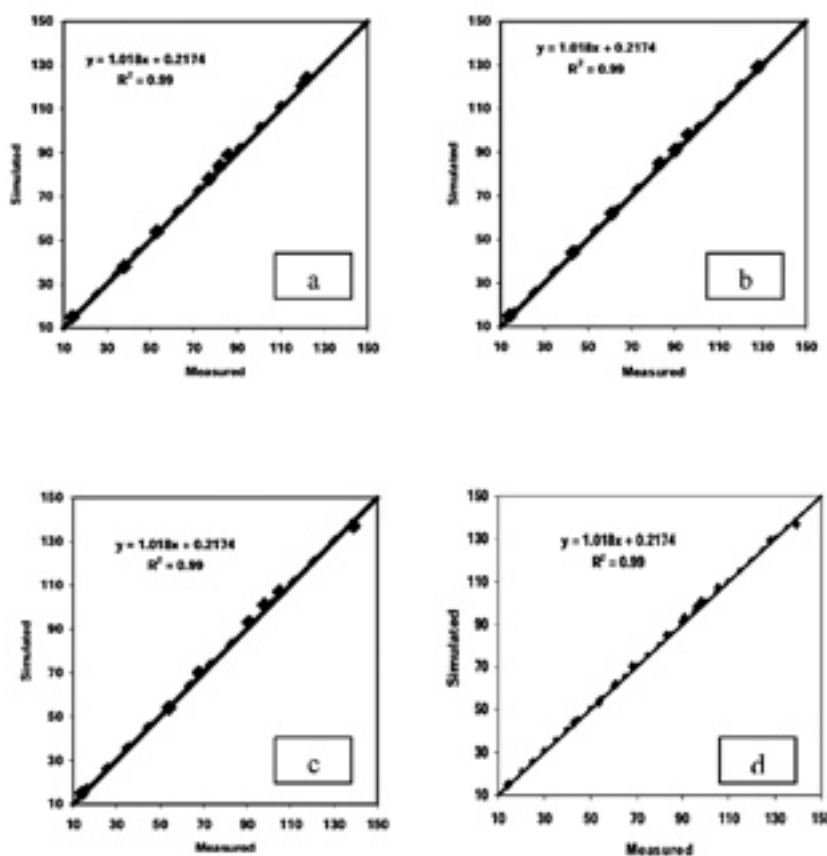
پاورقی‌ها

- 1 - Maturity
- 2- Phenology
- 3- Development Stage
- 4- Stereoscopic Microscope
- 5 - Calibration
- 6 - Validation
- 7- Terminal Spiklet
- 8- Anthesis
- 9 - Interpolation
- 10- Reduction Factors

نیز در ارقام فونگ، چمران و استار به ترتیب با سه، سه و دو روز بیشتر از زمان واقعی، پیش‌بینی شده است و مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی نیز در ارقام فونگ و چمران با دو و یک روز بیش‌تر و در رقم استار دو روز کم‌تر برآورد شده است. در مجموع مدل به طور رضایت بخشی مراحل نمو را شبیه‌سازی می‌نماید. مقدار ریشه اختلاف میانگین مربعات (RMSD) بین زمانهای شبیه‌سازی شده و مشاهده شده (جدول ۴) بطور متوسط برای همه مراحل نمو در ارقام فونگ، چمران و استار به ترتیب ۱/۶۹، ۱/۳۶ و ۱/۹۲ روز می‌باشد که حاکی از کارکرد قابل قبول و معتبر مدل در پیش‌بینی مراحل نمو می‌باشد. همچنین رسم خط رگرسیون یک به یک داده‌های شبیه‌سازی شده علیه داده‌های مشاهده شده (شکل ۶)، نشان می‌دهد که همبستگی بالایی ($r^2=0/99$) بین مراحل نمو شبیه‌سازی شده و مشاهده شده در هر سه رقم وجود دارد و این نیز بر صحت عمل مدل دلالت دارد.

نتیجه‌گیری کلی

مدل ساخته شده مذکور با توانایی بالایی مراحل رشد و نمو گیاهان زراعی تیپ بهار را شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌نماید. این نرم‌افزار می‌تواند به عنوان یک ابزار کمکی برای محققان مؤسسات و مراکز تحقیقاتی جهت ارزیابی مراحل نمو ژنوتیپ‌های مختلف گیاهان زراعی در مناطق، سال‌ها



شکل (۶). مقایسه بین زمان وقوع مراحل نمو

پیش‌بینی شده و مشاهده شده (a) رقم فونگ (b) رقم چمران (c) رقم استار (d) هر سه رقم

Indian-Punjab Journal of Agricultural Science. Cambridge. 129: 13-18.

12- Kirby, E. J. M., M. Applyard and G. Fellow. 1985; Variation in development of wheat and barley in response to sowing date and variety. Journal of Agricultural Science Cambridge. 104: 383-396.

13- Lommmis, R.S. 1979; Explanatory models in crop physiology. Plant Physiology 30: 330-367.

14- Mall, R. K., B. Gupta., K. Singh., and T. Singh. 2000; Phenology and yield of wheat (*Tritium aestivum*) in relation to growing degree-days and photo thermal units. Indian Journal of Agricultural sciences. 70 (10): 647-52.

15- Nereu, A. S., A. Weiss, Q. Xue, and P. Stephan Banzinger. 2003; Improving predictions of developmental stages in winter wheat: Amodified Wang and Engel Model. Agricultural and Forest Meteorology. 115: 139- 150.

16- Ritchie, J.T.U., U. Singh., D. C. Godwin and W. T. Bowen.1998; Cereal growth, development and yield in. Tsuji, G.Y., G. Hoogenboom and P.K.Thornton, (Eds.). Understanding option for agricultural production. Kluwer.Academic publisher, Dordrecht. The Netherlands. PP. 70-98.

17-Saarikko, R. A., and T. R. Carter. 1996; Phenological development in spring cereals: Response to temperature and photoperiod under northern conditions European Journal of Agronomy. 5: 59- 70.

18- Stapper, M. 1984; SIMTAG: A simulation model of wheat genotypes. University of New England. ICARDA.

19- Wang, E., and T. Engel.1998; Simulation of phenological development of wheat crops. Agricultural systems. 58: 1-24.

20- Weikai. Y., and L. A. Hunt.1999; An equation for modeling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. Annals of Botany 84: 607-614.

21-Whisler, F. D., M.C.Kininien., and V.R.Reddy. 1986; Crop simulation Model in agronomic systems. Advance in Agronomy. 40, Academic press.

22- White, J. W., and G, Hoogenboom. 2005; A structured procedure for assessing how crop models respond to temperature. Agronomy Journal. 97: 426-439.

- 11 - Growing Degree Days
- 12- Simulator Meteorology
- 13- Weather Generator
- 14- Weather Information
- 15- Root Mean Square Difference
- 16 - Booting Stage

منابع مورد استفاده

۱ - امام، ی. ۱۳۷۸؛ راهنمای تشخیص مراحل نمو جو و گندم. نشریه فنی شماره ۱۹، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز.

۲ - بنایان، م. ۱۳۸۱؛ ساخت و کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی در کشاورزی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

۳ - کیانی، ع و همکاران. ۱۳۸۲؛ ارزیابی مدل CERES-Wheat در دو نقطه متفاوت اقلیمی در استان خراسان، مجله پژوهشی بیابان جلد ۸. شماره ۲. دانشگاه تهران.

۴ - نصیری محلاتی، م. ۱۳۷۹؛ مدل‌سازی فرآیندهای رشد گیاهان زراعی. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.

5- Angus, J. F., D. H. Mackenzie., R. Morton and C. A. Schafer. 1981; Phasic development in field crops II. Thermal and Photoperiodic responses of spring wheat. Field Crops Research 83: 169-283.

6- Bannayan. M., N. M. Crout and G. Hoogenboom. 2003; Application of the CERES-Wheat model for within season prediction of winter wheat yield in the United Kingdom. Agronomy Journal. 95: 114- 125.

7- Cesaraccio.C., D. Spano and P. Duce. 2001; An improved model determining degree-day values from daily temperature data. International Journal Biometeorology. 45: 161- 169.

8- Gosh, D. C., and P. Nandi. 2000; Phenological development and productivity of wheat (*T.aestivum*) at different dates of sowing. Indian Journal of Agricultural Science 70(6):393-5.

9- Hoogenboom. G. 1994; Manual DSSAT. Version 3. Vol.4. University of Hawaii. PP: 201- 215.

10- Horie, T. 1994; Crop ontogeny and development. In Physiology and determination of crop yield. Crop Science: 53: 153- 180.

11- Hundale, S. S., and R, Kaur.1997; Application of CERES-Wheat Model to yield prediction in the irrigated plains of the

