

# Assessment of Climate Change and Planting Date Impacts under IPCC Scenarios on Pea Yield Using the AquaCrop Model

M. Hoseini, M. Khoshrovesh \* , M. A. Gholami Sefidkouhi, and

R. Norouz Valashedi

MSc Student of Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. [mahsah77h@gmail.com](mailto:mahsah77h@gmail.com)

Associate Prof., Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. [m.khoshrovesh@sanru.ac.ir](mailto:m.khoshrovesh@sanru.ac.ir)

Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. [magholamis@yahoo.com](mailto:magholamis@yahoo.com)

Assistant Prof., Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. [rezanorooz@yahoo.com](mailto:rezanorooz@yahoo.com)

Received: September 2024 and Accepted: December 2024

## Abstract

In this study, AquaCrop model was employed to simulate the grain yield of pea plants under future climate conditions, considering various irrigation treatments and different planting dates as an adaptation strategy, in Babol County, Iran. The grain yield and biomass of pea plants were simulated for the next three decades for planting dates of October (16, 23, and 30), November 6, 13, 20, and 27), under future climate scenarios of 126SSP, 245SSP, and 585SSP of Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Report, and three levels of irrigation: 100% ( $I_1$ ), 80% ( $I_2$ ), and 60% ( $I_3$ ). According to the results, the highest pea yield in the 2023-32 was simulated for the  $I_1$  treatment under the 585SSP scenario on November 6, yielding 7.2 t/ha, while the lowest yield was simulated for the  $I_3$  treatment under the same scenario on November 27, yielding 4.1 t/ha. In 2033-42, the highest yield was observed for  $I_1$  under the 585SSP scenario on November 13, yielding 8.4 t/ha, and the lowest yield for  $I_3$  under the 245SSP scenario on November 27, yielding 4.4 t/ha. In the 2043-52, the highest yield was simulated for  $I_1$  under the 585SSP scenario on November 9, yielding 8.7 t/ha, while the lowest yield belonged to  $I_3$  under 126SSP on October 16, yielding 3.9 t/ha. The highest pea biomass in 2023-32 was simulated for  $I_1$  under the 585SSP scenario on November 13, yielding 17.1 t/ha, while the lowest biomass belonged to  $I_3$  under the same scenario on November 27, yielding 10.3 t/ha. In 2033-42, the highest biomass was simulated for  $I_1$  under the 585SSP on November 20, yielding 20.1 t/ha, and the lowest biomass for the  $I_3$  under the 245SSP scenario on November 27, yielding 11.1 t/ha. In 2043-52, the highest biomass was for the  $I_1$  under the 126SSP scenario on November 13, yielding 20.6 t/ha, while the lowest biomass was observed for  $I_3$  under the 245SSP on November 27, yielding 12.7 t/ha. Therefore, the optimal planting dates for pea crops in Babol County are October 30, November 6 and 13, under the  $I_1$  irrigation, which can help improve crop and irrigation management in this region. Overall, climate change can lead to both increases and decreases in pea yield and biomass, but with proper irrigation management and selection of the optimal planting dates, the likelihood of yield increase is higher.

**Keywords:** Crop model, Irrigation management, Babol County, Cultivation management.

\* - Corresponding author's email: [m.khoshrovesh@sanru.ac.ir](mailto:m.khoshrovesh@sanru.ac.ir)  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.366835.1053>

## بررسی اثرهای تغییر اقلیم و تاریخ کشت در سناریوهای پانل بین‌المللی تغییر اقلیم بر

### عملکرد نخود فرنگی با استفاده از مدل AquaCrop

سیده مهسا حسینی، مجتبی خوش‌روش\* , محمد علی غلامی سفیدکوهی

و رضا نوروز ولاشدی

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

[saeidhabibi990@yahoo.com](mailto:saeidhabibi990@yahoo.com)

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

[khoshravesh\\_m24@yahoo.com](mailto:khoshravesh_m24@yahoo.com); [m.khoshravesh@sanru.ac.ir](mailto:m.khoshravesh@sanru.ac.ir)

استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

[magholamis@yahoo.com](mailto:magholamis@yahoo.com)

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

[rezanorooz@yahoo.com](mailto:rezanorooz@yahoo.com)

دریافت: شهریور ۱۴۰۳ و پذیرش: آذر ۱۴۰۳

#### چکیده

به منظور استفاده از مدل‌های گیاهی برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات زراعی، مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه نخودفرنگی در اقلیم آینده، در تیمارهای مختلف آبیاری و تاریخ‌های مختلف کشت در شهرستان بابل بکار گرفته شد. برای شبیه‌سازی مقادیر عملکرد دانه و زیست توده نخودفرنگی در سه دهه آینده، برای تاریخ‌های کشت ۲۵ مهر، آبان (۲، ۹، ۱۶، ۲۳ و ۳۰) و ۷ آذر تحت گزینه‌های وضعیت اقلیمی آینده SSP۱۲۶، SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ از گزارش ششم پانل بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) و در سه سطح ۱۰۰% (I<sub>1</sub>)، ۸۰% (I<sub>2</sub>) و ۶۰% (I<sub>3</sub>) آبیاری کامل استفاده شد. با توجه به نتایج، بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه ۲۰۲۳-۳۲ در تیمار I<sub>1</sub> گزینه SSP ۵۸۵ در ۱۶ آبان به مقدار ۷/۳ تن در هکتار و کم‌ترین عملکرد در تیمار I<sub>3</sub> گزینه SSP۵۸۵ در ۷ آذر برابر ۴/۱ تن در هکتار شبیه‌سازی شد. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در ۲۰۳۳-۴۲ در تیمار I<sub>1</sub> گزینه SSP۵۸۵ در ۲۳ آبان برابر ۸/۴ تن در هکتار و کم‌ترین عملکرد در I<sub>3</sub> گزینه SSP۲۴۵ در ۷ آذر برابر ۴/۴ تن بر هکتار بود. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در ۲۰۴۳-۵۲ در I<sub>1</sub> گزینه SSP۵۸۵ در ۹ آبان برابر ۸/۷ تن در هکتار و کم‌ترین عملکرد در تیمار I<sub>3</sub> گزینه SSP۱۲۶ در ۲۵ مهر به مقدار ۳/۹ تن بر هکتار شبیه‌سازی شد. بیشترین مقدار زیست توده نخودفرنگی در ۲۰۲۳-۲۰۳۲ در تیمار I<sub>1</sub> گزینه SSP ۵۸۵ در ۲۳ آبان به مقدار ۱۷/۱ تن در هکتار و کم‌ترین مقدار در تیمار I<sub>3</sub> گزینه SSP۵۸۵ در ۷ آذر به مقدار ۱۰/۳ تن بر هکتار به دست آمد. نیز، بیشترین مقدار زیست توده در ۲۰۳۳-۴۲ در تیمار I<sub>1</sub> گزینه SSP۵۸۵ در ۳۰ آبان برابر ۲۰/۱ تن در هکتار و کم‌ترین مقدار در I<sub>3</sub> گزینه SSP۲۴۵ در ۷ آذر به مقدار ۱۱/۱ تن بر هکتار شبیه‌سازی شد. بیشترین مقدار زیست توده در ۲۰۴۳-۵۲ در I<sub>1</sub> گزینه SSP۱۲۶ در ۲۳ آبان به مقدار ۲۰/۶ تن در هکتار و کم‌ترین مقدار در تیمار I<sub>3</sub> تحت گزینه SSP۲۴۵ در ۷ آذر برابر ۱۲/۷ تن بر هکتار شد. بنابراین بهترین زمان تاریخ کشت برای گیاه نخودفرنگی در شهرستان بابل در تاریخ‌های ۹، ۱۶ و ۲۳ آبان در تیمار آبیاری I<sub>1</sub> می‌باشد که از این نتایج می‌توان برای مدیریت بهتر کشت و آبیاری در شهرستان بابل استفاده نمود. به‌طور کلی تغییر اقلیم می‌تواند هم باعث افزایش و هم کاهش عملکرد و زیست توده نخودفرنگی شود، اما با مدیریت مناسب آبیاری و انتخاب تاریخ کشت، احتمال افزایش عملکرد بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: مدل گیاهی، مدیریت آبیاری، شهرستان بابل، مدیریت کشت

\* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: [m.khoshravesh@sanru.ac.ir](mailto:m.khoshravesh@sanru.ac.ir)



گلخانه‌ای به روند فعلی خود ادامه دهد یا حتی بالاتر برود، ممکن است گرمایش جهانی به بیش از چهار درجه سانتی-گراد برسد و تأثیرات شدید و غیرقابل برگشت تغییر اقلیم را به همراه داشته باشد (اونیل و همکاران، ۲۰۱۷).

انتخاب تاریخ کاشت مطلوب یکی از عوامل مهم و اصلی در مدیریت زراعی است که با انطباق فرایندهای فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی و مراحل فنولوژیکی گیاه مانند رشد رویشی، رشد زایشی و گلدهی و کل دوره رشد با شرایط مطلوب آب و هوایی سبب تعیین پتانسیل عملکرد هر محصول در هر منطقه و محیطی می‌گردد (جلالی و همکاران، ۱۳۹۴). تاریخ کاشت مناسب به‌عنوان تاریخی تعریف می‌شود که در آن عملکرد به حداکثر می‌رسد و موجب بهره‌گیری بهینه از عوامل اقلیمی نظیر درجه حرارت، رطوبت، طول روز و همچنین تطابق زمان گلدهی با درجه حرارت مناسب می‌گردد (فراهانی پاد و همکاران، ۱۳۹۰). تاریخ کاشت نامناسب منجر به مواجهه دوران رشد رویشی و زایشی گیاه با شرایط نامساعد محیطی می‌گردد (حق‌وردیان و همکاران، ۱۳۹۰) که عدم کفایت رشد رویشی منجر به کاهش ذخیره غذایی و نقصان عملکرد می‌گردد (انوری ساوجبلاغی و همکاران، ۱۳۹۰). در نهایت با دیر هنگام و زودهنگام شدن زمان تاریخ کاشت خارج از تاریخ کاشت مناسب، عملکرد محصول کاهش می‌یابد؛ بنابراین، درک اینکه چگونه تغییرات آب و هوایی بر تاریخ کاشت در مقیاس‌های زمانی و مکانی تأثیر خواهد گذاشت، اهمیت بالایی دارد.

یکی از گیاهان زراعی که شرایط اقلیمی آینده زمین می‌تواند کشت و کار آن را دستخوش تغییر کند، گیاه نخودفرنگی است. نخود یک محصول حبوبات دانه معتدل است (مونیرجولین و همکاران، ۲۰۱۰) که در طول دوره پاییز تا بهار رشد می‌کند؛ بنابراین بیشتر در طول فصل بارانی رشد کرده و عوامل اقلیمی می‌توانند سبب محدودیت توان تولیدی نخودفرنگی شوند. به همین دلیل لازم است که اثر عوامل اقلیمی بر عملکرد نخودفرنگی تحت شرایط کم

شواهد بسیار قوی مبنی بر اینکه عامل اصلی گرمایش جهانی زمین، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای (کربن دی‌اکسید، متان و مونواکسیدکربن) است، وجود دارد. گرم شدن زمین از اواسط قرن بیستم آغاز شده و انتظار می‌رود که این روند در سال‌های آینده نیز ادامه پیدا کند. تغییرات بلندمدت شرایط عمومی آب و هوایی زمین، تغییر اقلیم نامیده می‌شود که در اثر آن پارامترهای آب‌وهوا مانند دما و بارش در مناطق مختلف تغییر می‌یابد و در نتیجه آن رویدادهای حدی مانند سیل و خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت رخ خواهد داد (تاکاریندوا، ۲۰۱۳). ششمین گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم 'IPCC' که در سال ۲۰۲۱ منتشر شد، نشان می‌دهد که دمای کره زمین نسبت به دوره پیش از انقلاب صنعتی حدود یک درجه سلسیوس افزایش یافته است و این افزایش دما بر تولید محصولات کشاورزی تأثیرات منفی داشته است؛ زیرا کشاورزی، به دلیل وابستگی به پارامترهای آب‌وهوا، یکی از مهم‌ترین بخش‌های تأثیرپذیر از تغییر اقلیم است؛ بنابراین اتخاذ راهبردهای مناسب و سازگار با تغییرات آب و هوایی، بی‌تردید موجب کاهش اثرات منفی بر عملکرد محصولات کشاورزی می‌گردد (حسینی و همکاران، ۲۰۱۳؛ چالینور و همکاران، ۲۰۱۴؛ IPCC، ۲۰۱۴). از سوی دیگر همگام با تغییر اقلیم، علاوه بر کاهش عملکرد محصولات در نتیجه تأثیرپذیری منفی زیست‌توده نسبت به شرایط یاد شده موجب تشدید مسئله کمبود آب نیز می‌شود (ماکووارو و همکاران، ۲۰۱۸).

گزینه‌های گزارش ششم، بر اساس روش پیش‌بینی‌های مختلفی از تغییرات آب‌وهوا در آینده ارائه می‌دهند. برخی از این گزینه‌ها، نشان می‌دهند که اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای به سرعت کاهش یابد، می‌توان از رسیدن به حد بحرانی گرمایش جهانی (۱/۵ درجه سانتی‌گراد) جلوگیری کرد و تأثیرات منفی تغییر اقلیم را کاهش داد؛ اما برخی دیگر از گزینه‌ها، نشان می‌دهند که اگر انتشار گازهای

و با بقیه داده‌ها اعتبارسنجی شد. به‌طور کلی، در اعتبارسنجی مدل، RMSE برای عملکرد دانه  $0.58 \text{ Mg ha}^{-1}$  و زیست‌توده  $0.87 \text{ Mg ha}^{-1}$  به‌دست آمد و نتایج نشان داد که مدل AquaCrop یک مدل معتبر و اطمینان‌بخش برای شبیه‌سازی عملکرد گندم در دشت شمالی چین است. مورالس سانتوس و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری بر عملکرد سویا و بهره‌وری آب را در اتریش گزارش کردند. نتایج مطابقت مقادیر پوشش گیاهی و عملکرد شبیه‌سازی‌شده با مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان داد و ضرایب کارایی نش-ساتکلیف بین  $0.76$  و  $0.96$  بود و همچنین نتیجه‌گیری شد که کم‌آبیاری متوسط، راهبرد مناسبی برای بهبود عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری است و در مقابل، کم‌آبیاری شدید به‌طور قابل توجهی عملکرد را کاهش می‌دهد. چنگ و همکاران (۲۰۲۲) پژوهشی به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop برای عملکرد گوجه‌فرنگی گیلاسی تحت مدیریت‌های مختلف آب و نیتروژن پرداختند. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop شبیه‌سازی پوشش گیاهی، زیست‌توده و عملکرد نهایی را به‌خوبی ارائه کرده است اما تبخیر و تعرق و بهره‌وری آب را کم برآورد کرد و بهترین راهبرد مدیریت آبیاری برای عملکرد مطلوب محصول (I80N360) بود که  $98/24$  درصد از عملکرد مطلوب را به دست آورد. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) به‌منظور شبیه‌سازی رشد، عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی تحت رژیم‌های مختلف کم آبیاری در شمال غربی چین از مدل AquaCrop استفاده نمودند. مقدار NRMSE برای مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده برای پوشش گیاهی، زیست‌توده، عملکرد غده خشک، عملکرد غده تر و بهره‌وری آب به‌ترتیب  $14/7$ ،  $25$ ،  $12/21$ ،  $12/02$  و  $5/51$  درصد و ضریب تعیین مدل به ترتیب  $0/92$ ،  $0/92$ ،  $0/57$ ،  $0/53$  و  $0/91$  گزارش شده است که نشان دهنده تطبیق مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده و نیز دقت خوب مدل است. ریس و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی عملکرد یونجه با استفاده از مدل AquaCrop پرداختند که مدل توانست دقت خوبی

آبیاری با استفاده از مدل‌های گیاهی به‌ویژه مدل AquaCrop مورد بررسی قرار گیرد تا بر اساس یافته‌های آن، برنامه‌ریزی‌های کلان مدیریتی اعمال شود. اومش و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی عملکرد ذرت با استفاده از مدل AquaCrop در هند گزارش دادند که مدل دقت خوبی برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری آب برای تمام سطوح آبیاری نشان می‌دهد و نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین میانگین عملکرد دانه و بهره‌وری آب به‌ترتیب  $3/19$  تن در هکتار و  $10/65$  کیلوگرم بر هکتار-میلی‌متر در  $50$  میلی‌متر آبیاری و کمترین آن به-ترتیب  $1/78$  تن در هکتار و  $7/60$  کیلوگرم بر هکتار-میلی‌متر در  $10$  میلی‌متر آبیاری ثبت شده است. پژوهشی توسط قاسم بگلو و همکاران (۱۴۰۰) در شهرستان هریس استان آذربایجان شرقی بر روی عملکرد کمی و کیفی دانه نخودفرنگی تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری انجام گردید که طبق یافته‌ها تأثیر سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد معنی‌دار بود و باعث کاهش عملکرد و کاهش ارتفاع بوته، تعداد دانه در غلاف، تعداد غلاف در بوته، درصد پروتئین، شاخص برداشت، طول غلاف و افزایش وزن صد دانه گردید. چیب‌آبادا و همکاران (۲۰۲۰) به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد بادام‌زمینی تحت شرایط کم‌آبی در آفریقای جنوبی از مدل AquaCrop استفاده نمودند. این مدل توانست پوشش گیاهی و زیست‌توده جمعی را به‌خوبی شبیه‌سازی کند اما تبخیر و تعرق را بیش از حد برآورد کرد. کاندا و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشی به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop برای لوبیا چشم‌بلبلی تحت گزینه‌ی آبیاری کامل و کم آبیاری انجام دادند. نتایج نشان داد، مقادیر پوشش گیاهی، زیست‌توده نهایی، عملکرد و بهره‌وری آب اندازه‌گیری شده با مقادیر شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مطابقت داشت؛ بنابراین مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد محصول مناسب تشخیص داده شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای تحت کم‌آبیاری در ایستگاه لانچنگ در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۱ انجام شد و مدل AquaCrop با بخشی از داده‌ها واسنجی

علامت‌گذاری شده‌اند که نشان می‌دهند چگونه جامعه بشر و غلظت گازهای گلخانه‌ای در آینده تغییر خواهند کرد. دیگر تغییرات در سناریوهای گزارش ششم عبارتند از:

- استفاده از داده‌های جدید و به‌روزتر از مدل‌های تغییر اقلیم (CMIP6) که دقت و قابلیت پاسخگویی بالاتری نسبت به نسخه قبلی (CMIP5) دارند.

- پوشش مناطق جغرافیایی بیشتر و جزئی‌تر در سناریوهای تغییر اقلیم، به‌خصوص در مورد آفریقا، آسیا و جزایر کوچک.

- ارائه بازه‌های اطمینان و احتمالات بالاتر برای پیش‌بینی تغییرات دما، بارش، سطح دریا و رخداد‌های شدید آب و هوایی.

- لحاظ کردن عوامل غیرخطی و بازخوردها در سناریوهای تغییر اقلیم، مانند ذوب یخ‌های یخ، تغییرات در جرم خورشید و فعالیت آتشفشان‌ها.

در صورت انجام این پژوهش می‌توان برنامه‌ریزی صحیح و کارآمد جهت الگوی کشت و سازگاری نظام‌های تولید محصولات مورد نظر شهرستان بابل در شرایط اقلیمی آینده ارائه داد. هدف از این پژوهش استفاده از مدل AquaCrop در تخمین عملکرد نخودفرنگی تحت تأثیر تغییر اقلیم و تاریخ کشت در شرایط مختلف آبیاری در شهرستان بابل است.

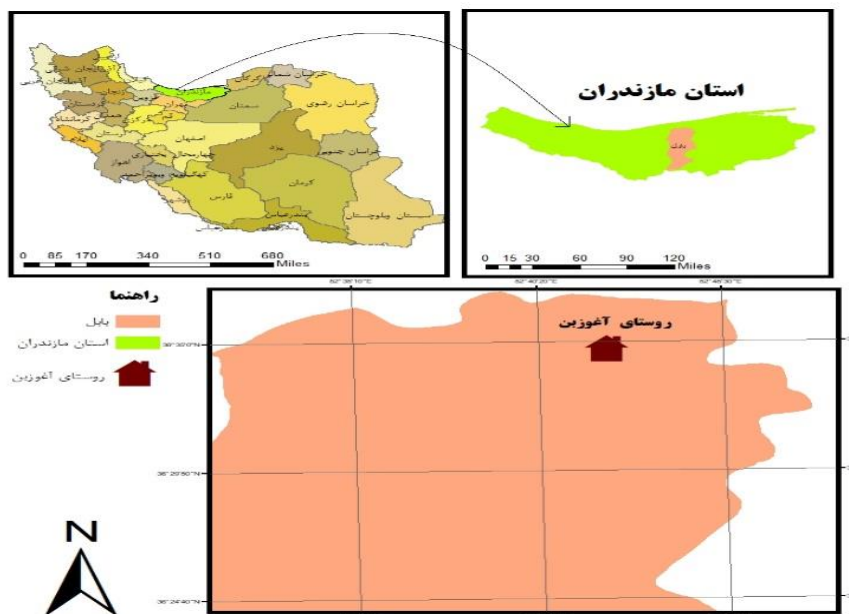
#### مواد و روش‌ها

داده‌های مورد بررسی این پژوهش مربوط به یداللهی و همکاران (۱۴۰۰) است. پژوهش مذکور در روستای آغوزبن شهرستان بابل واقع در استان مازندران به طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۴۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۴ دقیقه و ۱۰ ثانیه شمالی و ارتفاع دو متر پایین‌تر از سطح دریا در سال ۱۳۹۹ اجرا شد. این منطقه از نظر اقلیمی (با توجه به مدل تعیین اقلیم دومارتن) به‌عنوان اقلیم معتدل نیمه مرطوب محسوب می‌شود. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

را برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده نشان دهد. از این‌رو، مدل AquaCrop می‌تواند عملکرد محصولات زراعی را در اقلیم‌ها و محیط‌های مختلف به‌خوبی پیش‌بینی کند.

حسینی و همکاران (۱۳۹۴) در منطقه گرگان اثر تغییر اقلیم بر عملکرد سویا را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از مدل ریز مقیاس نمایی آماری-LARS-WG تحت گزینه‌های انتشار  $A_2$  و  $B_1$  پارامترهای هواشناسی برای دوره‌های آبی را با مدل AquaCrop شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که تحت گزینه‌های انتشار  $A_2$  و  $B_1$  برای دوره ۲۰۳۸-۲۰۱۱ نسبت به دوره پایه، مقادیر زیست‌توده و عملکرد دانه شبیه‌سازی شده به ترتیب بین ۵ تا ۱۱/۵ درصد و ۸/۳ و ۱۳/۷ درصد کاهش داشت و برای دوره ۲۰۶۶-۲۰۳۹ بین ۱۸/۶ تا ۲۴ درصد و ۱۶ تا ۲۴/۴ درصد افزایش داشت. برای دوره ۲۰۹۴-۲۰۶۷ بین ۹ تا ۲۱/۸ درصد و ۷/۲ تا ۲۱/۲ درصد افزایش نشان داد. سومر (۲۰۲۴) به بررسی عملکرد رقم‌های مختلف نخودفرنگی در تاریخ‌های مختلف کاشت (۱۵ نوامبر، ۳۰ نوامبر و ۱۵ دسامبر) در ترکیه پرداخت. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه نخودفرنگی در تاریخ کاشت دوم و سوم و بیشترین عملکرد دانه از ارقام میسیا و محلی بود. این مطالعه نشان داد که اثر تاریخ کاشت و ارقام بر عملکرد معنی‌دار بود.

بر اساس مطالعات گذشته، تاکنون پژوهشی با مدل گیاهی AquaCrop به همراه گزینه‌های اقلیمی جدید گزارش ششم IPCC برای بررسی اثر تغییرات اقلیم بر گیاه نخودفرنگی در شهرستان بابل انجام نشده است. یکی از تغییرات مهم در سناریوهای گزارش ششم نسبت به گزارش‌های قبلی، سناریوهای جدید SSPs است که برای تعریف سناریوهای تغییر اقلیم استفاده شده است. این روش، به‌جای تکیه بر فرضیات در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای، به عوامل اجتماعی-اقتصادی که موجب تغییرات آب‌وهوا می‌شوند توجه می‌کند؛ بنابراین، سناریوهای گزارش ششم با استفاده از حروف الفبا و عددها



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

درصد آبیاری کامل (I<sub>2</sub>) و ۶۰ درصد آبیاری کامل (I<sub>3</sub>) است. در این طرح آزمایشی کرت‌ها به ابعاد ۲×۲ (متر) و آرایش کاشت ۵۰×۲۰ (سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. میزان آبیاری تیمارهای مختلف آبیاری در جدول ۱ ارائه شده است.

پژوهش حاضر بر روی گیاه نخودفرنگی در شهرستان بابل واقع در استان مازندران انجام گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شده بود. تیمارهای مورد بررسی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰ درصد آبیاری کامل (I<sub>1</sub>), ۸۰

جدول ۱- میزان آبیاری تیمارهای مختلف آبیاری (یداللهی و همکاران، ۱۴۰۰)

ماه	۱۰۰ درصد نیاز آبی (mm)	۸۰ درصد نیاز آبی (mm)	۶۰ درصد نیاز آبی (mm)
از ۱۶ آبان	12.38	12.38	12.38
آذر	20.12	18.57	17.02
دی	49.02	39.21	29.40
بهمن	61.92	49.53	37.15
اسفند	77.39	61.91	46.43
تا ۱۶ فروردین	50.59	41.64	32.86
مجموع	271.42	223.24	175.24

آب‌وهوا مجموعه‌ای از آزمایش‌های معروف به پروژه‌ی مقایسه‌ی مدل‌های جفت‌شده<sup>۲</sup> (CMIP) را از دهه‌ی ۱۹۹۰ منتشر کرده است که شبیه‌سازی‌های هدفمند و با کیفیتی را برای درک بهتر تغییرات اقلیمی گذشته و انجام پیش‌بینی‌ها و برآوردهای عدم قطعیت در آینده ارائه کرده است (آنان و هارگریوز، ۲۰۱۱). در حال حاضر گزارش ششم پروژه‌ی

#### مدل‌های گردش عمومی جو

برای پیش‌بینی تغییرات آینده اقلیمی از مدل‌های ریاضی با نام مدل‌های گردش عمومی<sup>۱</sup> (GCM) استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان این مدل‌ها به توان و صحت آن‌ها در بازتولید ویژگی‌های آب و هوایی پایه و دوره آینده بستگی دارد. در این زمینه، برنامه‌ی تحقیقات جهانی

مقایسه‌ی مدل‌های جفت شده (CMIP6) در حال انتشار است. به تازگی نیز، مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده از چندین مدل اقلیمی CMIP6 با حساسیت اقلیمی متفاوت منتشر شده است. هر تکرار جدید از پروژه‌ی مقایسه‌ی مدل‌های جفت شده بر این فرض استوار است که نسل نوین GCM نسبت به نسل‌های پیشین دارای پیشرفت‌های بیشتری است، زیرا مدل‌ها به تدریج از نظر کارایی محاسباتی، قدرت تفکیک‌پذیری و نمایش فرایندهای فیزیکی بهبود می‌یابند. در گزارش ششم در مقایسه با گزارش پنجم (CMIP5) به‌روزرسانی‌هایی در مورد افزودن پارامترها و فرایندهای فیزیکی جدید و افزایش تفکیک‌پذیری مکانی ارائه شده است (ایرینگ و همکاران، ۲۰۱۹). برونداد مدل‌های گزارش ششم فرصت جدیدی برای بررسی سامانه‌ی اقلیمی و پیش‌بینی‌های منطقه‌ای تحت گزینه‌های جدید فراهم می‌کنند. این گزینه‌ها که به SSPها معروف هستند تغییرات محتمل آینده را بر پایه‌ی جنبه‌های اجتماعی مانند عوامل جمعیتی، فنی، اقتصادی، حاکمیتی و محیطی توصیف و مدل می‌کنند (اونیل و همکاران، ۲۰۲۰). لذا پس از بررسی عدم قطعیت در محدوده طرح مطالعاتی این پژوهش از بهترین مدل ممکن استفاده شد.

### ریز مقیاس‌سازی برونداد مدل‌های GCM

مدل‌های گردش عمومی جو ابزار مفیدی برای شبیه‌سازی آب‌وهوایی گذشته، حال و آینده هستند. با این حال، یکی از محدودیت‌های عمده مدل‌های گردش عمومی، بزرگ‌مقیاس بودن متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده است و آن‌ها نیازمند ریزمقیاس‌نمایی هستند تا با اعمال رفتارهای محلی در آن‌ها، پیش‌بینی‌هایشان در مقیاس‌های محلی بهبود یابند. به این منظور، روش‌های گوناگونی از جمله روش‌های دینامیکی و آماری برای ریزمقیاس‌نمایی توسعه داده شده است. مدل‌هایی که برای ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی استفاده می‌شوند، بسیار شبیه همان مدل‌های گردش عمومی هستند، منتها گام‌های زمانی

و مکانی شبکه، ریزتر و دقیق‌تر است؛ مثلاً گام مکانی مدل‌های گردش عمومی حدود ۲/۵ در ۲/۵ درجه جغرافیایی و حدود ۲۵۰ کیلومتر در عرض‌های جغرافیایی محدوده کشور ایران است درحالی‌که گام‌های مکانی مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی بین ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر در نظر گرفته می‌شود. البته این عدد ثابت نیست و ممکن است گام‌های مکانی را ۱۰ کیلومتر در نظر گرفت. روش دیگری که می‌توان مدل‌های گردش عمومی را ریزمقیاس نمود، ریزمقیاس‌نمایی آماری است. در این روش یک ارتباط آماری با استفاده از رگرسیون ساده، چند متغیره، شبکه عصبی و غیره بین رفتار واقعی ایستگاه و برونداد مدل گردش عمومی ایجاد می‌شود. بعد از صحت‌سنجی، این معادلات می‌توانند در ریزمقیاس‌نمایی پیش‌بینی‌های آینده با استفاده از گزینه‌های انتشار، مورد استفاده قرار گیرند. هدف از ریزمقیاس‌نمایی پیش‌نگری‌های آینده برخی از متغیرها برای قابل استفاده کردن آن‌ها در سطح شبکه است که برای برنامه‌ریزی توسعه و تصمیم‌گیری برای راهبردهای کاهش و سازگاری مؤثر و کارآمد است. ریزمقیاس‌نمایی آماری روشی نسبتاً سریع و کارآمد برای فرموله کردن رابطه آماری بین بروندادهای مدل گردش عمومی و داده‌های مشاهداتی ایستگاه است و بیش از سایر روش‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (فاولر و همکاران، ۲۰۰۷)؛ بنابراین در این پژوهش ریزمقیاس‌نمایی آماری با استفاده از نرم‌افزار R و روش ریزمقیاس‌نمایی WorldClim انجام شد.

روش ریزمقیاس‌نمایی WorldClim یکی از ابزارهای معتبر برای تولید داده‌های اقلیمی با دقت بالا است که به‌ویژه در تحقیقات کشاورزی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به‌منظور کاهش عدم قطعیت‌های مربوط به داده‌های اقلیمی در مقیاس‌های بزرگ و ارائه داده‌های دقیق‌تر در مقیاس‌های محلی طراحی شده است. منابع داده: WorldClim از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی موجود در سطح جهانی استفاده می‌کند. این

داده‌ها شامل دما، بارش و سایر پارامترهای اقلیمی هستند که در طول زمان جمع‌آوری شده‌اند.

مدل‌سازی ریزمقیاس: این روش از تکنیک‌های ریزمقیاس‌سازی مانند Kriging و روش‌های آماری دیگر بهره می‌برد تا داده‌های اقلیمی را به مقیاس‌های کوچک‌تری مانند نواحی کشاورزی خاص تبدیل کند. این کار به محققان کمک می‌کند تا توزیع فضایی دقیق‌تری از پارامترهای اقلیمی داشته باشند.

کاربرد در کشاورزی: با استفاده از داده‌های ریزمقیاس شده، می‌توان تأثیرات تغییرات اقلیمی را بر عملکرد محصولات زراعی به‌طور دقیق‌تری ارزیابی کرد. در مطالعه ما، این داده‌ها به‌عنوان ورودی برای مدل AquaCrop استفاده شدند تا عملکرد نخودفرنگی تحت گزینه‌های مختلف اقلیمی شبیه‌سازی شود.

دقت و اعتبار: WorldClim به‌طور مداوم به‌روزرسانی می‌شود و داده‌های آن بر اساس تحقیقات و مشاهدات جدید بهبود می‌یابد. این ویژگی باعث می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده از این داده‌ها، معتبر و قابل اعتماد باشند.

### مدل AquaCrop

یکی از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه مدل AquaCrop است که از اصلاح و بازنگری نشریه ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به دست آمده است. مدل AquaCrop یک ابزار قدرتمند و با ارزش برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و بهره‌وری آب است، سادگی مدل AquaCrop نیاز به داده‌های ورودی کمتر و دقت قابل قبول از مزایای استفاده از آن است (استدوتو و همکاران، ۲۰۰۹). پارامترهای مهم مورد بررسی در این مدل شامل عملکرد محصول، کارایی مصرف آب (WP) و شاخص برداشت (HI) می‌باشند:

$$WP = \text{Yield}/ET \quad (1)$$

$$HI = \text{Yield}/\text{Biomass} \quad (2)$$

که در آن: عملکرد و بیوماس (زیست‌توده) بر حسب کیلوگرم در هکتار و آب مصرفی (ET) بر حسب مترمکعب در هکتار در طی دوره رشد است. همچنین WP، پارامتر بهره‌وری آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب است.

ورودی‌های مدل AquaCrop به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده محصولات کشاورزی شامل چهار گروه اطلاعات داده‌های هواشناسی، گیاه‌شناسی، خاک‌شناسی، مدیریت مزرعه و آبیاری است.

داده‌های هواشناسی: داده‌های بارش، تبخیر و تعرق پایه، حداقل و حداکثر دما، تشعشع (ساعات آفتابی)، سرعت باد و رطوبت نسبی و میانگین سالانه غلظت CO<sub>2</sub> موجود در اتمسفر است.

داده‌های گیاه‌شناسی: پارامترهای رشد گیاه مانند (مشخصات فنولوژیکی، عمق ریشه و ...) که رشد محصول و جذب آب را در ریشه تشریح می‌کند. همچنین داده‌های گیاه‌شناسی به دو دسته ثابت و غیرثابت طبقه‌بندی می‌شود. داده‌های ثابت بر اساس شرایط مدیریتی تغییر نمی‌کنند و به‌صورت پیش‌فرض در مدل قرار دارند و می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. درحالی‌که داده‌های غیرثابت بسته به شرایط محیطی و مدیریتی تغییر می‌کنند؛ مانند مشخصات فنولوژیکی گیاهان در طی دوره رشد که بسته به شرایط محیطی و مدیریتی تغییر می‌کنند.

داده‌های خاک‌شناسی: پارامترهای فیزیکی خاک شامل بافت خاک، چگالی، هدایت هیدرولیکی و مقدار رطوبت حجمی خاک در ظرفیت زراعی ( $\theta_{fc}$ ) و نقطه پژمردگی دائم ( $\theta_{pwp}$ ) و ... می‌باشند.

مدیریت مزرعه و آبیاری: داده‌های مدیریت به دو گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شود. ۱- مدیریت مزرعه ۲- مدیریت آب

مدیریت‌های مزرعه، گزینه‌های مربوط به سطح حاصلخیزی را طی شبیه‌سازی در نظر می‌گیرد.

در این پژوهش داده‌های هواشناسی سال‌های پایه (۲۰۲۱-۲۰۲۰ و ۲۰۲۰-۲۰۲۱) از ایستگاه هواشناسی قراخیل

برای شبیه‌سازی به مدل داده شد.



باشد، یکسان بودن اقلیم شبیه‌سازی شده تولیدی و اقلیم واقعی غیرمحمتمل خواهد بود (دانش فراز و رزاق پور، ۱۳۹۳).

### نتایج و بحث

#### ارزیابی مدل ریزمقیاس نمایی

بر اساس داده‌های تولیدشده از مدل و داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی قراخیل در شهرستان قائم‌شهر در دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۵، برای دما و بارش مقایسه‌ای انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده، به ترتیب مربوط به بارندگی و دمای حداقل است. به طور کلی میزان خطای موجود در شبیه‌سازی بارش در مقایسه با خطای موجود در شبیه‌سازی دما بالاتر است که با توجه به خاصیت بی‌ثباتی و تغییرپذیری بارش قابل توجیه و قابل قبول است.

در جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون KS برای پارامترهای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ارائه شده است. نتایج نشان داد که پارامترهای دما با دقت بالایی شبیه‌سازی شده اما در شبیه‌سازی بارش نسبت به دیگر پارامترها خطا بیشتر ولی در حد قابل قبول است.

عملکرد و زیست‌توده شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop به دست آمد. در نهایت برای بررسی اثر تغییر اقلیم از منظر علم هوا و اقلیم‌شناسی کلیه پارامترهای مربوط به گیاه نخودفرنگی بر اساس واسنجی‌های انجام شده از دوره تاریخی در نظر گرفته شد. با فرض ثابت بودن شرایط آب، خاک و گیاه به وجه اساسی محدود کننده محیط رشد گیاه یعنی به تغییرات دما، بارش و تابش در آینده دور و آینده نزدیک تحت گزینه‌های SSP۱۲۶، SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ در سه دهه آینده پرداخته شد. همچنین جابجایی تاریخ کشت به طوری که تغییرات عملکرد ناشی از تغییر اقلیم جبران شود بررسی شد.

در این پژوهش برای ارزیابی داده‌های تولید شده از مدل ریزمقیاس نمایی تغییر اقلیم، از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و شاخص مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MBE) استفاده شد.

از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (KS) برای مقایسه توزیع‌های احتمالاتی استفاده شد. آزمون KS روش ناپارامتری ساده برای همسان‌سازی اطلاعات تجربی با توزیع آماری منتخب است. در این آزمون احتمال یکسان بودن دو توزیع مشاهداتی و محاسباتی بررسی شد. اگر این مقدار کوچک و کمتر از سطح معنی‌داری (۰/۰۱ تا ۰/۰۵)

جدول ۲- شاخص‌های آماری ارزیابی مدل

پارامتر	$R^2$	RMSE	MBE
حداکثر دما	0.88	4.9	0.4
حداقل دما	0.91	3.0	2.4
بارش	0.29	1.6	1.2

جدول ۳- نتایج آزمون KS برای پارامترهای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش ماهانه داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده

دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	آگوست	جولای	ژوئن	مه	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	ماه	
0.110	0.105	0.099	0.100	0.081	0.117	0.102	0.078	0.077	0.057	0.107	0.120	آزمون KS	دمای
0.047	0.095	0.141	0.137	0.426	0.040	0.193	0.481	0.495	0.910	0.083	0.031	سطح معنی‌داری	بیشینه
0.113	0.131	0.088	0.094	0.105	0.129	0.095	0.062	0.094	0.073	0.110	0.131	آزمون KS	دمای
0.054	0.010	0.284	0.203	0.096	0.012	0.186	0.818	0.204	0.599	0.067	0.010	سطح معنی‌داری	کمینه
0.110	0.123	0.091	0.250	0.266	0.260	0.128	0.125	0.108	0.088	0.095	0.124	آزمون KS	بارش
0.070	0.025	0.248	<0.001	<0.001	<0.001	<0.016	<0.020	<0.077	0.297	0.189	0.022	سطح معنی‌داری	

### واسنجی مدل AquaCrop

گیری شده سال اول استفاده شد. جدول ۴ مقایر داده‌های ورودی مورد استفاده در مرحله واسنجی مدل AquaCrop برای گیاه نخودفرنگی را نشان می‌دهد که پس از وارد کردن تمامی اطلاعات موردنیاز، مدل AquaCrop اجرا شد.

در این پژوهش، از اطلاعات دو ساله مزرعه مورد مطالعه، داده‌های لازم برای ارزیابی مدل AquaCrop به دست آمد. به منظور واسنجی این مدل، از داده‌های اندازه

جدول ۴- مقادیر پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

پارامتر	مقدار	واحد
تراکم کشت	160000	گیاه در هکتار
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	5	سانتی‌متر مربع
پوشش گیاهی اولیه (CC0)	0.8	درصد
بیشینه رشد کانوبی (CCx)	100	درصد
مدت‌زمان کاشت تا جوانه‌زنی	12	روز
مدت‌زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوبی	88	روز
مدت‌زمان کاشت تا رسیدن و پیری	148	روز
مدت‌زمان کاشت تا برداشت محصول	176	روز
ضریب رشد پوشش (CGC)	9.7	درصد روز
ضریب کاهش پوشش (CDC)	9.7	درصد روز
عمق مؤثر ریشه	100	سانتی‌متر
مدت‌زمان رسیدن به بیشینه رشد ریشه	90	روز
دمای پایه	4	درجه سانتی‌گراد
دمای بالا	29	درجه سانتی‌گراد
بهره‌وری مصرف آب نرمال شده (WP*)	16	گرم بر مترمربع
شاخص برداشت (HI)	40	درصد
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	0.22	-
حد پایین ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	0.6	-
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	1.1	درصد روز

مقادیر شاخص‌های آماری واسنجی و صحت-سنجی مدل AquaCrop در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مدل AquaCrop

توانست با دقت بالایی مقدار عملکرد و زیست‌توده را شبیه-سازی کند. نتایج هر دو سال کشت نشان می‌دهد که مقدار RMSE و NRMSE در حد پایین به دست آمد که نشان-دهنده کارایی بهتر مدل است.

جدول ۵- شاخص‌های آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop

پارامتر	مرحله	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE	MBE
عملکرد	واسنجی	0.99	0.13	1.95	0.12
(کیلوگرم در هکتار)	صحت‌سنجی	0.98	0.10	1.49	0.09
زیست‌توده	واسنجی	0.99	0.37	2.15	0.35
(کیلوگرم در هکتار)	صحت‌سنجی	0.99	0.34	1.93	0.31

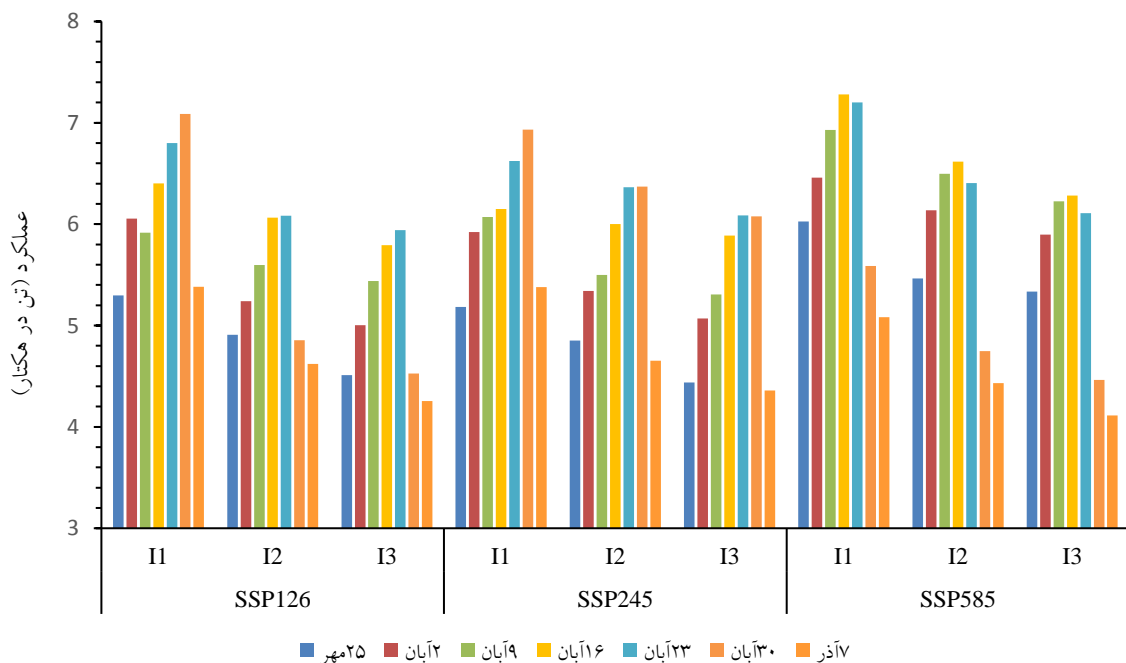
مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده نخودفرنگی در تاریخ‌های مختلف کاشت در سه دهه آینده ۲۰۳۲-۲۰۲۳، ۲۰۴۲-۲۰۳۳، ۲۰۵۲-۲۰۴۳ در شکل‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل ۲ بیشترین عملکرد نخودفرنگی در

دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ کشت ۳۰ آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۷/۰۸۹ تن در هکتار شبیه‌سازی شد اما در تیمارهای I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> عملکرد پایین شبیه‌سازی شد بر همین اساس بهترین تاریخ کاشت که در آن تمام تیمارها

SSP۵۸۵ در دهه اول، کاهش دما و افزایش بارندگی در ماه‌های مقارن با فصل رشد نخودفرنگی رخ خواهد داد که هر دو عامل، اثر مثبتی بر عملکرد محصول نخودفرنگی خواهند داشت. پژوهشی توسط احمد و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر تاریخ‌های مختلف کاشت بر عملکرد و اجزای عملکرد در رقم‌های مختلف نخودفرنگی در بنگلادش صورت پذیرفت. تاریخ کاشت شامل ۲۹ اکتبر، ۱۳ نوامبر و ۲۸ نوامبر و رقم شامل BARI motor-1، BADC motor-1، Natore local و Narail بود. بیشترین عملکرد دانه (۱۳۱۹/۳ کیلوگرم در هکتار) در تاریخ کشت ۱۳ نوامبر با رقم Natore local و کم‌ترین عملکرد دانه (۳۳۰/۳۵ کیلوگرم در هکتار) در تاریخ کشت ۲۸ نوامبر با رقم Narail به دست آمد. نتایج نشان داد که عملکرد و اجزای عملکرد به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تاریخ کاشت و ارقام نخودفرنگی قرار گرفت.

عملکرد مناسبی داشته باشند انتخاب شد. بهترین تاریخ کاشت در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ ۲۳ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۱۶ آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ کشت ۳۰ آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۶/۹۳۴ تن در هکتار شبیه‌سازی شد و بهترین تاریخ کاشت در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ ۳۰ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۲۳ آبان است.

بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ کشت ۱۶ آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۷/۲۸۱ تن در هکتار شبیه‌سازی شد و بهترین تاریخ کاشت در دهه اول بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ ۱۶ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۲۳ آبان است؛ بنابراین با توجه به شکل ۲ بیشترین مقدار عملکرد نخودفرنگی در دهه اول در گزینه‌ی بدبینانه SSP۵۸۵ در شرایط اقلیمی آینده این گزینه‌ی



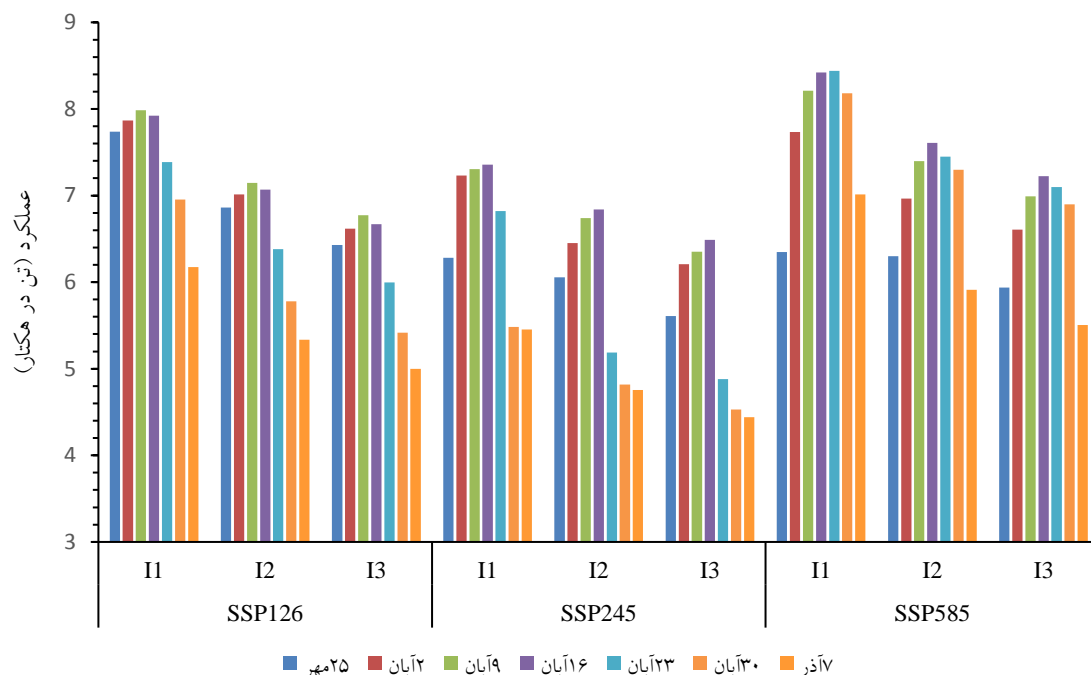
شکل ۲- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده نخودفرنگی در تاریخ‌های کاشت مختلف در دوره ۲۰۲۳-۲۰۳۲

گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ نه آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۱۶ آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ کشت ۱۶ آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۷/۳۵۸ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛

با توجه به شکل ۳ بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ کشت نه آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۷/۹۸۴ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه دوم بر اساس

نخودفرنگی رخ خواهد داد اما از طرفی علاوه بر اثرات غیرمستقیم دما و بارش، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، به صورت مستقیم اثرات مثبتی بر نخودفرنگی به عنوان یک گیاه C3 می‌گذارد، از این رو کاهش عملکرد ناشی از افزایش دما جبران خواهد شد. سومر (۲۰۲۴) به بررسی عملکرد رقم‌های مختلف نخودفرنگی در تاریخ‌های مختلف کاشت (۱۵ نوامبر، ۳۰ نوامبر، ۱۵ دسامبر) در ترکیه پرداخت. نتایج نشان داد که اثر تاریخ کاشت و رقم‌های مختلف بر عملکرد نخودفرنگی معنی‌دار بوده و بیشترین عملکرد دانه نخودفرنگی در تاریخ کاشت دوم و سوم و از ارقام میسیا و محلی بود.

بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ ۱۶ آبان و تاریخ بعدی تاریخ نه آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ کشت ۲۳ آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۸/۴۴۰ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه دوم بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ ۱۶ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۲۳ آبان است؛ بنابراین با توجه به شکل ۳ بیشترین مقدار عملکرد نخودفرنگی در دهه دوم در گزینه‌ی بدینانه SSP۵۸۵ شبیه‌سازی شد. در شرایط اقلیمی آینده گزینه‌ی SSP۵۸۵ در دهه دوم، افزایش دما و کاهش بارندگی در ماه‌های مقارن با فصل رشد



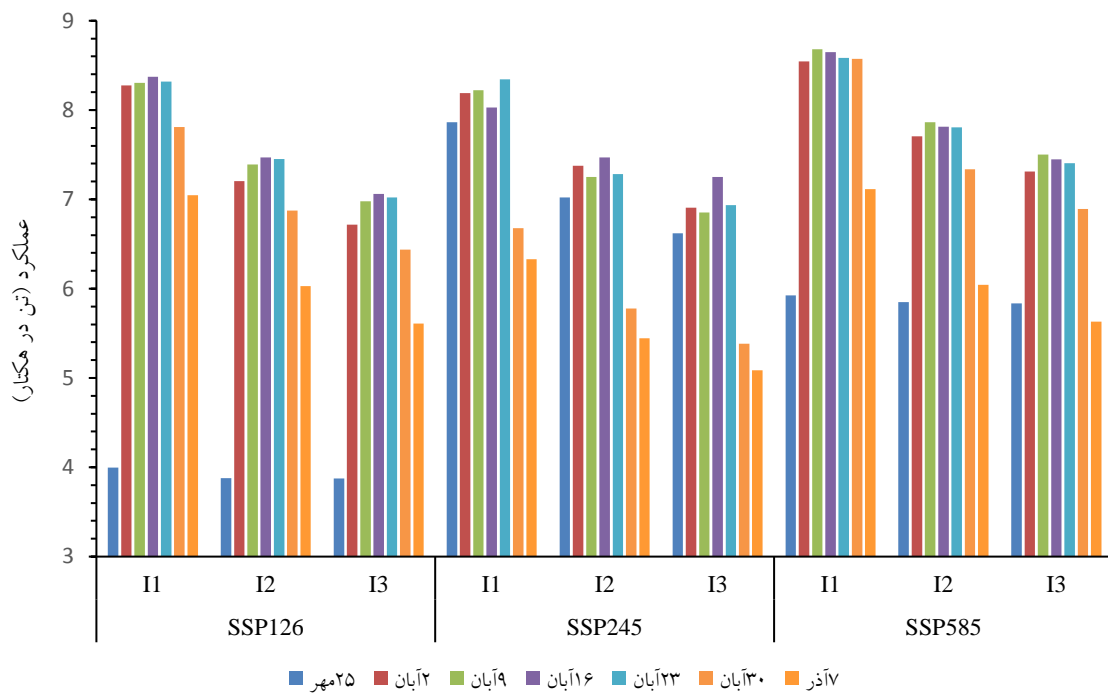
شکل ۳- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده نخودفرنگی در تاریخ‌های کاشت مختلف در دوره ۲۰۴۲-۲۰۳۳

بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ ۲۳ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۱۶ آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ کشت نه آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۸/۶۸۲ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۵۸۵ در تاریخ نه آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۱۶ آبان است؛ بنابراین با توجه به شکل ۴ بیشترین مقدار عملکرد نخودفرنگی در

با توجه به شکل ۴ بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ کشت ۱۶ آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۸/۳۷۳ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛ بنابراین بهترین تاریخ کاشت در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۱۲۶ در تاریخ ۱۶ آبان و تاریخ بعدی تاریخ ۲۳ آبان است. بیشترین عملکرد نخودفرنگی در دهه سوم بر اساس گزینه‌ی SSP۲۴۵ در تاریخ کشت ۲۳ آبان و در تیمار I<sub>1</sub> به مقدار ۸/۳۴۵ تن در هکتار شبیه‌سازی شد؛

است، شبیه‌سازی عملکرد نخودفرنگی افزایش و مصرف آب کاهش یافت. راحمی‌کاریزکی و همکاران (۱۴۰۱) اثر تغییر اقلیم بر صفات فنولوژیک نخود تحت سه تاریخ کاشت مختلف (آذر، دی و بهمن) در شهرستان گنبد بررسی کردند. نتایج نشان داد با افزایش دما در اقلیم آینده طول دوره رشد نخود کاهش می‌یابد؛ اما افزایش غلظت CO<sub>2</sub> تأثیری روی دوره رشد نخود ندارد و همچنین تأخیر در کاشت نخود باعث کوتاه‌تر شدن دوره رشد نخود و کاهش عملکرد می‌شود.

دهه سوم در گزینه‌ی بدینانه SSP۵۸۵ شبیه‌سازی شد. در شرایط اقلیمی آینده گزینه‌ی SSP۵۸۵ در دهه سوم، افزایش دما و افزایش بارندگی در ماه‌های مقارن با فصل رشد نخودفرنگی رخ خواهد داد. راواسی و همکاران (۲۰۲۰) با شبیه‌سازی عملکرد نخودفرنگی با استفاده از مدل STICS تحت دو گزینه‌ی RCP۴/۵ و RCP۸/۵ نشان دادند که تغییرات آب و هوایی باعث کاهش عملکرد ارقام فعلی نخودفرنگی می‌شود و افزایش آبیاری از کاهش عملکرد جلوگیری نمی‌کند؛ اما با ارقام جدید بهبودیافته نخودفرنگی که فاز رویشی کوتاه‌تر و افزایش تحمل به دمای آن بالاتر



شکل ۴- مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده نخودفرنگی در تاریخ‌های کاشت مختلف در دوره ۲۰۴۳-۲۰۵۲

عملکرد نخودفرنگی برای تمام تیمارهای آبیاری، در دوره ۲۰۴۳-۲۰۵۲ (دهه سوم) شبیه‌سازی شد که با توجه به شرایط اقلیمی آینده، افزایش دما و بارندگی رخ خواهد داد اما از طرفی هم با افزایش غلظت دی‌اکسید کربن، اثرات مثبتی بر گیاه نخودفرنگی به‌عنوان یک گیاه C3 ایجاد می‌شود، از این رو کاهش عملکرد ناشی از افزایش دما جبران خواهد شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از مدل AquaCrop تحت گزینه‌های SSP و در سه سطح ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۶۰٪ آبیاری، کمترین میزان عملکرد محصول نخودفرنگی مربوط

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گیاه نخودفرنگی در سه دهه آینده ۲۰۲۳-۲۰۳۲، ۲۰۴۲-۲۰۳۳، ۲۰۵۲-۲۰۴۳ تحت گزینه‌های اقلیمی SSP۱۲۶، SSP۲۴۵ و SSP۵۸۵ مورد بررسی قرار گرفت و تغییر تاریخ کاشت به‌عنوان راهکار سازگاری برای بهبود عملکرد گیاه نخودفرنگی ارزیابی شد. نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده نخودفرنگی برای تیمارهای مختلف در دوره‌های مختلف توسط مدل AquaCrop، نشان داد که بیشترین مقدار

مناسب تاریخ‌های کشت و استفاده از آبیاری بهینه، عملکرد زیست‌توده نخود تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌تواند افزایش یابد، اما در صورت عدم مدیریت صحیح، کاهش عملکرد در شرایط خاص نیز ممکن است رخ دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تغییر تاریخ کاشت به‌عنوان راهکاری مناسب برای بهبود عملکرد نخودفرنگی مؤثر خواهد بود به‌طوری‌که بهترین تاریخ کاشت در دهه اول در تاریخ کشت ۲۳ آبان و در دهه‌های دوم و سوم در تاریخ کشت ۱۶ آبان است که باعث تولید عملکرد بالاتری نسبت به سایر تاریخ‌های کاشت در شرایط تغییر اقلیم خواهد شد. تفاوت هفت روزه در تاریخ کشت و تغییرات قابل‌توجه در عملکرد محصولات زراعی، به عوامل فنی و زراعی مختلفی مرتبط است که عبارت‌اند از: تغییر در دما و دوره رشد، تأثیر بر دسترسی به منابع نوری، زمان‌بندی تطابق با بارش و منابع آبی، مدیریت آفات و بیماری‌ها، رشد و رقابت علف‌های هرز، اثر تغییر اقلیم بر شدت و الگوی بارش و اثر بر مراحل فیزیولوژیکی حساس.

#### تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

به تیمار I<sub>3</sub> در دوره ۲۰۳۲-۲۰۲۳ و برای گزینه‌ی SSP۱۲۶ و ۵/۷۹۲ تن بر هکتار است و بیشترین میزان عملکرد محصول نخودفرنگی مربوط به تیمار I<sub>1</sub> در دوره ۲۰۵۲-۲۰۴۳ و برای گزینه‌ی SSP۵۸۵ و ۸/۶۴۸ تن بر هکتار است. مقدار عملکرد شبیه‌سازی‌شده نخودفرنگی تحت گزینه‌های SSP و در تاریخ کشت ۱۶ آبان در دهه اول نسبت به دوره پایه، کاهش و در دهه دوم و دهه سوم نسبت به دوره پایه، افزایش خواهد داشت. در دهه ۲۰۳۲-۲۰۲۳، بیشترین زیست‌توده با مقدار ۱۷/۱۲۹ تن در هکتار برای تیمار I<sub>1</sub> و گزینه SSP ۵۸۵ در تاریخ ۲۳ آبان مشاهده شد. در دهه ۲۰۴۲-۲۰۳۳، بیشترین زیست‌توده با مقدار ۲۰/۱۱۲ تن در هکتار برای تیمار I<sub>1</sub> و گزینه SSP ۵۸۵ در تاریخ ۳۰ آبان شبیه‌سازی شد. در دهه ۲۰۵۲-۲۰۴۳، بیشترین زیست‌توده با مقدار ۲۰/۶۴۷ تن در هکتار برای تیمار I<sub>1</sub> و گزینه SSP ۱۲۶ در تاریخ ۲۳ آبان شبیه‌سازی شد. تغییر اقلیم هم باعث افزایش و هم کاهش عملکرد و زیست‌توده نخودفرنگی می‌شود، اما این تغییرات بستگی به شرایط آبیاری، تاریخ کشت و گزینه‌ی اقلیمی دارد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که عملکرد و زیست‌توده نخود در تیمارهای با آبیاری کامل تحت شرایط مختلف اقلیمی مانند SSP ۵۸۵ افزایش می‌یابد. در تیمارهای با کاهش آبیاری (I<sub>3</sub>) و برخی شرایط اقلیمی، عملکرد و زیست‌توده به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است؛ بنابراین، با مدیریت

#### فهرست منابع

۱. انوری ساوجبلاغی، کامران، تاجبخش، مهدی، چوگان، رجب، و حاجی آقایی، منوچهر، ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات عملکرد و اجزای عملکرد هیبریدهای ذرت دانه‌ای در انواع گروه‌های رسیدگی در تاریخ کشته‌ای مختلف. همایش ملی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر کشاورزی و محیط‌زیست، ارومیه، دوم مرداد، ۹ ص.
۲. جلالی، جواد، نصیری، مرتضی، حبیبی، معصومه، و خیری، نوراله، ۱۳۹۴. بررسی امکان افزایش ضریب موفقیت کشت مستقیم ژنوتیپ‌های برنج با تغییر تاریخ کاشت. پژوهشی فیزیولوژی گیاهان زراعی، ۷(۲۶)، صص. ۸۵-۱۰۳.
۳. حسینی، سیده طیبه، خوش‌روش، مجتبی، ضیاتباب احمدی، میرخالق، ۱۳۹۴. بررسی اثر تغییر اقلیم و ارزیابی تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد سویا. پژوهش آب در کشاورزی، ۲۹(۴)، صص. ۵۷۵-۵۵۹.

۴. حق‌وردیان، مهرداد، سام‌دلیری، مرتضی، مبصر، حمیدرضا، و موسوی میرکلایی، امیرعباس، ۱۳۹۰. بررسی تأثیر تاریخ کاشت بر عملکرد و برخی صفات در کشت مستقیم ارقام مختلف برنج (*Oryza sativa* L.). پژوهش در علوم زراعی، ۳(۱۲)، صص. ۱-۱۶.
۵. دانش فراز، رسول، و رزاق‌پور، هادی، ۱۳۹۳. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل در استان آذربایجان غربی. *فضای جغرافیایی*، ۱۴(۴۶)، صص. ۱۹۹-۲۱۱.
۶. راحمی کاریزکی، علی، ثنائی، کوروش، نخزری مقدم، علی، غلامعلی‌پور علمداری، ابراهیم، پیردهقان، سارا، حبیبیان، لیلا، ۱۴۰۱. اثر تغییر اقلیم بر صفات فنولوژیک نخود (*Cicer arietinum* L.) تحت شرایط دیم و آبی در شهرستان گنبد. *تولید گیاهان زراعی*، ۱۵(۱)، صص. ۵۷-۷۲.
۷. فراهانی‌پاد، پوریا، پاک‌نژاد، فرزاد، ایلکایی، محمدنسی، حبیبی، داوود، و داوودی فرد، مهدی، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی عملکرد و اجزای عملکرد سویا (رقم ویلیامز) در چهار تاریخ کاشت با استفاده از مدل CROPGRO-Soybean در منطقه کرج. *زراعت و اصلاح نباتات*، ۸(۴)، صص. ۳۱-۴۱.
۸. قاسم بگلو، مهدی، صدقی، محمد، سید شریفی، رئوف، و فرزانه، سلیم، ۱۴۰۰. اثر کودهای زیستی بر عملکرد و اجزای عملکرد دانه نخودفرنگی (*Pisum sativum* L.) تحت سطوح مختلف آبیاری. *دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۳۱(۳)، صص. ۱۶۹-۱۸۰. doi: 10.22034/saps.2021.43011.2583
۹. یداللهی، امیرحسین، خوش‌روش، مجتبی، و غلامی سفیدکوهی، محمدعلی، ۱۴۰۰. تأثیر کم آبیاری تنظیم‌شده با آب مغناطیسی بر خواص کمی، کیفی و بهره‌وری آب نخودفرنگی. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۵(۴)، صص. ۳۷۳-۳۸۹.
- doi:https://doi.org/10.22092/jwra.2021.356340.897
10. Ahmed, B., Hasan, A.K., Karmakar, B., Hasan, M.S., Akter, F., Saha, P.S. and Haq, M.E., 2020. Influence of date of sowing on growth and yield performance of field Pea (*Pisum sativum* L.) genotypes. *Asian Research Journal of Agriculture*, 13(2), pp. 26-34. doi: 10.9734/ARJA/2020/v13i230099
  11. Annan, J.D. and Hargreaves, J.C., 2011. Understanding the CMIP3 Multimodel Ensemble. *Journal of Climate*, 24(16), pp.4529-4538. doi: https://doi.org/10.1175/2011JCLI3873.1
  12. Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R. and Chhetri, N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), pp.287-291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
  13. Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Xiang, Y., Liu, X., Liao, Z., Abdelghany, A.E., Zhang, F. and Li, Z., 2022. Evaluation of AquaCrop model for greenhouse cherry tomato with plastic film mulch under various water and nitrogen supplies. *Agricultural Water Management*, 274, pp.107949. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107949>
  14. Chibarabada, T.P., Modi, A.T. and Mabhaudhi, T., 2020. Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, pp.107850. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107850>
  15. Eyring, V., Flato, G., Lamarque, J.F., Meehl, J., Senior, C., Stouffer, R. and Taylor, K., 2019. Status of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) and goals of the workshop. CMIP6 Analysis Workshop, Barcelona, Spain.
  16. Fowler, H.J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C., 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), pp.1547-1578. doi: 10.1002/joc.1556

17. Hosseini, S.S., Nazari, M. and Araghinejad, S., 2013. Investigating the impacts of climate on agricultural sector with emphasis on the role of adaptation strategies in this sector. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 44(1), pp.1-16.  
**doi: 10.22059/ijaedr.2013.36064.** (In Persian).
18. IPCC, 2014. "Climate Change 2014: Synthesis Report", Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
19. Kanda, E.K., Senzanje, A. and Mabhaudhi, T., 2020. Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *Physics and Chemistry of the Earth*, 124(2), pp.102941. **doi: 10.1016/j.pce.2020.102941**
20. Makuvaro, V., Walker, S., Masere, T.P. and Dimes, J., 2018. Smallholder farmer perceived effects of climate change on agricultural productivity and adaptation strategies. *Journal of Arid Environmental*, 152, pp.75-82.  
**https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.01.016**
21. Munier-Jolain, N., Biarnès, V., Chaillet, I., Lecoœur, J. and Jeuffroy, M.H., (Eds.). 2010. *Physiology of the Pea Crop*. Science Publishers, Enfield, USA (270 p).
22. O'Neill, B.C., Carte, T.R., Ebi K. and Harrison P.A., 2020. Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Natural Climate Change*, 10(12), pp.1074-1084.  
**doi:10.1038/s41558-020-00952-0**
23. O'Neill, B., Kriegler, E., Ebi, K., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D., Van Ruijven, B., Van Vuuren, D., Birkmann, J., Kok, K., Levy. and Solecki, W. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42(1), pp.169-180.  
**https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004**
24. Raes, D., Fereres, E., García Vila, M., Curnel, Y., Knoden, D., Kale Çelik, S., Ucar, Y., Türk, M. and Wellens, J., 2023. Simulation of alfalfa yield with AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 284(3), pp.108341.  
**https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108341**
25. Ravasi, R.A., Paleari, L., Vesely, F.M., Movedi, E., Thoelke, W. and Confalonieri, R., 2020. Ideotype definition to adapt legumes to climate change: A case study for field pea in Northern Italy. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 291, pp.108081.  
**https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108081**
26. Santos, O.F., Cunha, F.F., Taira, T.L., Souza, E.J., Leal, A.J.F., 2023. Increase in pea productivity associated with irrigation management. *Horticultura Brasileira*, 36(2), pp.178-183.  
**doi: http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180205**
27. Steduto, P., Raes, T., Hsiao, T. C. Fereres, E., Heng, L., Izzi, G. and Hoogeveen, J., 2009. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Mediterraneennes*, 80, pp.285-292.
28. Sümer, F.O., 2024. The Effects of Sowing Date and Cultivars on Yield and Quality of Pea (*Pisum sativum* L.). **doi:10.20944/preprints202401.1660.v1**
29. Tacarindua, C.R., Shiraiwa, T., Homma, K., Kumagai, E. and Sameshima, R., 2013. The effects of increased temperature on crop growth and yield of soybean grown in a temperature gradient chamber. *Field Crops Research*, 154(1), pp.74-81.  
**doi:https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.07.021**
30. Umesh, B., Reddy, K.S., Poligowdar, B.S., Maruthi, V., Satishkumar, U., Ayyanagoudar, M.S., Rao, S. and Veeresh, H., 2022. Assessment of climate change impact on maize (*Zea mays* L.) through aquacrop model in semi-arid alfisol of southern Telangana. *Agricultural Water Management*, 274, pp.107950. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107950**
31. Wang, H., Cheng, M., Liao, Z., Guo, J., Zhang, F., Fan, J., Feng, H., Yang, Q., Wu, L. and Wang, X., 2023. Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-SUBSTOR-Potato models in simulating potato growth, yield and water productivity under various drip fertigation regimes. *Agricultural Water Management*, 276, pp.108076.  
**Doi: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108076**