



University of Guilan
Faculty of Agricultural Sciences

Cereal Research

Vol. 14, No. 4, Winter 2025 (379-395)

doi: 10.22124/CR.2025.28834.1842

pISSN: 2252-0163 eISSN: 2538-6115



RESEARCH PAPER

OPEN ACCESS

Parameterization and evaluation of SSM-iCrop model for predicting growth and development, grain yield, accumulation and concentration of nitrogen in wheat

Arezo Abidi^{1*}, Afshin Soltani^{2*} and Ebrahim Zeinali³

1. Ph. D. Student, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran (* Corresponding author: arezoabidi@gmail.com)
2. Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran (* Corresponding author: afshin.soltani@gmail.com)
3. Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

Comprehensive abstract

Introduction

Wheat is one of the most important crops in Iran, with national food security heavily dependent on products derived from wheat grain flour. To comprehensively study growth, development, and nitrogen dynamics in crops, extensive field experiments across diverse climatic regions and time periods are required; however, conducting such experiments is challenging, time-intensive, and costly. Crop simulation models offer a way to reduce the time and expenses associated with field experiments. This study aims to parameterize and evaluate the SSM-iCrop model for predicting key phenological stages, leaf area, biological and grain yield and nitrogen dynamics in wheat in Iran. To date, this model has not been parameterized or evaluated for simulating nitrogen accumulation and concentration in wheat in Iran.

Materials and methods

In this study, the SSM-iCrop simulation model was employed to parameterize and evaluate to predict various phenological stages, node number, leaf area, biological and grain yield, nitrogen accumulation in above-ground biomass and grain, and grain nitrogen concentration in wheat across different regions in Iran by using data collected from the results of studies conducted in different years and regions by other researchers. To evaluate the ability of the model in predicting the aforementioned traits, statistical indicators including root mean square error (RMSE), correlation coefficient (r) and coefficient of variation (CV) were calculated between observed and simulated values. Additionally, 1:1 lines with $\pm 20\%$ difference were drawn to show the deviation of the simulated data against the observed data.

Research findings

The findings indicated that the SSM-iCrop model accurately predicted various phenological stages, including the number of days to emergence, tillering, stem elongation, heading, and physiological maturity ($r = 0.99$, $CV = 7.8\%$). The model also performed well in predicting the number of nodes on the main stem ($r = 0.88$, $CV = 11.3\%$), maximum leaf area index at anthesis ($r = 0.88$, $CV = 17.8\%$), biological yield ($r = 0.79$, $CV = 11.3\%$), grain yield ($r = 0.84$, $CV = 12.6\%$), nitrogen accumulation in the above-ground biomass ($r = 0.84$, $CV = 12.7\%$), grain nitrogen accumulation ($r = 0.8$, $CV = 16.4\%$), and grain nitrogen concentration ($r = 0.66$, $CV = 11.3\%$).



Conclusion

Given the high predictive accuracy of the SSM-iCrop model, it can be used for a range of purposes, including improving crop management, analysing growth and yield, estimating potential yield, assessing yield gaps, and examining the impacts of climate change on wheat.

Keywords: Leaf area, yield, phenology, dry matter, modeling

Received: October 29, 2024

Accepted: December 30, 2024

Cite this article:

Abidi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2025). Parameterization and evaluation of SSM-iCrop model for predicting growth and development, grain yield, accumulation and concentration of nitrogen in wheat. *Cereal Research*, 14(4), 379-395. doi: [10.22124/CR.2025.28834.1842](https://doi.org/10.22124/CR.2025.28834.1842).



پارامتریایی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد و نمو، عملکرد دانه، تجمع و غلظت نیتروژن در گندم

آرزو عبیدی^{۱*}، افشین سلطانی^{۲*} و ابراهیم زینلی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران (* نویسنده

مسئول: arezoabidi@gmail.com)

۲- استاد، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران (* نویسنده مسئول: afshin.soltani@gmail.com)

۳- دانشیار، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

چکیده جامع

مقدمه: گندم یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی در ایران است، به‌طوری که امنیت غذایی در این کشور تا حد زیادی به فرآورده‌های حاصل از آرد دانه گندم وابسته است. به‌منظور بررسی رشد و نمو و پویایی نیتروژن در گیاهان زراعی، انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای زیادی در طیف وسیعی از زمان‌ها و مناطق اقلیمی ضروری است. اجرای چنین آزمایش‌هایی، سخت، زمان‌بر و پرهزینه است، اما با کمک مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی می‌توان در زمان و هزینه‌های ناشی از آزمایش‌های مزرعه‌ای صرفه‌جویی کرد. مطالعه حاضر با هدف پارامتریایی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی نمو، سطح برگ، عملکرد زیستی، عملکرد دانه و پویایی نیتروژن در گندم در ایران انجام شد. پارامتریایی و ارزیابی این مدل در شبیه‌سازی تجمع و غلظت نیتروژن برای گندم در ایران تا کنون انجام نشده است.

مواد و روش‌ها: پارامتریایی و ارزیابی مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop برای پیش‌بینی مراحل مختلف فنولوژی، تعداد گره، سطح برگ، عملکرد زیستی و دانه، تجمع نیتروژن در بخش هوایی و دانه، و غلظت نیتروژن دانه در گیاه گندم در مناطق مختلف ایران با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از نتایج مطالعات انجام شده توسط سایر پژوهش‌گران در سال‌ها و مناطق مختلف انجام شد. برای ارزیابی توانایی مدل در پیش‌بینی صفات یاد شده، آماره‌های مختلف شامل مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و ضریب تغییرات (CV) بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده محاسبه شدند. همچنین، خطوط ۱:۱ با اختلاف $\pm 20\%$ درصد برای نشان دادن میزان انحراف داده‌های شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های مشاهده شده رسم شدند.

یافته‌های تحقیق: نتایج به‌دست آمده از این مطالعه نشان داد که مدل SSM-iCrop با دقت بسیار بالایی می‌تواند زمان وقوع مراحل مختلف نمو گندم، شامل تعداد روز تا سبز شدن، پنجه‌زنی، ساقه‌رفتن، سنبله‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیک را پیش‌بینی کند ($r = 0.99$ و $CV = 7.8\%$). مدل به‌خوبی توانست تعداد گره در ساقه اصلی ($r = 0.88$ و $CV = 11.3\%$)، حداکثر شاخص سطح برگ در گرده‌افشانی ($r = 0.88$ و $CV = 17.8\%$)، عملکرد زیستی ($r = 0.79$ و $CV = 11.3\%$)، عملکرد دانه

($r = 0.84$ و $CV = 12.6\%$)، تجمع نیتروژن بخش هوایی ($r = 0.84$ و $CV = 12.7\%$)، تجمع نیتروژن دانه ($r = 0.80$ و $CV = 16.4\%$) و غلظت نیتروژن دانه ($r = 0.66$ و $CV = 11.3\%$) را پیش‌بینی کند.

نتیجه‌گیری: با توجه به توانایی بالای مدل SSM-iCrop در پیش‌بینی نمو، تجمع ماده خشک، شاخص سطح برگ، عملکرد دانه، تجمع و غلظت نیتروژن، می‌توان از این مدل برای اهداف مختلف مانند بهبود مدیریت زراعی، تجزیه و تحلیل رشد و عملکرد، تخمین عملکرد پتانسیل، خلأ عملکرد و اثرات تغییرات اقلیمی برای گندم استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: سطح برگ، عملکرد، فنولوژی، ماده خشک، مدل‌سازی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۰

نحوه استناد به این مقاله:

عبیدی، آرزو، سلطانی، افشین، و زینلی، ابراهیم. (۱۴۰۳). پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد و نمو، عملکرد دانه، تجمع و غلظت نیتروژن در گندم. *تحقیقات غلات*، ۱۴ (۴)، ۳۷۹-۳۹۵. doi: [10.22124/CR.2025.28834.1842](https://doi.org/10.22124/CR.2025.28834.1842)

مقدمه

گندم (*Triticum aestivum* L.) مهم‌ترین گیاه زراعی در ایران به‌شمار می‌رود و هر ساله بیش از ۵۰ درصد از کل زمین‌های قابل کشت به زراعت گندم اختصاص داده می‌شود. سطح زیرکشت گندم در ایران در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در حدود شش میلیون هکتار و میزان تولید آن بیش از ۱۳ میلیون تن بود (Ahmadi et al., 2021). فرآورده‌های این گیاه در حدود ۴۰ درصد از انرژی و پروتئین مورد نیاز مردم کشور را تأمین می‌کند (Salehi et al., 2013). بنابراین می‌توان گفت که امنیت غذایی مردم ایران تا حد زیادی به فرآورده‌های این گیاه وابسته است.

برای بررسی رشد و نمو و پویایی نیتروژن در گیاهان زراعی، می‌بایست تعداد زیادی آزمایش مزرعه‌ای در طیف وسیعی از زمان‌ها و مناطق اقلیمی اجرا شود که انجام چنین کاری سخت، زمان‌بر و پرهزینه است. امروزه مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی به‌عنوان ابزاری مفید برای انجام چنین مطالعاتی هستند و می‌توان به‌کمک آن‌ها در زمان و هزینه‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای صرفه‌جویی کرد (Soltani & Sinclair, 2012). از آنجا که نیتروژن یک عنصر غذایی کلیدی برای رشد و نمو و عملکرد گیاه است، شبیه‌سازی پویایی نیتروژن در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی اهمیت زیادی دارد. یک مدل بهتر است برای پیش‌بینی دقیق رشد و نمو و عملکرد گیاه، مواردی نظیر جذب نیتروژن، تخصیص نیتروژن در گیاه و پیامدهای کمبود نیتروژن را به‌طور کارآمد شبیه‌سازی کند. این موجب می‌شود که مدل به‌طور واقع‌بینانه واکنش گیاه را به سطوح مختلف نیتروژن قابل دسترس نشان دهد (Soltani & Sinclair, 2012). این قابلیت، مدل را قادر می‌سازد نه تنها کمیت عملکرد، بلکه کیفیت را نیز پیش‌بینی کند. در مورد گندم، غلظت نیتروژن دانه یک عامل تعیین‌کننده برای محتوای پروتئین است که مستقیماً بر کیفیت و ارزش دانه در بازار اثر می‌گذارد. از سوی دیگر شبیه‌سازی پویایی نیتروژن در مدل‌ها به تصمیم‌گیری برای بهبود مدیریت کوددهی نیتروژن کمک می‌کند. قابلیت شبیه‌سازی دقیق سناریوهای مختلف مدیریت نیتروژن (به‌عنوان مثال، زمان و مقدار مصرف کود نیتروژن) امکان ارزیابی پیامدهای اقتصادی و زیست-محیطی آن را فراهم می‌کند. این قابلیت به کشاورزان کمک می‌کند تا روش‌های کشاورزی پایدارتر و سودآورتری اتخاذ کنند و

تلفات نیتروژن ناشی از فرآیندهایی نظیر آبشویی و نیتروژن‌زدایی را کاهش دهند (Link et al., 2008; Wang et al., 2017; Ma et al., 2019). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی مختلفی وجود دارند که می‌توانند شبیه‌سازی پویایی نیتروژن را انجام دهند. برخی از مدل‌ها مانند APSIM و DSSAT، از یک روش پیچیده با تعریف محدودیت‌های غلظت نیتروژن برای اندام‌های مختلف گیاه در مراحل مختلف رشد استفاده می‌کنند، اما برخی دیگر از روش‌های ساده‌تری مانند منحنی رقیق شدن نیتروژن در مدل CropSyst و STICS یا غلظت‌های ثابت نیتروژن در اندام‌های پیر و جوان گیاه مانند SSM استفاده می‌کنند (Manschadi et al., 2022). در مدل‌هایی نظیر APSIM-Sorghum (Hammer et al., 2010) و APSIM-Maize (Soufizadeh et al., 2018) از یک روش مکانیکی و ساده استفاده می‌شود. به این صورت که، تقاضای نیتروژن گیاه نسبت به گسترش کانوپی آن با استفاده از مقدار نیتروژن ویژه برگ محاسبه می‌شود (Jamieson & Semenov, 2000).

در مطالعاتی که با مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی انجام می‌شوند به منظور افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی رشد و نمو و سایر صفات کلیدی گیاه، مدل باید قبل از استفاده، پارامتریابی (Parameterization) و برای اطمینان از قابل قبول بودن، دقت پیش‌بینی ارزیابی (Evaluation) شود (Soltani & Sinclair, 2012). ارزیابی مدل باید با هدف مقایسه نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل با داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌ها انجام شود. اگر پیش‌بینی‌ها با اندازه‌گیری‌های سیستم به‌طور منطقی و طبق معیارهای از قبل تعریف شده مطابقت داشته باشد، مدل آماده استفاده است. این نوع ارزیابی به‌ویژه زمانی ضروری است که مدل برای اهداف کاربردی مورد استفاده قرار گیرد (Soltani & Sinclair, 2012). ارزیابی مدل شبیه‌سازی به‌صورت مقایسه نتایج مشاهده شده با نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل در مطالعات اولیه مدل‌سازی (Monteith, 1965) استفاده شده و هم‌چنان (Manschadi et al., 2020; Shiukhy Soqanloo et al., 2022) ادامه دارد. SSM (Simple Simulation Models) گروهی از مدل‌های شبیه‌سازی شناخته شده هستند که نخستین بار توسط سینکлер (Sinclair, 1986) برای سوپا طراحی شد و به مرور زمان توسط ایشان و سایر پژوهش‌گران برای اکثر گیاهان زراعی تهیه و استفاده شدند (Soltani &

Sinclair, 2015; Soltani *et al.*, 2013, 2020; Sinclair *et al.*, 2020). مطالعات پارامتریایی و ارزیابی مدل SSM در ایران برای گیاهان مختلف از جمله سویا (Nehbandani *et al.*, 2015) و سیب زمینی (Dadrasi *et al.*, 2020) انجام شده است.

مدل مورد استفاده در مطالعه حاضر SSM-iCrop (Soltani *et al.*, 2013) است که دقت این مدل برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در شرایط محیطی و مدیریتی مختلف، قبلاً پارامتریایی و ارزیابی شده است (Soltani *et al.*, 2015; Sinclair & Soltani, 2013). با این وجود، پارامتریایی و ارزیابی این مدل در شبیه‌سازی پویایی نیتروژن برای گندم در ایران انجام نشده و در این زمینه تنها یک مطالعه در شرایط محیطی اتریش صورت گرفته است (Manschadi *et al.*, 2022). از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف پارامتریایی و ارزیابی دقت مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی مراحل نمو، سطح برگ، عملکرد دانه و زیست-توده، تجمع نیتروژن در بخش هوایی و دانه و غلظت نیتروژن دانه گندم در ایران انجام شد.

مواد و روش‌ها

مدل SSM-iCrop یک مدل شبیه‌سازی گیاهی است. این مدل ماژولار نیست، ولی شامل زیرمدل‌های جداگانه برای شبیه‌سازی فنولوژی، گسترش و زوال سطح برگ، تولید و توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد، موازنه آب خاک و موازنه نیتروژن گیاه و خاک است که توسط برنامه اصلی مدل فراخوانده می‌شوند. شبیه‌سازی مراحل مختلف نمو در این مدل بر اساس مفهوم روز-زیست صورت می‌گیرد (Soltani *et al.*, 2013). مقدار روز-زیست تجمعی مورد نیاز برای وقوع هر مرحله نمو و سایر شاخص‌های گیاهی مورد استفاده در مدل برای محاسبه فنولوژی در جدول ۱ ارائه شده است. از زمان کاشت تا برداشت، مقدار روز-زیست برای هر روز تقویمی (DBt) از حاصل ضرب توابع دما (tempfun)، طول روز یا طول دوره روشنایی (ppfun)، بهاره‌سازی (verfun) و کمبود آب (wsfd) بر اساس رابطه (۱) محاسبه شد (Soltani & Sinclair, 2012):

$$DBt = tempfun \times ppfun \times verfun \times wsfd \quad (1)$$

نمو گندم از سبز شدن تا ساقه‌رفتن، به دما، طول روز و بهاره‌سازی واکنش نشان می‌دهد و سایر مراحل نمو فقط تحت تأثیر دما است (Ritchie, 1991; Soltani, 2009).

(Soltani & Sinclair, 2012). روز-زیست تجمعی (CBD) از مجموع روز-زیست روزانه (DBt) حاصل می‌شود. قبل از انجام هر شبیه‌سازی، مقدار CBD لازم برای وقوع مراحل مختلف فنولوژی به‌طور ویژه برای هر رقم به‌عنوان ورودی به مدل داده می‌شود (جدول ۱). این مدل برای شبیه‌سازی گسترش سطح برگ از مفهوم فیلوکرون جهت محاسبه افزایش روزانه تعداد برگ‌ها در ساقه اصلی استفاده می‌کند (Soltani *et al.*, 2013). پس از آن، با استفاده از روابط آلومتریک، سطح برگ گیاه بر اساس تعداد برگ‌های ساقه اصلی برآورد می‌شود. این مدل اثرات محدودیت‌های آب و نیتروژن بر توسعه سطح برگ و تأثیر دماهای شدید، از جمله یخبندان و گرما بر این فرآیند را در نظر می‌گیرد (Soltani *et al.*, 2011). تولید ماده خشک با استفاده از تابش فعال فتوسنتزی جذب شده (PAR) و کارایی استفاده از تابش (RUE) محاسبه می‌شود که با در نظر گرفتن اثرات تنش‌های خشکی و دمایی تنظیم شده‌اند (Soltani & Sinclair, 2012). تشکیل عملکرد با استفاده از مفهوم اصلاح‌شده افزایش خطی شاخص برداشت محاسبه می‌شود که به‌طور کامل تشریح شده است (Soltani & Sinclair, 2011). سرعت رشد دانه از طریق این مفهوم تعیین می‌شود، اما میزان ماده خشک روزانه انتقال‌یافته از اندام‌های رویشی به دانه و نرخ فتوسنتز جاری گیاه آن را محدود می‌کند. شیب افزایش خطی شاخص برداشت با توجه به شرایط رشد گیاه پیش از تشکیل دانه تنظیم می‌شود (Soltani *et al.*, 2013).

مدل SSM-iCrop برای شبیه‌سازی دقیق رشد، نمو و عملکرد گیاه به داده‌های مرتبط با خاک و شرایط اقلیمی نیاز دارد که شامل دمای حداقل و حداکثر روزانه، میزان تابش خورشیدی و بارش روزانه است. این مدل در صورت لزوم موازنه آب و نیتروژن را در خاک و گیاه لحاظ می‌کند. در بخش موازنه آب خاک، اجزایی مانند تبخیر آب از سطح خاک، تعرق گیاه، رواناب سطحی، زهکشی عمیق و اثرات محدودیت آب بر فرآیندهای رشدی گیاه شبیه‌سازی می‌شوند (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani *et al.*, 2013). به‌طور مشابه، موازنه نیتروژن در خاک را نیز با در نظر گرفتن اجزایی مانند تصعید، نیترازدایی (Denitrification)، جذب نیتروژن توسط گیاه، آبشویی و معدنی‌شدن نیتروژن شبیه‌سازی می‌کند (Soltani & Sinclair, 2012; Soltani *et al.*, 2013).

جدول ۱- پارامترهای مدل SSM-iCrop برآورد شده برای گندم در ایران
Table 1. SSM-iCrop parameters estimated for wheat in Iran

Parameter	Abbreviation	Value	Reference
<i>Phenology</i>			
Base temperature for development (°C)	TBD	0	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Optimum temperature for development (°C)	TP1D	27.5	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Ceiling temperature for development (°C)	TCD	40	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Vernalization sensitivity coefficient	Vsen	0.00089* or 0.0015**	Parameterization
Critical photoperiod (h)	cpg	21	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Photoperiod sensitivity coefficient	ppsen	0.001467	Parameterization
Biological days from sowing to emergence (Biological day)	bdSOWEMR	3.5	Parameterization
Biological days from emergence to first-tiller (Biological day)	bdEMRTIL	5	Parameterization
Biological days from first-tiller to first-node (stem-elongation) (Biological day)	bdTILSEL	11.5	Parameterization
Biological days from first-node to booting (ligule of flag leaf visible) (Biological day)	bdSELBOT	7	Parameterization
Biological days from booting to ear emergence (Biological day)	bdBOTEAR	3	Parameterization
Biological days from ear emergence to anthesis (Biological day)	bdEARANT	8	Parameterization
Biological days from anthesis to physiological maturity (Biological day)	bdANTPM	34	Parameterization
Biological days from physiological maturity to harvest maturity (Biological day)	bdPMHM	8	Parameterization
<i>Leaf area development and senescence</i>			
Phyllochron, the accumulated thermal time required for the successive leaves' appearance in the main stem (°C.Leaf ⁻¹)	Phyl	95	Parameterization
A coefficient (constant) in the power relationship between plant leaf area and mainstem node number	PLACON	1	Soltani <i>et al.</i> (2013)
A coefficient (exponent) in the power relationship between plant leaf area and main stem node number (For 300 Plants .m ⁻²)	PLAPOW	2.4336	Parameterization
Specific leaf area (m ² .g ⁻¹)	SLA	0.021	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Low temperature/freezing threshold for leaf death (°C)	FrzTh	-5	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Fraction leaf destruction below the critical by each degree centigrade (m ² .m ⁻²)	FrzLDR	0.01	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Heat threshold temperature for leaf senescence (°C)	HeatTH	30	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Relative increase in leaf senescence rate per each degree above heat threshold (°C)	HtLDR	0.1	Soltani <i>et al.</i> (2013)
<i>Dry mass accumulation</i>			
Base temperature for dry matter production (°C)	TBRUE	0	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Lower optimum temperature for dry matter production (°C)	TP1RUE	15	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Upper optimum temperature for dry matter production (°C)	TP2RUE	22	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Ceiling temperature for dry matter production (°C)	TCRUE	35	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Extinction coefficient for photosynthetically active radiation	KPAR	0.65	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Radiation use efficiency under optimal growth conditions (g. MJ ⁻¹)	IRUE	2.42	Parameterization
A coefficient that describes RUE response to CO ₂ in a curvilinear response.	CO2RES	0.8	Soltani <i>et al.</i> (2013)

Table 1. Continued

جدول ۱- ادامه

<i>Dry mass partitioning</i>			
Partitioning coefficient to leaves during the main phase of leaf area development at lower levels of total crop mass (g g^{-1})	FLF1A	0.6	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Partitioning coefficient to leaves during the main phase of leaf area development at higher levels of total crop mass (g.g^{-1})	FLF1B	0.3	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Total crop mass when leaf partitioning coefficient turns from FLF1A to FLF1B (g.g^{-1})	WTOPL	160	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Partitioning coefficient to leaves from termination leaf growth on mainstem to beginning seed growth (g g^{-1})	FLF2	0.1	Soltani <i>et al.</i> (2013)
<i>Yield formation</i>			
Fraction crop mass at the beginning of seed growth which is translocatable to grains (g.g^{-1})	FRTRL	0.22	Parameterization
Grain conversion coefficient (g.g^{-1})	GCF	1	Soltani <i>et al.</i> (2013)
The rate of linear increase in harvest index during effective grain filling period ($\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1}$)	PDHI	0.019	Parameterization
A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling (g.m^{-2})	WDHI1	0	Soltani <i>et al.</i> (2013)
A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling (g.m^{-2})	WDHI2	600	Soltani <i>et al.</i> (2013)
A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling (g.m^{-2})	WDHI3	1200	Soltani <i>et al.</i> (2013)
A turning point in relationship between PDHI and crop dry mass at beginning grain filling (g.m^{-2})	WDHI4	3200	Soltani <i>et al.</i> (2013)
<i>Water relations</i>			
Initial depth of roots at emergence or beginning leaf growth (mm)	iDEPORT	200	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Maximum effective depth of water extraction from soil (mm)	MEED	1000	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Potential daily increase (growth) in root depth (mm.d^{-1})	GRDTP	30	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Transpiration efficiency coefficient (Pa)	TEC	5.8	Soltani <i>et al.</i> (2013)
FTSW*** threshold when dry matter production starts to decline	WSSG	0.3	Soltani <i>et al.</i> (2013)
FTSW threshold when leaf area development starts to decline	WSSL	0.4	Soltani <i>et al.</i> (2013)
A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit	WSSD	0.5	Soltani <i>et al.</i> (2013)
<i>Plant nitrogen budget</i>			
Specific leaf nitrogen in green leaves (target) (g N m^{-2})	SLNG	1.8	Parameterization
Specific leaf nitrogen in senesced leaves (minimum) (g N m^{-2})	SLNS	0.4	Parameterization
Stem nitrogen concentration in green stems (target) (g N g^{-1})	SNCG	0.019	Parameterization
Stem nitrogen concentration in senesced stems before beginning of seed growth (minimum) (g N.g^{-1})	SNCS1	0.0095	Parameterization
Stem nitrogen concentration in senesced stems after beginning of seed growth (minimum) (g N.g^{-1})	SNCS2	0.0022	Parameterization
Grain nitrogen concentration (minimum)	GNCmin	0.016	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Grain nitrogen concentration (maximum)	GNCmax	0.035	Soltani <i>et al.</i> (2013)
Maximum rate of nitrogen uptake ($\text{g N.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)	MXNUP	0.6	Parameterization

* and ** Vernalization sensitivity coefficient for the cultivar estimated for regions with mild and cold winters respectively.

*** FTSW, fraction transpirable soil water.

در مطالعه حاضر، برای پارامتریابی از روش واسنجی (Calibration) استفاده شد، به این ترتیب که به‌جای پارامترهای گیاهی، مقادیر مختلفی در دامنه منطقی گزارش شده در مطالعات و مقالات معتبر در مدل قرار داده شد و سپس مدل اجرا و خروجی آن با مقدار مشاهده شده مقایسه و مقداری که بهترین و نزدیک‌ترین خروجی را نسبت به مقدار مشاهده شده داشت، به‌عنوان برآورد نهایی پارامتر انتخاب شد (Soltani, 2009). داده‌های مشاهده شده از آزمایش‌های مزرعه‌ای مطالعات مختلف (جدول ۲) جمع‌آوری شد. علت انتخاب این مطالعات، تیمارهای بررسی شده در این آزمایش‌ها بود که تنوع ارقام گندم، سطوح آبیاری، تاریخ کاشت و تنوع سطوح و الگوی کوددهی نیتروژن را داشتند تا برای انجام پارامتریابی و ارزیابی مدل برای رشد و نمو، عملکرد و پویایی نیتروژن مناسب باشند. داده‌های این مطالعات، مناطق مختلف ایران (گرگان، پارس آباد، بجنورد و اهواز)، فصل‌های زراعی متنوع (بین سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۱)، رقم‌های مختلف گندم بهاره از جمله کوه‌دشت، شیروودی، تجن، زاگرس، آرتا، اترک، هیرمند، دریا، چمران، مغان-۳ و رقم‌های گندم زمستانه از جمله Sayonz, Gunashli, Gobustan, Pirshahin-1, Ruzi-84, Girmizigul-1, Nurlo-99, Azamatli-95, Akinchi-84, Tale-38, Gimatli2/17 را شامل می‌شوند. رقم‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها از جنبه‌های مختلف از جمله مقاومت به بیماری‌ها، تنش شوری و خوابیدگی، ارتفاع بوته، طول سنبله، تحمل به جوانه‌زنی قبل از کاشت، رنگ دانه، کیفیت نانوائی، تعداد پنجه، تعداد سنبله در بوته، تعداد دانه در سنبله و واکنش به ریزش دانه متفاوت بودند (Navabpour & Kazemi, 2015; SPII, 2013)، اما این رقم‌ها از نظر پارامترهای گیاهی مورد استفاده در مدل (جدول ۱) تفاوت چندانی نداشتند. در برخی از این مطالعات اثر سطوح مختلف کود نیتروژن از صفر تا ۲۵۰ (کیلوگرم بر هکتار) بر عملکرد دانه و برخی صفات دیگر نیز بررسی شده‌اند. داده‌های این مطالعات شامل اندازه‌گیری مراحل مختلف نمو، حداکثر شاخص سطح برگ در گرده‌افشانی، تعداد گره در ساقه اصلی، عملکرد زیستی و دانه، مقدار نیتروژن کل بوته و دانه، غلظت نیتروژن دانه و برخی صفات دیگر بودند. مدل برای انجام شبیه‌سازی به اطلاعات روزانه آب و هوا، ویژگی‌های خاک و مدیریت زراعی نیاز دارد (Soltani et al., 2013). کیفیت داده‌های ورودی نظیر داده‌های

اقلیمی، ویژگی‌های خاک و همچنین وجود خطا در داده‌های مشاهده شده می‌تواند نتایج شبیه‌سازی مدل را تحت تأثیر قرار دهد و منجر به کاهش صحت پیش‌بینی شود. بنابراین، فقط آزمایش‌هایی برای این منظور قابل استفاده بودند که داده‌های خاک و اطلاعات مدیریتی ارائه شده در آن‌ها (مثل تاریخ کاشت یا زمان‌ها و مقادیر کوددهی) برای تعریف در مدل و اجرای آن، دقیق و کامل بود (جدول ۲).

اطلاعات هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. ابتدا بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده (جدول ۲)، تغییر پارامترهای گیاهی مربوط به بخش فنولوژی به صورتی که کم‌ترین خطا برای مقادیر شبیه‌سازی نسبت به مقادیر مشاهده شده باشد، انجام و مقدار پارامترهای گیاهی این بخش انتخاب شدند. در مرحله بعد، پارامترهای گیاهی مربوط به شبیه‌سازی تعداد گره روی ساقه اصلی و سپس سطح برگ در مدل پارامتریابی شدند. در نهایت مقادیر پارامترهای گیاهی برای شبیه‌سازی مقدار نیتروژن، ماده خشک و عملکرد دانه برآورد شدند. نکته قابل توجه اینکه در مطالعه حاضر پارامترهای ذکر شده برای دو رقم گندم نان یکی به‌عنوان نماینده رقم‌های گندم بهاره (کوه‌دشت، شیروودی، تجن، زاگرس، آرتا، اترک، هیرمند، دریا، چمران، مغان-۳) مناسب برای کشت در مناطق با زمستان معتدل و دیگری به‌عنوان نماینده رقم‌های گندم زمستانه (Sayonz, Girmizigul-1, Nurlo-99, Gobustan, Gunashli, Tale-38, Gimatli2/17, Pirshahin-1, Ruzi-84, Azamatli-95, Akinchi-84) مناسب کشت در مناطق با زمستان سرد برآورد شدند (جدول ۱). نتایج پارامتریابی نشان داد که این رقم‌ها در پارامتر ضریب واکنش به بهاره‌سازی (Vsen) تفاوت داشتند، اما سایر پارامترهای برآورد شده برای این رقم‌ها یکسان بود (جدول ۱).

پس از پارامتریابی، آزمایش‌های شبیه‌سازی اجرا و خروجی آن با داده‌های مشاهده شده در آزمایش‌های مزرعه‌ای مندرج در جدول (۲) برای زمان وقوع مراحل مختلف نمو (شامل تعداد روز تا سبز شدن، پنجه‌زنی، ساقه رفتن، آبستنی، سنبله‌دهی، گرده‌افشانی، رسیدگی فیزیولوژیک و رسیدگی کامل)، حداکثر شاخص سطح برگ در گرده‌افشانی، تعداد گره در ساقه اصلی، عملکرد زیستی، عملکرد دانه، مقدار نیتروژن کل بوته، مقدار نیتروژن دانه و غلظت نیتروژن دانه مقایسه شدند تا میزان انطباق بین

پیش‌بینی‌های مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده ارزیابی شود. برای ارزیابی توانایی مدل در شبیه‌سازی، آماره‌های مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و ضریب تغییرات (CV) بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده محاسبه و استفاده شدند (Soltani, 2009). همچنین، خطوط ۱:۱ با اختلاف ± 20 درصد برای نشان دادن میزان انحراف داده‌های شبیه‌سازی شده در مقابل داده‌های مشاهده شده رسم شدند.

نتایج و بحث

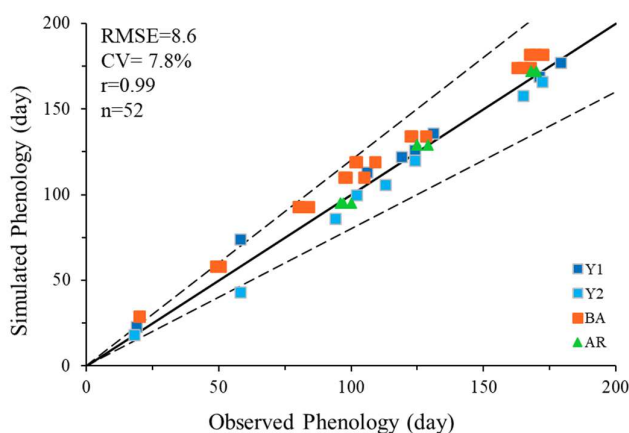
نتایج برآورد پارامترهای گیاهی مرتبط با فنولوژی گیاه در جدول ۱ گزارش شده است. در آزمایش‌های استفاده شده برای ارزیابی مدل (جدول ۲)، مقادیر مشاهده شده برای تعداد روز تا سبز شدن بین ۱۸ تا ۲۰ روز، پنجه‌زنی بین ۴۹ تا ۵۸ روز، ساقه رفتن بین ۸۰ تا ۱۰۶ روز، آبستنی بین ۹۷ تا ۱۱۹ روز، سنبله‌دهی بین ۱۰۲ تا ۱۲۴ روز، گرده‌افشانی بین ۱۲۲ تا ۱۳۱ روز، رسیدگی فیزیولوژیک بین ۱۶۳ تا ۱۷۱ روز و رسیدگی کامل (برداشت) بین ۱۶۸ تا ۱۷۹ روز متغیر بودند. نتایج ارزیابی کارایی مدل SSM-iCrop نشان داد که مدل با دقت بسیار بالایی مراحل مختلف نمو گندم را در مناطق مختلف

شبیه‌سازی کرده است، به‌طوری که ضریب تغییرات (CV) برابر با ۷/۸ درصد، ضریب همبستگی (r) برابر با ۰/۹۹ و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده ۸/۶ روز بود. همچنین، ۹۴ درصد نقاط در محدوده ± 20 درصد خط ۱:۱ قرار گرفتند که دقت بالای مدل را برای پیش‌بینی مراحل نمو گیاه گندم تأیید می‌کند (شکل ۱).

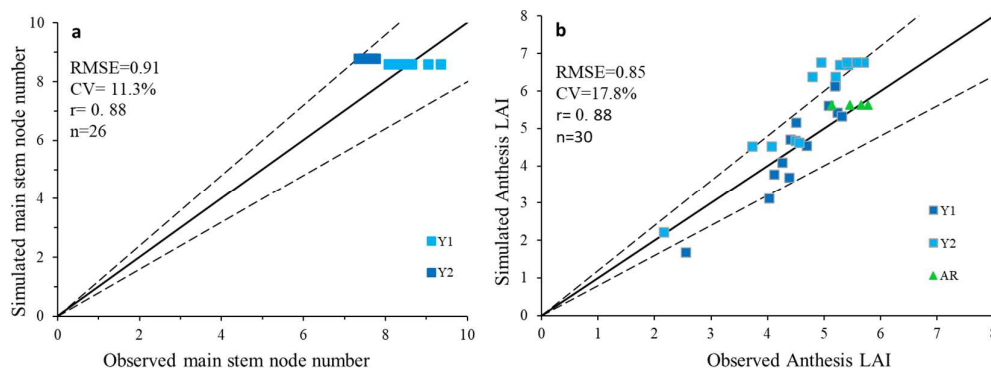
پارامترهای گیاهی برآورد شده مرتبط با گسترش و پیری سطح برگ در جدول ۱ ارائه شده است. در مرحله ارزیابی، مقدار r بین تعداد گره مشاهده شده در مقابل شبیه‌سازی شده برابر با ۰/۸۸، CV برابر با ۱۱/۳ درصد و RMSE برابر با ۰/۹ بود که در حدود ۱۱ درصد میانگین تعداد گره مشاهده شده در ساقه اصلی بود. همه داده‌های مربوط به تعداد گره در ساقه اصلی در بازه خطوط ± 20 درصد قرار داشتند که نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی این صفت بود (شکل ۲a). در آزمایش‌های مربوط به ارزیابی مدل (جدول ۲)، مقدار شاخص سطح برگ بین ۲/۲ تا ۵/۸ متغیر بود. مقدار r و CV برای حداکثر شاخص سطح برگ به ترتیب ۰/۸۸ و ۱۷/۸ درصد و مقدار RMSE نیز ۰/۸۵ بود که ۱۸ درصد میانگین حداکثر سطح برگ مشاهده شده است (شکل ۲b).

جدول ۲- آزمایش‌های مورد استفاده برای پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop
Table 2. Experiments used for parameterization and evaluation of SSM-iCrop model

Reference	Treatments	Description of treatments	Location	Abbreviation in the figures of this study
Bakhshandeh <i>et al.</i> (2011)	Cultivar	5 bread wheat cultivars	Gorgan, Golestan province	BA
Khalilzadeh <i>et al.</i> (2011)	Cultivar Nitrogen fertilizer	20 bread wheat cultivars 2 levels of 0-200 kg N/ha	Parsabad, Ardabil province	KH
Arab Ameri <i>et al.</i> (2012)	Cultivar Planting date	4 bread wheat cultivars 6 levels	Gorgan, Golestan province	AR
Ghanbari <i>et al.</i> (2014)	Irrigation Nitrogen fertilizer	4 levels 4 levels of 0-250 kg N/ha	Bojnourd, North Khorasan province	GH
Naderi <i>et al.</i> (2000)	Cultivar Nitrogen fertilizer	12 bread wheat cultivars 4 levels of 0-150 kg N/ha	Ahvaz, Khuzestan province	NA
Yousefidaz <i>et al.</i> (2014) (1st year)	Nitrogen fertilizer Nitrogen fertilization Pattern	4 levels of 0-250 kg N/ha 12 patterns	Gorgan, Golestan province	Y1
Yousefidaz <i>et al.</i> (2014) (2nd year)	Nitrogen fertilizer Nitrogen fertilization Pattern	4 levels of 0-180 kg N/ha 12 patterns	Gorgan, Golestan province)	Y2



شکل ۱- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تعداد روز تا وقوع مراحل نمو (سبز شدن، پنجه‌زنی، ساقه رفتن، آبستنی، سنبله‌دهی، گرده‌افشانی، رسیدگی فیزیولوژیک و رسیدگی کامل). خطوط منقطع دامنه $\pm 20\%$ درصد را نسبت به خط ۱:۱ (خط ممتد) نشان می‌دهند.
Figure 1. Observed and simulated values of days to different phenological stages (emergence, tillering, stem elongation, booting, heading, anthesis, physiological maturity, and full maturity). Dashed lines show $\pm 20\%$ range compared to 1:1 line (solid line).

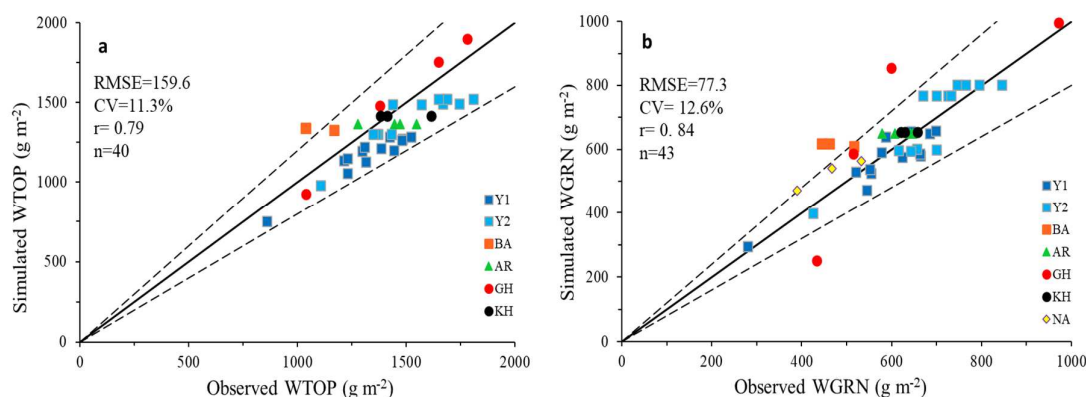


شکل ۲- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تعداد گره در ساقه اصلی (a) و شاخص سطح برگ در مرحله گرده‌افشانی (b). خطوط منقطع دامنه $\pm 20\%$ نسبت به خط ۱:۱ (خط ممتد) را نشان می‌دهند.

Figure 2. Observed and simulated values for number of nodes on the main stem (a) and leaf area index at anthesis stage (b). Dashed lines show $\pm 20\%$ range compared to 1:1 line (solid line).

بیانگر برآورد صحیح پارامترهای گیاه و کارایی بالای مدل در تخمین عملکرد زیستی و دانه گندم بود. مقایسه نتایج نشان داد که CV شاخص سطح برگ در مرحله گرده‌افشانی در حدود ۶۰ درصد بیش‌تر از عملکرد زیستی (۱۸ در برابر ۱۱ درصد) بود (شکل‌های ۲b و ۳a). برآورد سطح برگ به‌دلایل مختلف از جمله تاخوردگی و لوله شدن برگ‌ها در هنگام کار با دستگاه سطح برگ‌سنج و یا جمع‌آوری نکردن کامل برگ‌های ریخته شده در دوره رشد گیاه، با خطای زیادی همراه است و بنابراین بالا بودن CV در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ اصولاً امری رایج است (Abidi *et al.*, 2024).

پارامترهای گیاهی مرتبط با تولید و تخصیص ماده خشک و عملکرد در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار عملکرد زیستی مشاهده شده در آزمایش‌های مختلف بین ۸۶۰ تا ۱۸۱۱ و عملکرد دانه بین ۲۸۰ تا ۹۷۲ (گرم در متر مربع) متغیر بود (جدول ۲). در ارزیابی مدل، مقدار r برای عملکرد زیستی و دانه به‌ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۴، مقدار CV به‌ترتیب ۱۱/۳ و ۱۲/۶ درصد و RMSE به‌ترتیب ۱۵۹/۶ و ۷۷/۳ (گرم در متر مربع) بود که بیانگر دقت خوب مدل در پیش‌بینی عملکرد زیستی و دانه بود. همچنین، اکثر نقاط در محدوده خطوط $\pm 20\%$ درصد قرار گرفتند (شکل‌های ۳a، b). بنابراین، شبیه‌سازی عملکرد زیستی و دانه بر اساس مدل SSM-iCrop رضایت‌بخش و

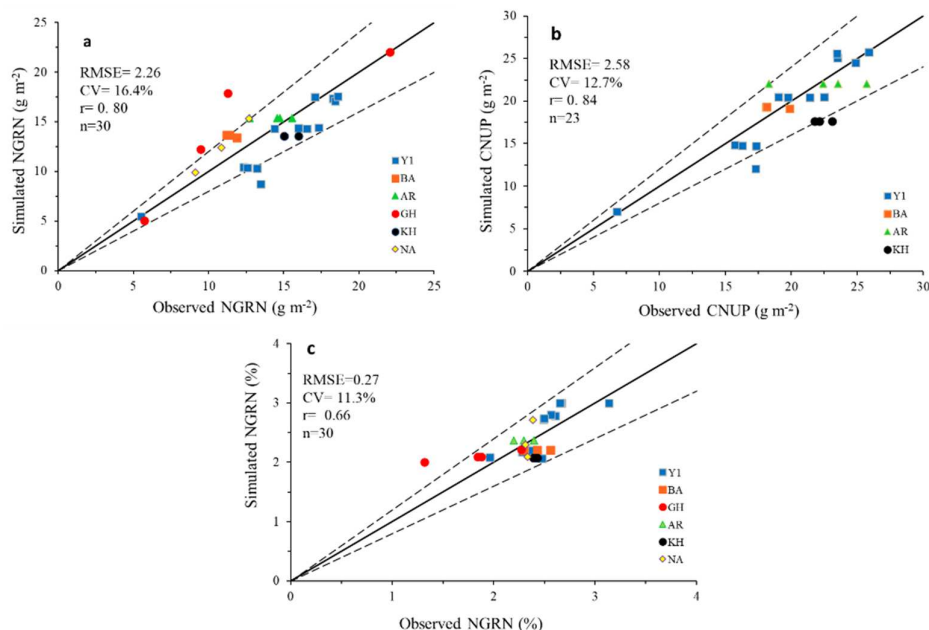


شکل ۳- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد زیستی (a) و عملکرد دانه (b). خطوط منقطع دامنه $\pm 20\%$ نسبت به خط ۱:۱ (خط ممتد) را نشان می‌دهند.

Figure 3. Observed and simulated values for biological yield (a) and grain yield (b). Dashed lines show $\pm 20\%$ range compared to 1:1 line (solid line).

دانه به‌ترتیب ۰/۸ و ۰/۸۴ (گرم بر متر مربع)، CV به‌ترتیب ۱۲/۷ و ۱۶/۴ درصد و RMSE به‌ترتیب ۲/۶ و ۲/۳ (گرم بر متر مربع) بود که دقت خوب مدل را در پیش‌بینی مقدار نیتروژن بخش هوایی و دانه نشان می‌دهد (شکل‌های ۴a, b). برای غلظت نیتروژن دانه نیز مقدار r برابر با ۰/۶۶ و مقدار CV و RMSE به‌ترتیب ۱۱/۳ درصد و ۰/۲۷ درصد به‌دست آمد که بیانگر دقت قابل قبول مدل در پیش‌بینی غلظت نیتروژن دانه بود (شکل ۴c).

پارامترهای گیاهی مرتبط با نیتروژن به‌دست آمده از مرحله پارامتریابی مدل در جدول ۱ ارائه شده است. در آزمایش‌های مورد استفاده در بخش ارزیابی (جدول ۲)، مقدار نیتروژن بخش هوایی بین ۶/۸ تا ۲۵/۹ و نیتروژن دانه بین ۵/۵ تا ۲۲/۱ (گرم بر متر مربع) و غلظت نیتروژن دانه بین ۱/۳۲ تا ۳/۱۴ درصد گزارش شده است. نتایج ارزیابی مدل نشان داد که مقدار r بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای مقدار نیتروژن بخش هوایی و



شکل ۴- مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مقدار نیتروژن دانه (a)، مقدار نیتروژن بخش هوایی (b) و غلظت نیتروژن دانه (c). خطوط منقطع دامنه $\pm 20\%$ درصد نسبت به خط ۱:۱ (خط ممتد) را نشان می‌دهند.

Figure 4. Observed and simulated values for nitrogen content in grain (a) and above-ground biomass (b), and nitrogen concentration in grain (c). Dashed lines show $\pm 20\%$ range compared to 1:1 line (solid line).

با توجه به این که برای ارزیابی مدل در این مطالعه از آزمایش‌های انجام شده در مناطق مختلف کشور با شرایط آب و هوایی متفاوت استفاده شد و از سوی دیگر، این آزمایش‌ها با رقم‌های مختلف گندم، مقادیر مختلف آبیاری، تاریخ کاشت و مقادیر و الگوی کوددهی متفاوتی انجام شده‌اند (جدول ۲)، می‌توان نتیجه‌گرفت که کارکرد مدل برای پیش‌بینی صفات گیاهی مورد بررسی موفقیت‌آمیز است و از این مدل می‌توان برای شبیه‌سازی‌های مختلف مانند تجزیه و تحلیل رشد و عملکرد گندم در شرایط محیطی مختلف کشور، بهبود مدیریت زراعی، تخمین عملکرد پتانسیل و خلأ عملکرد، اصلاح رقم و بررسی اثرات تغییرات اقلیمی در گیاه گندم استفاده کرد. سلطانی و همکاران (Soltani *et al.*, 2013) از مدل SSM برای شبیه‌سازی گندم در گرگان با استفاده از داده‌های مستقل استفاده و دقت مدل را برای پیش‌بینی روز تا گلدهی ($r=0/98$, $CV=0/45$)، روز تا رسیدگی ($r=0/96$, $CV=0/56$)، شاخص سطح برگ ($r=0/8$, $CV=0/118$)، عملکرد زیستی ($r=0/82$, $CV=0/95$) و عملکرد دانه ($r=0/89$, $CV=0/84$) قابل قبول گزارش کردند که در مقایسه با نتایج مطالعه حاضر از نظر دقت مدل در پیش‌بینی صفات ذکر شده مطابقت داشت. در مطالعه‌ای دیگر، برآورد پارامترها و ارزیابی مدل SSM با استفاده از داده‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای مختلف برای چهار رقم گندم در استان گلستان انجام شد (Soltani *et al.*, 2013). نتایج ارزیابی آن‌ها حاکی از کارایی رضایت‌بخش این مدل برای پیش‌بینی روز تا گرده‌افشانی ($r=0/98$, $CV=0/45$)، روز تا رسیدگی ($r=0/96$, $CV=0/56$)، شاخص سطح برگ ($r=0/8$, $CV=0/118$)، عملکرد زیستی ($r=0/82$, $CV=0/95$) و عملکرد دانه ($r=0/89$, $CV=0/84$) بود که با نتایج مطالعه حاضر مشابه بود. آن‌ها همچنین توانایی مدل SSM را با سه مدل قدرتمند CropSyst، DSSAT و APSIM مقایسه کردند که نتایج حاکی از برتری یا تشابه دقت شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد گندم در مدل SSM نسبت به مدل‌های نامبرده بود. در مطالعه دیگری، عملکرد گندم توسط چهار مدل شبیه‌سازی SSM-iCrop، CropSyst، APSIM و DSSAT مقایسه و گزارش شد که مدل SSM-iCrop با وجود تعداد پارامترهای گیاهی کم‌تر، به‌خوبی توانست عملکرد گندم را با دقت بیش‌تری از مدل‌های قدرتمند فوق شبیه‌سازی کند (Soltani & Sinclair, 2015).

ایشان مقدار CV مقادیر شبیه‌سازی شده در مقابل مقادیر مشاهده شده عملکرد گندم را در مدل‌های SSM-iCrop، CropSyst، APSIM و DSSAT به‌ترتیب ۸/۲، ۱۴/۳، ۱۵ و ۱۸/۵ درصد گزارش کردند. نتایج به‌دست آمده از مطالعه‌ای در آمریکا که به‌منظور پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-Wheat در گندم در شرایط محیطی مختلف انجام شد، نشان داد که ۸۸ درصد از نقاط شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر مشاهده شده در مراحل مختلف نمو (روز تا گرده‌افشانی، رسیدگی فیزیولوژیک و رسیدگی کامل) در محدوده خطی ± 5 درصد (نسبت به خط ۱:۱) قرار داشتند که حاکی از دقت بسیار زیاد مدل برای پیش‌بینی نمو در مناطق مورد مطالعه بود. ضریب تغییرات مدل نیز برابر با چهار درصد بود که تأییدی بر توانایی مدل برای پیش‌بینی سرعت نمو بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، توانایی مدل برای پیش‌بینی عملکرد دانه خوب ($CV=14$) درصد و $RMSE=690$ کیلوگرم بر هکتار) گزارش شد (Lollato *et al.*, 2017). نتایج مطالعه‌ای دیگر در زمینه پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM-iCrop برای پیش‌بینی رشد و عملکرد گندم در نقاط مختلف ایران، حاکی از کارایی قابل قبول مدل در پیش‌بینی روز تا گلدهی ($r=0/98$, $CV=0/6$, $RMSE=7$ روز) و روز تا رسیدگی فیزیولوژیک ($r=0/99$, $CV=0/4$, $RMSE=6$ روز) بود (Alimagham *et al.*, 2020). نتایج ایشان در ارزیابی دقت مدل در پیش‌بینی مراحل نمو گندم نسبت به مطالعه حاضر تفاوت چندانی نداشت. مقادیر $RMSE$ برای تعداد گره روی ساقه اصلی و شاخص سطح برگ هر دو برابر با ۰/۸ و مقدار CV به‌ترتیب ۱۰ و ۱۸ درصد بود که به نتایج مطالعه حاضر ($RMSE$ برای هر دو ۰/۸۸ و CV به‌ترتیب ۱۱/۳ و ۱۷/۸ درصد) بسیار نزدیک بود. همچنین، در بررسی دقت مدل برای پیش‌بینی عملکرد زیستی و دانه، ایشان مقدار $RMSE$ را برای عملکرد زیستی و دانه به‌ترتیب ۲۶۸ و ۱۰۳ گرم بر متر مربع، مقدار CV را به‌ترتیب ۲۱ و ۲۰ درصد و مقدار r را به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۸۴ گزارش کردند (Alimagham *et al.*, 2020). در مقایسه با نتایج مطالعه حاضر، اگرچه دقت مدل ایشان در پیش‌بینی مراحل فنولوژی بیش‌تر از مطالعه حاضر ($CV=0/8$) بود، اما پیش‌بینی عملکرد دانه در مطالعه حاضر ($CV=0/125$) با دقت بیش‌تری انجام شد. در مطالعه‌ای در اتریش نیز از مدل SSM-iCrop برای پارامتریابی و ارزیابی گندم استفاده و گزارش شد که

عملکرد مدل برای شبیه‌سازی فنولوژی (روز تا آبستنی) بسیار خوب ($CV=1\%$, $RMSE=2/9$ روز) و برای عملکرد دانه ($CV=26\%$, $RMSE=198$ گرم بر متر مربع) مناسب بود (Fuchs, 2021). به این ترتیب، دقت مدل در مطالعه ایشان برای پیش‌بینی فنولوژی بیش‌تر از مطالعه حاضر ($CV=8\%$, $RMSE=8/6$ روز) و برای عملکرد دانه کم‌تر از مطالعه حاضر ($CV=12/5\%$, $RMSE=76$ گرم بر متر مربع) بود. در مطالعه مقایسه‌ای دیگر، نتایج شبیه‌سازی شاخص سطح برگ (LAI) و عملکرد دانه گندم توسط مدل SSM-Wheat و چهار مدل شبیه‌سازی گیاهی دیگر (WHEATPEST, HERMES, DSSAT-Nwheat, WOFOST_GT) مقایسه و گزارش شد که این مدل‌ها از نظر شبیه‌سازی روند تغییرات LAI در طول فصل رشد و تاریخ شروع پر شدن دانه متفاوت بودند، اما تمامی مدل‌ها عملکرد دانه را به‌صورت بسیار مشابهی (افزایش تقریباً خطی) شبیه‌سازی کردند (Bregaglio et al., 2021).

پارامتریایی و ارزیابی مدل SSM-iCrop به‌منظور شبیه‌سازی پویایی نیتروژن برای گندم تا کنون در ایران انجام نشده و در این زمینه فقط یک مطالعه در شرایط محیطی اتریش انجام شده است (Manschadi et al., 2022). دقت مدل SSM-iCrop در شبیه‌سازی نیتروژن و سایر صفات گندم در مطالعه ایشان نیز همانند نتایج مطالعه حاضر رضایت‌بخش بود. نتایج پیش‌بینی شده در مطالعه آن‌ها مطابقت خوبی با داده‌های مشاهده شده برای مقدار نیتروژن بخش هوایی ($CV=4/5\%$, $RMSE=1/9$ گرم نیتروژن بر متر مربع)، مقدار نیتروژن دانه ($CV=1/1\%$, $RMSE=2/2$ گرم نیتروژن بر متر مربع) و غلظت نیتروژن دانه ($CV=3/7\%$, $RMSE=0/115$) داشت. کارایی مدل در پیش‌بینی زمان وقوع مراحل مختلف نمو از جمله روز تا گرده‌افشانی و رسیدگی فیزیولوژیک ($RMSE$ به‌ترتیب $3/5$ و $4/4$ روز)، و همچنین تعداد گره در ساقه اصلی ($RMSE=0/6$) و عملکرد زیستی و عملکرد دانه (به‌ترتیب CV برابر با $5/9$ و $1/9$ درصد و $RMSE$ برابر با $115/6$ و $60/5$ گرم بر متر مربع) خوب بود. خطاهای پیش‌بینی مربوط به نیتروژن در تحقیق حاضر بسیار کم‌تر از خطاهای گزارش شده برای گندم با دو نسخه از مدل APSIM بود (Zhao et al., 2014). ایشان مقدار $RMSE$ را برای نیتروژن بخش هوایی $34/4$ و $37/5$ و برای نیتروژن دانه $31/1$ و $36/2$ گرم نیتروژن بر متر مربع گزارش کردند. خطاهای پیش‌بینی مربوط به نیتروژن در

مطالعه حاضر با نتایج مطالعه‌ای در سورگوم (Hammer et al., 2010) که $RMSE$ را برای مقدار نیتروژن بخش هوایی و دانه به‌ترتیب $4/1$ و $2/1$ گرم بر متر مربع و برای غلظت نیتروژن دانه $0/24$ درصد و مطالعه دیگری در ذرت (Soufizadeh et al., 2018) که $RMSE$ را برای مقدار نیتروژن بخش هوایی و دانه به‌ترتیب $2/5$ و $2/3$ گرم بر متر مربع با استفاده از مدل APSIM گزارش کردند، قابل مقایسه بود. در مطالعه‌ای که با هدف پارامتریایی و ارزیابی دقت دو مدل ساده (SSM-iCrop) و پیچیده (APSIM) برای پیش‌بینی مقدار نیتروژن و عملکرد دانه ذرت انجام شد، دقت SSM-iCrop خوب و حتی بهتر از APSIM گزارش شد (Manschadi et al., 2020). ایشان $RMSE$ را برای مقدار نیتروژن بخش هوایی و عملکرد دانه در مدل SSM-iCrop به‌ترتیب $1/4$ و $32/6$ و در مدل APSIM به‌ترتیب $2/4$ و $59/9$ گرم بر متر مربع گزارش کردند.

برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود پارامتریایی و ارزیابی مدل برای سایر رقم‌های گندم در مناطق مختلف اقلیمی ایران انجام شود تا تطابق بیش‌تری با شرایط محلی حاصل شود. همچنین، با توجه به محدودیت داده‌های مشاهده شده در این مطالعه برای بررسی روند تجمع نیتروژن در طول فصل رشد، توصیه می‌شود پژوهش‌های بعدی بر طراحی آزمایش‌ها یا جمع‌آوری داده‌های کافی برای تحلیل دقیق‌تر این روند متمرکز شوند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop در این مطالعه حاکی از دقت بسیار بالای این مدل ($r=0/99$, $CV=7/8$ درصد، $RMSE=8/6$ روز) برای پیش‌بینی زمان وقوع مراحل مختلف نمو گندم بود. همچنین مدل توانست تعداد گره در ساقه اصلی ($r=0/88$ و $CV=11/3\%$)، شاخص سطح برگ در مرحله گرده‌افشانی ($r=0/88$ و $CV=17/8\%$)، عملکرد زیستی ($r=0/79$ و $CV=11/3\%$)، عملکرد دانه ($r=0/84$ و $CV=12/6\%$)، میزان نیتروژن بخش هوایی ($r=0/84$ و $CV=12/7\%$) و دانه ($r=0/80$ و $CV=16/4\%$) و غلظت نیتروژن دانه ($r=0/66$ و $CV=11/3\%$, $RMSE=0/27$) را با دقت بالایی شبیه‌سازی کند. این نتایج برآورد دقیق پارامترهای مدل و توانایی بالای مدل در پیش‌بینی صفات گندم در شرایط اقلیمی مختلف کشور را نشان داد. به‌طورکلی، با توجه به توانایی بالای مدل SSM-iCrop در پیش‌بینی موارد ذکر شده، می‌توان از این مدل برای تجزیه

و تحلیل رشد و عملکرد گندم در شرایط محیطی مختلف کشور، بهبود مدیریت زراعی، تخمین عملکرد پتانسیل، خلأ عملکرد، اصلاح رقم و بررسی اثر تغییرات اقلیمی در گیاه گندم استفاده کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور به‌خاطر فراهم کردن امکان دسترسی و استفاده از داده‌های هواشناسی مورد نیاز در این مطالعه صمیمانه تشکر می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان تایید می‌کنند که این تحقیق در غیاب هرگونه روابط تجاری یا مالی می‌تواند به عنوان تضاد منافع بالقوه تعبیر شود، انجام شده است.

رعایت اخلاق در نشر

نویسندگان اعلام می‌کنند که در نگارش این مقاله به‌طور کامل از اخلاق نشر از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و انتشار دوگانه، پیروی کرده‌اند. همچنین این مقاله حاصل یک کار تحقیقاتی اصیل بوده و تاکنون به‌طور کامل به هیچ زبانی و در هیچ نشریه یا همایشی چاپ و منتشر نشده است و هیچ اقدامی نیز برای انتشار آن در هیچ نشریه یا همایشی صورت نگرفته و نخواهد گرفت.

اجازه انتشار مقاله

نویسندگان با چاپ این مقاله به‌صورت دسترسی باز موافقت کرده و کلیه حقوق استفاده از محتوا، جدول‌ها، شکل‌ها، تصویرها و غیره را به ناشر واگذار می‌کنند.

References

- Abidi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2024). Identifying plant traits to increase wheat yield under irrigated conditions. *Heliyon*, 10: e31734. doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e31734](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31734).
- Ahmadi, K., Ebadzadeh, H. R., Hatami, F., Mohammadnia Afrouzi, Sh., Esfandiari Pour, A., & Abbas Taghani, R. (2021). Agricultural Statistics Yearbook, 2019-2020. Vol. I: Crop Products. Information and Communications Technology Center, Deputy of Planning and Economics, Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran. [In Persian].
- Alimagham, S. M., Soltani, A., Vadez, V., Zeinali, E., & Zand, E. (2020). Irrigated wheat (*Triticum aestivum* L.) traits effects on potential yield under current and future climates in Iran. *Journal of Agroecology*, 12(3), 413-431. [In Persian]. doi: [10.22067/jag.v12i3.75590](https://doi.org/10.22067/jag.v12i3.75590).
- Arab Ameri, R., Soltani, A., Zeinali, E., Kamkar B., & Khavari, F. (2012). Estimation of some parameters associated with nitrogen accumulation and remobilization in spring bread wheat cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 14(1), 1-15. [In Persian]. dor: [20.1001.1.15625540.1391.14.1.1.2](https://doi.org/20.1001.1.15625540.1391.14.1.1.2).
- Bakhshandeh, E., Soltani, A., Zeinali, E., Kalateh-Arabi, M., & Ghadiryan, R. (2012). Evaluation of allometric relationships between leaf area and vegetative characteristics in bread and durum wheat cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 13(4), 642-657. [In Persian]. dor: [20.1001.1.15625540.1390.13.4.4.4](https://doi.org/20.1001.1.15625540.1390.13.4.4.4).
- Bregaglio, S., Willocquet, L., Kersebaum, K. C., Ferrise, R., Stella, T., Ferreira, T. B., Pavan, W., Asseng, S., & Savary, S. (2021). Comparing process-based wheat growth models in their simulation of yield losses caused by plant diseases. *Field Crops Research*, 265, 108108. doi: [10.1016/j.fcr.2021.108108](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108108).
- Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM-iCrop2) for potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield in Iran. *Potato Research*, 63, 545-563. doi: [10.1007/s11540-020-09456-y](https://doi.org/10.1007/s11540-020-09456-y).
- Fuchs, W. (2021). Parameterisation and evaluation of the crop growth model SSM-iCrop for winter wheat grown in Eastern Austria. Ph. D. Dissertation, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria.
- Ghanbari, A., Fakheri, B., Amiri, E., & Tavassoli, A. (2014). Evaluation nitrogen and radiation use efficiency of wheat (*triticum aestivum*) under irrigation nitrogen fertilizer levels. *Journal of Crop Ecophysiology*, 8(1), 41-56. [In Persian].
- Hammer, G. L., van Oosterom, E., McLean, G., Chapman, S. C., Broad, I., Harland, P., & Muchow, R. C. (2010). Adapting APSIM to model the physiology and genetics of complex adaptive traits in field crops. *Journal of Experimental Botany*, 61(8), 2185-2202. doi: [10.1093/jxb/erq095](https://doi.org/10.1093/jxb/erq095).
- Jamieson, P. D. & Semenov, M. A., (2000). Modelling nitrogen uptake and redistribution in wheat. *Field Crops Research*, 68, 21-29. doi: [10.1016/S0378-4290\(00\)00103-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00103-9).

- Khalilzadeh, Gh., Arshad, Y., Rezaei, M., & Eivazi, A. (2011). Evaluation of yield, yield components, nitrogen uptake and use efficiency in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Research in Crop Sciences*, 4(14), 121-138. [In Persian].
- Link, J., Batchelor, W. D., Graeff, S., & Claupein, W. (2008). Evaluation of current and model-based site-specific nitrogen applications on wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and environmental quality. *Precision Agriculture*, 9, 251-267. doi: [10.1007/s11119-008-9068-y](https://doi.org/10.1007/s11119-008-9068-y).
- Lollato, R. P., Edwards, J. T., & Ochsner, T. E. (2017). Meteorological limits to winter wheat productivity in the U.S. southern Great Plains. *Field Crops Research*, 203, 212-226. doi: [10.1016/j.fcr.2016.12.014](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.014).
- Ma, G., Liu, W., Li, S., Zhang, P., Wang, C., Lu, H., Wang, L., Xie, Y., Ma, D., & Kang, G. (2019). Determining the optimal N input to improve grain yield and quality in winter wheat with reduced apparent N loss in the North China Plain. *Frontiers in Plant Science*, 10, 181. doi: [10.3389/fpls.2019.00181](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00181).
- Manschadi, A. M., Eitzinger, J., Breisch, M., Fuchs, W., Neubauer, T., & Soltani, A. (2020). Full parameterisation matters for the best performance of crop models: Inter-comparison of a simple and a detailed maize model. *International Journal of Plant Production*, 15, 61-78. doi: [10.1007/s42106-020-00116-2](https://doi.org/10.1007/s42106-020-00116-2).
- Manschadi, A. M., Palka, M., Fuchs, W., Neubauer, T., Eitzinger, J., Oberforster, M., & Soltani, A. (2022). Performance of the SSM-iCrop model for predicting growth and nitrogen dynamics in winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 135, 126487. doi: [10.1016/j.eja.2022.126487](https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126487).
- Monteith, J. L. (1965). Light distribution and photosynthesis in field crops. *Annals of Botany*, 29, 17-37. doi: [10.1093/oxfordjournals.aob.a083934](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a083934).
- Naderi, A., Majidi Harvan, E., Hashemi Dezfali, A., Nour Mohammadi, Gh., & Rezaei, A. (2000). Genetic variation for dry matter and nitrogen accumulation in grain of spring wheat genotypes under optimum and post-anthesis drought stress conditions. I. Grain yield and its related traits. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 2(2), 58-61. [In Persian]. doi: [20.1001.1.15625540.1379.2.2.6.5](https://doi.org/20.1001.1.15625540.1379.2.2.6.5).
- Navabpour, S., & Kazemi, G. (2013). Study the relations between grain yield and related traits in wheat by path analysis. *Crop Production*, 6(1), 191-203. [In Persian]. doi: [20.1001.1.2008739.1392.6.1.11.7](https://doi.org/20.1001.1.2008739.1392.6.1.11.7).
- Nehbandani, A., Soltani, A., Zeinali, E., Raeisi, S., & Rajabi, R. (2015). Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for Prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. *Journal of Plant Production Research*, 22(3), 1-26. [In Persian]. doi: [20.1001.1.23222050.1394.22.3.1.2](https://doi.org/20.1001.1.23222050.1394.22.3.1.2).
- Ritchie, J. T. (1991). Wheat phasic development. In: Hanks, J., & Ritchie, J. T. (Eds.). *Modeling Plant and Soil Systems*. Agronomy Monograph. Vol. 31. ASA, CSSA, SSSA, Medison, USA. pp. 31-54. doi: [10.2134/agronmonogr31.c3](https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c3).
- Salehi, F., Abdollahi, M., & Abdollahi, Z. (2013). Optimal food basket for Iranian society. Andisheh Mandegar Publications, Qom, Iran. 60 p. [In Persian].
- SPII. (2015). Introduction of Crop Cultivars: Food Safety and Health. Vol. 1. Seed and Plant Improvement Institute (SPII), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO). 234 p. [In Persian].
- Shiukhy Soqanloo, S., Mousavi Baygi, M., Torabi, B., & Raeini Sarjaz, M. (2023). Evaluating the SSM model efficiency in simulating the wheat growth under water stress conditions. *Journal of Water & Soil*, 37(3), 353-366. doi: [10.22067/jsw.2023.80355.1237](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237).
- Sinclair, T. R. (1986). Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. *Field Crops Research*, 15(2), 125-141. doi: [10.1016/0378-4290\(86\)90082-1](https://doi.org/10.1016/0378-4290(86)90082-1).
- Sinclair, T. R., Soltani, A., Marrou, H., Ghanem, M., & Vadez, V. (2020). Geospatial assessment for crop physiological and management improvements with examples using the simple simulation model. *Crop Science*, 60(2), 700-708. doi: [10.1002/csc2.20106](https://doi.org/10.1002/csc2.20106).
- Soltani, A. (2009). Mathematical modeling in field crops. Jahad Daneshgahi Publications, Mashhad (1th Ed.). 175 p. [In Persian].
- Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R.S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., van Ittersum, M. K., & Sinclair, T. R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, 102855. doi: [10.1016/j.agsy.2020.102855](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102855).

- Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T. R. (2013). SSM-wheat: A simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, 7(4), 711-740. doi: [10.22069/IJPP.2013.1266](https://doi.org/10.22069/IJPP.2013.1266).
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124(2), 252-260. doi: [10.1016/j.fcr.2011.06.021](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021).
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. CABI, Wallingford, UK. 322 p. ISBN: 978-1-84593-970-0.
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*, 175, 37-46. doi: [10.1016/j.fcr.2014.10.019](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.019).
- Soufizadeh, S., Munaro, E., McLean, G., Massignam, A., van Oosterom, E. J., Chapman, S. C., Messina, C., Cooper, M., & Hammer, G. L. (2018). Modelling the nitrogen dynamics of maize crops – Enhancing the APSIM maize model. *European Journal of Agronomy*, 100, 118-131. doi: [10.1016/j.eja.2017.12.007](https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.007).
- Wang, H., Zhang, Y., Chen, A., Liu, H., Zhai, L., Lei, B., & Ren, T. (2017). An optimal regional nitrogen application threshold for wheat in the North China Plain considering yield and environmental effects. *Field Crops Research*, 207, 52-61. doi: [10.1016/j.fcr.2017.03.002](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.03.002).
- Yousefidaz, M., Soltani, A., Galeshi, S., & Zeinali, E. (2014). Optimization of the nitrogen fertilizer management of wheat in Gorgan: Rate and time of nitrogen application. *Crop Production*, 7(4), 81-102. [In Persian]. dor: [20.1001.1.2008739.1393.7.4.5.4](https://doi.org/20.1001.1.2008739.1393.7.4.5.4).
- Zhao, Z., Wang, E., Wang, Z., Zang, H., Liu, Y., & Angus, J. F. (2014). A reappraisal of the critical nitrogen concentration of wheat and its implications on crop modeling. *Field Crops Research*, 164(1), 65-73. doi: [10.1016/j.fcr.2014.05.004](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.05.004).