University of Tehran Press

Journal of Crops Improvement

Online ISSN: 2345-6957

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

Investigation of Genetic Coefficients of Rice Cultivars for Applying in Crop Simulation Models

Shahram Nazari[1]✉ | Maryam Hosseini Chelshtori[2] | Sajjad Rahimi-Moghaddam[3] | Mohammad Mohammadi[4]

1. Corresponding Author, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. E-mail: sh.nazari@areeo.ac.ir
2. Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran. E-mail: m.hosseini@areeo.ac.ir
3. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: rahimi.s@lu.ac.ir
4. Rice Research Institute of Iran, Rasht, Iran. E-mail: m.mohammadi57@areeo.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 17 August 2021
Received in revised form:
01 February 2022
Accepted: 23 February 2022
Published online:
17 December 2022

Keywords:
Flowering,
growth degree days,
harvest index,
plant height,
single grain weight.

ABSTRACT

In order to determine the phenological differences of some improved rice cultivars in Iran for applying in crop simulation models, an experiment has been conducted in the research farm of the Rice Research Institute of Iran (Rasht) in 2020 as a randomized complete block with three replications. The experimental treatment consist of six rice cultivars (Rash, Anam, Gohar, SA1, SA6 and M7). Results show that the highest development rate can be observed in development rate in juvenile phase and grain filling phase in Anam cultivar. The minimum and maximum time required to start emergence with 3 and 6 days are in Anam and Gohar cultivars, respectively. The maximum time required to achieve maximum flowering and physiological maturity is obtained with 71 and 103 days in Gohar cultivar. The highest flowering period with 19 and 20 days is obtained in late maturing Rash and Gohar cultivars, respectively. The highest *growth degree days* (GDD) in beginning of grain filling to maturity stage is observed with 401 *GDD* for M7 cultivar. The highest growth-day for pre-flowering with 1208 GDD belongs to Gohar cultivar. The highest harvest index is obtained with 50.91% in Gohar cultivar. The results also show that the single grain weight under ideal growing conditions with 0.030 g is observed in Gohar and M7 cultivars. The highest plant height belongs to cultivar M7 with 150 cm and the highest total nitrogen uptake is observed in the plant at maturity of Anam cultivar. Overall, the estimated genetic coefficients in different models differ between cultivars and the coefficients vary in the range defined in the model for different groups of maturity. To accurately calculate the genetic coefficients, it is suggested that this experiment should be repeated over several years and in different ecosystems under rice cultivation.

Cite this article: Nazari, Sh., Hosseini Chelshtori, M., Rahimi-Moghaddam, S., & Mohammadi, M. (2022). Investigation of genetic coefficients of rice cultivars for applying in crop simulation models. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 1085-1100. DOI: http://doi.org/10.22059/jci.2022.329050.2599

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: http://doi.org/10.22059/jci.2022.329050.2599

انتشارات دانشگاه تهران

به زراعی کشاورزی

Homepage: https://jci.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۶۹۵۷-۲۳۴۵

بررسی ضرایب ژنتیکی ارقام برنج برای کاربرد در مدل‌های شبیه‌سازی گیاه زراعی

شهرام نظری[۱]✉ | مریم حسینی چالشتری[۲] | سجاد رحیمی مقدم[۳] | محمد محمدی[۴]

۱. نویسنده مسئول، بخش اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. رایانامه: shahram_nazari1986@yahoo.com

۲. بخش اصلاح و تهیه بذر، مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران. رایانامه: m.hosseini@areeo.ac.ir

۳. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. رایانامه: rahimi.s@lu.ac.ir

۴. مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران. رایانامه: m.mohammadi57@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

کلیدواژه‌ها:
ارتفاع بوته،
درجه روز رشد،
شاخص برداشت،
گل‌دهی،
وزن تک‌دانه.

چکیده

به‌منظور تعیین تفاوت‌های فنولوژی برخی ارقام اصلاح‌شده برنج برای کاربرد در مدل‌های شبیه‌سازی گیاه زراعی، آزمایشی در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور (رشت) در سال ۱۳۹۹ به‌صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمار آزمایش شامل شش رقم برنج (رش، آنام، گوهر، SA1، SA6 و M7) بود. نتایج نشان داد که بالاترین سرعت نمو در مرحله رشد رویشی و مرحله پرشدن دانه در رقم آنام مشاهده شد. کم‌ترین و بیش‌ترین زمان لازم جهت شروع سبزشدن با سه و شش روز به‌ترتیب در ارقام آنام و گوهر بود. بیش‌ترین مدت زمان لازم جهت دست‌یابی به حداکثر گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیکی با ۷۱ و ۱۰۳ روز در رقم گوهر به‌دست آمد. بالاترین طول دوره گل‌دهی با ۱۹ و ۲۰ روز به‌ترتیب در ارقام دیررس رش و گوهر به‌دست آمد. بیش‌ترین درجه روز رشد از شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی با ۴۰۱ درجه روز رشد مربوط به رقم M7 مشاهده شد. بیش‌ترین زمان دمایی تجمعی پیش از گل‌دهی با ۱۲۰۸ درجه روز رشد به‌ترتیب متعلق به رقم گوهر بود. بالاترین شاخص برداشت با ۵۰/۹۱ درصد در رقم گوهر به‌دست آمد. هم‌چنین نتایج نشان داد که بیش‌ترین وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل با ۰/۰۳۰ گرم در ارقام گوهر و M7 مشاهده شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بالاترین ارتفاع بوته مربوط به رقم M7 با ۱۵۰ سانتی‌متر بود. نتایج نشان داد بالاترین نیتروژن کل جذب‌شده در بوته در زمان رسیدگی مربوط به رقم آنام مشاهده شد. به‌طورکلی نتایج نشان داد که ضرایب ژنتیکی محاسبه‌شده در مدل‌های مختلف در بین ارقام متفاوت است و ضرایب در دامنه‌ای که در مدل برای گروه‌های مختلف رسیدگی تعریف شده است، تغییر می‌کنند. هم‌چنین برای محاسبه دقیق ضرایب ژنتیکی پیشنهاد می‌شود این آزمایش در تعداد سال بیش‌تر و اکوسیستم‌های مختلف تحت کشت برنج نیز تکرار شود.

استناد: نظری، ش.، حسینی چالشتری، م.، رحیمی مقدم، س. و محمدی، م (۱۴۰۱). بررسی ضرایب ژنتیکی ارقام برنج برای کاربرد در مدل‌های شبیه‌سازی گیاه زراعی. *به‌زراعی کشاورزی*، ۲۴ (۴)، ۱۰۸۵-۱۱۰۰. DOI: http://doi.org/10.22059/jci.2022.329050.2599

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی در جهان بوده و غذای اصلی نیمی از جمعیت جهان را برنج تشکل می‌دهد (Ding *et al*., 2018). در حال حاضر مصرف سالانه برنج در ایران حدود ۳/۴ میلیون تن بوده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۵ مقدار مصرف به ۵/۱ میلیون تن برسد در حالی است که مطالعات ۲۰ سال گذشته نشان‌دهنده آن است که سطح زیر کشت برنج در کشور به‌دلیل محدودیت زمین‌های قابل کشت، روندی کاهشی دارد (FAOSTAT, 2019).

پایداری تولید در کشاورزی مستلزم شناخت دقیق و کافی از روابط متقابل محیط و گیاه است. در شرایطی که اکوسیستم‌های کشاورزی دستخوش تغییرات ناشی از اقلیم و پیامدهای آن هستند، برای دست‌یابی به پایداری عملکرد در بوم‌نظام‌ها، نیازمند پیش‌آگاهی از این پیامدها در عرصه‌های مختلف خواهیم بود. هم‌اکنون در کشورهای پیشرفته، علم مدل‌سازی[1] یکی از ابزارهای مهم در رسیدن به این ثبات به‌شمار می‌رود، زیرا این مدل‌ها امکان افزایش فهم درباره چگونگی عملکرد آن‌ها را فراهم خواهند کرد و نشان خواهند داد که آیا یک مدیریت خاص موجب افزایش عملکرد خواهد شد یا خیر؟. مدل‌های شبیه‌سازی[2] رشدونمو گیاهان، ابزارهای کمّی هستند که براساس اصول علمی و روابط ریاضی استوار بوده و می‌توانند آثار متفاوت اقلیم، آب، خاک و عوامل مدیریت زراعی را روی رشدونمو گیاهان مورد ارزیابی قرار دهند (Zand *et al*., 2014).

نیازهای اطلاعاتی برای تصمیم‌گیری کشاورزان در تمام سطوح به‌دلیل افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی و فشارها بر زمین، آب و سایر منابع طبیعی به‌سرعت در حال افزایش است. تولید داده‌های جدید از طریق پژوهش با روش‌های سنتی و انتشار آن برای تأمین نیازهای روزافزون کافی نیست. امروزه یکی از چالش‌های مهم در مدل‌سازی دقیق تولید محصولات زراعی این است که ارقام جدید به‌طور مداوم در حال معرفی می‌باشند و برای هر رقم جدید نیازمند تخمین پارامترهای مدل است (Nissanka *et al*., 2015). کاربرد اغلب مدل‌های شبیه‌سازی نیازمند تخمین پارامترها یا ضرایبی هستند که ویژگی‌های هرگونه یا رقم را در مدل نشان می‌دهند. در مدل‌های شبیه‌سازی اساساً دو نوع پارامتر وجود دارد. اول پارامترهای گونه‌ای که برای همه ارقام یکسان می‌باشد و دیگر پارامترهای ژنتیکی (ضرایب ژنتیکی) هستند که در بین ارقام متفاوت می‌باشند (Wallach *et al*., 2011). برخی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی از ضرایب ژنتیکی برای بیان صفات کلیدی ارقام مختلف استفاده می‌کنند. این ضرایب مربوط به ژنتیک گیاه بوده و محیط بر روی آن‌ها تأثیری ندارد و تغییرات آن‌ها در دامنه خاص خود می‌باشد. با این وجود عملکرد یک ژنوتیپ در شرایط محیطی مختلف، علاوه بر عوامل اقلیمی و مدیریت زراعی تحت تأثیر این ضرایب نیز می‌باشد (Paoli *et al*., 2000). مقادیر ضرایب ژنتیکی باید قبل از استفاده، از طریق آزمایش‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری و یا تخمین زده شوند، اما این آزمایش‌ها بسیار پرهزینه هستند.

یکی از مهم‌ترین تفاوت‌های ارقام، در فنولوژی و زمان‌های لازم برای توسعه بسیاری از فرایندهای اصلی فیزیولوژیکی می‌باشد (Van oort *et al*., 2011). بنابراین برآورد پارامترهای فنولوژی دقیق با درصد خطای قابل‌قبول یکی از مباحث کلیدی در شبیه‌سازی محصولات زراعی می‌باشند (Aggarwal & Mall, 2002). لذا، مقادیر ضرایب ژنتیکی هر یک از ارقام باید قبل از استفاده، از طریق آزمایش‌های مزرعه‌ای اندازه‌گیری و یا تخمین زده شوند، اما این آزمایش‌ها بسیار پرهزینه هستند. با وجود نو بودن نگرش سیستماتیک به فرایند تولید در گیاهان زراعی تاکنون مدل‌های متعددی ارائه‌شده که قادر است مراحل مختلف نمو و فرایندهای رشد گیاه برنج را با استفاده از داده‌های اقلیمی و خاکی، مدیریتی و ضرایب ژنتیکی شبیه‌سازی کند. در همین راستا Singh *et al*. (2017) در آزمایش شبیه‌سازی اثرات تغییر

1. Modeling
2. Simulation

اقلیم بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام مختلف برنج با استفاده از مدل DSSAT ضرایب ژنتیکی زمان دمایی تجمعی مرحله رشد رویشی و از شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی را به‌ترتیب ۶۵۰-۴۸۰ و ۵۱۰-۳۹۰ درجه روز رشد به‌دست آوردند. Liu *et al.* (2019) با بررسی اثرات مختلف دی‌اکسیدکربن بر عملکرد برنج با استفاده از مدل APSIM-ORYZA سرعت نمو در مراحل رشد رویشی، تشکیل خوشه و پرشدن دانه را به‌ترتیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۰۸۵ و ۰/۰۰۲ درجه روز گزارش کردند. Pourgholami-Amiji *et al.* (2020) با ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد برنج تحت کشت آبیاری تناوبی، ضرایب ژنتیکی روز تا شروع سبزشدن، حداکثر کانوپی، حداکثر گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیکی رقم طارم را به‌ترتیب ۶، ۵۳، ۷۰ و ۸۲ روز گزارش کردند. Li *et al.* (2020) در پژوهشی ضرایب ژنتیکی برنج را در زمان دمایی تجمعی مرحله رشد رویشی و شروع پرشدن دانه تا رسیدگی را به‌ترتیب ۶۰۴-۳۶۶ و ۷۳۰-۵۱۷ درجه روز رشد در مدل DSSAT و سرعت نمو در مراحل رشد رویشی، تشکیل خوشه و پرشدن دانه را به‌ترتیب ۰/۰۰۰۹، ۰/۰۰۰۸ و ۰/۰۰۱۷ درجه روز در مدل APSIM-ORYZA گزارش کردند.

با توجه به این‌که استفاده و به‌کارگیری بسیاری از مدل‌های گیاهان زراعی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد ارقام، نیازمند در دسترس‌بودن ضرایب ژنتیکی مختص هر رقم می‌باشد و این ضرایب در بسیاری از موارد برای ارقام مورد کشت در ایران برآورد نشده است، لذا این پژوهش در راستای تخمین و اندازه‌گیری برخی از ضرایب مهم ژنتیکی ارقام برنج برای استفاده در مدل‌های APSIM-ORYZA، AquaCrop، DSSAT و GECROS اجرا شد.

۲. مواد و روش‌ها

به‌منظور تعیین ضرایب ژنتیکی برخی ارقام برنج برای کاربرد در مدل‌های شبیه‌سازی گیاه زرعی آزمایشی در مزرعه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور (رشت) در سال ۱۳۹۹ اجرا شد. ایستگاه پژوهشی مؤسسه تحقیقات برنج کشور (رشت) با طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی از نصف‌النهار گرینویچ و با ارتفاع هفت متر پایین‌تر از سطح دریای آزاد قرار گرفته است. متوسط بارندگی سالیانه ۱۱۰۰ میلی‌متر است. میانگین دمای سالانه منطقه اجرای آزمایش در حدود ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد بود. بافت خاک از نوع لومی رسی، هدایت الکتریکی ۱/۹۳ دسی‌زیمنس بر متر، اسیدیته ۶/۹۴، فسفر و پتاسیم قابل‌جذب به‌ترتیب ۳۷/۱ و ۱۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، نیتروژن خاک ۰/۱۷ درصد و ماده آلی خاک نیز ۰/۹۳ بود.

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شرایط خزانه و زمین اصلی انجام شد. تیمار آزمایش شامل شش رقم برنج (رش، آنام، گوهر، SA1، SA6 و M7) بود. مشخصات ارقام مورد بررسی در جدول (۱) ارائه شده است. هر واحد آزمایشی متشکل از شش ردیف کاشت به طول شش متر بود. تراکم کاشت برای کلیه ارقام مورد بررسی در زمین اصلی بین سه عدد نشا در هر کپه و فاصله کاشت ۲۰ سانتی‌متر بین ردیف و ۲۰ سانتی‌متر روی ردیف بود. عملیات آبیاری غرقاب، کود دهی و کنترل حشرات، بیماری‌های احتمالی و علف‌های هرز به گونه‌ای انجام شد که هیچ‌گونه آثاری از تنش خشکی، کمبود عناصر غذایی، آفت‌زدگی، بیماری و خسارت علف هرز در برنج مشاهده نشد تا این گیاه زراعی بتواند در شرایط بهینه رشد کند. در این آزمایش ۱۵۰ کیلوگرم کود اوره و کودهای فسفر و پتاسیم به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار مصرف شد. به‌طوری‌که، ۵۰ درصد کود اوره به‌صورت پایه و ۲۵ درصد آن در زمان طویل‌شدن ساقه و ۲۵ درصد دیگر نیز در زمان تشکیل خوشه مصرف شد. کود فسفر کامل از منبع سوپر فسفات تریپل به‌صورت پایه و کود پتاسیم از منبع کلرور پتاسیم نیز ۵۰ درصد پایه و ۵۰ درصد دیگر به‌دلیل افزایش راندمان جذب، بهبود طول خوشه و دانه در زمان تشکیل خوشه به شکل سرک مصرف شد.

جدول ۱. ویژگی‌های زراعی ارقام برنج مورد آزمایش

نام رقم	نوع رقم	منشأ	طول دوره رسیدن	ارتفاع بوته	مقاومت به بلاست	عملکرد
رش	اصلاح‌شده	گیلان	دیررس	متوسط	مقاوم	متوسط
آنام	اصلاح‌شده	گیلان	زودرس	پاکوتاه	حساس	متوسط
گوهر	اصلاح‌شده	گیلان	دیررس	متوسط	مقاوم	بالا
SA1	اصلاح‌شده	گیلان	میان‌رس	پابلند	نیمه‌حساس	متوسط
SA6	اصلاح‌شده	گیلان	میان‌رس	پاکوتاه	نیمه‌حساس	متوسط
M7	اصلاح‌شده	گیلان	میان‌رس	پابلند	نیمه‌حساس	بالا

طول دوره رسیدن؛ زودرس: ۱۱۰–۹۰ روز، متوسطرس: ۱۳۰–۱۱۰ روز، دیررس: بیش از ۱۳۰ روز

ارتفاع بوته؛ پاکوتاه: ۱۰۰–۸۰ سانتی‌متر، متوسط: ۱۲۰–۱۰۰ سانتی‌متر، بلند: بیش از ۱۲۰ سانتی‌متر

عملکرد دانه؛ کم: ۵۰۰۰–۳۵۰۰ کیلوگرم در هکتار، متوسط ۶۰۰۰–۵۰۰۰ کیلوگرم در هکتار، بالا: بیش از ۶۵۰۰ کیلوگرم در هکتار

به‌منظور تعیین قوه‌نامیه بذور ارقام مختلف قبل از کاشت، از روش کاغذ فیلتر استفاده شد. بعد از آن ۱۰۰ بذر را به نمونه‌های ۲۵×۴ تقسیم شد و هر کدام را در پتری‌دیش که حاوی کاغذ فیلتر (مرطوب شده) بود و در دمای اتاق نگهداری شد. بعد از گذشت ۱۴ روز تعداد بذرهای جوانه‌زده شمارش و درصد جوانه‌زنی تعیین شد. از داده‌های به‌دست‌آمده از مزرعه برای محاسبه و تخمین ضرایب ژنتیکی ارقام برنج در مدل‌های APSIM-ORYZA، AquaCrop، DSSAT و GECROS استفاده شد.

۲. ۱. مدل APSIM-ORYZA

در مدل APSIM-ORYZA محاسبه سرعت نمو فنولوژیک از الگوی محاسبه روزانه پیروی می‌کند. با استفاده از مجموع این مقادیر در طول زمان، مراحل نمو در سراسر فصل رشد شبیه‌سازی می‌شود (Bouman *et al.*, 2001). در این مدل سرعت نمو گیاه زراعی براساس مقادیر ثابت سرعت نمو در مراحل مختلف فنولوژی، افزایش روزانه در واحدهای حرارتی و طول روز محاسبه شده است. چرخه زندگی گیاه برنج به چهار مرحله مهم فنولوژیک تقسیم می‌شود (Bouman *et al.*, 2001):

۲. ۱. ۱. مرحله رشد رویشی پایه[1] (BVP) که از خروج کولئوپتیل تا شروع مرحله حساس به طول روز به‌طول می‌انجامد. سرعت نمو این مرحله با کد *DVRJ* مشخص می‌شود و به معنی سرعت نمو در مرحله نوجوانی[2] است.

۲. ۱. ۲. مرحله حساس به طول روز[3] (PSP) که از انتهای BVP تا آغازش خوشه[4] ادامه می‌یابد. سرعت نمو این مرحله با کد DVRI مشخص می‌شود و به معنی سرعت نمو مرحله القای خوشه می‌باشد.

۲. ۱. ۳. مرحله تشکیل خوشه[5] (PFP) که از آغازش خوشه تا ۵۰ درصد گل‌دهی به‌طول می‌انجامد. سرعت نمو این مرحله با کد *DVRP* مشخص‌شود.

۲. ۱. ۴. مرحله پرشدن دانه[6] (GFP) از زمان تلقیح گلچه تا رسیدگی فیزیولوژیک ادامه می‌یابد و سرعت نمو این مرحله با کد *DVRR* مشخص می‌شود.

سرعت نمو عکس دوره زمانی مورد نیاز برای تکمیل یک واحد نمو می‌باشد. درجه حرارت کاردینال برای برنج

1. Basic Vegetative Phase
2. Juvenile
3. Photo-Sensitive Phase
4. Panicle Initiation
5. Panicle Formation Phase
6. Grain Filling Period

عبارتند از ۹، ۳۰ و ۴۲ درجه سانتی‌گراد بود (Bouman *et al*., 2001). در این مدل درجه حرارت ساعتی (Td) با استفاده از درجه حرارت‌های حداقل و حداکثر و براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (Amiri Larijani, 2011):

$$T_d = (T_{min} - T_{max})/2 + (T_{max} - T_{min})\cos(0.2618(h-14))/2$$

که در آن h ساعت زمانی (از ۱ تا ۲۴) در روز می‌باشد. افزایش ساعتی در واحدهای حرارتی (HUH, $^{o}C d\ h^{-1}$) براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$T_d \leq T_{base}$, $T_d \geq T_{high}$: $HUH=0$

$T_{base} < T_d < T_{opt}$: $HUH= \frac{(T_d - T_{base})}{24}$

$T_d < T_{base}$, $T_d > T_{high}$: $HUH= \frac{[T_{opt} - (T_d - T_{opt}) \times (T_{opt} - T_{base})/(T_{high} - T_{opt})]}{24}$

که در آن T_{base} درجه حرارت پایه، T_{opt} درجه حرارت بهینه و T_{high} درجه حرارت حداکثر برای نمو فنولوژیک است. بنابراین افزایش روزانه در واحدهای حرارتی (HUH, $^{o}C d\ h^{-1}$) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$HUH = \sum_{k=1}^{24}(HUH)$$

برای هر یک از ارقام برنج مقادیر سرعت نمو در هر یک از این چهار مرحله ثابت است و با عکس مجموع درجه حرارت مورد نیاز برای کامل‌کردن مرحله‌ای خاص در یک طول روز متناسب است. تفاوت بین ارقام زراعی در کل طول دوره رشد معمولاً به‌علت اختلاف در طول دوره رشد رویشی پایه بیش از سایر مراحل رشد می‌باشد.

۲. ۲. مدل AquaCrop

ضرایب ژنتیکی مدل AquaCrop شامل روز تا شروع سبزشدن، روز تا حداکثر کانوپی، روز تا حداکثر گل‌دهی، روز تا رسیدگی فیزیولوژیکی، طول دوره گل‌دهی، حداکثر عمق نفوذ ریشه و شاخص برداشت می‌باشد که برای هر یک از ارقام مورد بررسی در این پژوهش با پایش روزانه مورد ثبت شد (Seyed Raoufi *et al*., 2017).

۲. ۳. مدل‌های DSSAT و GECROS

ضرایب ژنتیکی مدل DSSAT به سه گروه تقسیم می‌شوند که گروه اول شامل وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل و تعداد خوشه بالقوه در هر گرم از وزن اصلی ساقه است که در انتهای دوره رشد برای هر یک از ارقام اندازه‌گیری می‌شود. گروه دوم مانند بلندترین طول روز که بیش‌تر از آن رشد گیاه کم می‌شود، ضریب حساسیت به فتوپریود، ضریب پنجه‌زنی و ضریب تحمل به دما که با توجه به اطلاعات آزمایش‌های در شرایط مختلف تخمین زده می‌شود که معمولاً برای هر یک از ارقام ثابت درنظر گرفته می‌شود. هم‌چنین گروه سوم مربوط به داده‌های فنولوژیکی می‌باشد. مراحل فنولوژیکی مدل DSSAT شامل زمان دمایی تجمعی مرحله رشد رویشی و زمان دمای تجمعی از شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی است (Dias *et al*., 2016). هم‌چنین ضرایب ژنتیکی مدل GECROS شامل دو گروه می‌باشد. گروه اول مانند ارتفاع بوته، وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل، غلظت نیتروژن دانه و کل نیتروژن جذب‌شده در بوته در زمان رسیدگی می‌باشند که در انتهای دوره رشد برای هر یک از ارقام برنج ثبت می‌شوند و گروه دوم در ارتباط با داده‌های فنولوژیکی می‌باشد (Yin & Struik, 2017). برای محاسبه مقدار نیتروژن دانه و بوته در زمان رسیدگی ابتدا تعداد پنج بوته در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد آون قرار گرفته و سپس به آزمایشگاه منتقل و بعد از تفکیک بوته و دانه، عمل هضم جهت تعیین نیتروژن با روش هضم در بالن ژوژه با سولفوریک‌اسید، سلنیم، سالیسیلیک‌اسید و آب اکسیژنه و با استفاده از

دستگاه کجلدال (مدل VIP45S ساخت آلمان) صورت گرفت. مراحل فنولوژیکی مدل GECROS شامل زمان دمایی تجمعی پیش از گل‌دهی و زمان دمایی تجمعی بعد از گل‌دهی است. بر این اساس محاسبه مراحل فنولوژیکی هر یک از این مدل‌ها از مفهوم زمان حرارتی یا درجه روز رشد (GDD)، با استفاده از بیشینه و کمینه دمای روزانه، دمای پایه گیاه زراعی و هم‌چنین درجه حرارت مؤثر روزانه انجام شد (Challinor *et al*., 2004):

$$GDD = \sum_{i=1}^{n}(T_{mean} - T_b)$$ رابطه ۱)

که در آن، T_{mean}: میانگین دمای روزانه، T_b: دمای پایه (دمایی که در کم‌تر از آن نمو متوقف می‌شود) و GDD: درجه روز رشد روزانه می‌باشد. تجزیه و تحلیل آماری این طرح با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و مقایسه میانگین براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. ضرایب ژنتیکی مدل APSIM-ORYZA

مدل APSIM-ORYZA دارای شش ضریب ژنتیکی است که از طریق آن‌ها می‌توان رشدونمو مختص هر رقم را شبیه‌سازی کرد (جدول ۲). این ضرایب را می‌توان در چند گروه طبقه‌بندی کرد. برخی از آن‌ها نمو فنولوژیک در گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (مانند سرعت نمو در مرحله رشد رویشی) و تعدادی نیز بر شبیه‌سازی فرایند گل‌دهی تأثیر دارند. برخی از این ضرایب را می‌توان به‌صورت مستقیم (از طریق انجام آزمایش) و برخی دیگر را به‌صورت غیر مستقیم (از طریق برآورد آن‌ها با کمک مدل) محاسبه کرد. در پژوهش حاضر تنها ضرایبی که امکان اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها وجود داشت محاسبه شد.

به‌طورکلی نتایج مقایسه میانگین نشان داد که ارقام زودرس نسبت به ارقام دیررس دارای سرعت نمو بالاتری در مرحله رویشی می‌باشند (جدول ۳). به‌طوری‌که بالاترین سرعت نمو در مراحل رشد رویشی، حساس به طول روز و تشکیل خوشه در ارقام آنام و SA1 و کم‌ترین نیز در رقم گوهر مشاهده شد (جدول ۳). هم‌چنین نتایج نشان داد که ارقام SA6 و M7 از نظر سرعت نمو در مراحل رویشی، حساس به طول روز و پرشدن دانه شباهت بالایی دارند (جدول ۳).

جدول ۲. ضرایب ژنتیکی مدل APSIM-ORYZA و دامنه آن‌ها برای ارقام برنج (Bouman *et al*., 2001)

ضرایب ژنتیکی	دامنه	واحد
سرعت نمو در مرحله رشد رویشی	۰/۰۰۰۶-۰/۰۰۱۲	درجه روز
سرعت نمو در مرحله حساس به طول روز	۰/۰۰۰۵۷-۰/۰۰۱۲	درجه روز
سرعت نمو در مرحله تشکیل خوشه	۰/۰۰۰۶۱-۰/۰۰۱۶	درجه روز
سرعت نمو در مرحله پرشدن دانه	۰/۰۰۰۱۲-۰/۰۰۲۲	درجه روز
حداکثر نور مطلوب	۱۱/۵	ساعت
ضریب حساسیت به طول روز	۰	ساعت

جدول ۳. مقایسه میانگین ارقام برنج برای ضرایب ژنتیکی مدل APSIM-ORYZA

رقم	سرعت نمو در مرحله رشد رویشی (^{0}C day^{-1})	سرعت نمو در مرحله حساس به طول روز (^{0}C day^{-1})	سرعت نمو در مرحله تشکیل خوشه (^{0}C day^{-1})	سرعت نمو در مرحله پرشدن دانه (^{0}C day^{-1})
رش	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۰۷۱	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۰۱۴
آنام	۰/۰۰۰۹۷	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۱۸
گوهر	۰/۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۲
SA1	۰/۰۰۰۹۵	۰/۰۰۰۹۱	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۰۱۷
SA6	۰/۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۸۱	۰/۰۰۱۶
M7	۰/۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۷۹	۰/۰۰۱۶
$LSD_{0.05}$	۰/۰۰۰۰۰۰۵۵	۰/۰۰۰۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰۰۰۴۶	۰/۰۰۰۴

به‌نظر می‌رسد تفاوت ارقام از لحاظ سرعت نمو در مراحل رویشی، حساس به طول روز و تشکیل خوشه به ویژگی‌های ذاتی رقم بستگی دارد. تفاوت ارقام در سرعت نمو در محیط‌های مختلف ثابت بود و شواهد بسیاری از گیاهان زراعی مؤید این است که سرعت نمو تحت کنترل ژنتیک گیاه است (Nezamzadeh *et al*., 2010). بررسی دوره‌های اقلیمی متفاوت از جمله سرد و کوهستانی، معتدل و خشک طی سال‌های مختلف نشان داده که سرعت‌های نمو در مراحل مختلف رشد تغییری پیدا نکرد و علت آن را به ویژگی‌های ژنتیکی گیاه نسبت دادند. به‌نظر می‌رسد ویژگی‌های ذاتی گیاهان احتمالاً یک پدیده عمومی در کلیه گونه‌های زراعی می‌باشد (Tan *et al*., 2016).

نتایج مقایسه میانگین نشان داد بالاترین سرعت پرشدن دانه به‌ترتیب در ارقام گوهر، آنام و SA1 مشاهده شد که در یک گروه آماری قرار گرفتند. کم‌ترین سرعت نمو در مرحله پرشدن نیز در این مدل در رقم رش مشاهده شد (جدول ۳). بالابودن سرعت نمو در مرحله پرشدن دانه را می‌توان با فراهمی مواد جذبی و سایر مواد خام از گیاه مادری مرتبط دانست که می‌توانند سرعت رشد دانه را تنظیم کنند و یا به‌عبارت دیگر سرعت رشد دانه یک سازوکار مرتبط با بذر است. سرعت نمو پرشدن دانه به تغییرات فراهمی مواد جذبی در هر بذر واکنش نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود مقدار ضرایب سرعت نمو در مراحل رویشی، حساس به طول روز، تشکیل خوشه و پرشدن دانه در ارقام مختلف (جدول ۳)، در بین دامنه معرفی‌شده این ضریب در مدل APSIM-ORYZA است که این تأییدی بر خاص‌بودن این ضریب برای هر رقم می‌باشد. سرعت نمو بالاتر در ارقام زودرس (آنام و SA1) توسط سایر پژوهش‌گران نیز گزارش شده است. در همین راستا Amiri Larijani *et al*. (2011) طی پژوهشی اظهار داشتند که سرعت نمو در مرحله رویشی و مرحله پرشدن در ارقام زودرس و بومی مانند قائم و طارم از رقم دیررس فجر بالاتر بود. در آزمایش دیگری، گزارش شده است که ارقام زودرس برنج نسبت به ارقام دیررس دارای سرعت نمو بیش‌تری در مرحله رشد رویشی بودند (Khanal, 2005). با بررسی ارقام زودرس (Bg300 و Bg357) و دیررس (Bg358 و Bg379-2) برنج گزارش شد که سرعت نمو در مرحله رشد رویشی در ارقام زودرس و سرعت نمو در مرحله پرشدن دانه در ارقام دیررس بالاتر بود (Nissanka *et al*., 2015). بررسی‌ها در آزمایشی بر روی دو رقم زودرس (Bg300) و میان‌رس (Bg359) نشان داد که سرعت نمو در مراحل رشد رویشی و حساس به طول روز در رقم زودرس و سرعت نمو در مراحل تشکیل خوشه و پرشدن دانه در رقم میان‌رس بالاتر بود (Amarasingha *et al*., 2015).

۳. ۲. ضرایب ژنتیکی مدل AquaCrop

مدل AquaCrop دارای هشت ضریب ژنتیکی برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد ارقام برنج است (جدول ۴). نتایج جدول مقایسه میانگین نشان که کم‌ترین و بیش‌ترین زمان لازم جهت شروع سبزشدن با سه و شش روز به‌ترتیب در ارقام آنام و گوهر مشاهده شد. هم‌چنین بین سایر ارقام مورد پژوهش از نظر مدت زمان لازم جهت شروع سبزشدن تفاوت وجود نداشت (جدول ۵).

جدول ۴. ضرایب ژنتیکی مدل AquaCrop و دامنه آن‌ها برای ارقام برنج (Seyed Raoufi *et al*., 2017)

ضرایب ژنتیکی	دامنه	واحد
شروع سبز شدن	۳–۶	روز
حداکثر کانوپی	۴۶–۶۱	روز
حداکثر گل‌دهی	۵۰–۷۳	روز
رسیدگی فیزیولوژیکی	۶۹–۱۰۴	روز
طول دوره گل‌دهی	۱۰–۱۹	روز
حداکثر عمق نفوذ ریشه	۰/۳–۰/۵	متر
شاخص برداشت	۳۹–۵۳	درصد

جدول ۵. مقایسه میانگین ارقام برنج برای ضرایب ژنتیکی مدل AquaCrop

رقم	شروع سبزشدن (d)	حداکثر کانوپی (d)	حداکثر گل‌دهی (d)	رسیدگی فیزیولوژیکی (d)	طول دوره گل‌دهی (d)	حداکثر عمق نفوذ ریشه (m)	شاخص برداشت (%)
رش	۵	۶۱	۷۰	۹۹	۱۹	۰/۳۶	۴۹/۱
آنام	۳	۴۹	۵۴	۸۶	۱۵	۰/۳	۴۲/۳
گوهر	۶	۶۱	۷۱	۱۰۳	۲۰	۰/۳۸	۵۰/۹
SA1	۴	۵۲	۵۶	۸۹	۱۴	۰/۳۲	۴۴/۴
SA6	۴	۵۲	۵۹	۹۲	۱۳	۰/۳	۴۵/۸
M7	۴	۵۶	۶۳	۹۹	۱۴	۰/۳۲	۴۵/۲
$LSD_{0.05}$	۲/۷	۷	۴	۱۱	۶	۰/۰۷	۴/۸

دامنه مدت زمان لازم جهت شروع سبزشدن در مدل AquaCrop بین سه تا شش روز می‌باشد که با توجه به رقم تفاوت داشته (Seyed Raoufi *et al*., 2017) که مقدار به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر در این دامنه متغیر است. بنابراین چنین استنباط می‌شود که ارقام زودرس نسبت به رقم دیررس دارای پتانسیل ژنتیکی و کیفیت فیزیولوژیکی بالایی هستند. شاید علت این اختلاف بین ارقام را می‌توان با کیفیت فیزیولوژیکی بذر توجیه کرد. به‌طوری‌که برخی ارقام دارای ذخیره مناسب غذایی جهت در اختیار قراردادن به جنین می‌باشند که به‌واسطه نقش آن سبب تسریع و بهبود سبزشدن می‌شود. در همین راستا Nawaz *et al*. (2016) طی آزمایشی مدت زمان لازم جهت شروع جوانه‌زنی برنج را پنج تا هفت روز عنوان کردند. Rehman *et al*. (2015) نیز طی پژوهشی نشان دادند مدت زمان لازم جهت شروع سبزشدن برنج را پنج روز بعد از بذرپاشی است.

نتایج جدول مقایسه میانگین نشان داد که کم‌ترین زمان لازم جهت دست‌یابی به حداکثر کانوپی با ۴۹ روز در رقم آنام به‌دست آمد که نسبت به ارقام دیررس گوهر و رش حدود ۱۵–۱ روز سریع‌تر به حداکثر کانوپی رسیدند (جدول ۵). هم‌چنین منابع مختلف تغییرات مقدار ضریب روز تا حداکثر کانوپی را ۶۱–۴۶ روز را معرفی کردند که با نتایج حاصل از این پژوهش نیز مطابقت دارد (Mazniruzzaman *et al*., 2015; Seyed Raoufi *et al*., 2017). نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بیش‌ترین مدت زمان لازم جهت دست‌یابی به حداکثر گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیکی با ۷۱ و ۱۰۳ روز در رقم گوهر و کم‌ترین زمان نیز با ۵۴ و ۸۶ روز در رقم آنام به‌دست آمد (جدول ۵). بنابراین چنین استنباط می‌شود که ارقام زودرس نسبت به ارقام گوهر و رش دارای ویژگی ذاتی و کیفیت فیزیولوژیکی بالایی می‌باشد. مهم‌ترین دلیل این امر را باید در بهره‌برداری ارقام زودرس از نهاده‌های در دسترس و در عین حال تولید مواد فتوسنتزی بیش‌تر و به‌دنبال آن توسعه بیش‌تر برگ‌ها و گسترش سریع‌تر کانوپی نسبت داد. هم‌چنین می‌توان ادعا کرد ارقام زودرس از طریق بهبود ویژگی‌های گیاهچه‌ای و به‌دنبال آن استفاده کارآمدتر اندام‌های مورفولوژیکی از منابع، موجب کاهش مدت زمان لازم جهت دست‌یابی به حداکثر کانوپی و گل‌دهی و هم‌چنین رسیدگی فیزیولوژیکی شده‌اند. سایر پژوهش‌گران نیز مقدار ضرایب روز تا حداکثر گل‌دهی را ۷۳–۵۰ روز و مدت زمان لازم جهت دست‌یابی به رسیدگی فیزیولوژیکی را ۱۰۴–۶۹ روز در مدل AquaCrop برای ارقام مختلف گزارش کردند که با توجه به نتایج، یافته‌های این پژوهش منطقی به‌نظر می‌رسد (Mazniruzzaman *et al*., 2015; Seyed Raoufi *et al*., 2017). به‌نظر می‌رسد علت دست‌یابی به حداکثر کانوپی، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک در ارقام زودرس برنج به‌دلیل تحریک رشد اولیه گیاهچه و سبزشدن سریع‌تر است. به‌طوری‌که ارقام زودرس از طریق تأمین عناصر غذایی ضروری مورد نیاز برای رشد در اوایل فصل رشد می‌تواند موجب سبزشدن

سریع گیاهچه و ورود زودتر آن‌ها به مرحله خودپروردگی[1] و در نهایت دست‌یابی سریع‌تر به سطح سبز مطلوب شود که در این حالت با افزایش توانایی جذب منابع موجب ورود سریع‌تر به مراحل مختلف رشدی می‌شوند.

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش نشان داد که ارقام دیررس رش و گوهر به‌ترتیب با ۱۹ و ۲۰ روز دارای بیش‌ترین طول دوره گل‌دهی بود. هم‌چنین کم‌ترین طول دوره گل‌دهی بین ارقام مورد بررسی با ۱۳ روز مربوط به رقم SA6 می‌باشد (جدول ۵). نتایج بررسی ارقام نشان داد که حداکثر عمق نفوذ ریشه در ارقام گوهر و رش به‌ترتیب با ۰/۳۸ و ۰/۳۶ متر مشاهده شد و کم‌ترین نیز با ۰/۳ متر در ارقام آنام و SA6 به‌دست آمد (جدول ۵). از نتایج این پژوهش این‌گونه استنباط می‌شود که ارقام دیررس، به‌علت طولانی‌بودن دوره رشد توانایی دریافت دما و تابش بیش‌تری دارد و همین علت سبب افزایش عملکرد دانه و به‌دنبال آن افزایش شاخص برداشت می‌شود. به‌طوری‌که نتایج به‌دست‌آمده در این آزمایش نشان داد که بالاترین شاخص برداشت در ارقام موردبررسی با ۵۰/۹۱ و ۴۹/۱۳ درصد به‌ترتیب در ارقام گوهر و رش به‌دست آمد (جدول ۵). به‌نظر می‌رسد ارقام گوهر و رش نسبت به سایر ارقام، به‌علت محدودیت مخزن، زیست‌توده بالایی تولید نکرد و توانایی آن‌ها در اختصاص مواد فتوسنتزی به دانه‌ها بیش‌تر بود. Nadimi Dafrazi *et al.* (2018) طی آزمایشی با بررسی سه رقم برنج (هاشمی، گوهر و خزر) بیان داشتند که بالاترین شاخص برداشت مربوط به رقم گوهر می‌باشد. آن‌ها دلیل برتری این رقم را به توزیع بیش‌تر مواد فتوسنتزی به مخازن یا به‌عبارتی دیگر تخصیص بخش زیادی از ماده خشک به عملکرد اقتصادی دانه نسبت دادند.

۳. ۳. ضرایب ژنتیکی مدل DSSAT

مدل DSSAT دارای هشت ضریب ژنتیکی است. همان‌طور که در جدول (۶) ملاحظه می‌شود ضرایب به‌کاررفته در این مدل، کاملاً متفاوت از دو مدل دیگر است.

جدول ۶. ضرایب ژنتیکی مدل DSSAT و دامنه آن‌ها برای ارقام برنج (Swian & Yadav, 2009)

ضرایب ژنتیکی	دامنه	واحد
زمان دمایی مرحله رویشی	۳۹۰–۷۴۰	درجه روز رشد
بلندترین طول روز که بیش‌تر از آن رشد گیاه کم می‌شود	۸–۱۱/۷	ساعت
ضریب حساسیت به فتوپریود	۹۵–۳۵۰	درجه روز رشد
زمان دمایی تجمعی از شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی	۳۰۰–۴۰۳	درجه روز رشد
تعداد خوشه بالقوه در هر گرم از وزن ساقه اصلی	۵۸–۶۵	–
وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل	۰/۰۲۳–۰/۰۳	گرم
ضریب پنجه‌زنی	۱	–
ضریب تحمل به دما	۱	–

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که ارقام برنج از نظر درجه روز رشد مرحله رشد رویشی دارای تفاوت می‌باشند. به‌طوری‌که ارقام دیررس گوهر و رش به‌ترتیب با ۶۴۱ و ۶۲۷ درجه روز رشد بیش‌ترین مقدار درجه روز رشد مرحله رشد رویشی بودند و هم‌چنین کم‌ترین مقدار درجه روز رشد با ۴۲۲ درجه روز رشد مربوط به رقم آنام بود (جدول ۷). دامنه این ضریب در مدل DSSAT بین ۳۹۰–۷۴۰ درجه روز رشد می‌باشد که با توجه نوع رقم فرق می‌کند (Swian & Yadav, 2009; Dias *et al*., 2016).

1. Autotroph

جدول ۷. مقایسه میانگین ارقام برنج برای ضرایب ژنتیکی مدل DSSAT

رقم	زمان دمایی مرحله رویشی (GDD)	زمان دمایی تجمعی از شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی (GDD)	تعداد خوشه بالقوه در هر گرم از وزن ساقه اصلی	وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل (g)
رش	۶۲۷	۳۰۵	۵۷	۰/۰۲۸
آنام	۴۲۲	۳۹۶	۵۰	۰/۰۲۴
گوهر	۶۴۱	۳۰۰	۵۸	۰/۰۳
SA1	۴۹۳	۳۷۴	۵۵	۰/۰۲۲
SA6	۵۳۷	۳۹۴	۵۲	۰/۰۲۴
M7	۵۶۷	۴۰۱	۵۳	۰/۰۳
$LSD_{0.05}$	۱۳	۱۴	۷	۰/۰۰۴۷

Hasan & Rehman (2019) در آزمایش شبیه‌سازی تغییرات اقلیم بر عملکرد برنج با استفاده از مدل شبیه‌سازی DSSAT در شرایط آب‌وهوایی گرم و مرطوب بنگلادش، مقدار درجه روز رشد مرحله رشد رویشی را ۶۴۷ درجه روز رشد محاسبه کردند که با توجه به مقدار به‌دست‌آمده در این پژوهش قابل‌قبول می‌باشد. در پژوهشی نشان داده شد که ضریب درجه روز رشد مرحله رشد رویشی در ارقام دیررس برنج بالاتر است، به‌طوری‌که مقدار این ضریب در ارقام Lalat (زودرس)، IR36 (میان‌رس) و Swarna (دیررس) به‌ترتیب ۴۰۰، ۵۶۰ و ۷۴۰ درجه روز رشد بود (Swain & Yadav, 2009). در همین راستا طی آزمایشی نشان داده شد که مقدار این ضریب ۵۰۰–۳۰۰ درجه روز رشد است (Anurag & Shruti, 2019). ضریب درجه روز رشد در مدل DSSAT از ضرایب بسیار مهم برای نشان‌دادن شروع پرشدن دانه است. در واقع این ضریب نشان‌دهنده تقاضا برای مواد پرورده توسط دانه‌ها می‌باشد (Rahimi Moghadam *et al*., 2015).

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بیش‌ترین درجه روز رشد از شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی با ۴۰۱، ۳۹۴ و ۳۹۶ درجه روز رشد به‌ترتیب مربوط به ارقام M7، SA6 و آنام و کم‌ترین درجه روز رشد با ۳۰۰ و ۳۰۵ به‌ترتیب مربوط به ارقام گوهر و رش بود (جدول ۶). Dias *et al*. (2016) طی پژوهشی نشان داد که درجه روز رشد شروع پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی در دو رقم برنج At362 و Bg357 به‌ترتیب ۳۰۵ و ۳۵۰ درجه روز می‌باشد. آن‌ها هم‌چنین بالابودن این ضریب در رقم Bg357 را به طولانی‌بودن حد فاصل پرشدن دانه تا رسیدگی فیزیولوژیکی نسبت دادند.

نتایج این پژوهش نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین تعداد خوشه بالقوه در هر گرم از وزن ساقه اصلی با ۵۸ و ۵۰ به‌ترتیب مربوط به ارقام گوهر و آنام بود (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد رقم گوهر از طریق افزایش توان فتوسنتزی گیاه و تأمین مواد فتوسنتزی به‌دلیل افزایش شاخص سطح برگ و نیز باروری بیش‌تر گل‌آذین (مشاهدات عینی)، باعث افزایش تعداد خوشه می‌شود. Mohammadi *et al*. (2015) در آزمایش خود در رابطه با ارزیابی مدل شبیه‌سازی DSSAT با استفاده از پارامترهای واسنجی‌شده برنج در رشت، ضریب ژنتیکی تعداد خوشه بالقوه در هر گرم از وزن ساقه اصلی در رقم هاشمی را ۵۰ گزارش نمودند. Rahman *et al*. (2018) نیز با بررسی مدل شبیه‌سازی DSSAT در بنگلادش تعداد خوشه بالقوه در هر گرم از وزن ساقه اصلی را ۵۵ گزارش کردند.

مدل DSSAT عملکرد دانه را از حاصلضرب تعداد دانه در مترمربع در وزن تک‌دانه شبیه‌سازی می‌کند. بیش‌ترین وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل با ۰/۰۳–۰/۰۲۸ گرم در ارقام گوهر، M7 و رش مشاهده شد (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد علت افزایش وزن هزاردانه در این ارقام را می‌توان به انطباق دمای مناسب هوا در زمان رشد رویشی، طول دوره رشد مناسب، افزایش سطح برگ و افزایش میزان انتقال مجدد مواد فتوسنتزی به دانه‌ها نسبت داد (Nadimi Dafrazi *et al*., 2018). به‌طورکلی وزن هزاردانه در برنج به میزان انجام فتوسنتز توسط منبع، ظرفیت انتقال مواد فتوسنتزی دانه، طول دوره رشدونمو دانه، شرایط آب‌وهوایی موجود و مواد غذایی کافی در طول دوره پرشدن دانه (رطوبت، مواد معدنی قابل

دسترس، تابش خورشید، درجه حرارت)، شیوع بیماری‌ها و آفات به‌ویژه در برگ و خوشه بستگی دارد (Pirdashti *et al*., 2003). هم‌چنین کم‌ترین وزن تک‌دانه نیز با ۰/۰۲۲ گرم در رقم SA1 مشاهده شد (جدول ۶). دامنه ضریب وزن تک‌دانه در مدل DSSAT بین ارقام با دامنه منابع مختلف مطابقت دارد (Swian & Yadav, 2009; Dias *et al*., 2016). Singh *et al*. (2018) وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل در مدل DSSAT برای سه رقم برنج (Sarjoo52، NDR359 و Sawarna Sub1) در دامنه ۰/۰۲۵–۰/۰۱۸ گرم محاسبه نمودند. هم‌چنین Rodrigues-Gonzalez *et al*. (2020) طی آزمایشی میانگین وزن تک‌دانه را در شرایط بدون محدودیت، ۰/۰۲۵ گرم گزارش کرد.

۳. ۴. ضرایب ژنتیکی مدل GECROS

مدل GECROS دارای شش ضریب ژنتیکی برای شبیه‌سازی رشد، نمو و عملکرد ارقام برنج است (جدول ۸). مقایسه بین ضرایب ژنتیکی دو مدل DSSAT و GECROS نشان می‌دهد که در بین ضرایب ژنتیکی، وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل بین این دو مدل مشترک می‌باشند. بنابراین بررسی‌ها مؤید آن است که سازوکارهای فیزیولوژیک به‌کاررفته در مدل مکانیزم‌گرای GECROS برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه برنج تا حدود زیادی متفاوت است. در ادامه نتایج مرتبط با ضرایب ژنتیکی مدل GECROS ارائه شده است و از توضیح راجع به ضریب مشترک بین این دو مدل اجتناب شده است. مدل GECROS دارای سه نوع ضریب فنولوژیکی (دمای تجمعی پیش و بعد از گل‌دهی)، مورفولوژیکی (ارتفاع بوته) و فیزیولوژیکی (غلظت نیتروژن دانه و بوته) می‌باشد.

جدول ۸. ضرایب ژنتیکی مدل GECROS و دامنه آن‌ها برای ارقام برنج (Yin & Struik, 2017)

ضرایب ژنتیکی	دامنه	واحد
دمای تجمعی پیش از گل‌دهی	۱۳۰۰–۷۰۰	درجه روز رشد
دمای تجمعی بعد از گل‌دهی	۸۵۰–۴۰۰	درجه روز رشد
وزن تک‌دانه تحت شرایط ایده‌آل	۰/۰۲۵	گرم
ارتفاع بوته	۱۲۰	سانتی‌متر
غلظت نیتروژن دانه	۰/۰۵	گرم درگرم
کل نیتروژن جذب‌شده در بوته در زمان رسیدگی	۱۴/۵	گرم در مترمربع

مقایسه زمان دمایی تجمعی درجه روز رشد برای دوره رشد رویشی ارقام مختلف نشان داد بیش‌ترین مقدار درجه روز رشد پیش از گل‌دهی با ۱۲۰۸ و ۱۱۸۷ درجه روز رشد به‌ترتیب متعلق به ارقام گوهر و رش بود و کم‌ترین آن نیز با ۸۰۴ درجه روز رشد به‌ترتیب مربوط به رقم آنام بود (جدول ۹)، که این نتایج با یافته‌های Yin & Struik (2017) نیز مطابقت دارد. به‌نظر می‌رسد که تسریع مراحل رشدی از فاز رویشی به زایشی علت کم‌بودن زمان دمایی تجمعی در ارقام زودرس باشد. طی آزمایشی نیز مشاهده شد که حداکثر زمان دمایی تجمعی پیش از گل‌دهی در رقم طارم محلی حدود ۷۳۸ درجه روز رشد است (Esamailzadeh *et al*., 2017). در پژوهشی دو ساله نشان داده شد که میانگین دمای تجمعی پیش از گل‌دهی در رقم زودرس ۹۷۷ درجه روز رشد است (Erfani *et al*., 2020). هم‌چنین یافته‌های آزمایشی بر روی پنج رقم دیررس برنج نشان داد که حداکثر زمان دمایی پیش از گل‌دهی بین ۱۱۵۷–۱۰۶۷ درجه روز رشد است که با نتایج این پژوهش بر روی ارقام دیررس مطابقت دارد (Islam & Sikder, 2011).

مقایسه میانگین دمایی زمان دمایی تجمعی بعد از گل‌دهی حاکی از آن است که بیش‌ترین مقدار تجمعی درجه روز رشد متعلق به رقم SA1 با ۶۳۰ درجه روز رشد است و کم‌ترین نیز با ۵۵۴، ۵۴۸ و ۵۶۰ درجه روز رشد به‌ترتیب متعلق

به ارقام رش، گوهر و آنام بود (جدول ۹). در همین راستا نیز بیان شد که زمان دمای تجمعی بعد از گل‌دهی در شرایط اقلیمی هندوستان بین ۶۵۳–۶۳۳ درجه روز رشد است (Rani & Maragatham, 2013).

جدول ۹. مقایسه میانگین ارقام برنج برای ضرایب ژنتیکی مدل GECROS

رقم	زمان دمایی تجمعی پیش از گل‌دهی (GDD)	زمان دمایی تجمعی بعد از گل‌دهی (GDD)	ارتفاع بوته (cm)	غلظت نیتروژن دانه ($g\ g^{-1}$)	کل نیتروژن جذب‌شده در بوته در زمان رسیدگی ($g^{-1}\ m^{-2}$)
رش	۱۱۸۷	۵۵۴	۱۰۴	۰/۰۰۴۹	۱۱/۷
آنام	۸۰۴	۵۶۰	۱۰۵	۰/۰۰۳۱	۱۳/۲
گوهر	۱۲۰۸	۵۴۸	۱۰۲	۰/۰۰۵۶	۱۲/۸
SA1	۸۵۳	۶۳۰	۱۰۰	۰/۰۰۳۵	۱۲/۴
SA6	۹۱۹	۶۰۶	۱۰۳	۰/۰۰۴۳	۱۳/۲
M7	۱۰۱۳	۵۷۴	۱۵۰	۰/۰۰۴	۱۱/۴
$LSD_{0.05}$	۱۳۲	۱۱	۱۰	۰/۰۰۰۷	۲

ارتفاع بوته اگرچه از عوامل وابسته به ژنتیک محسوب می‌شود، اما از جمله صفات گیاهی است که نسبت به اجزای عملکرد راحت‌تر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد. نتایج مقایسه میانگین مربوط به ارتفاع بوته در بین ارقام مؤید این مسئله است که بیش‌ترین ارتفاع بوته مربوط به رقم M7 با ۱۵۰ سانتی‌متر است. هم‌چنین میانگین ارتفاع در سایر ارقام بین ۱۰۰ تا ۱۰۵ سانتی‌متر بود (جدول ۹). اختلاف ژنتیکی این ارقام می‌تواند علت تفاوت صفات مورفولوژیکی مذکور مانند ارتفاع بوته باشد. در پژوهشی به‌طور میانگین نشان داده شد که ارتفاع بوته در ارقام بومی و اصلاح‌شده برنج بین ۱۵۳–۱۰۵ سانتی‌متر می‌باشد (Mohammadi *et al*., 2015). طی پژوهشی ثابت شد اختلاف بین ارقام از نظر ارتفاع به وراثت‌پذیری بالا مرتبط است، به‌طوری‌که با بررسی ارتفاع پنج رقم برنج دریافتند ارتفاع رقم بومی هاشمی حدود ۱۳۲ سانتی‌متر و ارقام اصلاح‌شده درفک، لاین ۳۳۸، ندا و سپید رود را به‌ترتیب ۱۰۴، ۱۲۶، ۹۲ و ۱۰۰ سانتی‌متر است (Saeidzadeh *et al*., 2010). Bakhshipour *et al*. (2017) نیز با بررسی صفات مورفولوژیکی ۲۰ رقم برنج بیان داشتند که ارتفاع بوته گیاه بین ۱۳۹–۸۴ سانتی‌متر است، آن‌ها نیز علت اختلاف بین ارتفاع بوته را به ویژگی‌های ژنتیکی ارقام مرتبط دانسته‌اند.

مقایسه میانگین غلظت نیتروژن دانه در بین ارقام مورد مطالعه نشان داد که بالاترین مقدار این صفت مربوط در رقم گوهر با ۰/۰۰۵۶ گرم در گرم مشاهده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که کم‌ترین غلظت نیتروژن دانه در ارقام آنام و SA1 با ۰/۰۰۳۱ و ۰/۰۰۳۵ گرم در گرم به‌دست آمد (جدول ۹). بالابودن مقدار نیتروژن دانه در رقم گوهر را می‌توان به انتقال مجدد مواد فتوسنتزی نسبت داد. به‌نظر می‌رسد در این رقم ترکیبات آلی در طی انتقال از مرحله رویشی به زایشی، به مقدار بیش‌تری تولید شده است و بخشی از این ترکیبات ناشی از تجزیه پروتئینی در اندام‌های مسن می‌باشد که به‌صورت نیتروژن محلول به سمت بافت‌های جوان‌تر و در حال رشد و دانه‌ها انتقال می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تفاوت ژنتیکی در جذب نیتروژن دانه بین ارقام مختلف گیاهی وجود دارد (Ehdaie *et al*., 2006). به‌نظر می‌رسد این تفاوت‌ها به‌طور عمده ناشی از حجم و مورفولوژی ریشه، میزان عناصر معدنی مورد نیاز ناشی از سرعت رشد نسبی، جذب و انتقال یون‌ها و کارایی مصرف گیاه می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان که بین ارقام رش و SA6 از نظر غلظت نیتروژن دانه شباهت بسیار بالایی با یکدیگر دارند. نتایج مقایسه میانگین نشان داد بالاترین نیتروژن کل جذب‌شده در بوته در زمان رسیدگی مربوط به ارقام آنام و SA6 است (جدول ۹).

۴. نتیجه‌گیری

از نتایج این پژوهش می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ضرایب ژنتیکی در مدل‌های مختلف در بین ارقام برنج متفاوت است. نتایج نشان داد بیش‌ترین سرعت نمو در مراحل رشد رویشی، حساس به طول روز و تشکیل خوشه در ارقام آنام مشاهده شد. بیش‌ترین مدت زمان لازم جهت دست‌یابی به حداکثر گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیکی و هم‌چنین وزن تک‌دانه در رقم گوهر به‌دست آمد. به‌طورکلی از پارامترهای ژنتیکی به‌دست‌آمده در این پژوهش برای ارقام اصلاح‌شده برنج در کشور می‌توان در مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه زراعی و پیش‌بینی عملکرد برای مناطق مختلف توسط این مدل‌ها استفاده کرد. البته باید توجه داشت که تمامی این ضرایب موردمطالعه در این پژوهش یک عدد ثابت برای هر رقم بوده و به‌عنوان یک ورودی برای اجرای مدل استفاده می‌شوند. از این‌رو پیشنهاد می‌شود برای نتیجه‌گیری بهتر و محاسبه دقیق ضرایب ژنتیکی، این آزمایش در چندین سال و حتی‌الامکان در مناطق مختلف تحت کشت برنج نیز تکرار شود.

۵. تشکر و قدردانی

از مؤسسه تحقیقات برنج کشور به‌خاطر حمایت مالی این پژوهش، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع مورد استفاده

Aggarwal, P.K., & Mall, R.K. (2002). Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. II. Effect of uncertainties in sce- narios and crop models on impact assessment. *Climati Change, 52*, 331-343.

Amarasingha, R.P.R.K., Suriyagoda, L.D.B., Marambe, B., Gaydon, D.S., Galagedra, L.W., Punyaqardena, R., Silva, G.L.L.P., Nidumold, U., & Howden, M. (2015). Simulation of crop and water productivity for rice (*Oryza sativa* L.) using APSIM under diverse agro-climatic conditions and water management techniques in Sri Lanka. *Agricultural Water Management, 160*, 132-143.

Amiri Larijani, B. (2011). *Ecological and phenological simulation of rice cultivars with ORYZA2000 model related to growth, development and yield*. Ph.D. Thesis in Agronomy. Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Iran, 191p. (In Persian).

Anurag, S., & Shruti, S. (2019). Calibration and validation of DSSAT model (v. 4.7) for rice in Prayagraj. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *8*(4), 2916-2919.

Bakhshipour, S., Kambouzia, J., Khoshbakht, K., Mahdavi Damghani, A.M., & Hosseini Chaleshtori, M. (2017). Identification of effective morphological traits on rice cultivars yield under moisture stress condition using multivariate statistical methods. *Environmental Science, 15*(2), 163-180. (In Persian with English abstract).

Bouman, B.A.M., Kropff, M.J., Tuong, T.P., Wopereis, M.C.S., ten Berge, H.F.M., & Laar, H.H. (2001). ORYZA2000: *Modeling Lowland Rice. International Rice Research Institute, and Wageningen University and Research Centre, Los Baños, Philippines*, Wageningen, The Netherlands.

Challinor, A.J., Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., & Grimes, D.I.F. (2004). Design and optimization of a large-area process-based model for annual crops. *Agricultural and Forest Meteorology, 124*, 99-120.

Dias, M.P.N.M., Navaratne, C.M., Weerasinghe, K.D.N., & Hettiarachchi, R.H.A.N. (2016). Application of DSSAT crop simulation model to identify the changes of rice growth and yield in Nilwala river basin for midcenturies under changing climatic conditions. *Procedia Food Science, 6,* 159-163.

Ding, J., Hou, G.G., Dong, M., Xiong, S., Zhao, S., & Feng, H. (2018). Physicochemical properties of germinated dehulled rice flour and energy requirement in germination as affected by ultrasound treatment. *Ultrasonics Sonochemistry, 41,* 484-491.

Ehdaie, B., Alloush, G., & Waines, J.G. (2006). Genotypic variation for stem reserves and mobilization in wheat. *Crop Science, 46,* 735-746.

Erfani, R., Sattari, M., Mohaddesi, A., Tavasoli, F., Rahim Sourosh, H., Saeedi, M., Yousefi, M.M., Fathi, N., Abadian, H., & Abbasian, A. (2020). Determination of the proper transplanting datebased on GDD and the best plant density in promising line of rice 926 (Tisa). *Applied Research in Field Crops, 33*(1), 1-21. (In Persian with English abstract).

Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (FAOSTAT). (2019). *Food and Agriculture Organization of the United Nations Database; Food and Agriculture Organization (FAO),* Rome. Available online: http://www.fao.org.

Hasan, M.M., & Rahman, M. (2019). Simulating climate change impacts on T. aman (BR-22) rice yield: a predictive approach using DSSAT model. *Water and Environment Journal, 34,* 1-13.

Islam, M.R., & Sikder, S. (2011). Phenology and degree days of rice cultivars under organic culture. *Bangladesh Journal of Botnay, 40*(2), 149-153.

Khanal, R. R. (2005). *Phyllochron and leaf development in field grown rice genotypes under varying thermal environments of a high altitude cropping system*. MSc. Thesis. University of Zu Bonn. Germany.

Li, S., Fleisher, D., Timlin, D., Reddy, V.R., Wang, Z., & McClung, A. (2020). Evaluation of different crop models for simulations rice development and yield in the U.S. Mississippi delta. *Agronomy, 10,* 1-21.

Liu, J., Liu, Z., Zhu, A.X., Shen, F., Lei, Q., & Duan, Z. (2019). Global sensitivity analysis of the APSIM-Oryza rice growth model under different environmental conditions. *Science of The Total Environment, 651*(1), 953-968.

Mohammadi, H., Rabbani, F., & Mazaheri, D. (2015). Simulation of the effect of climate change on rice plant phenology under different irrigation managements in the Caspian region: Rasht station. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences, 15*(38), 187-206. (In Persian with English abstract).

Nadimi Dafrazi, M.H., Esfahani, M., & Aalami, A. (2018). Effect of transplanting time on grain yield, yield components and remobilization of three rice varieties in Roudbar region. *Cereal Research, 7*(4), 471-483. (In Persian with English abstract).

Nawaz, A., Farooq, M., Ahmad, R., Basra, S.M.A., & Lal, R. (2016). Seed priming improves stand establishment and productivity of no till wheat grown after direct seeded aerobic and transplanted flooded rice. *European Journal of Agronomy, 76,* 130-137.

Nezamzadeh, S.E., Pirdashti, H., & Babaeian Jelodar, N. (2010). Comparison of grain filling rate and duration among some old, modern and promising rice cultivars under different nitrogen levels. *Electronic Journal of Crop Production, 4*(3), 79-101. (In Persian with English abstract).

Nissanka, S.P., Karunaratne, A.S., Perera, R., Weerakoon, W.M.W., Thorburn, P.J., & Wallach, D. (2015). Calibration of the phenology sub-model of APSIM-Oryza: Going beyond goodness of fit. *Environmental Modelling & Software, 70,* 128-137.

Paoli, E., Welch, S.M., & Vanderlip, R.L. (2000). Comparing genetic coefficient estimation methods using the CERES-Maize model. *Agricultural Systems, 65,* 29-41.

Pirdashti, H., Tahmasebi Sarvestani, Z., & Nasiri, M. (2003). Study on dry matter and nitrogen remobilization in rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under different transplanting dates. *Iranian Journal of Crop Sciences, 5*, 46-55. (In Persian with English abstract).

Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A.M., & Khoshravesh, M. (2020). Evaluation of AquaCrop model for estimating rice yield under alternative irrigation. *International Water and Irrigation, 11*(1), 305-320. (In Persian with English abstract).

Rahimi Moghadam, S., Deihimfard, R., Soufizadeh, S., Kambouzia, J., Nazariyan Firuzabadi, F., & Eyni Nargeseh, H. (2015). Determination of genetic coefficients of some maize cultivars of Iran for application in crop simulation models. *Field Crop Research, 13*(2), 328-339. (In Persian with English abstract).

Rahman, A., Mojid, M.A., & Banu, S. (2018). Climate change impact assessment on three major crops in the north-central region of Bangladesh using DSSAT. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11*(4), 135-143.

Rani, B.A., & Maragatham, N. (2013). Effect of elevated temperature on rice phenology and yield. *Indian Journal of Science and Technology, 6*(8), 5095-5097.

Rehman, H.U., Kamran, M., Basra, S.M.B., Afzal, I., & Farooq, M. (2015). Influence of seed priming on performance and water productivity of direct seeded rice in alternating wetting and drying. *Rice Science, 22*(4), 189-196.

Saeidzadeh, F., Taghizadeh, R., & Molazem, D. (2010). Effect of plant density on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.) in climatic of the west part of Guilan province,Iran. *Agroecology Journal, 6*(1), 37-46. (In Persian with English abstract).

Seyed Raoufi, R., Soufizadeh, S., Amiri Lariani, B., AghaAlikhani, M., & Kamouzia, J. (2017). Simulation of growth and yield of various irrigatedrice (*Oryza sativa* L.) genotypes by AquaCrop under different seedling ages. *Natural Resource Modeling, 31*(4), 1-23.

Singh, P.K., Singh, K.K., Bhan, S.C., Baxla, A.K., Singh, S., Rathore, L.S., & Gupta, A. (2017). Impact of projected climate change on rice yield using CERSR-rice model in different agroclimatic zones of India. *Current Science, 112*(1), 108-115.

Singh, S.P., Mishra, S.R., Jena, A.K., Deuri, R., & Sharma, P. (2018). Evaluation of DSSAT model of rice genotypes under different weather conditions. *The Pharma Innovation Journal, 7*(10), 516-518.

Swain, D.K., & Yadav, A. (2009). Simulating the impact of climate change on rice yield using CERES-Rice model. *Journal of Environmental Informatics, 13*(2), 104-110.

Tan, J., Cui, Y., & Luo, Y. (2016). Global sensitivity analysis of outputs over rice-growth process in ORYZA model. *Environmental Modelling & Software, 83*, 36-46.

Van oort, P. A. J., Zhang, T. Y., De Vries, M. E., Heinemann, A. B., & Meinke, H. (2011). Correlation between temperature and phenology prediction error in rice (*Oryza sativa* L.). *Agricultural and Forest Meteorology, 151*, 1545–1555.

Wallach, D., Buis, S., Lecharpentier, P., Bourges, J., Clastre, P., Launay, M., Bergez, J.E., Guerif, M., Soudias, J., & Justes, E. (2011). A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modelling and Software, 26*, 386-394.

Yin, X., & Struik, P.C. (2017). Can increased leaf photosynthesis be converted into higher crop mass production? A simulation study for rice using the crop model GECROS. *Journal of Experimental Botany, 68*(9), 2345-2360.

Zand, E., Jalal-Kamali, M.R., & Nazari, Sh. (2014). Some frontiers of knowledge in crop sciences and their impacts on food security. *First International & 13 Iranian Crop Science Congres*s, Karaj, Iran, 26-28 Aug. (In Persian).