

Simulating the effect of climate change on sugar beet yield, water productivity and growing period in Qazvin using the AquaCrop model

Ghasem Marei¹, Aslan Egdernezhad^{1*}, NiazAli Ebrahimipak²

(Received: 13 March. 2024 ; Accepted: 19 Feb. 2025)

How to cite this article:

Marei G, Egdernezhad A, Ebrahimipak NA. Simulating the effect of climate change on sugar beet yield, water productivity and growing period in Qazvin using the AquaCrop model. 2024; (40)2. 165-184. (In Persian with English abstract). DOI: 10.22092/jsb.2025.365259.1351.

Extended Abstract

Introduction

Global warming has accelerated since the industrial revolution, but due to human activities and environmental degradation, this phenomenon has received increased attention in recent years. Future trends in global warming are expected to be influenced by scenarios projecting continued increases in greenhouse gas emission, particularly carbon dioxide. These scenarios predict varying levels of carbon dioxide production worldwide, which in turn affect climate factors, crop growth, and yield. Changes in climate can significantly impact agricultural production environments. To assess and predict the extent of these impacts on crop growth and yield, crop simulation models are essential tools. Among these, the AquaCrop model is widely used due to its user-friendliness, high accuracy and reliability. This model is capable of simulating various field conditions and is applicable to a wide range of agricultural crops, including corn, canola, wheat, saffron, and quinoa.. Sugar beet is considered a strategic crop in Iran, with its yield highly dependent on irrigation water and fertilizer application.

Materials and Methods

All data were collected from a research field located at the Faizabad research station in Qazvin, Iran, over three agricultural years. The experimental factors included irrigation management at four intervals (I1: 6, I2: 9, I3: 12, and I4: 15 days) and fertilizer application at three levels (F0: 21, F1: 30, and F2: 39 kg ha⁻¹). The LARS-WG model was used to simulate meteorological data for Qazvin under two climate change scenarios: an optimistic scenario (SSP2-4.5) and a pessimistic

scenario (SSP5-8.5). These simulations were performed using two atmospheric general circulation models, GFDL-ESM4 (G model) and MRI_ESM2-0 (M model), across two future periods: 2026-2045 (near-future) and 2046-2099 (-uture). The AquaCrop model was then used to simulate sugar beet yield and water productivity based on these climate projections. Some statistical criteria were applied to evaluate the performance and accuracy of both the LARS-WG and AquaCrop models..

Results and Discussion

During the calibration stage, the RMSE statistics for the AquaCrop model showed a yield prediction error of 3511 kg ha⁻¹, placing its accuracy in the excellent category (NRMSE<0.1). For water productivity, the model's error was 1.2 kg m⁻³, with accuracy evaluated as good (0.1<NRMSE<0.2). In the validation stage, the AquaCrop model showed some errors and underestimations in simulating yield and water productivity, as indicated by the mean bias error (MBE) exceeding acceptable thresholds. The RMSE for yield during validation was 2797 kg ha⁻¹. The LARS-WG model was evaluated using observed and simulated climate data for the baseline period (1950-2014). While slight underestimation of temperature and overestimation of some parameters were observed, the RMSE values were small enough to be considered negligible. The NRMSE values for all three variables studied were below 0.1, indicating high model accuracy. Furthermore, the efficiency coefficient (EF) and the index of agreement (d) were both greater than 0.8, demonstrating strong model performance. The coefficient of determination (R²) exceeded 0.9, indicating that the LARS-WG model explained over 90% of the variance in the observed data. Comparing

1. Water Sciences and Engineering Department, Islamic Azad University-Ahvaz Branch, Ahvaz, Iran.

*Corresponding author: a_eigder@yahoo.com

2. Irrigation and Soil Physics Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

rainfall between models, the baseline rainfall predicted by model G was lower than that of model M. Future projections revealed that under the optimistic scenario, rainfall is expected to increase compared with the current conditions, while the pessimistic scenario predicts a slight decrease. Minimum temperature changes were less consistent; the pessimistic scenario showed minimal increases, whereas the optimistic scenario exhibited more variability. Model M predicted the lowest minimum temperature, while model G predicted an increase. These climatic changes imply an increase in evapotranspiration, which, along with effects on crop growth duration, can alter the length of growing period. Since increases in evapotranspiration surpass increases in minimum temperature, the overall length of the growing period is expected to decrease. Rainfall is projected to increase by approximately 6 mm in the near-future and 8 mm in the far-future. Correspondingly, the sugar beet growing period (time from planting to harvest) is predicted to shorten compared with the baseline period. The average growth period was 160 days during the baseline period, decreasing to 154 days in the near-future and 153 days in the far-future. Simulations using models G and M for the near future under optimistic and pessimistic scenarios yielded growth periods of 156 and 152 days, respectively. For the far future, these values were 155 and 150 days, respectively. These findings indicate that, under climate change, the growth and development phases of many crops will shorten, with the magnitude depending on crop type and climatic severity. Yield changes under water and fertilizer stress mirrored observed treatments, suggesting similar trends will continue in coming decades. In model G, the average sugar beet yield for the near future under optimistic and pessimistic scenarios were 40746 and 38046 kg.m⁻³, respectively representing decreases of 40 and 44% compared with current conditions. Furthermore, yield reductions are projected to be more severe in the far-future than in the near-future.

Conclusion

Based on climate change scenarios and growth simulations using the Aquacrop model, the results showed a yield gap of approximately 40 and 70% between potential and actual sugar beet yield. To address this issue, it is recommended to increase the planting density compared with current practices. By reducing the difference between potential and actual evapotranspiration, this strategy may help narrow the yield gap and improve overall productivity under changing climatic conditions.

Keywords: Climate change, Fertilizer stress, Sugar beet, Water stress.

References

- Akbari F, Shourian M, Moridi A. Assessment of the climate change impacts on the watershed-scale optimal crop pattern using a surface-groundwater interaction hydro-agronomic model. *Agricultural Water Management*. 2022; 265: 107508. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107508>
- Mohammadzadeh Z, Soltani A, ajamnoroezi H, Bazrgar AB. Modeling of sugar beet yield gap and potential in Iran. *Journal of Sugar Beet*. 2020; 36(1): 27-46. (In Persian with English abstract). Doi:<https://doi.org/10.22092/jsb.2021.352324.1255>
- Koocheki A, Nasiri Mahalati M. Climate change Effects on agricultural production of Iran: II. Predicting productivity of field crops and adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 2016; 14(1), 1-20. Doi:<https://doi.org/10.22067/gsc.v14i1.51157>. (in Persian)

شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد، بهره‌وری آب و طول دوره رشد چغندرقد در قزوین با

استفاده از مدل AquaCrop[†]

قاسم مرعی^۱، اصلان اکدرنژاد^{۲*}، نیازعلی ابراهیمی پاک^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.22092/jsb.2025.365259.1351

ق. مرعی، ا. اکدرنژاد، ن.ع. ابراهیمی پاک، ۱۴۰۳. شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد، بهره‌وری آب و طول دوره رشد چغندرقد در قزوین با استفاده از مدل AquaCrop. چغندرقد ۴۰(۲): ۱۶۵-۱۸۴

چکیده

تغییر اقلیم از عواملی است که می‌تواند در دهه‌های آینده اثرات بسیاری بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی داشته باشد. چغندرقد یکی از محصولات راهبردی است که رشد و عملکرد آن تحت تأثیر دو تنش آبی و کودی تغییر می‌کند، بنابراین اطلاع از تأثیر این تنش‌ها بر گیاه در مزرعه و تغییر اقلیم برای مدیریت تولید چغندرقد ضروری است. برای دستیابی به این هدف، پژوهش حاضر در ایستگاه تحقیقاتی فیض‌آباد قزوین در طی سه سال زراعی انجام شد. عوامل مورد بررسی شامل مدیریت آبیاری در چهار دور آبیاری (I1، I2، I3 و I4 به ترتیب ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ روزه) و عامل کودی (از منبع اسید بوریک) در سه سطح (F0: ۲۱، F1: ۳۰ و F2: ۳۹ کیلوگرم در هکتار به ترتیب نشان‌دهنده سطوح کم، متوسط و زیاد بود. برای شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم، داده‌های هواشناسی بر اساس سناریوهای SSP2-4.5 (حد واسطه) و SSP5-8.5 (خیلی بدبینانه) و تحت دو مدل GFDL-ESM4 (مدل G) و MRI_ESM2-0 (مدل M) در طی دوره‌ی ۶۴ ساله، ۱۴۰۴ الی ۱۴۶۸ شبیه‌سازی شدند. برای شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد و رشد چغندرقد از مدل AquaCrop استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop نشان داد که در دوره زمانی آینده نزدیک میانگین عملکرد ریشه در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در مدل G به ترتیب ۴۰۷۴۶ و ۳۸۰۴۶ کیلوگرم در هکتار و در مدل M به ترتیب ۴۱۵۴۶ و ۳۸۷۴۶ کیلوگرم در هکتار خواهد بود. در دوره زمانی آینده دور، متوسط عملکرد ریشه برای دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه در مدل G به ترتیب ۵۲۰۷۷ و ۴۹۳۷۷ کیلوگرم در هکتار و در مدل M به ترتیب ۵۲۸۷۷ و ۵۰۰۷۷ کیلوگرم در هکتار محاسبه شد، بنابراین، به‌صورت متوسط، در آینده بیش از ۴۰ درصد عملکرد نسبت به شرایط فعلی کاهش می‌یابد. برای جبران این کاهش عملکرد، با در نظر گرفتن شرایط فعلی مدیریت آب و کود در مزرعه، افزایش تراکم بوته توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، تنش کودی، تغییر اقلیم، چغندرقد.

†- این مقاله مستخرج از پایان‌نامه دانشجویی دوره کارشناسی ارشد است.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران.

۲. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز، ایران.

*- نویسنده مسئول: a_eigder@ymail.com

۳. استاد پژوهش، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

مقدمه

گرم شدن کره زمین پس از انقلاب صنعتی روند افزایشی داشته است ولی به دلیل فعالیت‌های انسانی و تخریب محیط‌زیست، این پدیده در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه محققان بوده است. این روند در سال‌های آینده ممکن است تحت تأثیر چندین سناریو ادامه یابد. هر یک از این سناریوها بر اساس پیش‌بینی میزان تولید دی‌اکسید کربن در جهان است. بر اساس این پدیده، عملکرد و رشد گیاهان تحت تأثیر این پدیده تغییر می‌نماید (Akbari et al. 2022) و این می‌تواند اثراتی را برای تولید محصولات کشاورزی داشته باشد. نظر به این‌که انجام آزمایش برای تعیین میزان تغییرات رشد و عملکرد گیاهان در آینده ممکن نیست، لازم است از مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی استفاده کرد.

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های گیاهی است که به دلیل کاربرپسند بودن، دقت بالا و انعطاف‌پذیری برای شبیه‌سازی طیف وسیعی از گیاهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (Zhang et al. 2022). تاکنون گیاهان زراعی نظیر ذرت (*Zea mays* L.) (Zhang et al. 2009; Hsiao et al. 2009)، پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) (Farahani et al. 2009)، آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) (Todorovic et al. 2009)، کلزا (*Brassica napus* L.) (Golami et al. 2023)، گندم (*Triticum aestivum* L.) (Andarzian et al. 2011)، گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) (Behmanesh et al. 2021)، زعفران (*Crocus sativus* L.) (Ebrahimipak et al. 2018) و کینوا (*Chenopodium quinoa* L.) (Geerts et al. 2009) تحت شرایط مختلف مدیریتی در مزرعه با استفاده از این مدل گیاهی توسط پژوهشگران مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند.

چغندرقد (*Beta vulgaris* L.) یکی از گیاهان استراتژیک در کشور محسوب می‌شود که عملکرد آن وابسته به آب آبیاری و تأمین نیاز کودی است. تولید جهانی چغندرقد ۲۷۷/۷۲ میلیون تن و سطح زیر کشت آن ۴/۵۶ میلیون هکتار است. کشور ایران

با تولید ۵/۵ میلیون تن چغندرقد و حدود ۱۱۱ هزار هکتار سطح زیر کشت، یازدهمین کشور تولیدکننده چغندرقد در جهان و سومین کشور در خاورمیانه است (Mohammadzadeh et al. 2020). با توجه به تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی، در صورت عدم پیش‌بینی تغییرات رشد گیاه چغندرقد در آینده، این اختلاف ممکن است افزایش یابد. این گیاه در مرکز داده‌های گیاهی مدل AquaCrop وجود دارد و به همین دلیل تحقیقات متعددی روی آن توسط محققان انجام شده است.

در پژوهشی در شمال صربستان با بررسی شرایط زراعی کشت چغندرقد و مدل‌سازی آن با استفاده از مدل AquaCrop نشان داده شد که حتی با حذف آبیاری می‌توان این گیاه زراعی را کشت کرد. در این تحقیق تأمین نیاز آبی چغندرقد نیز بر اساس میزان بارندگی توسط مدل AquaCrop شبیه‌سازی و پیش‌بینی شد (Stricevic et al. 2011). در پژوهشی دیگر، در آفریقای جنوبی بر اساس تکیه بر دقت و کارایی مدل گیاهی AquaCrop به برنامه‌ریزی آبیاری گیاه چغندرقد به‌خصوص در حوضه‌های تحت تنش آبی این کشور پرداخته شد (Kunz et al. 2014). در کشور پاکستان نیز از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری استفاده شده است. گزارش گردیده که این مدل گیاهی دقت خوبی در شرایط تأمین آب کافی و کم آبیاری داشته است (Malik et al. 2017).

در استان مرکزی نیز از مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی چغندرقد استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که دقت این مدل گیاهی برای پیش‌بینی عملکرد این گیاه زراعی مطلوب بود (Alishiri et al. 2014). در منطقه الشتر در استان لرستان نیز توانایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی پوشش گیاهی، ماده خشک، عملکرد گیاه چغندرقد و رطوبت خاک تحت تیمارهای مختلف تنش آبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق مبین عملکرد خوب مدل بوده و استفاده از این مدل در تعیین استراتژی‌های بهینه مدیریت آب در کشت چغندرقد در منطقه مورد مطالعه توصیه شده است (Saadati et al. 2018). گرچه این مدل گیاهی ابتدا به‌منظور بررسی اثر مقدار آب آبیاری بسط

داده شد، لیکن در نسخه‌های بعدی امکان شبیه‌سازی تنش کودی نیز در این مدل در نظر گرفته شد (Van Gaelen et al. 2014). روش شبیه‌سازی اثر تنش کودی در مدل AquaCrop بر اساس یک الگوریتم خودکار است که پس از واسنجی، می‌توان به دقت آن اعتماد نمود. این روش نیمه کمی ابتدا برای شبیه‌سازی اثر کود بر عملکرد گیاهان ذرت و گندم (در نپال)، تف (Eragrostis tef L.) (در اتیوپی) و کینوا (در بولیوی) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این روش قابلیت بالایی در شبیه‌سازی پارامترهایی نظیر رطوبت خاک در ناحیه ریشه، افزایش پوشش و زیست‌توده در طول فصل رشد تحت تنش‌های مختلف کودی و خشکی را دارد. همچنین دقت این مدل هم‌تراز با سایر مدل‌های گیاهی که از بیان املاح برای شبیه‌سازی رشد گیاه در شرایط مختلف کودی استفاده می‌کنند، برآورد شد (Van Gaelen et al. 2014).

قابلیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده ذرت دیم نیز تحت تیمارهای مختلف کود نیتروژن در شمال نیجریه مورد بررسی قرار گرفت (Akumaga et al. 2017). نتایج این تحقیق نیز نشان داد که مدل AquaCrop با استفاده از این روش نیمه کمی، علی‌رغم تعداد کم پارامتر ورودی، عملکرد زیست‌توده و دانه را با دقت بالایی برای سطوح مختلف نیتروژن شبیه‌سازی می‌کند. در منطقه پاکدشت استان البرز نیز از این روش نیمه کمی به کار رفته در مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی پارامترهایی از قبیل رطوبت خاک در ناحیه ریشه، تغییرات پوشش و زیست‌توده گیاه ذرت طی دوره رشد و عملکرد نهایی دانه تحت تیمارهای مختلف نیتروژن استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل نسبتاً ساده AquaCrop به کاربران این اجازه را می‌دهد تا با در نظر گرفتن تیمارهای مختلف کودی، مدیریت آب و نیتروژن را، به خصوص در اقلیم‌های گرم و خشک نظیر اقلیم ایران، ارتقا ببخشند. این در حالی است که در مقایسه با سایر مدل‌های گیاهی، مدل AquaCrop برای در نظر گرفتن تأثیر کود بر رشد و عملکرد محصول، داده‌های ورودی به مراتب کم‌تری نیاز دارد (Ranjbar et al. 2017).

بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای گیاهی کمک شایانی در خصوص برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و نیاز آبی محصولات کشاورزی می‌نماید (Huo et al. 2013). بر این اساس تاکنون مطالعات متعددی در ارتباط با اثر تغییر اقلیم بر روند تبخیر-تعرق و عملکرد محصولات انجام شده است. روند تغییرات تبخیر-تعرق تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی متفاوت در آذربایجان غربی (Daneshfaraz and Razzaghpour 2014) و مشهد (Saadati et al. 2016) بررسی شده است. طی پژوهشی در مشهد به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تولید ذرت و ارزیابی تاریخ کشت پرداخته و گزارش شده است که عملکرد ذرت تحت تأثیر تغییر اقلیم در اکثر سناریوهای به کار گرفته شده، کاهش خواهد داشت (Moradi et al. 2014). تقاضای آب کشاورزی تحت سناریوهای اقلیمی مختلف در حوضه شانسکی در چین نیز مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده است که در دوره آبی درجه حرارت، بارش مؤثر و رطوبت نسبی افزایش و سرعت باد کاهش می‌یابد (Sun et al. 2018). در پژوهشی در دشت ابهر اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گوجه‌فرنگی (Solanum lycopersicum L.) مورد ارزیابی قرار گرفته و با استفاده از مدل AquaCrop، عملکرد گیاه در دوره‌های زمانی آبی و در زمان‌های کشت متفاوت، شبیه‌سازی و برآورد شد. نتایج این تحقیق نشان داد که بیش‌ترین عملکرد در کشت محصول گوجه‌فرنگی در زمان حال مربوط به کشت ۱۵ خرداد با ۵۷/۵۵ تن در هکتار بوده و با توجه به زمان کشت مرسوم منطقه (۵ خرداد)، با ۱۰ روز انتقال زمان کشت مرسوم (به ۱۵ خرداد)، ۰/۵۱ تن در هکتار محصول افزایش می‌یابد. همچنین عملکرد گوجه‌فرنگی در افق‌های آبی افزایش یافته که علت آن به سیستم فتوسنتزی C3 این گیاه و زودرس شدن میوه و گل‌دهی بیش‌تر ارتباط داده شد (Shirdeli et al. 2022).

نظر به اهمیت کشت چغندر قند در سال‌های اخیر در کشور، توجه به تغییرات رشد و عملکرد آن با توجه به شرایط مزرعه و اقلیم اهمیت دارد. مدیریت مزرعه شامل مقدار آب آبیاری و کود مصرفی است که توسط محققان و زارعان قابل اجرا است ولی اثرات تغییر اقلیم در آینده بر این گیاه زراعی مشخص نیست.

مروری بر منابع نشان داد که می‌توان تغییرات عملکرد و رشد چغندرقد را با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی نمود لذا در این پژوهش به بررسی تأثیر تغییر اقلیم در شرایط مختلف مدیریت زراعی گیاه چغندرقد در قزوین پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

روش آزمایش

این پژوهش بر اساس داده‌های برداشت‌شده از یک مزرعه تحقیقاتی واقع در ایستگاه تحقیقاتی فیض‌آباد قزوین در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۲۴۰ متر از سطح دریا در طی سه سال زراعی انجام شد (Ebrahimipak and Tafteh 2013; Ebrahimipak and Mostashari 2017). عوامل مورد مطالعه در این پژوهش شامل مدیریت آبیاری در چهار دور (I1: ۶، I2: ۱۲، I3: ۱۸ و I4: ۱۵ روز) و مقدار سطوح کودی در سه سطح (F0: ۲۱، F1: ۳۰ و F2: ۳۹ کیلوگرم در هکتار، به

ترتیب نشان‌دهنده‌ی سطوح کم، متوسط و مناسب) از منبع کود اسید بوریک در زمان کاشت بود. به‌منظور اجرای این آزمایش، ابتدا از دو عمق ۳۰- و ۶۰- سانتی‌متر نمونه‌های خاک برداشت و مورد تجزیه فیزیکوشیمیایی قرار گرفت. نتایج آزمایش در جدول (۱) نشان داده شده است. آماده‌سازی زمین در ابتدای اردیبهشت انجام گردید. کرت‌های مورد آزمایش در ابعاد ۱۰ مترمربع تهیه شد. در ادامه به میزان ۳۰ کیلوگرم در هر هکتار بذر منورم تکنیکی رقم ۷۲۳۲ با تراکم ۹۵ هزار بوته در هکتار و در عمق پنج تا هشت سانتی‌متر کشت شد. بر اساس نتایج آزمایش خاک، کودهای نیتروژن (اوره)، پتاسیم (سولفات پتاسیم) و فسفر (سوپر فسفات تریپل) در زمان آزمایش در اختیار گیاه قرار گرفت. مقدار کود نیتروژن ۱۵۵ کیلوگرم در هکتار بود و در سه مرحله هم‌زمان با کاشت و دو مرحله سرک استفاده شد. کود پتاسیم و فسفر نیز از منابع مورد اشاره به ترتیب به مقدار ۲۲۵ و ۳۴۵ کیلوگرم در هکتار هم‌زمان با کاشت استفاده گردید.

جدول ۱ برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

Table. 1 Some physical and chemical characteristics of the soil at the experimental site

عمق خاک	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری	رطوبت در ظرفیت زراعی	رطوبت در نقطه پژمردگی دائم	اسیدیته	هدایت الکتریکی	درصد اشباع	کربن آلی	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
Soil depth cm	Soil texture	Bulk density g.cm ⁻³	FC %w/w	PWP	pH	EC dS.m ⁻¹	Saturation percentage %	Organic carbon %	N %	P ppm	K
0-30	رسی لومی CL	1.56	24.5	13.9	8.1	0.35	49	0.86	0.09	8.00	360
30-60	رسی لومی CL	1.72	24.5	14.2	8.0	0.32	52	0.60	0.06	10.5	280

در این رابطه، Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول در هر تیمار است، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق است. این مدل برای جلوگیری از شبیه‌سازی مصرف غیر تولیدی آب، میزان تبخیر از سطح خاک را از تعرق گیاه تفکیک می‌کند. به این منظور، از پوشش گیاهی برای تفکیک این دو جز استفاده می‌کند. با در نظر گرفتن مقدار این پارامتر، توسعه پوشش تاج گیاه از زمان

مدل AquaCrop

برای شبیه‌سازی عملکرد و طول دوره رشد گیاه چغندرقد، از مدل گیاهی AquaCrop استفاده شد. این مدل برای تعیین عملکرد محصول از رابطه ۱ استفاده می‌کند (Steduto et al. 2009; Raes et al. 2009).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x} \right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x} \right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این رابطه، B_{ref} کل زیست توده خشک در شرایط بدون تنش و B_{stress} مقدار زیست توده به دست آمده پس از اعمال تنش است.

در مدل AquaCrop چهار دسته داده می بایست معرفی و مورد استفاده قرار گیرند. این دسته ها شامل پارامترهای اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است. داده های اقلیمی می بایست از نزدیک ترین ایستگاه هواشناسی در منطقه اخذ شوند. در این پژوهش، از داده های ایستگاه سینوپتیک قزوین استفاده شد. داده های خاک بر اساس آزمایش خاک (جدول ۱) و داده های مدیریت مزرعه نیز در طول آزمایش برداشت شدند. داده های گیاهی به دو دسته ی ثابت و غیر ثابت تقسیم می شوند. داده های غیر ثابت در مزرعه تعیین می شوند ولی داده های ثابت در پایگاه داده مدل AquaCrop وجود دارند و توسط توسعه دهندگان این مدل در آزمایش های مختلف تعیین شده است. برای تعیین صحت داده های ورودی و به خصوص داده های گیاهی، لازم است این مدل گیاهی مورد ارزیابی قرار گیرد (Steduto et al. 2009; Raes et al. 2009).

مدل LARS-WG

در این پژوهش، از مدل LARS-WG برای شبیه سازی داده های هواشناسی قزوین تحت سناریوهای حد واسطه (SSP2-4.5) و خوش بینانه (SSP5-8.5) با استفاده از دو مدل گردش عمومی جو GFDL-ESM4 (مدل G) و MRI_ESM2-0 (مدل M) در طی دو دوره زمانی ۱۴۲۳-۱۴۰۴ (آینده نزدیک-معادل ۲۰۲۶-۲۰۴۵ میلادی) و ۱۴۶۸-۱۴۲۳ (آینده دور-معادل ۲۰۴۶-۲۰۹۹ میلادی) استفاده شد. در انتخاب این مدل های گردش عمومی جو نکاتی نظیر در دسترس بودن، مقبولیت در میان پژوهشگران و توجه به حساسیت اقلیمی، مدنظر بود. در این پژوهش از مدل های مدل سیستم زمین که به روشنی؛ حرکت کربن در سیستم زمین را مدل می کند، استفاده شد. این مدل ها، به دنبال شبیه سازی تمام جنبه های مرتبط سیستم زمین از جمله فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی هستند بنابراین بسیار فراتر از مدل های پیشین خود یعنی مدل های آب و هوای جهانی که فقط

جوانه زنی تا مقدار بیشینه پوشش تاج از رابطه ۲ محاسبه می شود (Steduto et al. 2009; Raes et al. 2009):

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در این رابطه، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می باشد. میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش تاج از رابطه ۳ محاسبه می شود (Steduto et al. 2009; Raes et al. 2009):

$$Tr_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی هستند. بیوماس خشک نیز طبق رابطه ۴ برآورد می گردد (Steduto et al. 2009; Raes et al. 2009):

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad \text{رابطه ۴}$$

که در این رابطه، Tr_i مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره وری آب، $ET_{0,i}$ تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد وزن دانه (Y) نیز با استفاده از ماده خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه ۵ محاسبه می شود (Steduto et al. 2009; Raes et al. 2009):

$$Y = B \times HI \quad \text{رابطه ۵}$$

مدل AquaCrop برای شبیه سازی اثر مقدار کود بر روی رشد و عملکرد گیاه، از بیان کودی استفاده می کند. در واقع این مدل اثر مقدار تنش حاصلخیزی بر عملکرد را با استفاده از کمبود مواد غذایی در خاک شبیه سازی می کند. مدل AquaCrop با فرض پارامتر بیشینه نسبی مقدار زیست توده خشک (B_{rel}) بر حسب درصد، تنش کودی را با توجه به رابطه ۶ شبیه سازی می کند (Steduto et al. 2009; Raes et al. 2009; Van Gaalen et al. 2014).

$$B_{rel} = \frac{B_{stress}}{B_{ref}} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

فرآیندهای فیزیکی جوی و اقیانوسی را نشان می‌دهند؛ می‌توانند آب‌وهوا را پیش‌نگری کنند. مشخصات دو مدل مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۲) ارائه شده است. مدل LARS-WG از سه بخش اصلی شامل واسنجی، ارزیابی و شبیه‌سازی (تولید) داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده تشکیل شده است. اساسی‌ترین نیاز مدل در مرحله واسنجی، فایلی است که

مشخص‌کننده‌ی رفتار اقلیم در دوره گذشته است. این فایل با استفاده از داده‌های روزانه بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر و رطوبت هوا، باد (به‌عنوان عوامل اساسی در تبخیر-تعرق گیاه چغندرقد) ایستگاه قزوین با در نظر گرفتن دوره زمانی ۱۳۹۲-۱۳۲۸ به‌عنوان دوره پایه، تهیه شده و مدل بر اساس آن اجرا شد.

جدول ۲ مدل‌های مورد استفاده جهت همادی و پیش‌نگری دماهای حدی در این پژوهش

Table 2 Models used to simulation and forecasting of threshold temperatures in this study

مدل Model	مخفف Abbreviation	نام موسسه Institute	کشور Country	قدرت تفکیک مکانی تقریبی Approximate spatial resolution
GFDL-ESM4	G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	1.25*1.00
MRI_ESM2-0	M	Meteorological Research Institute	Japan	1.25*1.25

تغییرات به وجود آمده در مقدار واقعی است. این آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی برازش بهتر داده‌ها است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad \text{رابطه ۸}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها است.

ارزیابی مدل‌های AquaCrop و LARS-WG

به‌منظور واسنجی دو مدل مورد استفاده، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۷ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند.

آماره‌های RMSE و NEMSE به ترتیب برای تعیین خطا و دقت مدل است. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده‌ی دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آماره MBE برای سنجش بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی این مدل است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده‌ی این است که مقدار شبیه‌سازی‌شده بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل AquaCrop در برآورد عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقد عدد کوچک‌تری به دست آورده است.

مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده‌ی کارایی مدل AquaCrop است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر باشند بهتر است. آماره R^2 نشان‌دهنده‌ی قدرت مدل برای شبیه‌سازی

نتایج و بحث

نتایج واسنجی و ارزیابی AquaCrop

از داده‌های سال‌های زراعی اول و دوم برای واسنجی مدل AquaCrop استفاده شد. در این تحقیق عوامل گیاهی مورد

نیاز با سعی و خطا و همچنین با توجه به محدودی که برای این پارامترها در مناطق مختلف جهان به دست آورده‌اند؛ به نحوی که میان مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده کمینه اختلاف وجود داشته باشد، تعیین شد (جدول ۳).

جدول ۳ مقادیر پارامترهای گیاهی مورد استفاده در مدل AquaCrop
Table. 3 Plant parameter values used in the AquaCrop model

عامل Parameter	واحد Unit	مقدار Value	توضیح Description
دمای پایه Base temperature	درجه سانتی‌گراد Celsius	5.00	پیش فرض Default
دمای بالا Upper temperature	درجه سانتی‌گراد Celsius	30.0	پیش فرض Default
تراکم کشت Plant density	گیاه در هکتار Plant/ha	95000	اندازه گیری Measured
ضریب رشد کانوپی Canopy growth	درصد روز %/day	13.6	پیش فرض Default
پوشش گیاهی هر گیاهچه هنگام جوانه زنی Canopy size	سانتی متر مربع cm ²	5.00	پیش فرض Default
مدت زمان کاشت تا جوانه زنی Day after sowing to emergence	روز day	6.00	واسنجی Calibrated
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی Day after sowing to max canopy	روز day	70.0	واسنجی Calibrated
مدت زمان کاشت تا دوره پیری Day after sowing to senescence	روز day	113	واسنجی Calibrated
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول Day after sowing to maturity	روز day	145	واسنجی Calibrated
عمق مؤثر ریشه Effective root depth	متر m	1.40	واسنجی Calibrated
بهره‌وری آب نرمال شده Normalized water productivity	گرم بر مترمربع gr/m ²	16.5	واسنجی Calibrated
پوشش گیاهی اولیه Initial crop canopy	درصد %	0.10	واسنجی Calibrated
بیشینه رشد کانوپی Maximum canopy growth	درصد %	98.0	واسنجی Calibrated
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه Upper limit for canopy expansion	-	0.20	واسنجی Calibrated
حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه lower limit for canopy expansion	-	0.65	واسنجی Calibrated
ضریب رشد پوشش Canopy growth coefficient	درصد روز %/day	13.0	واسنجی Calibrated
ضریب کاهش پوشش Canopy decline coefficient	درصد روز %/day	5.50	واسنجی Calibrated
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق Maximum crop transpiration coefficient	درصد روز %/day	1.10	واسنجی Calibrated
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها Shape factor for stomatal closure	-	0.50	واسنجی Calibrated
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری Shape factor for early canopy senescence	-	0.70	واسنجی Calibrated
ضریب کاهش توسعه پوشش* Reduction of canopy expansion	درصد %	50.0	واسنجی Calibrated
ضریب حداکثر پوشش* Maximum canopy cover	درصد %	24.0	واسنجی Calibrated
ضریب متوسط کاهش* Average decline canopy cover	درصد روز %/day	0.30	واسنجی Calibrated
ضریب درصد کاهش بهره‌وری آب نرمال شده* Water productivity reduction	درصد %	20.0	واسنجی Calibrated

* این پارامترها با استفاده از مقادیر تنش کودی در بیشترین و کمترین حالت واسنجی شدند.

* These parameters were calibrated using fertilizer stress values in the highest and lowest condition.

نتایج آماری مقایسه عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده برای مرحله واسنجی در جدول (۴) ارائه شده است. بر اساس آماره MBE، مدل AquaCrop در مرحله واسنجی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب دچار خطای بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی شد. نتایج آماره RMSE نشان می‌دهد که خطای این مدل برای برآورد عملکرد ۳۵۱۱ کیلوگرم در هکتار و دقت آن در دسته عالی ($NRMSE < 0.1$) قرار داشت. همچنین خطای مدل برای برآورد بهره‌وری آب ۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و دقت آن نیز خوب ($0.1 < NRMSE < 0.2$) ارزیابی شد. این نتایج با مشاهدات اکثر محققان (Heng *et al.* 2009; Andarzian *et al.* 2011) مطابقت داشت. با توجه به آماره EF، کارایی این مدل گیاهی برای هر دو پارامتر عملکرد و بهره‌وری آب مطلوب بود. نتایج همبستگی عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده بیش از ۹۰ درصد و همبستگی بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده حدود ۵۷ درصد برآورد شد که در کل قابل قبول است. بر اساس نتایج کلیه آماره‌ها در مرحله واسنجی، می‌توان به مدل AquaCrop برای ورود به مرحله صحت‌سنجی اعتماد نمود.

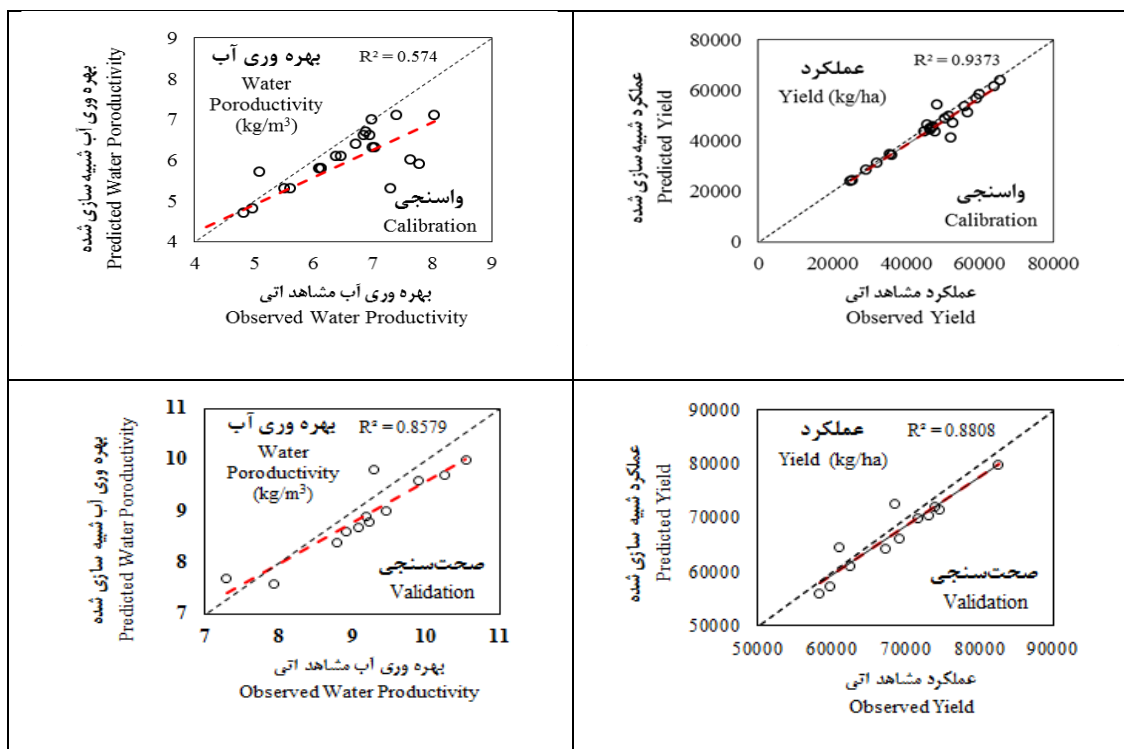
مقایسه آماری عملکرد و بهره‌وری آب در مرحله صحت‌سنجی در جدول (۴) نشان داده شده است. بر اساس آماره MBE، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به ترتیب دچار خطای بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی شد. خطای مدل AquaCrop بر اساس آماره RMSE برای عملکرد ۲۷۹۷

کیلوگرم در هکتار به دست آمد. در یک تحقیق مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، برای آماره RMSE گزارش شده است (Stricevic *et al.* 2011). گرچه با مقایسه نتایج این پژوهش با مقادیر گزارش‌شده توسط سایر محققان، مشاهده می‌شود که خطای پژوهش حاضر بالاتر از مقادیر به‌دست‌آمده پژوهش‌های پیشین است اما عملکرد به‌دست‌آمده توسط این محققان نیز کمتر از مقادیر این پژوهش است، به همین دلیل از خطای به‌دست‌آمده می‌توان صرف‌نظر کرد. دقت این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد در دسته عالی ($NRMSE < 0.1$) قرار داشت. بر اساس دو آماره EF و d نیز کارایی این مدل مطلوب بود. خطای شبیه‌سازی بهره‌وری آب ۰/۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. دقت مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی AquaCrop نیز در دسته عالی ($NRMSE < 0.04$) قرار داشت. کارایی این مدل گیاهی برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب نیز مطلوب بود. همبستگی عملکرد مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده بیش از ۸۸ درصد بود که نشان‌دهنده دقت مدل AquaCrop برای پیروی از تغییرات عملکرد در شرایط مزرعه است. همبستگی بین بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده نیز ۸۵ درصد بود که حاکی از دقت مدل AquaCrop برای پیش‌بینی تغییرات بهره‌وری آب است. بر اساس نتایج کلیه آماره‌های مورد بررسی در این پژوهش، می‌توان به دقت و کارایی مدل AquaCrop برای پیش‌بینی عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند اعتماد نمود. به همین دلیل از این مدل برای شبیه‌سازی این دو پارامتر تحت سناریوها و مدل‌های تغییر اقلیم استفاده شد.

جدول ۴ نتایج آماری عملکرد و بهره‌وری آب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Table. 4 Statistical results of observed and simulated yield and water productivity during calibration and validation stages

پارامتر Parameter	مرحله Stage	R ²	D	EF	NRMSE	RMSE	MBE
عملکرد Yield (kg/ha)	واسنجی Calibration	0.99	0.99	0.83	0.07	3511	2145
بهره‌وری آب Water Productivity (kg/m ³)		0.57	0.99	-0.24	0.18	1.21	-1.17
عملکرد Yield (kg/ha)	صحت‌سنجی Validation	0.88	0.99	0.82	0.04	2797	1469
بهره‌وری آب Water Productivity (kg/m ³)		0.85	0.99	0.76	0.04	0.42	-0.26



شکل ۱ همبستگی عملکرد و بهره‌وری آب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

Fig. 1 Correlation between observed and simulated yield and water productivity during calibration and validation stages.

شد که این مقدار خطا بر اساس آماره RMSE قابل چشم‌پوشی است. آماره NRMSE برای سه پارامتر مورد بررسی کمتر از ۰/۱ است که این نشان‌دهنده دقت خوب مدل است. مقادیر دو آماره EF و d بیشتر از ۰/۸ است که نشان‌دهنده کارایی قابل قبول این مدل است. مقادیر آماره R^2 بیشتر از ۰/۹ است که بیانگر این است که مدل LARS-WG تولنایی پیش‌بینی بیش از ۹۰ درصد تغییرات داده‌های مورد بررسی را دارد.

ارزیابی مدل LARS-WG

نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و داده‌های واقعی در دوره پایه ۱۳۹۲-۱۳۲۸ در جدول (۵) نشان داده شده است. در این جدول از آماره‌های مختلف برای ارزیابی این مدل استفاده شده است تا به صورت هم‌زمان، دقت، خطا و کارایی آن بررسی شود. بر اساس آماره MBE، خطای کم‌برآوردی برای دما و خطای بیش‌برآوردی برای بارش توسط این مدل مشاهده

جدول ۵ ارزیابی مدل LARS-WG در دوره پایه (۱۳۹۲-۱۳۲۸) با استفاده از آماره‌های واسنجی

Table. 5 Evaluation of the LARS-WG model during the baseline period (1950-2014) using statistics criteria

شاخص‌های آماری Statistics criteria	بارندگی Rainfall mm/month		دمای حداقل Minimum temperature (°C)		دمای حداکثر Maximum temperature (°C)	
	MRI- ESM2-0 (M)	GFDL- ESM4 (G)	MRI- ESM2-0 (M)	GFDL- ESM4 (G)	MRI- ESM2-0 (M)	GFDL- ESM4 (G)
MBE	0.42	0.30	-0.02	-0.01	-0.04	-0.03
RMSE	7.91	5.41	0.41	0.33	0.61	0.37
NRMSE	0.06	0.04	0.08	0.07	0.07	0.06
EF	0.70	0.75	0.82	0.83	0.80	0.89
D	0.95	0.97	0.98	0.99	0.98	0.99
R^2	0.92	0.94	0.95	0.96	0.94	0.97

تغییرات پارامترهای هواشناسی در دوره‌های آینده

با توجه به نتایج جدول (۶)، میزان بارندگی در وضعیت پایه در مدل G کمتر از مدل M بود. مقایسه تغییرات بارش در آینده نزدیک و دور نشان داد که بر اساس سناریوی خوش‌بینانه احتمالاً بارش در آینده بیشتر از شرایط فعلی خواهد بود. بر اساس سناریوی بدبینانه، احتمالاً میزان بارش اندکی کاهش خواهد یافت. این وضعیت برای دمای حداقل مشاهده نشد زیرا در سناریوی بدبینانه دمای حداقل افزایش یافت ولی در سناریوی خوش‌بینانه تغییرات متفاوت بود. در مدل M کاهش دمای حداقل مشاهده شد در حالی که در مدل G افزایش این پارامتر به دست آمد. این موضوع نشان‌دهنده‌ی افزایش تبخیر-

تعرق است و از طرفی به دلیل اثرگذاری روی درجه روز رشد گیاهان، می‌تواند دوره رشد را دستخوش تغییر نماید. تعیین کاهش یا افزایش طول دوره رشد، به تغییرات دمای حداکثر نیز وابسته است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، بر اساس هر دو سناریوی مورد استفاده، دمای حداکثر افزایش خواهد یافت. با توجه به این که این افزایش دمای حداکثر بیشتر از دمای حداقل هست، طول دوره رشد کاهش خواهد یافت. بر اساس این نتایج، دمای هوا برآورد شده توسط هر دو مدل در آینده افزایش خواهد یافت. این شرایط برای بارش نیز اتفاق می‌افتد و افزایش بارش تا حداکثر ۶ میلی‌متر در آینده نزدیک و ۸ میلی‌متر در آینده دور اتفاق خواهد افتاد.

جدول ۶ میانگین پارامترهای بارندگی، دمای حداقل و دمای حداکثر در دوره‌های زمانی مورد بررسی

Table. 6 Average rainfall, minimum and maximum temperature during the study periods

پارامتر Parameter	دوره زمانی Time period)	GFDL- ESM4 (G)	MRI- ESM2-0 (M)	GFDL- ESM4 (G)	MRI- ESM2-0 (M)
		SSP5-8.5		SSP2-4.5	
بارندگی Rainfall mm/month	baseline period (1950-2014)	37.4	40.1	37.4	40.1
	2026-2045	34.7	42.6	43.8	40.6
	2046-2099	37.2	39.3	38.9	41.0
دمای حداقل Minimum temperature °C	baseline period (1950-2014)	4.30	5.80	4.30	5.80
	2026-2045	5.00	7.00	6.70	4.60
	2046-2099	6.50	9.10	7.50	5.10
دمای حداکثر Maximum temperature °C	baseline period (1950-2014)	16.5	17.6	16.5	17.6
	2026-2045	17.3	18.7	18.4	16.2
	2046-2099	19.4	21.6	19.4	19.9

اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای گیاهی (طول دوره رشد، تبخیر-تعرق، عملکرد و بهره‌وری آب چغندر قند)

در جدول (۷) تغییرات طول دوره رشد چغندر قند در دوره پایه (۱۳۹۲-۱۳۲۸) و دوره‌های آینده نزدیک (۱۴۰۴-۱۴۲۳) و آینده دور (۱۴۶۸-۱۴۲۳) ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که طول دوره رشد چغندر قند (فاصله زمانی کاشت تا رسیدگی کامل) در اقلیم آینده نسبت به شرایط فعلی کاهش خواهد یافت. متوسط دوره رشد در دوره پایه ۱۶۰ روز بود که در آینده نزدیک

به ۱۵۴ و در آینده دور به ۱۵۳ روز کاهش خواهد یافت. نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های G و M در دوره آینده نزدیک در سناریوهای حد واسطه (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۱۵۶ و ۱۵۲ روز به دست آمد. همچنین نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های G و M در دوره آینده دور در سناریوهای حد واسطه (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۱۵۵ و ۱۵۰ روز به دست آمد. نتایج تحقیقات نشان داده است که در شرایط تغییر اقلیم، مراحل رشد و نمو بسیاری از گیاهان زراعی کوتاه‌تر خواهد شد که البته میزان آن به گونه گیاهی و شدت تغییرات اقلیمی بستگی دارد.

جدول ۷ طول دوره رشد در دوره‌های زمانی پایه، آینده نزدیک و آینده دور
Table. 7 Crop growth duration in the baseline, near- and far-future periods

مدل Model	دوره پایه (۱۳۲۸-۱۳۹۲)	آینده نزدیک (۱۴۰۴-۱۴۲۳)		آینده دور (۱۴۲۳-۱۴۶۸)	
	Baseline period (1950-2014)	Near-future (2026-2045)		Far-future (2046-2099)	
	-	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5
GFDL-ESM4 (G)	160	156	156	155	155
MRI-ESM2-0 (M)	160	152	152	150	150
Average	160	154	154	153	153

و مصرف آب نخود (*Cicer arietinum*) نشان داده شد که دوره رشد گیاه در اثر افزایش دما ۱۰ تا ۱۳ درصد کاهش می‌یابد (Soltani and Gholipoor 2006). همچنین در ارتباط با تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی ایران گزارش شده است که افزایش میانگین دما در طول کل فصل رشد چغندر قند باعث کاهش معادل ۱۵ درصد در طول دوره کاشت تا رسیدگی این گیاه می‌شود (Koocheki and Nasiri mahalati 2016). میانگین تبخیر-تعرق در دوره زمانی پایه و نیز دوره‌های زمانی آینده نزدیک و دور در جدول (۸) ارائه شده است.

در تحقیقی در زمینه ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر گندم دوروم (*Triticum turgidum* var. durum) در دوره آماری ۱۴۷۸-۱۴۴۹ میلادی در نواحی شمالی و مرکزی تانزانیا نشان داده شد که طول چرخه رشد گندم کاهش می‌یابد (Lhomme et al. 2009). در تحقیقی دیگر مشاهده شد که تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده، طول دوره کاشت تا گل‌دهی و همچنین طول دوره رسیدگی فیزیولوژیک ذرت تحت تأثیر تغییر اقلیم در اکثر گزینه‌های مورد استفاده کاهش خواهد یافت (Moradi et al. 2014). در پژوهشی در رابطه با اثر تغییر اقلیم بر رشد، عملکرد

جدول ۸ متوسط تبخیر-تعرق در طول دوره رشد چغندر قند در دوره پایه (۱۳۲۸-۱۳۹۲) و دوره‌های آینده نزدیک (۱۴۰۴-۱۴۲۳) و آینده دور (۱۴۲۳-۱۴۶۸)

Table. 8 Average evapotranspiration during the sugar beet growing season in the baseline period (1950-2014) near future (2026-2045) and far future (2046-2099)

تیمارهای مورد بررسی Treatments	متوسط تبخیر-تعرق (mm) دوره پایه (۱۹۵۰-۲۰۱۴)	متوسط تبخیر-تعرق (mm) در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵)				متوسط تبخیر-تعرق (mm) در آینده دور (2099-2046)			
	Average evapotranspiration (mm) in the baseline period (۱۹۵۰-۲۰۱۴)	Average evapotranspiration (mm) in the near future (2026-2045)				Average evapotranspiration (mm) in the far future (2046-2099)			
		Treatments		GFDL-ESM4 (G)		MRI-ESM2-0 (M)		GFDL-ESM4 (G)	
		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
F1I1	1062	1060	1055	1060	1059	1060	1054	1055	1059
F1I2	1036	1035	1035	1034	1031	1035	1032	1037	1034
F1I3	1001	998	995	999	997	1001	993	998	999
F1I4	947	945	944	946	943	994	945	951	945
F2I1	1062	1060	1055	1060	1059	1060	1054	1055	1059
F2I2	1036	1035	1035	1034	1031	1035	1032	1037	1034
F2I3	1001	998	995	999	997	1001	993	998	999
F2I4	947	945	944	946	943	994	945	951	945
F3I1	1062	1060	1055	1060	1059	1060	1054	1055	1059
F3I2	1036	1035	1035	1034	1031	1035	1032	1037	1034
F3I3	1001	998	995	999	997	1001	993	998	999
F3I4	947	945	944	946	943	994	945	951	945
میانگین	1011.5	1009.5	1007.4	1009.7	1007.5	1010.0	1006.0	1010.2	1009.2

متوسط مقدار تبخیر-تعرق در دوره زمانی آینده نزدیک تحت سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) در مدل M به ترتیب دو و چهار میلی متر کاهش و در مدل G نیز به ترتیب ۱/۷۵ و چهار میلی متر کاهش داشته است. در دوره زمانی آینده دور نیز تبخیر-تعرق تحت سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) در مدل M به ترتیب ۱/۵ و ۵/۵ میلی متر کاهش و در مدل G نیز به ترتیب ۱/۲۵ و ۲/۲۵ میلی متر کاهش نشان داده است. به طور کلی مقایسه نتایج شبیه سازی تبخیر-تعرق در تیمارهای مختلف مورد بررسی در دوره های زمانی آینده نسبت به دوره پایه در این پژوهش نشان دهنده کاهش تبخیر-تعرق و در واقع کاهش نیاز آبی گیاه است. با وجودی که افزایش درجه حرارت در آینده نیاز به تبخیر را افزایش خواهد داد ولی بررسی ها نشان می دهد که افزایش غلظت CO₂ موجب افزایش مقاومت روزنه ای و به دنبال آن کاهش تعرق می شود. این پدیده همراه با کوتاه تر شدن طول دوره رویش چغندر قند در نهلیت باعث کاهش آب مصرفی چغندر قند در طی فصل رشد خواهد شد.

شبیه سازی عملکرد چغندر قند در دوره زمانی آینده نزدیک بر اساس دو مدل گردش عمومی جو مورد استفاده (M و G) تحت سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) در شکل (۳) ارائه شده است.

تغییرات عملکرد تحت تنش آبی و کودی مشابه تیمارهای مشاهده ای بود که این مهم در دهه های آتی نیز واضح است. در مدل G، میانگین عملکرد در آینده نزدیک برای دو سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۴۰۷۴۶ و ۳۸۰۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب بود. این مقادیر نسبت به شرایط فعلی به ترتیب ۴۰ و ۴۴ درصد کمتر بود. احتمالاً این نتایج به دلیل افزایش دمای هوا و در نتیجه افزایش میزان تنش آبی است. از طرفی کاهش دوره رشد به دلیل تغییرات دما حداقل و حداکثر، سبب کاهش عملکرد می شود. همچنین میزان کاهش عملکرد در آینده دور بیشتر از آینده نزدیک خواهد بود. حداقل و حداکثر عملکرد چغندر قند نیز در مدل G برای سناریو حد واسط (SSP2-4.5) به ترتیب ۲۵۴۰۴ و ۵۸۱۵۱ کیلوگرم بر

مترمکعب بود که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط فعلی به ترتیب ۵۶ و ۲۹ درصد کاهش یافت. این نتایج نشان داد که تغییرات عملکرد در شرایط تنش آبی و کودی بسیار بیشتر از شرایط تأمین کامل نیاز تغذیه ای و آبی گیاه است. حداقل و حداکثر عملکرد در سناریو خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) بر اساس مدل G به ترتیب ۲۲۷۰۴ و ۵۵۴۵۱ کیلوگرم بر هکتار به دست آمد که به ترتیب نسبت به شرایط فعلی ۶۱ و ۳۲ درصد کاهش نشان داد. تغییرات حداقل و حداکثر عملکرد در سناریو خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) نیز بیشتر از سناریو حد واسط (SSP2-4.5) است و تفاوت بین دو حداقل و حداکثر عملکرد در شرایط تأمین و عدم تأمین نیاز کامل کودی و آبی مشاهده شد. متوسط عملکرد چغندر قند بر اساس مدل M برای دوره آینده نزدیک تحت سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۴۱۵۴۶ و ۳۸۷۴۶ کیلوگرم بر هکتار بود. حداقل عملکرد برای این دو سناریو به ترتیب ۲۶۲۰۴ و ۲۳۴۰۴ کیلوگرم بر هکتار و حداکثر عملکرد برای این دو سناریو به ترتیب ۵۸۹۵۱ و ۵۶۱۵۱ کیلوگرم بر هکتار بود. مقایسه این نتایج با مدل G نشان داد که گرچه عملکرد در مدل M بیشتر بود با این وجود نتایج کاهش عملکرد در مدل G نیز وجود دارد و احتمالاً در آینده نزدیک کاهش شدید عملکرد در صورت اعمال تنش آبی و کودی و کاهش کم عملکرد در صورت تأمین کامل نیاز آبی و تغذیه ای رخ خواهد آمد.

نتایج شبیه سازی عملکرد در آینده دور نیز در شکل (۳) ارائه شده است. متوسط عملکرد در مدل G برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۵۲۰۷۷ و ۴۹۳۷۷ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. این نتایج در مدل M به ترتیب ۵۲۸۷۷ و ۵۰۰۷۷ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. حداقل عملکرد در مدل M برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۴۲۸۸۳ و ۴۰۱۸۳ کیلوگرم در هکتار و حداکثر عملکرد نیز به ترتیب ۶۵۴۲۱ و ۶۲۷۲۱ کیلوگرم در هکتار بود. متوسط عملکرد در مدل G برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۵۲۸۷۷ و ۵۰۰۷۷ کیلوگرم در هکتار تعیین گردید.

حداقل عملکرد در این مدل برای سناریوهای اشاره شده به ترتیب ۴۳۶۸۳ و ۴۰۸۸۳ و حداکثر عملکرد به ترتیب ۶۶۲۲۱ و ۶۳۴۲۱ کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. مقایسه این نتایج نشان داد که مدل G عملکرد را بیشتر از مدل M برآورد نموده ولی در حالت کلی عملکرد بیشتر از دوره آینده نزدیک محاسبه شده است. علت آن احتمالاً افزایش بیشتر دما و کاهش اختلاف بین حداقل و حداکثر دما (و در نتیجه درجه روز رشد) و افزایش فتوسنتز است. گرچه در این شرایط نیز عملکرد نسبت به شرایط مشاهده‌ای کمتر است.

شبیه‌سازی بهره‌وری آب چغندر قند در دوره‌های زمانی آینده نزدیک و آینده دور بر اساس دو مدل گردش عمومی جو مورد استفاده (M و G) تحت سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) در شکل (۳) ارائه شده است. مدل AquaCrop بر اساس مدل G، میانگین بهره‌وری آب در آینده نزدیک برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) را به ترتیب ۵/۴۷ و ۵/۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد نمود. این مقادیر نسبت به شرایط کنونی به ترتیب ۴۰ و ۴۴ درصد کمتر بود. پارامتر حداکثر بهره‌وری آب با استفاده از مدل AquaCrop در دوره زمانی آینده نزدیک (۱۴۲۳-۱۴۰۴) بر اساس مدل G برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۶/۳۴ و ۶/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط کنونی به ترتیب ۴۰ و ۴۲ درصد کاهش خواهد داشت. حداقل بهره‌وری آب نیز با استفاده از مدل AquaCrop در دوره زمانی آینده نزدیک بر اساس مدل G برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۴/۱۷ و ۳/۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط کنونی به ترتیب ۴۲ و ۴۹ درصد کاهش خواهد داشت.

مدل AquaCrop بر اساس مدل M، میانگین بهره‌وری آب در آینده نزدیک برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) را به ترتیب ۵/۵۸ و ۵/۱۹ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد نمود. این مقادیر نسبت به شرایط کنونی به

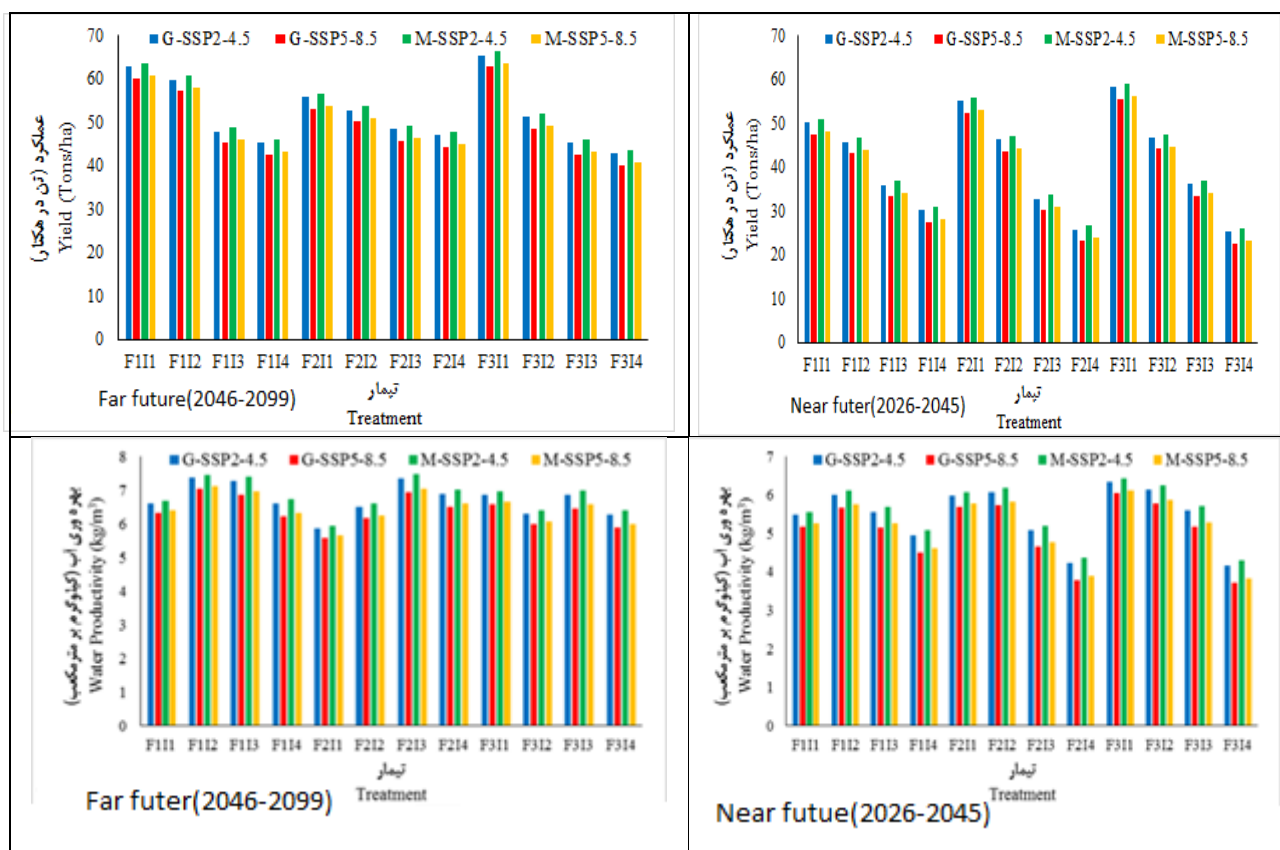
ترتیب ۳۹ و ۴۳ درصد کمتر بود. حداکثر بهره‌وری آب با استفاده از مدل AquaCrop در دوره زمانی آینده نزدیک بر اساس مدل M برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۶/۴۳ و ۶/۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط کنونی به ترتیب ۳۹ و ۴۲ درصد کاهش خواهد داشت. حداقل بهره‌وری آب نیز با استفاده از مدل AquaCrop در دوره زمانی آینده نزدیک (۱۴۲۳-۱۴۰۴) بر اساس مدل M برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۴/۳۰ و ۳/۸۴ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط کنونی به ترتیب ۴۱ و ۴۷ درصد کاهش خواهد داشت.

مدل AquaCrop بر اساس مدل G، میانگین بهره‌وری آب در آینده دور (۱۴۲۳-۱۴۶۸) برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) را به ترتیب ۶/۷۴ و ۶/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد نمود. این مقادیر نسبت به شرایط کنونی به ترتیب ۲۶ و ۳۰ درصد کمتر بود. حداکثر بهره‌وری آب با استفاده از مدل AquaCrop در دوره زمانی آینده دور بر اساس مدل G برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۷/۳۷ و ۷/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط کنونی به ترتیب ۳۰ و ۳۳ درصد کاهش خواهد داشت. حداقل بهره‌وری آب نیز با استفاده از مدل AquaCrop در دوره زمانی آینده دور (۱۴۲۳-۱۴۶۸) بر اساس مدل G برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۵/۸۶ و ۵/۵۸ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط کنونی به ترتیب ۲۰ و ۲۴ درصد کاهش خواهد داشت.

مدل AquaCrop بر اساس مدل M، میانگین بهره‌وری آب در آینده دور (۱۴۲۳-۱۴۶۸) برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) را به ترتیب ۶/۸۴ و ۶/۴۷ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد نمود. این مقادیر نسبت به شرایط کنونی به ترتیب ۲۵ و ۲۹ درصد کمتر بود. حداکثر بهره‌وری آب

آینده نزدیک بر اساس مدل M برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۵/۹۵ و ۵/۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط کنونی به ترتیب ۱۹ و ۲۳ درصد کاهش خواهد داشت.

با استفاده از مدل AquaCrop در دوره زمانی آینده دور بر اساس مدل M برای سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۷/۴۸ و ۷/۱۲ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد که نسبت به مقادیر متناظر در شرایط کنونی به ترتیب ۲۹ و ۳۲ درصد کاهش خواهد داشت. حداقل بهره‌وری آب نیز با استفاده از مدل AquaCrop در دوره زمانی



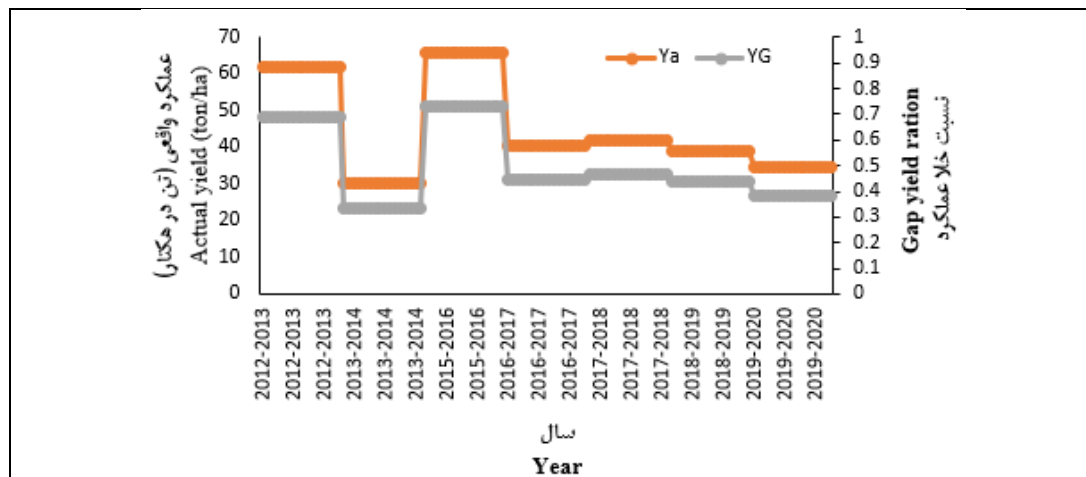
شکل ۳ تغییرات عملکرد و بهره‌وری آب بر اساس سناریوها و مدل‌های مورد استفاده در دوره زمانی آینده نزدیک و آینده دور

Fig. 3 Changes in yield and water productivity under different scenarios in the near- and far-future

شود. مقایسه خلا عملکرد در طول دهه‌ی ۹۰ خورشیدی نشان می‌دهد که میان عملکرد پتانسیل و عملکرد واقعی، ۴۰ تا ۷۰ درصد اختلاف وجود دارد (شکل ۴).

بهبود عملکرد در دوره‌های آینده

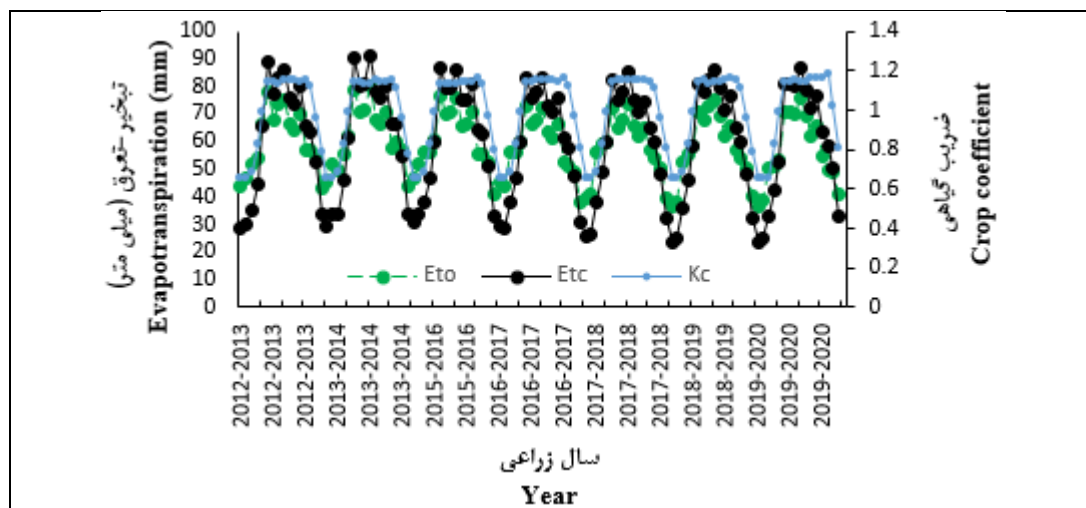
نظر به این که عملکرد چغندر قند در دهه‌های آینده کاهش خواهد یافت، لازم است تدابیری برای جبران آن در نظر گرفته



شکل ۴ تغییرات عملکرد واقعی و خلأ عملکرد چغندر قند
Fig. 4 Changes in actual and yield gap of sugar beet

می‌باشد. بدین منظور، ابتدا میزان تبخیر-تعرق واقعی و پتانسیل در قزوین بررسی شد (شکل ۵).

اگرچه روش‌های زراعی و غیر زراعی برای بهبود عملکرد گیاهان مختلف از جمله چغندر قند ارائه شده است لیکن توجه به مدیریت منابع و پیدا کردن مسأله بهترین و اساسی‌ترین روش



شکل ۵ تغییرات ضریب گیاهی و تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_0) و واقعی (ET_c) چغندر قند
Fig. 5 Changes in sugar beet crop coefficient and potential (ET_0) and actual (ET_c) evapotranspiration

ارقامی که عملکرد بالا و ضریب گیاهی کمتر در انتهای دوره رشد دارند می‌تواند به افزایش عملکرد و کاهش مصرف آب نیز کمک کند. این دو عامل در واقع به معنی کاهش ضریب گیاهی در انتهای دوره‌ی رشد است زیرا در شرایط فعلی مقدار آن بیشتر از یک شده و همین موضوع سبب افزایش تبخیر-تعرق و وابستگی گیاه به تأمین آب آبیاری است. از طرفی در صورت عدم تأمین آب مورد نیاز برای تبخیر-تعرق، گیاه با تنش آبی مواجه شده و عملکرد آن به شدت کاهش می‌یابد. مجموع این

نتایج نشان داد که میان تبخیر و تعرق واقعی و پتانسیل چغندر قند تفاوت زیادی وجود دارد. این تفاوت به دلیل ضریب گیاهی (K_c) پایین این گیاه در شرایط فعلی است. میزان K_c چغندر قند در ابتدا و میانه‌ی دوره رشد بسیار کم است. این موضوع به دلیل تراکم پایین این گیاه است بنابراین با افزایش تراکم می‌توان تا حدی این مشکل را رفع کرد. سایر محققان نیز افزایش تراکم را سبب بهبود عملکرد چغندر قند گزارش کرده‌اند (Kulan and Kaya 2023). از طرف دیگر، استفاده از

عوامل سبب کاهش بهره‌وری آب و افزایش آب مجازی می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در مدل G، میانگین عملکرد در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۴۰۷۴۶ و ۳۸۰۴۶ کیلوگرم در هکتار بود. این مقادیر نسبت به شرایط فعلی به ترتیب ۴۰ و ۴۴ درصد کمتر بود. متوسط عملکرد چغندر قند بر اساس مدل M برای آینده‌ی نزدیک تحت سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۴۱۵۴۶ و ۳۸۷۴۶ کیلوگرم در هکتار بود. مقایسه این نتایج با مدل G نشان داد که گرچه عملکرد در این مدل بیشتر بود، با این وجود نتایج کاهش عملکرد در مدل G نیز وجود دارد و احتمالاً در آینده‌ی نزدیک کاهش شدید عملکرد در صورت اعمال تنش آبی و کودی و کاهش کم عملکرد در صورت تأمین کامل نیاز آبی و تغذیه‌ای به وجود خواهد آمد. در آینده دور، متوسط

عملکرد در مدل G برای دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۵۲۰۷۷ و ۴۹۳۷۷ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. این نتایج در مدل M به ترتیب ۵۲۸۷۷ و ۵۰۰۷۷ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. برای رفع مشکل کاهش عملکرد در دهه‌های آتی، خلأ عملکرد چغندر قند در شهرستان قزوین بررسی شد. نتایج نشان داد که بین ۴۰ تا ۷۰ درصد اختلاف بین پتانسیل عملکرد و عملکرد واقعی وجود دارد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

سپاسگذاری

نگارندگان از مؤسسه تحقیقات خاک و آب کرج به دلیل همکاری و حمایت ارزشمند در طول اجرای این مطالعه تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع مورد استفاده:

References

- Akbari F, Shourian M, Moridi A. Assessment of the climate change impacts on the watershed-scale optimal crop pattern using a surface-groundwater interaction hydro-agronomic model. *Agricultural Water Management*. 2022; 265: 107508.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107508>
- Akumaga U, Tarhule A, Yusuf AA, Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2017; 232, 225–234.
Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.011>
- Alishiri R, Paknejad F, Aghayari F. Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop. *Bioscience*. 2014; 4(4): 1-9. Doi: <https://doi.org/10.12692/ijb/4.4.1-9>
- Andarzian B, Bannayan M, Steduto P, Mazraeh H, Barati ME, Barati MA, Rahnema A. Validation, and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*. 2011; 100:1-8. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Behmanesh A, Egdernezhad A, Sepehri S. Evaluation of AquaCrop model in simulating safflower yield, biomass and water productivity under different Irrigation amounts. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2021; 52(9): 2399-2413. Doi: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.327254.669026>. (in Persian)
- Daneshfaraz R, Razzaghpour H. Evaluation of climate change impacts on potential evapotranspiration in the West Azerbaijan province. *Geographic Space*. 2014; 46(4), 199-211. (in Persian)
- Ebrahimipak NA, Mostashari M. Evaluation of irrigation water management and boron fertilizer to increase water use efficiency of sugar beet. *Water and Irrigation Management*. 2013; 2(2), 53-67. Doi: <https://doi.org/10.22059/jwim.2013.30340>. (in Persian)
- Ebrahimipak NA, Tafteh A. Determination of yield –water use function for sugar beets in Qazvin. *Journal of Sugar Beet*. 2017; 33(1): 47-63. (In Persian with English abstract). Doi: <https://doi.org/10.22092/jsb.2017.1319>.
- Ebrahimipak NA, Ahmadee M, Egdernezhad A, KhasheiSiuki A. Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (*Crocus sativus* L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 2018; 8(1), 117-132. (in Persian).

- Farahani HJ, Izzi G, Steduto P, Oweis TY. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy*. 2009; 101: 469-476. Doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0182s>
- Garcia-Vila M, Fereres E, Mateos L, Orgaz F, Steduto P. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy*. 2009; 101: 477-487. Doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0179s>
- Geerts S, Raes D, Garcia M, Miranda R, Cusicanqui JA. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) with FAO-AquaCrop. *Agronomy*. 2009; 101: 499-508. Doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0137s>
- Gholami A, Egdernezhad A, Ebrahimipak NA. Simulation of the effect of irrigation management on yield, biomass and water use efficiency of canola (*Brassica napus* L.) using AquaCrop model. *Journal of Crop Ecophysiology*. 2023; 17(2): 205-222. (in Persian). Doi:<https://doi.org/10.30495/JCEP.2023.1930748.1804>
- Heng Lk, Hsiao T. C. Evett S, Howell T, Steduto P. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy*. 2009; 101(3): 488-498. Doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Huo Z, Dai X, Feng Sh, Kang Sh, Huang G. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. *Journal of Hydrology*. 2013; 492, 24-34. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.011>
- Hsiao TC, Heng LK, Steduto P, Raes D, Fereres E. AquaCrop-model parameterization and testing for maize. *Agronomy*. 2009; 101: 448-459. Doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Koocheki A, Nasiri Mahalati M. Climate change Effects on agricultural production of Iran: II. Predicting productivity of field crops and adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 2016; 14(1), 1-20. Doi:<https://doi.org/10.22067/gsc.v14i1.51157>. (in Persian)
- Kulan EG, Kaya MD. Effects of weed-control treatments and plant density on root yield and sugar content of sugar beet. *Sugar Tech*. 2023; 25: 805–819. Doi:<https://doi.org/10.1007/s12355-023-01249-0>
- Kunz R, Schulze R, Mabhaudhi T, Mokonoto O. Modeling the potential impacts of climate change on yield and water use of sugarcane and sugar beet: preliminary results based on the AquaCrop model. *South African Sugar Association*. 2014; 87: 285-289.
- Lhomme JP, Mougou R, Mansour M. Potential impact of climate change on durum wheat cropping in Tunisia. *Journal of Climatic Change*. 2009; 96(4), 549-564. Doi:<https://doi.org/10.1007/s10584-009-9571-9>
- Malik A, Shakir AS, Ajmal M, Jamal Khan M, Ali Kan T. Canopy cover, biomass and root yield under different irrigation and field management practices in semi-arid regions of Pakistan. *Water Resources Management*. 2017; 31: 4275-4292. Doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-017-1745-z>
- Mohammadzadeh Z, Soltani A, aJamnoroezi H, Bazrgar AB. Modeling of sugar beet yield gap and potential in Iran. *Journal of Sugar Beet*. 2020; 36(1): 27-46. (In Persian with English abstract). Doi:<https://doi.org/10.22092/jsb.2021.352324.1255>
- Moradi R, Koocheki A, Nassiri Mahallati M. Effect of climate change on maize production and shifting of planting date as adaptation strategy in mashhad. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*. 2014; 23(4): 111-130. (in Persian)
- Raes D, Steduto P, Hsiao TC, Fereres E. AquaCrop-the FAO Crop model to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*. 2009; 101, 438-447. Doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Ranjbar A, Rahimikhoob A, Ebrahimian H. Evaluating Semi-Quantitative Approach of the AquaCrop model for simulating maize response to nitrogen fertilizer. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2017; 11(2): 286-298.
- Saadati Z, Delbari M, Panahi M, Amiri E, Rahimian M, Ghodsi M. Evaluation of the effects of climate change on wheat growing period and evapotranspiration using the CERES-wheat model (Case Study: Mashhad). *Water and Soil Science*. 2016; 26(3), 67-79. (in Persian)
- Saadati Z, Delbari M, Amiri E. Simulation of sugar beet growth under water stress using AquaCrop model. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 2018; 7(3): 1-19. (in Persian)
- Shirdeli A, Khani Temeliyeh Z, Fakhimi P, khani temeliyeh S, Mirabbasi-Najafabadi R. Evaluation of climate change and its effects on tomato yield in Abhar Plain. *Water and Soil Management and Modelling*. 2022; 2(1), 63-75. Doi:<https://doi.org/10.22098/mmws.2022.9429.1041>. (in Persian)
- Soltani A, Gholipoor M. Simulating the impact of climate change on growth, yield and water use of chickpea. *Journal of agricultural sciences and natural resources*. 2006; 13(2): 69-79. (in Persian)

- Steduto P, Hsiao TC, Raes D, Fereres E. AquaCrop-the FAO Crop model to simulate yield response to water I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 2009; 101, 426-437. Doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Stricevic R, Cosic M, Djurovic N, Pejic B, Maksimovic L. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 2011; 98: 1615-1621. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.011>
- Sun SK, Li C, Wu PT, Zhao XN, Wang YB. Evaluation of agricultural water demand under future climate change scenarios in the Loess Plateau of Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*. 2018; 84: 811-819. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.09.048>
- Todorovic M, Albrizio R, Zivotic L, Abisaab M, Stwckle C. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy*. 2009; 101: 509-521. Doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s>
- Van Gaalen H, Tsegay A, Delbecque N, Shrestha N, Garcia M, Fajardo H, Miranda R, Vanuytrecht E, Abrha B, Diels J, Raes D. Asemi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the Aqua crop procedure. *Journal of Agricultural Science*. 2014; 1-16. Doi:<https://doi.org/10.1017/S0021859614000872>.