



Evaluating the SSM Model Efficiency in Simulating the Wheat Growth under Water Stress Conditions

S. Shiukhy Soqanloo^{1*}, M. Mousavi Baygi², B. Torabi³, M. Raeini Sarjaz⁴

Received: 01-01-2023

Revised: 18-01-2023

Accepted: 03-06-2023

Available Online: 03-06-2023

How to cite this article:

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 and Soil*, 37(3), 353-366. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237>

Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) has become very important as a valuable strategic product with high energy level. The importance of investigating environmental stresses and their role in predicting and evaluating the growth and crops yield is essential. A wide range of plant response to stress is extended to morphological, physiological and biochemical responses. Considering the rapid advancement in computer model development, plant growth models have emerged as a valuable tool to predict changes in production yield. These growth simulation models effectively incorporate the intricate influences of various factors, such as climate, soil characteristics, and management practices on crop yield. By doing so, they offer a cost-effective and time-efficient alternative to traditional field research methods.

Material and Methods

This research was conducted in the research farm of Varamin province, which has a silty loam soil texture. The latitude and longitude of the region are 35° 32' N and 51° 64' E, respectively. Its height above sea level is 21 meters. According to Demarten classification, Varamin has a temperate humid climate. The long-term mean temperature of Varamin is 11.18 ° C and the total long-term rainfall is 780 mm. In this study, in order to simulate irrigated wheat cv. Mehregan growth under drought stress, an experimental based on completely randomized blocks (CRBD) including: non-stress as control (NS), water stress at booting stage (WSB), water stress at flowering stage (WSF), water stress at milking stage (WSM) and water stress at doughing stage (WSD) with three replications during growth season 2019-2020 was carried out in Varamin, Iran. Crop growth simulation was done using SSM-wheat model. This model simulates growth and yield on a daily basis as a function of weather conditions, soil characteristics and crop management (cultivar, planting date, plant density, irrigation regime).

Results and Discussion

Based on the results, the simulation of the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan under water stress condition using SSM-wheat model showed that there was no difference between observed and simulated values. Summary, the values of day to termination of seed growth (TSG) were observed under non- stress, stress in the booting stage, flowering, milking and doughing of the grains, 222, 219, 219, 221, 221 days, respectively and simulation values with 224, 221, 220, 221, respectively. However, with their simulation values, there were slight differences with 224, 221, 220, 221, respectively. Acceptable values of RMSE (11.7 g.m⁻²) and CV (3.5)

1 and 4- Assistant Professor and Professor in Agrometeorology, Department of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: Saeid.Shiukhy@gmail.com)

2- Professor in Agrometeorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor, Agronomy Department, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources

DOI: [10.22067/jsw.2023.80355.1237](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237)

indexes showed the high ability of the SSM model in simulating the grain yield of irrigated wheat cv. Mehregan under water stress conditions. Grain yield values were observed in non-stress conditions of 5783, water stress in booting, flowering, milking and doughing of the grain stages in 5423, 5160, 5006 and 5100 kg. h⁻¹, respectively. While the simulated values were 5630, 5220, 4920, 4680 and 4880 kg. h⁻¹, respectively. Based on the findings, observed and simulated values of leaf area index (LAI) were observed under water stress condition in the booting, flowering, milking and doughing of the grain stages (4.3 and 4.47), (4.33) and 4.46), (4.4 and 4.57) and (4.4 and 4.58) cm⁻², respectively. Evaluation of the 1000-grain weight of irrigated wheat cv. Mehregan under the water stress showed that the SSM model was highly accurate. RMSE (4.6 g.m⁻²) and CV (1.8) values indicate the ability of the SSM model to simulate the 1000-grain weight of irrigated wheat cv. Mehregan. Also, the simulated values of the harvest index were 34.7 % in non-stress conditions, which decreased by 6 % compared to the observed value. Harvest index values were observed under water stress conditions in the in the booting, flowering, milking and doughing of the grain stages in 30.2, 29.3, 29.9 and 29.5 %, respectively. Compared to its observed values, it was reduced by 3, 3.5, 5, and 5.5 %, respectively.

Conclusion

Based on the findings, the slight difference between the observed and simulated values demonstrates the SSM model's capability to accurately capture water stress impacts on the phenological stages, grain yield, and yield components of irrigated wheat cv. Mehregan during critical growth stages, including booting, flowering, milking, and doughing. The results indicate that the SSM model is effective in simulating wheat growth under water stress conditions, showcasing its potential as a valuable tool for modeling irrigated wheat growth. The model's ability to account for water stress and its effects on various growth parameters makes it a reliable and efficient tool for predicting crop performance in water-limited environments.

Keywords: Crop model, Flowering, Grain yield, Simulation, Wheat

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۳۴۶-۳۵۳

ارزیابی کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم تحت شرایط تنش آبی

سعید شیوخی سوغانلو^{۱*} - محمد موسوی بایگی^۲ - بنیامین ترابی^۳ - محمود رائینی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳

چکیده

ارزیابی کارایی مدل SSM، در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان تحت شرایط تنش آبی، با انجام آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (CRBD) در ۳ تکرار با پنج تیمار آزمایشی شامل: [شرایط بدون تنش (NS)، تنش در مرحله آبستنی (WSB)، تنش در مرحله گلدهی (WSF)]، تنش در مرحله شیرگی شدن (WSM) و تنش در مرحله خمیری شدن دانه (WSD)]، در ورامین صورت گرفت. شبیه‌سازی رشد و نمو با بهره‌گیری از مدل گیاهی SSM-Wheat انجام شد. بر پایه یافته‌ها، میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وقوع مراحل فنولوژیکی گندم در شرایط بروز تنش تفاوت چندانی مشاهده نشد. به‌اختصار، مقادیر مشاهده شده روز تا پایان پر شدن دانه در شرایط بدون تنش، تنش در مراحل آبستنی، گلدهی، شیرگی شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب ۲۲۲، ۲۱۹، ۲۱۹، ۲۲۱، ۲۲۱ روز، مشاهده شد که با مقادیر شبیه‌سازی شده آنها به ترتیب ۲۲۴، ۲۲۱، ۲۲۰، ۲۲۱، ۲۲۱ اختلاف بسیار کمی داشت. همچنین تفاوت اندک در مقادیر مشاهده شده عملکرد دانه به ترتیب (۵۷۸۳/۶، ۵۴۲۳، ۵۱۶۰، ۵۰۰۶ و ۵۱۰۰ کیلو گرم در هکتار) و مقادیر شبیه‌سازی شده آنها به ترتیب (۵۶۳۰/۴، ۵۲۲۰، ۴۹۲۰، ۴۶۸۰ و ۴۸۸۰ کیلو گرم در هکتار)، نشان از کارایی مطلوب مدل SSM در درک بروز تنش آبی داشت.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، عملکرد دانه، گلدهی، گندم، مدل گیاهی

مقدمه

۲۲/۳۶ درصد از کشت دیم بدست آمده است (Shiukhy-Soqanloo *et al.*, 2021a).

اهمیت بررسی تنش‌های محیطی و نقش آنها در پیش‌بینی و ارزیابی رشد و عملکرد محصولات زراعی ضروری می‌باشد. تنش‌های غیر زیستی محدودیتی قابل توجهی برای تولید محصول و امنیت غذایی در سرتاسر جهان محسوب می‌شوند. و این وضعیت به دلیل تغییرات شدید و سریع آب و هوای جهانی تشدید شده است (Wei *et al.*, 2018). تنش آبی را بدون شک می‌توان عاملی بسیار حائز اهمیت، که تأثیر زیادی بر رشد و بهره‌وری محصولات گیاهی دارد، قلمداد نمود.

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین گیاهان زراعی شناخته شده در جهان می‌باشد (Baygi *et al.*, 2016). گندم به‌عنوان یک محصول استراتژیک با ارزش و دارای سطح انرژی بالا، اهمیت بسیار زیادی پیدا کرده است (Shiukhy-Soqanloo *et al.*, 2021b). سطح زیر کشت گندم کشور حدود ۴۱/۶ میلیون هکتار برآورد شده است که ۴۲/۳۷ درصد آن آبی و ۵۷/۶۳ درصد به صورت دیم بوده است. میزان تولید گندم کشور حدود ۴۴/۱۳ میلیون تن برآورد شده است که ۷۷/۶۴ درصد آن سهم کشت آبی و

۱ و ۴- به‌ترتیب استادیار و استاد هوشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران (*- نویسنده مسئول: Email: Saeid.Shiukhy@gmail.com)

۲- استاد هوشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی، ایران

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

شود (Soltani and Sinclair, 2012). مدل‌های شبیه‌سازی رشد با در نظر گرفتن اثرات پیچیده عواملی مانند آب و هوا، خصوصیات خاک و فاکتورهای مدیریتی بر عملکرد گیاه سبب کاهش هزینه‌ها و زمان در مقایسه با تحقیقات مزرعه‌ای می‌شوند (Delghandi et al., 2014). تا کنون مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی و رشد و نمو گیاهان انجام شده است که می‌توان به، پولنس و همکاران (Pullens et al., 2019) با ترکیب مدل پایه BRASNAP-PH با مدل Agriclim؛ پیرتوجا و همکاران (Pirttioja et al., 2019) با استفاده از مدل IRSs؛ بارلو و همکاران (Barlow et al., 2015) با بهره‌گیری از مدل APSIM-Nwheat؛ کلانکی و همکاران (Kalanaki et al., 2018) با استفاده از مدل DSSAT-CERES Maize؛ سلطانی و همکاران (Soltani and Sinclair, 2011) با به‌کارگیری مدل SSM، اشاره کرد. در مجموع، با توجه به شرایط اقلیمی بسیار خشک منطقه، وجود محدودیت در استفاده از منابع آب و توزیع نامناسب بارندگی‌ها و بویژه توقف بارش‌ها پیش از کامل شدن رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان در منطقه ورامین، که کشاورزان را با مشکل جدی مواجه ساخته است. هدف از این پژوهش بر مبنای ارزیابی کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان تحت تنش آبی بنا نهاده شد.

مواد و روش‌ها

محل اجرای آزمایش

روستای خاوه واقع در شهرستان ورامین دارای طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۵۱/۶۴ درجه شرقی و ۳۵/۳۲ درجه شمالی است. شرایط آب و هوایی محل آزمایش براساس طبقه‌بندی اقلیمی در سیستم دوماتن، خشک سرد، با میانگین دمای سالانه بلند مدت ۱۷/۳ درجه سلسیوس، میانگین سالانه بارندگی بلند مدت ۲۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۹۰/۸ متر بالاتر از سطح دریا می‌باشد.

بافت غالب در لایه سطحی لوم-رسی-شنی و در محدوده‌ی ۱۰۰-۳۰ سانتی‌متری لوم رسی می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ ارایه گردید.

درک مداخلات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و محیطی مربوط به این تنش به‌منظور مدیریت بهتر، بسیار مهم و حیاتی است. طیف وسیعی از پاسخ گیاهان به این تنش، به پاسخ‌های مورفولوژی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تعمیم داده می‌شود (Fahad et al., 2017).

زالی و همکاران (Zali et al., 2020)، با توجه به اینکه گستره‌ی کلانی از مناطق ایران دارای اقلیم اقلیم خشک و نیمه‌خشک بوده، تنش آبی را عامل مهم محدود کننده رشد و نمو گیاهان زراعی بیان کرده و آن را به‌عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدها برای تولید، بویژه گیاهان زراعی دانه‌ای در ایران به‌شمار آوردند. محمودی و افکاری (Mahmoudi et al., 2020)، اظهار داشتند که توزیع نامناسب بارندگی‌ها و توقف بارش‌ها پیش از کامل شدن رشد و نمو گیاه، باعث می‌شود که در مراحل رشد رویشی و زایشی، گیاه تحت تأثیر تنش میانی و انتهایی دوره رشد قرار گیرد. بر پایه نتایج ما و همکاران (Ma et al., 2020)، پاسخ گیاهان به شرایط تنش بسیار پیچیده است و به عوامل دیگری مانند گونه و ژنوتیپ، سن و اندازه گیاه، میزان رشد و همچنین شدت و مدت تنش بستگی دارد.

کمبود آب در طی مراحل مختلف رشد می‌تواند مقادیر اجزای عملکرد را تغییر دهد. کمبود آب در طی مراحل مختلف رشد می‌تواند مقادیر اجزای عملکرد از جمله؛ تعداد گیاهان در واحد سطح، تعداد سنبله‌ها و دانه‌ها در بوته و غیره را تغییر دهد. به عبارت دیگر، کمبود آب در مراحل مختلف رشد گیاه می‌تواند اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی داشته باشد (Gonzalez et al., 2010). مهربان و همکاران (Mehraban et al., 2019)، با بررسی تأثیر تنش آبی بر عملکرد و اجزای عملکرد بیان کردند که تنش آبی در طول مراحل مختلف پدیده‌شناسی گندم، باعث تغییراتی در مقادیر ارتفاع گیاه، دوره‌ی پر شدن دانه، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و عملکرد نهایی دانه نسبت به شرایط بدون تنش آبی گردید. نتایج سعیدی و عبدولی (Saeidi and Abdoli, 2015) نیز حاکی از کاهش عملکرد دانه، زیست توده، وزن هزار دانه و شاخص برداشت در شرایط کمبود آب بویژه در مرحله پس از گلدهی بود.

امروزه با توجه به سرعت گسترش مدل‌های کامپیوتری بویژه در بخش کشاورزی می‌توان از مدل‌های رشد گیاهی به‌عنوان ابزاری مناسب، به‌منظور دستیابی به درک صحیح از نحوه تغییرات عملکرد تولید، بر اساس تغییرات نهاده‌ها و عوامل محیطی استفاده کرد (Paknejad et al., 2017). مدل‌های رشد گیاهی مبتنی بر فرآیند در بسیاری از مطالعات، برای برآورد عملکرد محصول استفاده می‌شوند (Saeidi et al., 2010). تعیین راهکارهای بهینه به‌زراعی و به‌نژادی مبتنی بر تحقیقات و آزمایش‌های مزرعه‌ای می‌باشد. لذا صرف هزینه و انرژی زیاد به‌همراه زمان بر بودن آنها، سبب بروز مشکلات فراوانی می‌

شده روز تا وقوع هر یک از مراحل فنولوژیکی وجود نداشت (جدول ۲). بر پایه یافته‌ها، مدل رشد و نمو گیاهی SSM اثرات بروز تنش آبی در مراحل مختلف فنولوژیکی گندم را درک و با دقت بسیار خوبی شبیه سازی نمود.

به طور مثال، در بروز تنش آبی در مرحله گلدهی میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تعداد روز تا گلدهی، تفاوتی چندان قابل توجهی مشاهده نشد. به طوری که در شرایط بدون تنش مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۱۸۱ و ۱۸۴ روز بود، که اختلاف چندان نداشتند. در شرایط بروز تنش هم اختلاف بسیار ناچیزی میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مشاهده شد، به طوری که در شرایط بروز تنش در مراحل روز تا آستنی، شروع پر شدن و پایان پر شدن دانه به ترتیب (۱۶۴ و ۱۶۵)، (۱۹۴ و ۱۹۶) و (۲۲۱ و ۲۲۳) بود. به اختصار، مقادیر نمایه ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE = 4.4 \text{ day}$) و آماره ضریب تغییرات ($CV = 2.4$) در صفات روز تا گلدهی و ($RMSE = 1.4 \text{ day}$) و ($CV = 1.5$) در روز تا پایان پر شدن دانه، موید بسیار خوب و قابل پذیرشی از توانایی مدل SSM در شبیه‌سازی آنها بود (شکل ۲-الف و ۲-ب).

عملکرد و اجزای عملکرد

ارزیابی شبیه‌سازی عملکرد گندم آبی رقم مهرگان در طول دوره‌ی رشد و نمو در شرایط بروز تنش آبی با استفاده از مدل SSM، بیانگر آن بود که مدل علاوه بر شبیه‌سازی قابل قبول مراحل فنولوژیکی، توانایی لازم برای شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم آبی رقم مهرگان را نیز داشت. مقادیر قابل قبول نمایه ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE = 11.7 \text{ g.m}^2$) و آماره ضریب تغییرات ($CV = 3.5$) نیز نشان از توانایی بالای مدل SSM در شبیه‌سازی عملکرد گندم آبی رقم مهرگان تحت شرایط بروز تنش آبی داشت (شکل ۳).

بر پایه یافته‌ها، مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در شرایط بدون تنش $5783/6$ و $5630/4$ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین مقادیر مشاهده شده در شرایط بروز تنش آبی در مراحل فنولوژیکی آستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب $5423/2$ ، 5160 ، $5006/5$ و 5100 کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. این در حالی بود مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه به ترتیب با 5220 ، 4920 ، 4680 و 4880 کیلوگرم در هکتار اختلاف بسیار اندکی را نشان دادند (شکل ۴).

محیط نرم افزار با استفاده از درجه‌بندی خط‌کش برحسب سانتی‌متر اقدام به تنظیمات مقیاس^۱ شد. سپس مساحت هر برگ با مرزبندی پیرامون برگ محاسبه شد. ارتفاع گیاه با اندازه‌گیری ارتفاع ۱۰ ساقه که به طور تصادفی انتخاب و کف‌بر شدند، با اندازه‌گیری طول گیاه از سطح خاک تا انتهای سنبله به دست آمد. برای اندازه‌گیری وزن هزار دانه و تعداد دانه در سنبله، تعداد ۲۰ سنبله از کوادرات (20×20) انتخاب و به ترتیب توزین و شمارش شدند. برای اندازه‌گیری زیست توده، مساحت ۱ متر مربع از مرکز هر کرت انتخاب و ساقه‌ها از سطح خاک کف‌بر شده و در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. پس از توزین نمونه عملکرد زیست توده محاسبه شد. در نهایت شاخص برداشت از تقسیم مقادیر عملکرد دانه بر زیست توده (بر حسب درصد) محاسبه شد.

مدل شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهی SSM

برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان از مدل SSM- Wheat استفاده شد (Soltani and Sinclair, 2011). این مدل رشد و نمو و عملکرد را به صورت روزانه به عنوان تابعی از شرایط آب و هوایی (با استفاده از پارامترهای دمای بیشینه، کمینه، بارندگی و تابش خورشیدی)، خصوصیات خاک و مدیریت زراعی (رقم، تاریخ کاشت، تراکم بوته، رژیم آبیاری) شبیه‌سازی می‌کند. این مدل توانایی شبیه سازی مراحل فنولوژیکی، گسترش و پیری برگ، تاثیر خشکی هوا، شوری و CO_2 بر تولید ماده خشک، توزیع ماده خشک، تاثیر دماهای آستانه (دماهای بالا و پایین) بر سطح برگ، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد (Soltani and Sinclair, 2012). در این پژوهش با بهره‌گیری از نمایه ریشه میانگین مربعات خطا^۲ و ضریب تغییرات^۳ ارزیابی تفاوت داده‌های مشاهده شده و داده‌های شبیه‌سازی شده صورت گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - S_i)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

که O_i و S_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، و n تعداد مشاهدات می‌باشند.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

که μ و σ به ترتیب انحراف معیار و میانگین جامعه را نشان می‌دهند.

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی وقوع مراحل فنولوژیکی گندم آبی مهرگان تحت شرایط تنش آبی با استفاده از مدل SSM، نشان داد تفاوت چندان قابل ملاحظه‌ای بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی

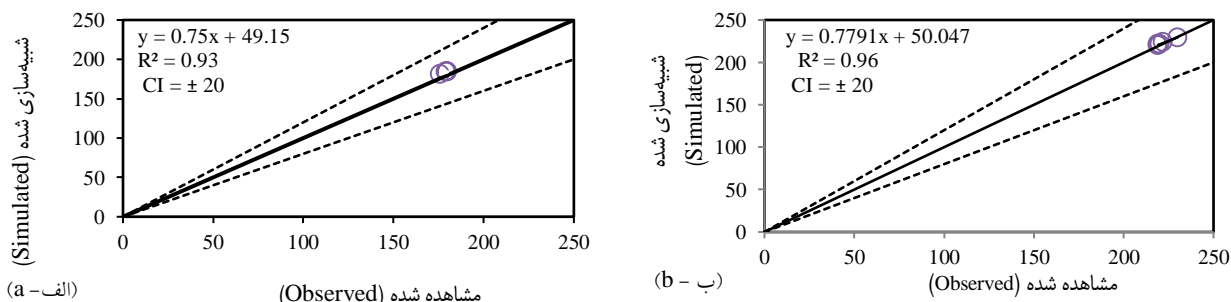
جدول ۲- مقایسه مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده مراحل فنولوژیکی تحت تنش آبی

Table 2- Comparison of observed and simulated values of phenological stages under water stress

مراحل فنولوژیکی Phenologic st.	بدون تنش Non-Stress		مرحله آبستنی Booting st.		مرحله گلدهی Flowering st.		مرحله شیری شدن دانه Milking st.		مرحله شیری شدن دانه Doughing st.	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
	سبز شدن Emergence	5	4	5	4	5	4	5	4	5
پنجه‌زنی Tillering	17	16	17	16	17	16	17	16	17	16
ساقه‌دهی Stem elongation	120	118	120	118	120	118	120	118	120	118
آبستنی Booting	166	164	164	165	164	166	164	166	164	166
خوشه‌دهی Heading	170	169	166	168	169	170	169	170	169	170
گلدهی Flowering	184	181	176	181	181	184	181	184	181	184
شروع پر شدن دانه BSG	196	194	186	188	192	194	196	194	196	194
پایان پر شدن دانه TSG	224	222	219	221	219	220	221	221	221	221
رسیدگی Maturity	231	230	230	229	230	229	230	229	230	229

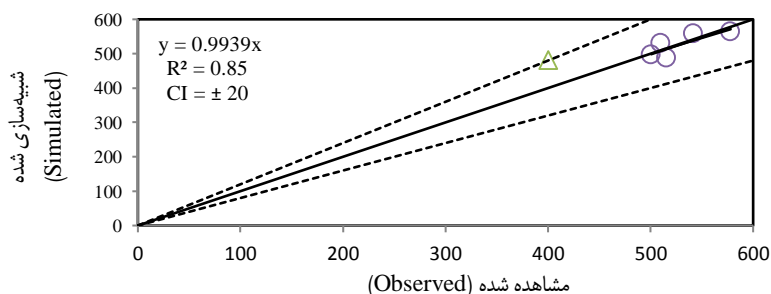
اعداد در هر ستون بر حسب روز پس از کاشت (DAP) می‌باشند

The numbers in each column are days after planting



شکل ۲- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تعداد روز تا گلدهی (الف) و پایان پر شدن دانه (ب) تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

Figure 2- Comparison of the observed and simulated values of days to flowering (a) and the termination of seed growth (b) under water stress at during the growth season using SSM model



شکل ۳- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

Figure 3- Comparison of the observed and simulated values of grain yield under water stress during the growth season using SSM model

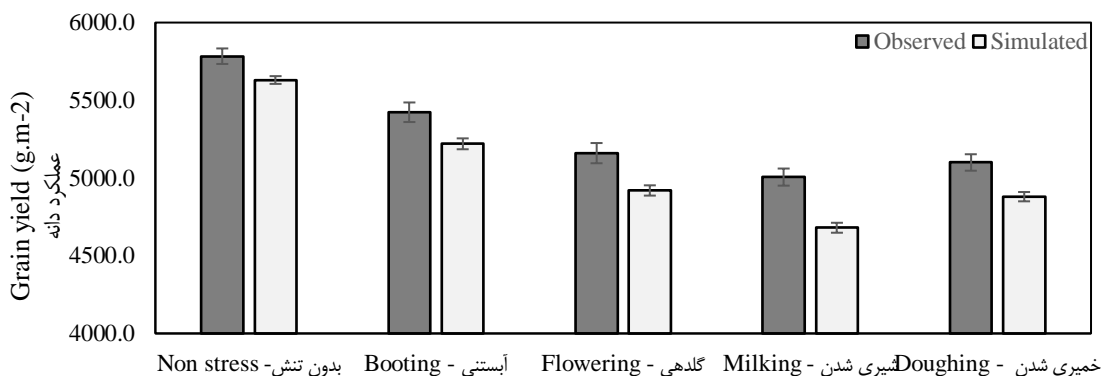
شرایط تنش آبی در مراحل مختلف فنولوژیکی، همخوانی داشت.

تولید ماده خشک

بررسی مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده میزان تولید ماده خشک حاکی از آن بود که اختلاف بسیار اندکی میان آنها مشاهده شد و این اختلاف اندک، گویای درک مدل SSM از بروز تنش آبی و توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی میزان تولید ماده خشک گندم آبی مهرگان تحت شرایط بروز تنش آبی در مراحل فنولوژیکی مختلف مورد بررسی بود. مقادیر نمایه ریشه مربعات خطا (RMSE= 11.4g.m²) و ضریب تغییرات (CV= 1.7) موید برتری مدل SSM در شبیه‌سازی تولید ماده خشک در گندم آبی رقم مهرگان بود (شکل ۵).

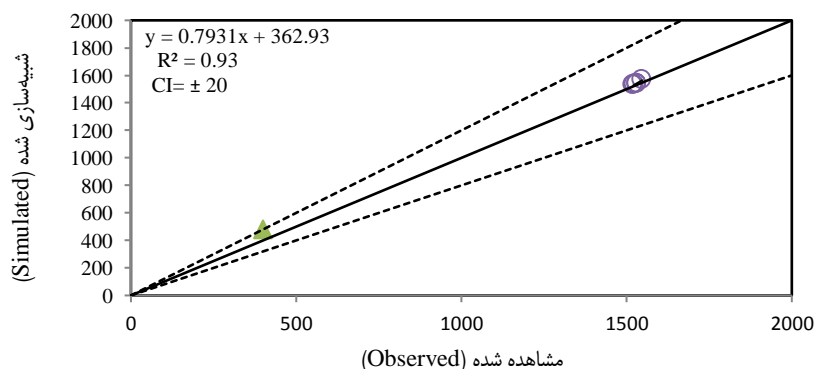
مکاری و همکاران (Mokari et al., 2020)، بیان کردند که وجود طول روز کافی و مناسب و دمای مطلوب در طول سپری کردن مراحل فنولوژیکی بویژه گلدهی و پر شدن دانه‌ها، منجر به افزایش عملکرد خواهد شد.

نتایج عبداللهی (Abdollahi, 2015)، نیز نشان داد که در طول مرحله پر شدن دانه‌ها تنش آبی و دمای بالا بر روی عملکرد دانه تاثیر منفی بر جای گذاشت. کشت با تاخیر و وجود دماهای پایین در مراحل اولیه رشد و نمو گیاه در مناطق دارای زمستان‌های بسیار سرد، بدلیل عدم استقرار و رشد کافی گیاه برای روبرو شدن با سرمای پاییزه و همچنین وجود دماهای بالا در مناطق گرم و خشک در مراحل انتهایی رشد و نمو بویژه دوره‌ی پر شدن دانه‌ها، عملکرد گیاه دچار کاهش خواهد شد (Mokari et al., 2020). همسنجی یافته‌های این پژوهش با نتایج مهربان و همکاران (Mehraban et al., 2019) و گونزالز و همکاران (Gonzalez et al., 2010) مبنی بر کاهش عملکرد گندم در



شکل ۴- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در شرایط تنش آبی در مراحل مختلف فنولوژیکی گندم آبی رقم مهرگان

Figure 4- Comparison of the observed and simulated values of grain yield under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan



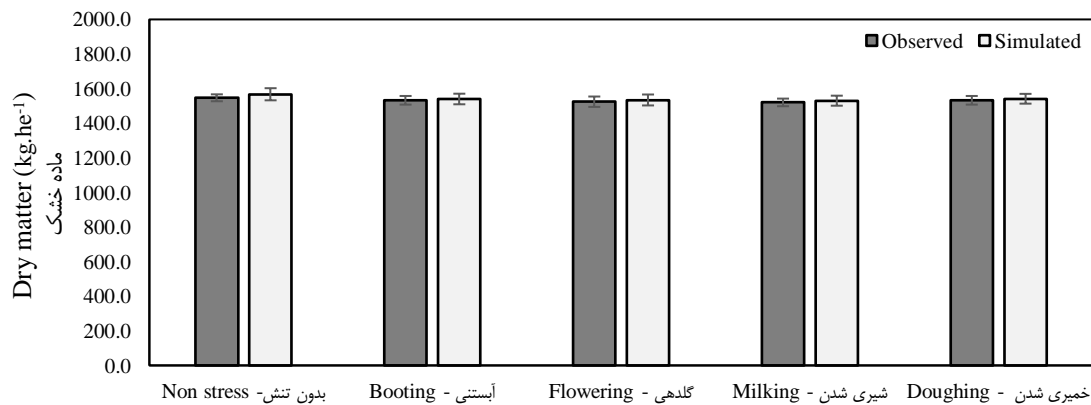
شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده ماده خشک کل تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

Figure 5- Comparison of the observed and simulated values of total dry matter under water stress during the growth season using SSM model

شاخص سطح برگ

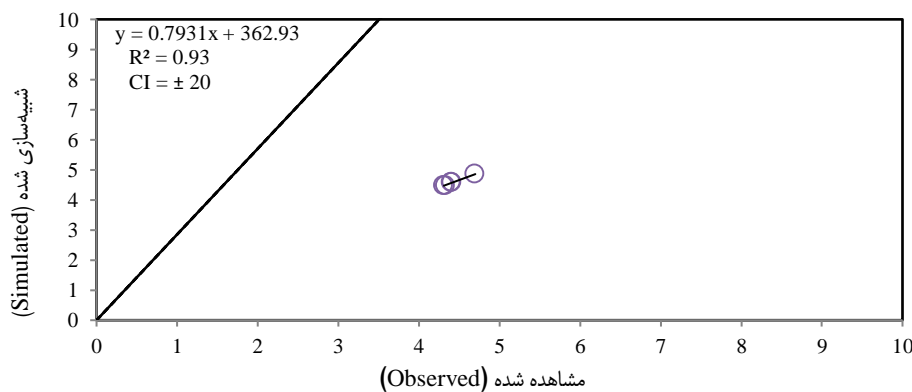
نتایج ارزیابی شبیه‌سازی شاخص سطح برگ نشان‌دهنده دقت خوب مدل SSM در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ داشت. تفاوت بسیار ناچیز میزان سطح برگ میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و همچنین مقادیر قابل قبول نمایه ریشه مربعات خطا ($RMSE=1.4 \text{ cm}^2$) و ضریب تغییرات ($CV=3.3$) نیز بیانگر تشخیص مدل SSM در بروز تنش آبی در طول دوره‌ی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان بود (شکل ۷).

بر اساس نتایج بدست آمده مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده تولید ماده خشک در شرایط بدون تنش آبی به ترتیب ۱۵۴۷ و ۱۷۰۱/۷ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. این در حالی بود که مقادیر مشاهده شده تولید ماده خشک در شرایط بروز تنش آبی در مراحل آبستنی، گلدهی، شیرینی شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب برابر با ۱۵۳۲/۶، ۱۵۲۴/۳، ۱۵۲۰/۳ و ۱۵۳۲/۶ کیلوگرم در هکتار بود که با مقادیر شبیه‌سازی شده در این مراحل به ترتیب با ۱۶۰۹/۲، ۱۶۰۰/۵، ۱۵۶۲/۹ و ۱۶۸۵/۹ کیلوگرم در هکتار تفاوت بسیار اندکی نشان داد (شکل ۶).



شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده ماده خشک کل در شرایط تنش آبی در مراحل مختلف فنولوژیکی گندم آبی رقم مهرگان

Figure 6- Comparison of the observed and simulated values of total dry matter under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan



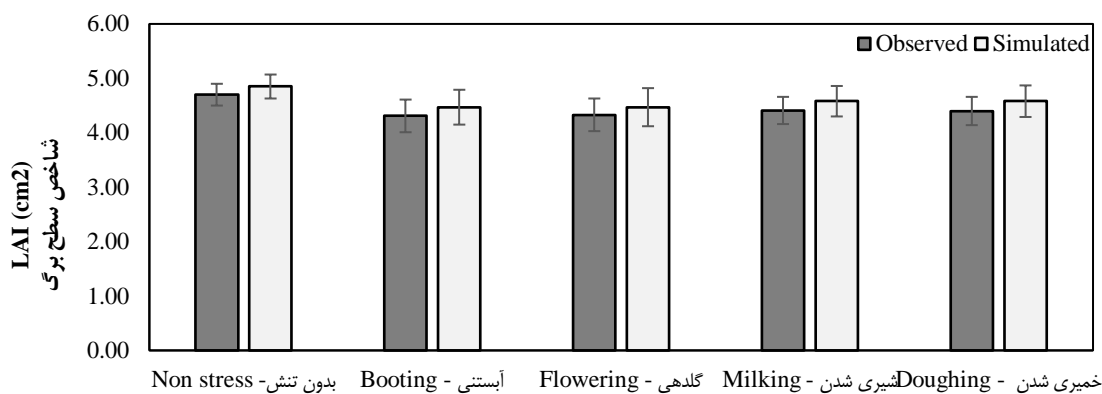
شکل ۷- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM
Figure 7- Comparison of the observed and simulated values of LAI under water stress during the growth season using SSM model

تیمارها بیان کردند. امیری ده‌احمدی (Amiri Deh-ahmadi *et al.*, 2010)، نشان دادند که وجود تنش در مرحله گلدهی و غلاف‌دهی بر تولید سطح برگ اثراتی جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت و روند پیری در گیاه را تسریع می‌دهد. که با نتایج این پژوهش مبنی بر بالاتر بودن شاخص سطح برگ در شرایط بدون تنش آبی در مقایسه با دیگر تیمارها، همخوانی داشت.

وزن هزار دانه

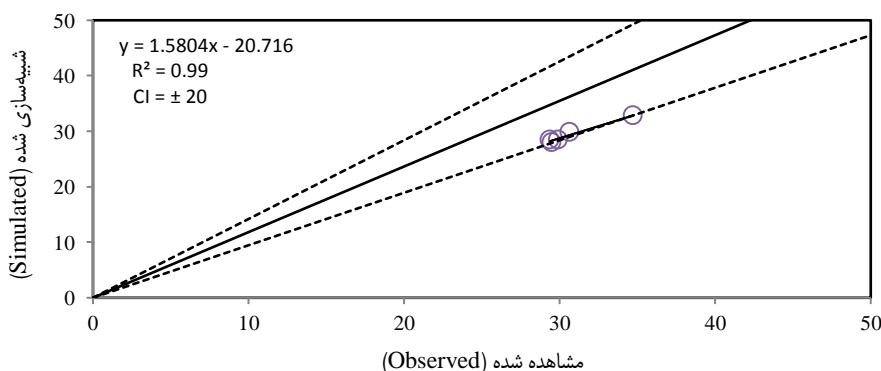
ارزیابی شبیه‌سازی وزن هزار دانه گندم آبی رقم مهرگان تحت تنش آبی نشان داد که مدل SSM با دقت بسیار بالا و قابل اطمینان توانایی شبیه‌سازی آن را داشت. به طوری که از اختلاف بسیار ناچیز میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌توان چشم‌پوشی کرد. مقادیر نمایه ریشه مربعات خطا ($RMSE= 4.6\text{ g}$) و ضریب تغییرات ($CV= 1.8$) دال بر توانایی بسیار خوب مدل SSM در شبیه‌سازی وزن هزار دانه گندم آبی رقم مهرگان تحت شرایط بروز تنش آبی بود (شکل ۹).

در شرایط بدون تنش، مقدار مشاهده شده شاخص سطح برگ $4/7$ سانتی‌متر مربع بود و مقدار شبیه‌سازی شده آن $4/85$ سانتی‌متر مربع مشاهده شد، که نشان از دقت خوب مدل SSM در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ داشت. همچنین یافته‌ها حاکی از آن بود که مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ در شرایط بروز تنش آبی در مراحل آبستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب ($4/3$ و $4/47$)، ($4/3$ و $4/46$)، ($4/4$ و $4/57$) و ($4/4$ و $4/58$) بود. همانطور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تفاوت چندانی وجود ندارد و مدل توانسته است با دقت قابل قبولی شاخص سطح برگ را شبیه‌سازی نماید (شکل ۸). در تمامی تیمارهای آزمایشی بدلیل اینکه تا پیش از آغاز مرحله آبستنی گیاه بصورت مشابه و یکسان آبیاری شد، روند رشد سطح برگ روندی افزایشی نشان داد. انتظار می‌رود که با افزایش سن گیاه و ریزش برگ ها، روند رشد سطح برگ کاهش یابد. نه‌بندانی (Nah-Bandani *et al.*, 2017)، دلیل کاهش سطح برگ نخود در شرایط تنش از آغاز مرحله گلدهی را، طولانی‌تر بودن دوره‌ی تنش آبی نسبت به دیگر



شکل ۸- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ در طول فصل رشد و نمو

Figure 8- Comparison of the observed and simulated values of LAI under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan



شکل ۹- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وزن هزار دانه تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

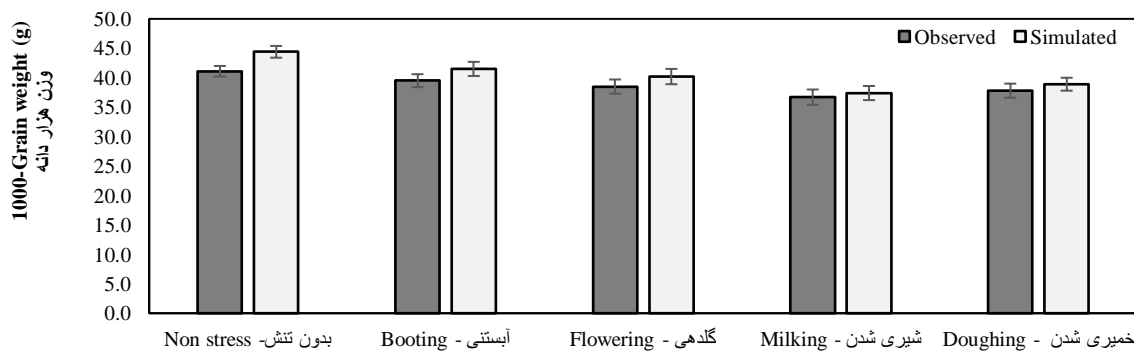
Figure 9- Comparison of observed and simulated 1000-Grain weight values under water stress during growth season using SSM model

کمتر تحت تأثیر تنش آبی قرار می‌گیرند. بنابراین، کاهش وزن و عملکرد دانه در اثر کمبود آب پس از گلدهی، ممکن است بیشتر نبود منبع جذب کننده فتو-آسیمیلات‌ها برای پر شدن دانه را نشان دهد.

شاخص برداشت

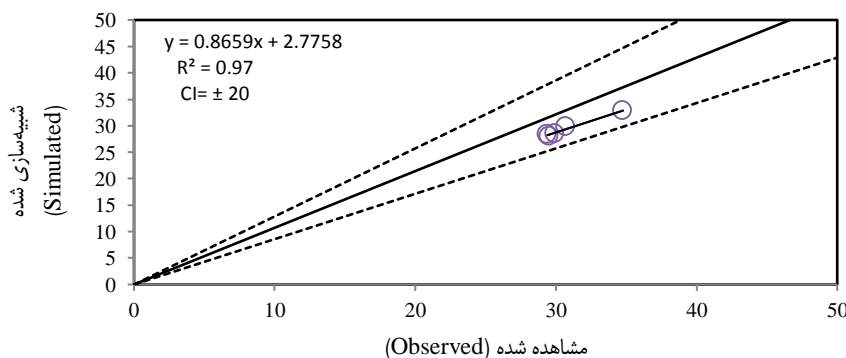
بررسی مقادیر شبیه‌سازی شده مقدار شاخص برداشت در مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی شده دچار کاهش شد اما همانند سایر اجزای عملکرد مورد بررسی، مدل SSM به خوبی و با دقت قابل پذیرش، توانایی شبیه‌سازی میزان شاخص برداشت در این شرایط را نشان داد. مقادیر نمایه ریشه مربعات خطا ($RMSE = 1.2$) و ضریب تغییرات ($CV = 4.1$) موید برتری مدل SSM در شبیه‌سازی تولید ماده خشک در گندم آبی رقم مهرگان بود (شکل ۱۱).

بر اساس یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی وزن هزار دانه گندم در شرایط بروز تنش آبی، مقادیر شبیه‌سازی شده وزن هزار دانه در بروز تنش در مراحل آبستنی، گلدهی، شیری شدن و پر شدن دانه به ترتیب ۴۱/۵، ۴۰/۲، ۳۷/۴ و ۳۸/۹ گرم بود و اختلاف بسیار اندکی با مقادیر مشاهده شده به ترتیب با ۳۹/۵، ۳۸/۵، ۳۶/۷ و ۳۷/۸ نشان داد. همچنین در شرایط بدون تنش نیز میان مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده وزن هزار دانه به ترتیب با ۴۴/۴ و ۴۱/۱ گرم، نیز تفاوت قابل توجهی مشاهده نشد (شکل ۱۰). وزن دانه به‌عنوان جزئی کلیدی در عملکرد نهایی دانه به‌شمار می‌رود که در زمان رخداد تنش‌های محیطی بویژه تنش آبی، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. سعیدی و همکاران (Saeidi et al., 2010)، اظهار داشتند که کاهش قابل توجه در عملکرد دانه به دلیل تنش آبی پس از گلدهی ممکن است در نتیجه کاهش تولید مواد فتو-آسیمیلات، افت توانایی جذب فتوآسیمیلات‌ها و مدت زمان پر شدن دانه باشد. سعیدی و عبدولی (Saeidi and Abdoli, 2015) گزارش کردند که احتمالاً فرآیندهای اولیه رشد دانه (تقسیم سلول)



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وزن هزار دانه در طول فصل رشد و نمو

Figure 10- Comparison of the observed and simulated values of 1000-grain weight under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan



شکل ۱۱- شبیه‌سازی مقادیر شاخص برداشت تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

Figure 11- Simulation of harvest index values under water stress during the growth season using SSM model

بارش‌ها پیش از کامل شدن رشد و نمو گندم، سبب شده است که، مشکلات بسیار قابل توجهی را برای کشاورزان بوجود آید. بر پایه یافته های این پژوهش، تفاوت اندک میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در وقوع مراحل فنولوژیکی، عملکرد دانه و اجزای عملکرد گندم آبی رقم مهرگان تحت شرایط بروز تنش آبی در مراحل آبستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن دانه، گویای درک مدل SSM از بروز تنش آبی بود و مدل دقت و توانایی بالایی در شبیه‌سازی آنها داشت. همچنین مقادیر قابل قبول نمایه‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تغییرات موید خوبی در بهره‌گیری از این مدل در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در شرایط بروز تنش آبی بود. لذا بر پایه نتایج، می‌توان مدل شبیه‌ساز SSM را در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در شرایط بروز تنش آبی را کارآمد دانست و در نهایت برای مدلسازی رشد و نمو گندم آبی از آن بهره گرفت.

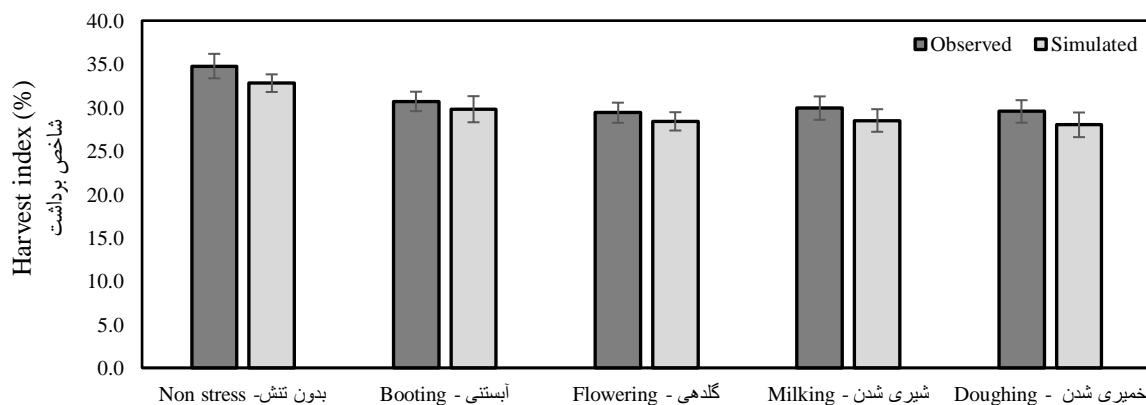
سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت و زحمات اداره آموزش و ترویج کشاورزی روستای خاوه واقع در شهرستان ورامین، کمال تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

بر پایه یافته‌ها، مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص برداشت در شرایط بدون تنش ۳۴/۷ درصد بود، که نسبت به مقدار مشاهده شده آن، ۶ درصد کاهش نشان داد. همچنین مقادیر مشاهده شده شاخص برداشت در شرایط بروز تنش آبی در مراحل فنولوژیکی آبستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب ۳۰/۶، ۲۹/۳، ۲۹/۹ و ۲۹/۵ درصد مشاهده شد، که نسبت به مقادیر مشاهده شده آن به ترتیب با کاهش ۳، ۳/۵ و ۵/۵ درصدی مواجه شد (شکل ۱۲). فرآورده‌های فتوسنتزی که پیش از گرده‌افشانی در اندام‌های هوایی گیاه ویژه برگ‌ها ذخیره شده‌اند، در نهایت به دانه‌ها انتقال داده می‌شوند. مقدار شاخص برداشت نشان دهنده میزان سرعت انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی به دانه می‌باشد. افزایش در مقدار شاخص برداشت باعث افزایش سهم دانه‌ها از کل ماده خشک می‌شود. در شرایط وجود خشکی روند انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی بدلیل کاهش تعرق گیاه کند شده و شاخص برداشت نیز دچار کاهش خواهد شد. نتایج حلیم و همکاران (Halim et al., 2017) نیز کاهش شاخص برداشت در شرایط تنش را تایید می‌کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه گستره کلانی از کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد و همچنین توزیع نامناسب بارندگی‌ها و توقف



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده شاخص برداشت در طول فصل رشد و نمو

Figure 12- Comparison of the observed and simulated values of harvest index under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan

منابع

1. Abdollahi, A. (2015). Investigation of the effect of sowing date and density on grain yield and yield components of bread wheat in rainfed conditions. *Iranian Journal of Rainfed Agriculture*, 4(2), 99-114. (In Persian with English abstract)
2. Amiri Deh-ahmadi, R., Parsa, M., & Gnajali, A. (2010). The effect of drought stress at different phenological stages on morphological characteristics and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in greenhouse conditions.

- Iranian Journal of Crop Research*, 8(2), 157-166. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/GSC.V8I1.7406>
3. Barlow, K.M., Christy, B.P., O'leary, G.J., Riffkin P.A., & Nuttall, J.G. (2015). Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production. A review. *Field Crops Research*, 171, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.010>
 4. Baygi, Z., Safizadeh, S., Shirani Rad, A.M., Valadabadi S.A., & Jafarinejad. A. (2016). Seed yield and yield component of some spring wheat varieties as affected by different sowing dates in Neishabour. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(4), 905-922. (In Persian with English abstract)
 5. Delghandi, M., Andarzian, B., Broomandnasab, S., Massah Bovani, A., & Javaheri., E. (2014). Evaluation of DSSAT 4.5-CSM-CERES-wheat to simulate growth and development, yield and phenology stages of wheat under water deficit condition (Case study: Ahvaz region). *Journal of Water and Soil*, 28(1), 82-91. (In Persian with English abstract)
 6. Fahad, Sh., Bajwa, A., Nazir, U., Anjum, Sh. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, Sh., Nasim, W., Adkins, S., Shah Saud, Sh., Ihsan, M.Z., Alharby, H., Wu, Ch., Wang, D., & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress. *Plant Responses and Management Options*, 8: 1147-1161. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
 7. Francia, E., Tondelli, A., Rizza, F., Badeck, F.W., Thomas, W.T.B., van Eeuwijk Romagosa, I., Stanca, A. M., & Pecchioni, N. (2013). Determinants of barley grain yield in drought-prone Mediterranean environments. *Italian Journal of Agronomy*, 8(1), 1-8. <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e1>
 8. Gonzalez, A., Bermejo, V., & Gimeno, B.S. (2010). Effect of different physiological traits on grain yield in barley grown under irrigated and terminal water deficit conditions. *Journal of Agricultural Science*, 48, 1-10. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000031>
 9. Halim, Gh., Yahya, A., & Shakeri, A. (2017). Evaluation of yield, yield components and stress tolerance indices in bread wheat cultivars in conditions of cessation of irrigation after flowering. *Journal of Production and Processing of Crops and Horticulture*, 3(4): 121-134. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/ESCS.2019.2822.1733>
 10. Kalanaki, M., Karandish, F., & Saberali, S. F. (2018). Effect of integrated management of irrigation and planting date on maize water use efficiency by using the DSSAT model. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sciences)*, 31(4), 509-522. (In Persian with English abstract)
 11. Ma, Y., Celeste Dias, M., & Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591911>
 12. Mahmoudi, H., & Afkari, A. (2020). Physiological traits of wheat in drought stress conditions. *Scientific Journal of Crop Physiology*, 12(46), 131-156.
 13. Mehraban, A., Tobe, A., Gholipour, A., Amiri, E., Ghafari, A., & Rostaii, M. (2019). The effects of drought stress on yield, yield components, and yield stability at different growth stages in bread wheat cultivar (*Triticum aestivum* L.). *Polish Journal Environmental Studies*, 28(2), 739-746. <https://doi.org/10.15244/pjoes/85350>
 14. Mokari, M., Abedinpour, M., & Dehghan, H. (2020). The effect of drought stress and sowing date on grain yield and water use efficiency in autumn wheat in Kashmar region. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(2), 167-189. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.122256>
 15. Nah-Bandani, A.R., Soltani, A., & Darvishirad, P. (2017). The effect of end-of-season drought stress on water consumption, growth and yield of chickpeas. *Scientific Journal of Plant Ecophysiology*, 7(23), 17-27. (In Persian).
 16. Paknejad, F., Moayeri Pour, Sh., Aghayari, F., & Ilkaei, M.N. (2017). Simulation of maize yield with different levels of nitrogen by using DSSAT model. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(3), 503-518. (In Persian with English abstract)
 17. Pirttioja, N., Palosuo, T., Fronzek, S., Raisanen, J., Rotter R.P., & Carter, R.T. (2019). Using impact response surfaces to analyse the likelihood of impacts on crop yield under probabilistic climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.006>
 18. Pullens, J.W.M., Sharif, B., Trnka, M., Balek, J., Semenov, M.A., & Olesen, J.E. (2019). Risk factors for European winter oilseed rape production under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 273, 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.023>
 19. Saeidi, M., & Abdoli, M. (2015). Effect of Drought Stress during Grain Filling on Yield and Its Components, Gas Exchange Variables, and Some Physiological Traits of Wheat Cultivars. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17, 885-898.
 20. Saeidi, M., Moradi, F., Ahmadi, A., Spehri, R., Najafian, G., & Shabani, A. (2010). The effects of terminal water stress on physiological characteristics and sink source relations in two bread wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. *Iranian Journal of Crop Science*, 12, 392-408. (In Persian with English abstract)
 21. Shiukhy-Soqanloo, S., Mousavi-Baygi, M., Torabi, B., & Raeini-Sarjaz, M. (2021). Evaluation of climate change effects on irrigated wheat CV. Mehregan yield under drought stress condition (Case study: Varamin). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(2), 15-28. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22125/agmj.2021.297373.1121>
 22. Shiukhy-Soqanloo, S., Raeini, M., & Chalavi, V. (2015). Colored plastic mulch microclimates affect strawberry fruit yield and quality. *International Journal of Biometeorology*, 59(8), 1061-1066. <https://doi.org/10.1007/s00484-014->

0919-0

23. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crop Research*, 124, 252-260. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00017-9)
24. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2012). *Modeling physiology of crop development, growth and yield*. CAB International, Wallingford, UK.
25. Wei, Y., Jin, J., Jiang, Sh., Ning Sh., & Liu, L. (2018). Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei plain, China. *Agronomy*, 9, 1-16. <https://doi.org/10.3390/agronomy8070097>
26. Zali, H., Hasanloo, T., Sofalian, O., & Asghari, A. (2020). Evaluation of drought stress effect on seed oil yield and fatty acid composition in canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Environmental Stresses on Crop Sciences*, 3(13), 735-747. <https://doi.org/10.22077/ESCS.2020.2205.1552>