



The Effect of Climate Change on Yield Potential and Water Productivity of Forage Maize in Iran

Hosna Fayazi¹ | Ebrahim Zeinali²  | Afshin Soltani³  | Benjamin Torabi⁴ 

1. Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: h.fayaz222@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: e.zeinali@gau.ac.ir
3. Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: Afshin.Soltani@gau.ac.ir
4. Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: b.torabi@gau.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 03 December 2021

Received in revised form:

10 March 2022

Accepted: 22 April 2022

Published online:

17 December 2022

Keywords:

Climate zones,
GYGA protocol,
SSM-iCrop2 model,
temperature,
yield simulation.

ABSTRACT

Global climate change is among the most important agricultural and food security challenges. This study tries to investigate the effect of climate change on potential yield and water productivity of forage maize (*Zea mays* L.) in Iran. Two scenarios of RCP4.5 and RCP8.5 are used to predict the future climate (2050s) and climate data of 2001-2015 have been used as the base period. Potential yield is estimated using SSM-iCrop2 model according to the GYGA protocol and the climate changes for both scenarios are applied in the model. The results show that the climate change will not have a considerable effect on forage maize yield compared to the current conditions (85.6 ton ha⁻¹) and will only lead to an increase of 0.9% and 1.6% in on both scenarios, respectively. This may be attributed to maize being a C4 plant and thus non-effectiveness of CO₂ increase on its growth. Also, the temperature will remain in optimum range for maize in most of the main regions for forage maize cultivation areas in Iran. Water productivity in both scenarios will increase by 0.4% and 1.6%, compared to current conditions (10.4 kg m⁻³), respectively, which may be due to increased CO₂ concentration and more closure of stomata. Also, improved water productivity in forage maize may be attributed to increase yield potential due to the fact that no considerable changes are observed in terms of the required water, evapotranspiration and irrigation times.

Cite this article: Fayazi, H., Zeinali, E., Soltani, A., & Torabi, B. (2022). The Effect of Climate Change on Yield Potential and Water Productivity of Forage Maize in Iran. *Journal of Crops Improvement*, 24 (4), 1247-1263.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.334981.2648>





اثر تغییر اقلیم بر پتانسیل عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در ایران

حسنا فیاضی^۱ | ابراهیم زینلی^۲ | افشین سلطانی^۳ | بنیامین ترابی^۴

۱. گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: h.fayaz222@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: e.zeinali@gau.ac.ir
۳. گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: Afshin.Soltani@gau.ac.ir
۴. گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: b.torabi@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۱۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶</p> <p>کلیدواژه‌ها: پروتکل گیگا، دما، شبیه‌سازی عملکرد، مدل SSM-iCrop2، مناطق اقلیمی.</p>	<p>یکی از چالش‌های مهم مرتبط با کشاورزی و امنیت غذایی، تغییر اقلیم جهانی است. پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر تغییر اقلیم در آینده بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای (<i>Zea mays L.</i>) در ایران انجام شد. برای پیش‌بینی تغییر اقلیم در آینده (۲۰۵۰ میلادی) از دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و از داده‌های هواشناسی در سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۸۰ به‌عنوان دوره مینا استفاده شد. پتانسیل عملکرد با استفاده از مدل شبیه‌سازی گیاهی SSM-iCrop2 و براساس شیوه‌نامه گیگا برآورد شد و تغییرات اقلیمی برای هر سناریو در مدل شبیه‌سازی اعمال شد. نتایج نشان داد که تغییر اقلیم براساس هر دو سناریوی یادشده تأثیر قابل‌اعتنایی بر پتانسیل عملکرد ذرت علوفه‌ای نسبت به شرایط فعلی نداشت و فقط موجب افزایشی معادل ۰/۹ و ۱/۴ درصد در دو سناریوی یادشده نسبت به شرایط فعلی (۸۵/۶ تن در هکتار) خواهد شد. این نتیجه را می‌توان به چهارکربنه‌بودن این گیاه و در نتیجه عدم تأثیر افزایش CO₂ بر رشد و عملکرد آن و همچنین باقی‌ماندن دما در دامنه دماهای بهینه در بیش‌تر مناطق اقلیمی اصلی تولید ذرت علوفه‌ای در ایران نسبت داد. میزان بهره‌وری آب نیز در هر دو سناریو به میزان ۰/۴ و ۱/۶ درصد نسبت به شرایط فعلی (۱۰/۴ کیلوگرم بر مترمکعب) افزایش می‌یابد که دلیل احتمالی آن افزایش غلظت CO₂ و بسته‌تر شدن روزنه‌ها می‌باشد. همچنین، به دلیل آن که تغییر چندانی در میزان آب مصرفی و تبخیر و تعرق مشاهده نشد می‌توان افزایش بهره‌وری آب در ذرت علوفه‌ای را به افزایش پتانسیل عملکرد نسبت داد.</p>

استناد: فیاضی، ح.، زینلی، ا.، سلطانی، ا. و ترابی، ب. (۱۴۰۱). اثر تغییر اقلیم بر پتانسیل عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در ایران. به زراعی کشاورزی، ۲۴ (۴)، ۱۲۴۷-۱۲۶۳. DOI: <http://doi.org/10.22059/jci.2022.334981.2648>



۱. مقدمه

یکی از چالش‌های مهم مرتبط با کشاورزی و امنیت غذایی، تغییر اقلیم جهانی است. تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مشکلات زیست‌محیطی قرن بیست و یکم در نظر گرفته شده است (IPCC, 2007). با وجود پیشرفت‌های قابل توجهی که در زمینه مکانیزاسیون، مدیریت تولید و اصلاح ارقام پرمحصول انجام شده است، آب و هوا همچنان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده عملکرد گیاهان زراعی محسوب می‌شود (Faraji & Soltani, 2009). غلظت دی‌اکسیدکربن از حدود ۲۸۰ میکرومول بر مول در قبل از انقلاب صنعتی به ۳۷۹ میکرومول بر مول افزایش یافته است که استفاده‌ی گسترده از سوخت‌های فسیلی و قطع جنگل‌ها از مهم‌ترین دلایل این افزایش به‌شمار می‌آیند (IPCC, 2007). پنجمین گزارش هیأت بین‌المللی تغییر اقلیم^۱ (IPCC) بیانگر آن است که افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر به افزایش دمای جهانی، تغییر در مقدار و الگوهای بارش و افزایش در تکرار و شدت مخاطرات محیطی مانند خشکسالی، دوره‌های گرمایی، سیل و آتش‌سوزی خواهد شد و در این رابطه با اطمینان بیشتری به جوامع بین‌المللی هشدار می‌دهد (IPCC, 2014). برای این‌که بتوان تحت هر رژیم اقلیمی حداکثر درآمد اقتصادی از تولید محصولات کشاورزی را برداشت نمود، ضروری است که قبل از انجام هر گونه برنامه‌ریزی، عواملی مانند میزان تأثیر بارندگی، دامنه تغییرات درجه حرارت و دیگر عوامل هواشناسی را در نظر گرفت. شناخت عوامل مختلف محیطی و انتخاب گیاهان مناسب برای شرایط متفاوت، از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید محصولات کشاورزی می‌باشد (Koocheki & Nassiri Mahallati, 2008).

با وجودی که در طی سال‌های اخیر آزمایش‌های انجام‌شده در محیط‌های کنترل‌شده اطلاعات زیادی را در مورد تأثیر افزایش درجه حرارت و یا غلظت دی‌اکسیدکربن بر فرایندهای رشد و نمو گیاهان فراهم کرده است، اما این نوع مطالعات بسیار پرهزینه بوده و اجرای آن‌ها به داشتن ابزارهای دقیق وابسته است (Koocheki & Nassiri Mahallati, 2008). توسعه روش‌های مدل‌سازی، جایگزین مناسب و کم‌هزینه‌ای برای این نوع مطالعات است که در حال حاضر مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. مدل‌های گردش عمومی (GCM)^۲ ابزار مناسب و در عین حال دقیقی برای پیش‌بینی شرایط اقلیمی آینده بوده و داده‌های لازم برای اجرای مدل‌های شبیه‌سازی رشدونمو محصولات زراعی تحت شرایط تغییر اقلیم را فراهم می‌سازند (Jones et al., 2003).

ذرت (*Zea mays* L.) یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی ایران است که با دو هدف تولید دانه و علوفه کشت می‌شود. بیش‌ترین مصرف این گیاه در تغذیه دام و طیور به‌صورت دانه، علوفه تازه و سیلوشده می‌باشد. به این ترتیب ذرت بیش‌تر به‌طور غیرمستقیم از طریق تولید فرآورده‌های دام و طیور (گوشت، تخم‌مرغ و لبنیات) در تغذیه انسان نقش دارد (Densley et al., 2006). این گیاه به‌دلیل دارابودن ویژگی‌هایی همچون تولید زیاد علوفه در واحد سطح، کیفیت بالای علوفه‌ی سیلو شده، میزان انرژی بالا (قابلیت هضم و جذب بالا) و فیبر کم به‌عنوان یکی از بهترین گیاهان علوفه‌ای به‌شمار می‌رود (Densley et al., 2006). عملکرد ذرت علوفه‌ای در ایران حدود ۴۵ تن در هکتار است که سالانه از حدود ۴۸۰۰ هکتار از زمین‌های زیر کشت این محصول ۲۱۶ هزارتن علوفه تولید می‌شود (آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۶). سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای در جهان یک میلیون هکتار با تولید ۸/۳ میلیون تن علوفه می‌باشد (FAO, 2019).

حداکثر عملکردی که از یک رقم در یک محیط مشخص در شرایط بدون محدودیت منابع آب و عناصر غذایی و همچنین عدم وجود آفات، بیماری‌ها، علف‌های هرز، حشرات مضر و (شرایط بدون تنش‌های زنده و غیرزنده) به‌دست

1. Intergovernmental Panel on Climate Change

2. General Circulation Model

می‌آید عملکرد پتانسیل نامیده می‌شود (Fischer, 2015). عملکرد واقعی عملکردی است که در مزارع توسط کشاورزان تولید می‌شود. خلأ عملکرد به‌عنوان اختلاف بین پتانسیل عملکرد و عملکرد واقعی تعریف می‌شود (Fischer, 2015). در صورت فراهم‌بودن آمار هواشناسی بلندمدت، مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برآورد بهتری از پتانسیل عملکرد را نشان می‌دهند زیرا در این مدل‌ها اثر نوسانات دمایی، تشعشع و بارندگی در طی زمان بهتر تخمین زده می‌شود (Van Ittersum *et al.*, 2013).

SSM به گروهی از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی اطلاق می‌شود که ساخت آن‌ها به سال ۱۹۸۶ برمی‌گردد. ساختار این مدل طی ۳۰ سال بهبود یافته و تقریباً برای همه گیاهان زراعی استفاده شده است. زیرمدل iCrop2 برگرفته از مدل اصلی SSM می‌باشد (Soltani *et al.*, 2020). مدل SSM-iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی مختلف تهیه شده است (Soltani & Sinclair, 2020). از آنجایی که این مدل از صفحه گسترده اکسل برای ورود داده‌ها و خروج نتایج استفاده می‌کند، کار با آن ساده است. این مدل توانایی شبیه‌سازی مراحل رشدونمو فنولوژیک، گسترش و پیری برگ، تأثیر تنش خشکی بر تولید ماده خشک، توزیع ماده خشک و هم‌چنین، تأثیر دماهای اکستریم (دماهای بالا و پایین) بر سطح برگ، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد (Soltani & Sinclair, 2011; Soltani & Sinclair, 2012). جزئیات کامل مدل در گزارش طرح Soltani *et al.* (2020) بیان شده است. توانایی بالای مدل SSM-iCrop2 در شبیه‌سازی گیاهانی مانند گندم (Soltani *et al.*, 2017; Nehbandani *et al.*, 2017; Soltani & Sinclair, 2015; Lollato *et al.*, 2017; zahed *et al.*, 2018; Sinclair *et al.*, 2005; Soltani & Sinclair, 2015; Lollato *et al.*, 2017; zahed *et al.*, 2018; Soltani *et al.*, 2020) سوپا (Soltani *et al.*, 2013; Soltani & Sinclair, 2015; Lollato *et al.*, 2017; zahed *et al.*, 2018; Soltani *et al.*, 2020) سورگوم (Sinclair *et al.*, 2005)، جو دیم (Alasti *et al.*, 2020)، سیب‌زمینی (Dadrasi *et al.*, 2019) و چغندر (Mohammadzadeh *et al.*, 2019) و ... گزارش شده است.

شیوه‌نامه گیگا (GYGA)^۱ یکی از روش‌های محاسبه عملکرد محسوب می‌شود که توسط Van Ittersum *et al.* (2013) تهیه شده است. هدف گیگا در دسترس قراردادن اطلس آنلاینی است که شامل اطلاعات پتانسیل عملکرد، عملکرد واقعی و خلأ عملکرد گیاهان زراعی می‌باشد. عملکردها در سطح ملی و پهنه‌های اقلیمی نمایش داده می‌شوند. در گزارش IPCC (2014)، برای پیش‌بینی تغییر اقلیم در آینده، چهار سناریوی RCP^۲ مختلف شامل RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 طراحی شده است. سناریوی RCP4.5 به‌عنوان حالت میانه متمایل به خوش‌بینانه و سناریوی RCP8.5 به‌عنوان بدبینانه‌ترین سناریوی تغییر اقلیم شناخته می‌شود. در پژوهشی با استفاده از روش دلتا و مدل SSM-iCrop2 اثر تغییر اقلیم بر عملکرد سیب‌زمینی در ایران برای سال ۲۰۵۰ بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش تحت دو سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نشان از عدم تغییر در میزان پتانسیل عملکرد داشت. مقدار پتانسیل عملکرد در شرایط حال (دوره زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵) برابر ۶۷/۴ تن در هکتار گزارش شد (Dadrasi *et al.*, 2019). نتایج به‌دست‌آمده از اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در چهار سناریو A1B، A2، B1 و B2 بر عملکرد گندم، جو و ذرت به‌عنوان غلات اصلی منطقه‌ی دشت قزوین نشان داد که عملکرد ذرت در دوره ۲۶ ساله ۲۰۳۵-۲۰۱۰ نسبت به دوره ۲۶ ساله مینا (۲۰۰۹-۱۹۸۴) به‌طور میانگین بین ۵/۱۱ تا ۴/۱۴ درصد افزایش خواهد یافت. در مورد جو و ذرت این افزایش به‌ترتیب ۳/۱۱ تا ۵/۸ و ۳/۴ تا ۷/۳ درصد گزارش شد (Ramazani Etedali *et al.*, 2018). در پژوهشی برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم دیم و آبی در ایران از مدل شبیه‌سازی HadGEM تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد میزان عملکرد در گندم دیم برای دوره میانه (۲۰۵۵ تا ۲۰۶۹) از ۲/۴ تن در هکتار در شرایط فعلی به ۳/۸ تن در هکتار برای RCP4.5 و ۴/۶ تن در هکتار برای RCP8.5 خواهد رسید که این میزان برای دوره آینده دور (۲۰۸۵ تا ۲۰۹۹) به‌ترتیب ۴/۱ و ۵/۳ تن

1. Global Yield Gap Atlas

2. Representative Concentration Pathways

در هکتار گزارش شد. این در حالی است که در میزان عملکرد گندم آبی در هر دو دوره تغییری مشاهده نشد (Zahed *et al.*, 2018). پیش‌بینی انجام‌شده از اثر تغییر اقلیم بر شاخص‌های آب و عملکرد ذرت دیم و آبی در حوضه موری دارلینگ (جنوب شرقی استرالیا) بیان‌کننده افزایش دمای هوا در همه سال‌های موردبررسی (۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) و افزایش بارندگی تا سال ۲۰۲۰ و سپس کاهش آن تا سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بود. به اعتقاد آن‌ها تغییرات فوق باعث افزایش مقدار تبخیر-تعرق و در پی آن افزایش عملکرد گیاه ذرت می‌شود (Kang *et al.*, 2015). مطالعه صورت‌گرفته روی ذرت در ایالات متحده نشان داد به‌طور کلی پتانسیل عملکرد در سناریوهای مورد استفاده تا سال ۲۰۵۰ برای منطقه ERS-Heartland افزایش می‌یابد گرچه در برخی از نواحی هارتلند، کاهش محصول نیز مشاهده شد (Johnsto *et al.*, 2015). Tubiello *et al.* (2002) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد ذرت، گندم، جو، سویا و آفتابگردان پرداختند. آن‌ها از دو مدل GISS و GFDL به‌عنوان مدل عمومی تغییر اقلیم و از مدل CropSyst برای پیش‌بینی رشد و عملکرد گیاهان استفاده نمودند. نتایج حاکی از آن بود که تلفیق هر دو شرایط تغییر اقلیم و افزایش مقدار گاز دی‌اکسیدکربن در اتمسفر (۷۰۰ppm) موجب کاهش عملکرد خواهد شد. همچنین، به این نتیجه رسیدند که در شرایط تغییر اقلیم در صورتی که مقدار بیش‌تری آب برای آبیاری موجود باشد عملکرد گیاه می‌تواند به اندازه مقدار فعلی باقی بماند.

به‌منظور دستیابی به تولید مطلوب و حفظ پایداری تولید محصولات ضروری است تا شرایط محیطی از جنبه قابلیت‌ها و محدودیت‌ها موردبررسی قرار گرفته و به‌عبارتی نوعی پهنه‌بندی یا طبقه‌بندی انجام شود. بررسی شرایط اقلیمی آینده از این لحاظ بسیار دارای اهمیت است که می‌تواند به‌صورت کاملاً محسوسی بر شرایط مدیریتی مزرعه تأثیر گذاشته و در نهایت عملکرد محصولات را تحت تأثیر قرار دهد. پژوهش حاضر با هدف تأثیر متغیرهای اقلیمی بر پتانسیل عملکرد و مصرف آب ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.) در شرایط اقلیمی آینده در ایران انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش موردبررسی در سال ۹۷-۱۳۹۵ براساس یک پروتکل جهانی موسوم به اطلس جهانی خلأ عملکرد (GYGA) در دانشکده تولید گیاهی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد. در این پژوهش عملکرد پتانسیل با استفاده از مدل شبیه‌سازی گیاهی SSM-iCrop2 برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ محاسبه شد. برای اجرای پروتکل گیگا، ابتدا سهم استان‌های مختلف کشور در تولید ذرت علوفه‌ای آبی که حداقل ۸۵ درصد تولید کشور را در بر می‌گیرند براساس آمار سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵ تعیین شد (Ministry of Agricultural Jihad Statistic, 2017). نقشه پراکنش سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای با استفاده از اطلاعات سطح زیر کشت شهرستانی (از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵)، نقشه پراکنش زمین‌های زراعی آبی و همچنین، نقشه مرز شهرستانی کشور، تهیه شد. مرحله بعدی اجرای شیوه‌نامه گیگا تعیین بافر (محدوده‌ای به شعاع ۱۰۰ کیلومتر به مرکزیت ایستگاه هواشناسی) بود. محدوده هر ایستگاه باید به‌گونه‌ای در نظر گرفته می‌شد که تا حد ممکن دارای اقلیم مشابهی باشد (Van Bussel *et al.*, 2015). برای این منظور نیاز به مشخصات جغرافیایی محل قرارگیری ایستگاه‌های هواشناسی در کشور بود. اطلاعات مربوط به داده‌های هواشناسی (کمینه و بیشینه دمای روزانه، تابش خورشیدی و بارندگی) و موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در کشور از سازمان هواشناسی کل کشور تهیه شد. ایستگاه‌های هواشناسی که بیش از یک درصد سطح زیر کشت در داخل بافر را پوشش می‌دادند به‌عنوان ایستگاه‌های هواشناسی مرجع (RWS)^۱ انتخاب شدند. براساس شیوه‌نامه گیگا اگر در مناطقی که زمین‌های زراعی محصول موردنظر موجود باشد، اما ایستگاه هواشناسی در آنجا نباشد و یا ایستگاهی حاوی اطلاعات ثبت‌نشده و یا غیر قابل‌قبولی در آن منطقه وجود داشته باشد در این صورت، می‌توان از ایستگاه

1. Reference weather stations

جایگزینی که حاوی اطلاعات درازمدت (حداقل ۲۰ سال) و با کیفیت مناسب است و در نزدیکی آن ایستگاه (درون آن پهنه با کد اقلیمی یکسان) قرار دارد، استفاده کرد و آن را به‌عنوان ایستگاه هواشناسی مرجع فرضی در نظر گرفت (Van Wart *et al.*, 2013). از این‌رو در این پژوهش، با رعایت شرایط شیوه‌نامه گیگا برای ذرت علوفه‌ای، ایستگاه هواشناسی بهبهان به‌عنوان ایستگاه فرضی در نظر گرفته شد و از اطلاعات هواشناسی این ایستگاه به‌جای ایستگاه انتخابی دهلران (کد ۲۳) استفاده و به‌صورت ایستگاه فرضی نمایش داده شد.

برای تعیین پهنه‌های اصلی کشت براساس شیوه‌نامه گیگا، ابتدا مناطق اقلیمی مهم شناسایی شده و در نهایت از بین آن‌ها مناطق اقلیمی که بیش از پنج درصد سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای را در برمی‌گیرند، انتخاب شدند. برای نامگذاری (یا کدگذاری) هر پهنه اقلیمی از یک عدد چهار رقمی استفاده شد. هر یک از پهنه‌های اقلیمی براساس اطلاعات سه متغیر از هم تفکیک شدند؛ الف) متغیر واحد دمایی (GDD)^۱، ب) متغیر شاخص خشکی سالیانه (AI)^۲، ج) متغیر نوسانات فصلی^۳. برای اطلاعات بیشتر به سایت (www.yieldgap.org/web/guest/cz-ted) مراجعه شود. در این مطالعه به‌منظور تهیه نقشه خاک، از اطلاعات HC-27 (حاصل دو پایگاه مهم اطلاعات جهانی خاک HWSO و WISE) در سطح کشور استفاده شد. نوع خاک براساس سه معیار بافت، عمق و حاصلخیزی (درصد کربن آلی) خاک در هر منطقه شماره‌گذاری شده‌اند (Van Bussel *et al.*, 2015). با استفاده از روش میانگین وزنی برای هر ایستگاه میانگین عملکرد ۱۵ ساله شبیه‌سازی شد. سپس عملکرد محدوده ایستگاه هواشناسی به اقلیم تعمیم داده شد. با استفاده از همین روش و براساس این‌که چه مساحتی از ذرت علوفه‌ای در هر اقلیم موجود بود عملکرد برای کل کشور محاسبه شد. لازم به ذکر است که مدل SSM-iCrop2 میزان عملکرد را برحسب وزن خشک شبیه‌سازی می‌کند. به همین دلیل، عملکردهای واقعی جمع‌آوری‌شده از مقاله‌های چاپ‌شده در سطح کشور با هر میزان از درصد رطوبت گزارش شده به وزن خشک تبدیل شدند. با توجه به این‌که میزان رطوبت ثبت‌شده براساس شیوه‌نامه گیگا برای ذرت علوفه‌ای ۷۰ درصد می‌باشد، بنابراین جهت اضافه‌نمودن این میزان رطوبت، عملکرد علوفه بر ۰/۳ تقسیم شد.

در این پژوهش برای تولید داده‌های هواشناسی برای شرایط آینده ایران (سال ۲۰۵۰) از روش دلتا استفاده شد. در این روش از میانگین ۴۹ مدل گردش عمومی جو (GCM) از مدل‌های اقلیمی CMIP5^۴ (<http://regclim.coas.oregonstate.edu/>) استفاده شد. در واقع از معدل خروجی ۲۳ مدل گردش عمومی برای RCP4.5 و معدل خروجی ۲۶ مدل گردش عمومی برای RCP8.5 برای تولید داده در شرایط اقلیمی آینده استفاده شد (Alder & Hostetler, 2013). با توجه به این‌که در روش دلتا از داده‌های بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ برای ساخت داده‌های اقلیم آینده مورد‌استفاده قرار گرفت، مقدار تغییرات دما در سال ۲۰۵۰ نسبت به سال ۲۰۰۷ (این سال به‌عنوان میانه دوره زمانی اقلیم کنونی که شبیه‌سازی برای آن انجام شد) محاسبه شد. غلظت CO₂ برای شرایط اقلیمی کنونی، ۳۸۵ پی‌پی‌ام در نظر گرفته شد (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>). شرایط اقلیمی آینده براساس دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در نظر گرفته شد. براساس سناریوی RCP4.5 در سال ۲۰۵۰ میزان افزایش مقادیر دما، بارش و CO₂ به‌ترتیب ۱/۴۷۵ درجه سانتی‌گراد، ۰/۹۹۸ میلی‌متر و ۴۸۷ پی‌پی‌ام (۲۱ درصد افزایش نسبت به شرایط فعلی) و افزایش مقادیر آن‌ها برای سناریوی RCP8.5 به‌ترتیب ۲/۰۵۲ درجه سانتی‌گراد، ۰/۹۹۷ میلی‌متر و ۵۴۱ پی‌پی‌ام (۲۹ درصد افزایش نسبت به شرایط فعلی) بود (جدول ۱). بنابراین در شرایط اقلیمی آینده تحت دو سناریوی ذکرشده دما

1. Growing degree days (GDD)
2. Annual aridity index (AI)
3. Temperature seasonality
4. Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

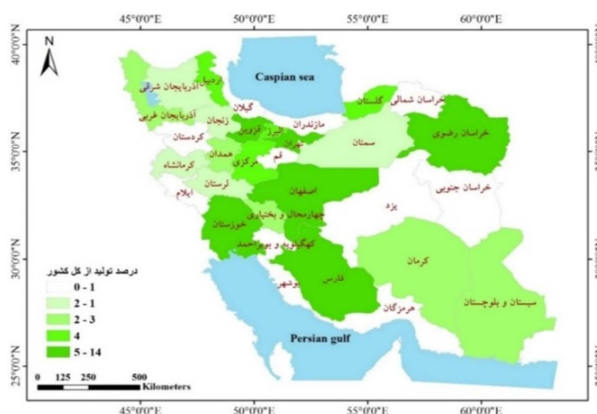
و CO₂ افزایش یافت و تغییر محسوسی در میزان بارش نسبت به شرایط فعلی مشاهده نشد. سپس، در بخشی از مدل (SSM-iCrop2) به نام Location، سه عامل دما، میزان بارش تولید شده و CO₂ برای هر سناریو ب طور جداگانه تعریف شد و برای پیش‌بینی پتانسیل عملکرد در شرایط آینده مدل اجرا شد.

جدول ۱. متغیرهای اقلیمی براساس روش ترکیبی مدل‌های تغییر اقلیم (Meinshausen et al., 2011)

سناریو	دما (°C)	بارندگی (mm)	دی‌اکسیدکربن (ppm)
RCP4.5	۱/۴۷۵	۰/۹۹۸	۴۸۷
RCP8.5	۲/۰۵۲	۰/۹۹۷	۵۴۱

۳. نتایج و بحث

استان‌های مهم تولیدکننده ذرت علوفه‌ای بر روی نقشه کشور به تفکیک رنگ در شکل (۱) نشان داده شده است. این استان‌ها شامل، خوزستان (۱۴ درصد)، فارس (۱۴ درصد)، تهران (۱۳ درصد)، قزوین (۱۱ درصد)، اصفهان (۸ درصد)، خراسان رضوی (۸ درصد)، اردبیل (۴ درصد)، آذربایجان غربی (۳ درصد) و البرز (۳ درصد) می‌باشند. این استان‌ها در مجموع حدود ۸۴ درصد تولید را در برمی‌گیرند و سایر استان‌های کشور ۱۶ درصد باقی‌مانده را شامل می‌شوند (شکل ۱). براساس نتایج به‌دست‌آمده، کشت ذرت علوفه‌ای در ایران در یازده منطقه اقلیمی اصلی صورت می‌گیرد. اقلیم‌های انتخاب‌شده در مجموع ۸۸ درصد از کل سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای را پوشش می‌دهند (جدول ۳). بیش‌ترین سطح زیرکشت ذرت علوفه‌ای به مساحت حدود ۴۶۷۱۱ هکتار مربوط به اقلیم با کد ۵۰۰۳ می‌باشد که چهار ایستگاه هواشناسی (کرج، سبزوار، ساوه و شهرکرد) را به خود اختصاص داده است و کم‌ترین سطح زیر کشت به مساحت ۲۸۳۹ هکتار مربوط به اقلیم ۴۱۰۲ با یک ایستگاه (نهایوند) می‌باشد (جدول ۳). تعداد ۲۷ ایستگاه هواشناسی مرجع براساس شیوه‌نامه گیگا در مناطق اقلیمی اصلی کشت ذرت علوفه‌ای مشخص شد (جدول ۲). بیش‌ترین و کم‌ترین سطح زیر کشت داخل بافر به‌ترتیب در ایستگاه کرج با ۲۷۴۰۸ هکتار (۱۲ درصد) و ایستگاه ساوه با ۲۰۰۵ هکتار (۰/۹ درصد) مشاهده شد (جدول ۲). براساس نتایج حاصل از این مطالعه پنج نوع کد خاک برای تهیه نقشه HC27 به‌دست آمد (جدول ۲). بیش‌ترین سطح زیر کشت ذرت علوفه‌ای به‌ترتیب مربوط به خاک‌های رسی، با حاصلخیزی متوسط و عمق خاک ۱۲۰ سانتی‌متر (کد خاک ۵) و خاک‌های لومی با حاصلخیزی ضعیف و عمق خاک ۱۲۰ سانتی‌متری (کد خاک ۱۷) می‌باشد (جدول ۲).



شکل ۱. سهم استان‌های مختلف کشور در تولید ذرت علوفه‌ای براساس آمار سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۵.

جدول ۲. ایستگاه‌های هواشناسی انتخاب‌شده و اطلاعات موردنیاز آن‌ها برای ذرت علوفه‌ای در ایران

شماره ایستگاه	اقلیم‌های اصلی	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض ارتفاع جغرافیایی (m)	کد خاک	سطح زیر کشت در هر بافر (درصد از کل کشور)
۱	۴۰۰۳	قزوین	۵۰/۰۶	۱۲۷۹ ۳۶/۲۶	(۱۵) ۵ (۳۸) ۱۲ (۴۲) ۱۷	(۲/۲) ۵۱۰۰
۲	۴۰۰۳	قوچان	۵۸/۴۵	۱۲۸۷ ۳۷/۱۲	(۶۵) ۵ (۳۸) ۵	(۰/۹) ۲۰۹۴
۳	۴۰۰۳	کمیجان	۴۹/۳۱	۱۷۴۱ ۳۴/۷۱	(۲۹) ۱۴ (۳۲) ۱۷ (۳۲) ۱۲	(۱/۰) ۲۲۴۲
۴	۴۰۰۳	کوه‌رنگ	۵۰/۱۳	۲۳۶۵ ۳۲/۴۶	(۳۶) ۱۴ (۳۳) ۱۷	(۱/۰) ۲۲۸۵
۵	۴۰۰۳	قرق‌آباد	۴۹/۸۳	۱۵۹۰ ۳۵/۱۱	(۵۸) ۱۷ (۲۳) ۵	(۱/۳) ۳۰۰۴
۶	۴۱۰۲	نهایوند	۴۸/۴۱	۱۶۷۸ ۳۴/۱۴	(۳۳) ۱۲ (۴۳) ۱۷	(۱/۰) ۲۲۲۸
۷	۵۰۰۲	ارسنجان	۵۳/۲۸	۱۶۷۶ ۲۹/۹۳	(۶۹) ۱۴ (۳۶) ۵	(۲/۷) ۶۲۳۶
۸	۵۰۰۲	درودزن	۵۲/۴۲	۱۶۴۲ ۳۰/۲۱	(۴۹) ۱۴ (۱۵) ۱۷	(۱/۹) ۴۳۲۴
۹	۵۰۰۲	تریت جام	۶۰/۵۶	۹۵۰ ۳۵/۲۹	(۹۰) ۱۷	(۱/۳) ۳۰۱۰
۱۰	۵۰۰۳	کرج	۵۰/۹۵	۱۲۹۳ ۳۵/۸۱	(۵۱) ۵	(۱۲/۰) ۲۷۴۰۸
۱۱	۵۰۰۳	سبزوار	۵۷/۶۵	۹۶۲ ۳۶/۲۱	(۷۷) ۵	(۱/۴) ۳۲۳۱
۱۲	۵۰۰۳	ساوه	۵۰/۳۷	۱۱۱۲ ۳۵/۰۸	(۶۲) ۵	(۰/۹) ۲۰۰۵
۱۳	۵۰۰۳	شهرکرد	۵۰/۸۴	۲۰۴۹ ۳۲/۲۹	(۷۲) ۵	(۱/۴) ۳۱۲۸
۱۴	۵۱۰۲	پارس‌آباد	۴۷/۷۸	۷۳ ۳۹/۶۰	(۸۰) ۵	(۵/۷) ۳۵۵۰
۱۵	۵۲۰۲	بیلسوار	۴۸/۳۲	۱۰۱ ۳۹/۳۷	(۹۱) ۵	(۳/۷) ۸۴۹۲
۱۶	۶۰۰۲	زرقان	۵۲/۷۰	۱۵۹۶ ۲۹/۷۸	(۶۹) ۵	(۲/۴) ۵۵۳۱
۱۷	۶۰۰۲	گنبد	۵۵/۲۱	۳۷ ۳۷/۲۷	(۶۲) ۵	(۱/۲) ۲۶۷۶
۱۸	۶۰۰۳	گرمسار	۵۲/۳۶	۹۰۰ ۳۵/۲۴	(۹۱) ۵	(۷/۵) ۱۷۰۱۷
۱۹	۶۰۰۳	قم	۵۰/۸۶	۸۷۹ ۳۴/۷۷	(۶۴) ۵	(۴/۲) ۹۴۷۰
۲۰	۶۰۰۳	کیوت‌آباد	۵۱/۸۳	۱۵۴۳ ۳۲/۵۲	(۸۰) ۵ (۳۴) ۵	(۲/۰) ۴۶۵۵
۲۱	۶۱۰۲	هاشم‌آباد	۵۴/۲۷	۱۳ ۳۶/۸۵	(۱۹) ۸ (۳۶) ۱۴	(۱/۸) ۴۰۲۳
۲۲	۷۰۰۳	بهیان	۵۰/۲۲	۳۱۳ ۳۰/۶۱	(۶۷) ۵	(۱/۲) ۲۷۲۲
۲۳	۷۰۰۳	دهلران (ایستگاه فرضی)	۴۷/۲۸	۲۳۲ ۳۲/۶۸	(۶۸) ۵	(۱/۰) ۲۲۹۵
۲۴	۷۰۰۳	زابل	۶۱/۵۴	۴۸۹ ۳۱/۰۹	(۶۲) ۱۷	(۰/۹) ۲۰۵۲
۲۵	۸۰۰۳	اهواز	۴۸/۷۴	۲۳ ۳۱/۳۴	(۵۱) ۱۷	(۲/۴) ۵۴۴۷
۲۶	۸۰۰۳	دزفول (صفی‌آباد)	۴۸/۴۳	۸۳ ۳۲/۲۵	(۶۳) ۱۷ (۲۵) ۵	(۶/۹) ۱۵۷۳۲
۲۷	۸۰۰۳	امیدیه (پایگاه)	۴۹/۵۵	۳۵ ۳۰/۸۳	(۳۲) ۸ (۴۳) ۱۷	(۱/۶) ۳۵۹۸
جمع کل (۶۷/۵) ۱۵۳۵۵۵						

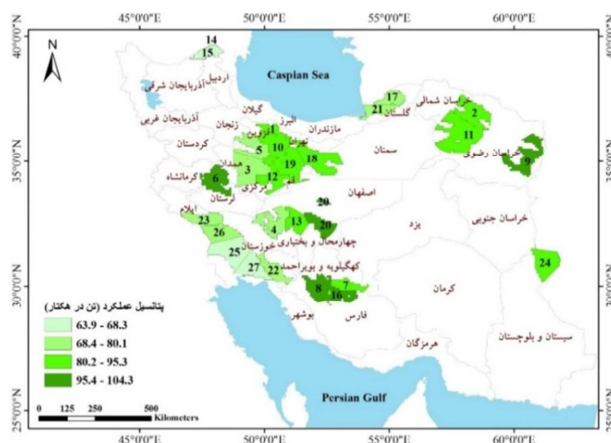
کد خاک (۵) خاک رسی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر؛ کد خاک (۸) خاک رسی، حاصلخیزی کم، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر؛ کد خاک (۱۲) خاک لومی، حاصلخیزی بالا، عمق ۶۰ سانتی‌متر؛ کد خاک (۱۴) خاک لومی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر؛ کد خاک (۱۷) خاک لومی، حاصلخیزی کم، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر و کد خاک (۲۶) خاک شنی، حاصلخیزی کم، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر می‌باشد.

۳. ۱. پتانسیل عملکرد

نتایج این مطالعه نشان داد که پتانسیل عملکرد ذرت علوفه‌ای در شرایط فعلی در سطح ایستگاه بین ۶۳/۹ تن در هکتار (ایستگاه امیدیه با کد ۲۷) و ۱۰۴/۳ تن در هکتار (ایستگاه کبوترآباد با کد ۲۰) با متوسط ۸۴/۶ تن در هکتار برآورد شد (جدول ۳ و شکل ۲). بیش‌ترین پتانسیل عملکرد ذرت علوفه‌ای در مناطق واقع در استان‌های اصفهان، فارس، همدان و شرق استان خراسان رضوی مشاهده شد و کم‌ترین پتانسیل عملکرد ذرت علوفه‌ای مربوط به شمال استان اردبیل (دشت مغان) و استان خوزستان بود (شکل ۲).

براساس یافته‌های این پژوهش پتانسیل عملکرد برای شرایط فعلی در کشور بین ۶۷/۴ (اقلیم ۵۲۰۲) و ۱۰۳/۷ (اقلیم ۴۱۰۲) با میانگین ۸۵/۶ تن در هکتار برآورد شد (جدول ۳). تحت تأثیر تغییر اقلیم مقدار پتانسیل عملکرد برای سناریوهای RCP4.5 برابر ۸۶/۴ تن در هکتار و برای سناریو RCP8.5 برابر ۸۶/۸ تن در هکتار خواهد بود که تأثیر قابل‌اعتنایی بر پتانسیل عملکرد ذرت علوفه‌ای نسبت به شرایط فعلی (۸۵/۶ تن در هکتار) ندارد و فقط موجب افزایشی معادل ۰/۹ و ۱/۴ درصد در دو سناریوی یادشده نسبت به شرایط فعلی خواهد شد (جدول ۳). میزان پتانسیل عملکرد در شرایط اقلیمی آینده (سال ۲۰۵۰) برای ذرت علوفه‌ای در سناریو RCP4.5 بین ۱- (اقلیم ۴۱۰۲ و ۶۰۰۳) و ۹/۱+ (اقلیم ۵۱۰۲) درصد و برای سناریو RCP8.5 بین ۰/۶- (اقلیم ۴۱۰۲) و ۱۱/۵+ (اقلیم ۵۱۰۲) درصد متغیر خواهد بود.

براساس نتایج به‌دست‌آمده طول دوره رشد در اقلیم‌های ۵۱۰۲، ۵۲۰۲ و ۷۰۰۳ تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر چندانی نخواهد کرد اما در سایر اقلیم‌ها کاهش خواهد یافت (شکل ۳-ب). هم‌چنین، میزان تابش تجمعی دریافتی در طول دوره کاشت تا شروع پرشدن دانه در اکثر اقلیم‌ها روند کاهشی خواهد داشت که به‌نظر می‌رسد این کاهش ناشی از کوتاه‌تر شدن طول فصل رشد باشد. بیش‌ترین میزان تابش دریافتی در طول دوره پر شدن دانه (شروع پر شدن دانه تا مرحله خمیری) در اقلیم ۵۱۰۲ و ۵۲۰۲ مشاهده شد و در سایر اقلیم‌ها این میزان روند کاهشی را نشان داد (شکل ۳-ج). نتایج به‌دست‌آمده از تأثیر تغییر دما در هر دو سناریو موردبررسی بیانگر آن است که در اقلیم‌های اصلی کشت ذرت علوفه‌ای به‌استثنای دو اقلیم ۷۰۰۳ و ۸۰۰۳ که در شرایط کنونی نیز در آن‌ها گیاه با دماهای بالاتر از حد مطلوب مواجه می‌شود، در سایر اقلیم‌ها حتی پس از افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم باز هم محیط در طول فصل رشد در دامنه بهینه باقی خواهد ماند (شکل ۳-الف).



شکل ۲. نقشه پتانسیل عملکرد (تن در هکتار) در شرایط فعلی در ایستگاه‌های هواشناسی مرجع کشت ذرت علوفه‌ای کشور که براساس ۷۰ درصد رطوبت تصحیح شده است. (اعداد داخل نقشه شماره ایستگاه هواشناسی را نشان می‌دهند که توضیح آن در جدول (۲) آورده شده است).

جدول ۳. پتانسیل عملکرد در شرایط فعلی و آینده در اقلیم‌های اصلی کشت ذرت علوفه‌ای در کشور براساس سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 تا سال ۲۰۵۰. پتانسیل عملکرد توسط مدل SSM برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴ براساس رطوبت ۷۰ درصد شبیه‌سازی شده است.

کد اقلیم	نام ایستگاه‌های انتخابی در مناطق اقلیمی	سطح زیر کشت (1000 ha)	نسبت سطح کشت شده به کل کشور (%)	پتانسیل عملکرد (ton ha ⁻¹)	
				شرایط فعلی	شرایط
				RCP4.5	RCP8.5
				(درصد تغییرات نسبت به شرایط فعلی)	(درصد تغییرات نسبت به شرایط فعلی)
۴۰۰۳	قزوین، قوچان، کميجان، کوهرنگ، غرق آباد	۴۸	۱۰/۷	۸۳/۲ (+۱/۷)	۸۳/۷ (+۱/۸)
۴۱۰۲	نهادند	۷۰	۱/۲	۱۰۲/۷ (-۱/۰)	۱۰۳/۱ (-۰/۶)
۵۰۰۲	ارستجان، درودزن، تربت‌جام	۸۱	۹/۰	۹۷/۵	۹۷/۳ (-۰/۲)
۵۰۰۳	کرج، سبزوار، ساوه، شهرکرد	۹۶	۲۰/۵	۹۰/۴	۹۱/۲ (+۰/۹)
۵۱۰۲	پارس آباد	۱۳۳	۱/۹	۶۸/۳	۷۴/۴ (+۹/۱)
۵۲۰۲	بيله سوار	۱۳۶	۳/۸	۶۷/۴	۷۲/۸ (+۸/۱)
۶۰۰۲	شیراز، زرگان، مروست، بم، حسن‌آبادداراب	۱۶۸	۵/۹	۹۴/۶	۹۴/۷ (+۰/۱)
۶۰۰۳	قمصر، قم، کبوترآباد	۱۶۱	۱۷/۶	۹۰/۷	۹۰/۶ (-۰/۱)
۶۱۰۲	هاشم‌آباد	۱۴۷	۲/۰	۷۳/۲	۷۵/۴ (+۳/۰)
۷۰۰۳	بهبان، دهلران (ایستگاه فرضی)، زابل	۱۳۹	۴/۵	۷۵/۹	۷۶/۷ (+۱/۰)
۸۰۰۳	اهواز، دزفول (صفی‌آباد)، امیدیه (پایگاه)	۱۴۵	۱۰/۹	۷۰/۶/۸	۷۱/۷ (+۱/۳)
		۱۴۹	۸۸	۸۵/۶	۸۶/۴ (+۰/۹)

برآورد در سطح ملی

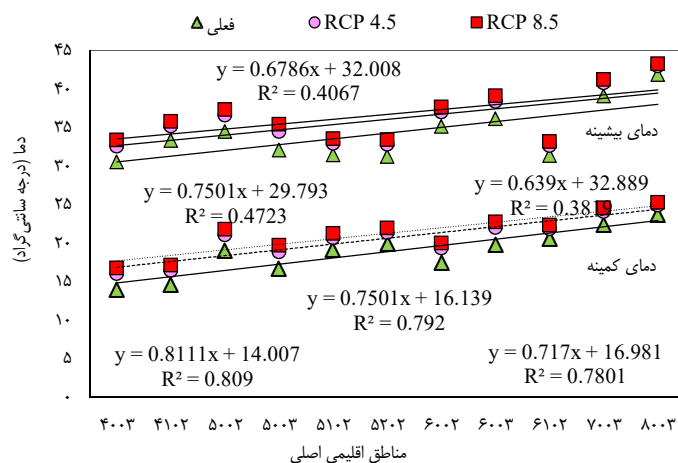
از آنجاکه ذرت یک گیاه C4 بوده و به دلیل داشتن سیستم تغلیظ CO₂ (آناتومی کرانز) برخلاف گیاهان C3 فاقد تنفس نوری می‌باشد بنابراین در شرایط کنونی با کمبود CO₂ مواجه نبوده و می‌تواند در سطح پایین تری از CO₂ اتمسفر عمل فتوسنتز را به خوبی انجام دهد در نتیجه افزایش غلظت گاز CO₂ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان عملکرد ذرت نداشته و اثر غیرمستقیم آن از طریق افزایش دما می‌تواند سبب کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد گیاه شود (شکل ۳-ب). بنابراین، با وجود کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد در نتیجه افزایش دما و تأثیر غیرمستقیم افزایش میزان CO₂ و کاهش در میزان تابش جمعی دریافتی به نظر می‌رسد، به دلیل چهارکربنه بودن گیاه ذرت و همچنین باقی ماندن دمای محیط در دامنه بهینه در بیش تر مناطق اقلیمی اصلی تولید ذرت علوفه‌ای، تغییر اقلیم موجب مطلوب‌تر شدن شرایط رشد و افزایش پتانسیل عملکرد علوفه در شرایط اقلیمی آینده خواهد شد (شکل ۳-د). بیش ترین اختلاف افزایش عملکرد در دو اقلیم ۵۱۰۲ و ۵۲۰۲ مشاهده شد که این امر را می‌توان به مطلوب‌تر شدن دما برای رشد، عدم تغییر در تعداد روز برای رسیدگی و افزایش در میزان تشعشع دریافتی در طول دوره پرشدن دانه (شروع پرشدن دانه تا مرحله خمیری) نسبت به سایر اقلیم‌ها نسبت داد (شکل ۳-د).

در این راستا (Rahimi Jahangirlou et al., 2016) با بررسی تأثیر تغییر دما بر عملکرد ذرت در استان‌های فارس و خوزستان در شرایط اقلیمی آینده گزارش دادند که دما در همه شهرستان‌های این دو استان افزایش یافته، اما این افزایش در استان فارس در محدوده قابل‌تحملی برای ذرت بوده است. بنابراین پژوهش‌گران دلیل بالاتر بودن عملکرد ذرت در شهرستان‌های این استان را وجود دمای مطلوب‌تر در طول فصل رشد ذرت نسبت به دیگر شهرستان‌های استان خوزستان دانستند. مطالعه صورت‌گرفته بر روی ذرت در اروپا نشان داد که سطح زیر کشت ذرت از ۱۱ هزار هکتار در سال ۱۹۹۳ به ۱۲۰ هزار هکتار در سال ۲۰۰۵ در دانمارک افزایش یافت که ناشی از افزایش دما در طی دوره رشد گیاه و در نتیجه مناسب شدن شرایط تولید بود این در حالی است که عملکرد ذرت در آفریقا و آمریکای لاتین حدود ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت (Kjellstrom et al., 2005). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات زراعی آبی در دشت قزوین نشان داد که با اعمال سناریوی یک درجه افزایش دما و ۱۰ میلی‌متر کاهش بارش، عملکرد جو، ذرت، چغندرقد و یونجه به ترتیب ۱۵، ۲۴، ۱۳ و ۱۷ درصد افزایش و عملکرد گندم، گوجه‌فرنگی و کلزا به ترتیب ۲۹، ۲۰ و ۲۳ درصد کاهش یافت (Mahmoodi & Parhizkari, 2015).

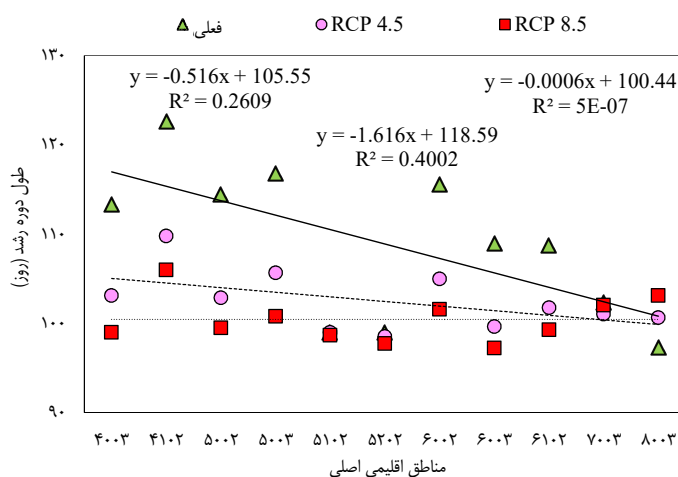
۲.۳. نیاز آبی، میزان تبخیر و تعرق و تعداد دفعات آبیاری در سطح کشور

میزان تبخیر و تعرق، مقدار آب مصرفی و تعداد دفعات آبیاری در زراعت ذرت علوفه‌ای در شرایط کنونی برابر ۸۶۴۷ و ۷۹۴۸ مترمکعب در هکتار و ۱۴ بار آبیاری برآورد شد (جدول ۴).

بیش‌ترین میزان آب موردنیاز و تبخیر و تعرق به‌ترتیب با میانگین ۱۰۲۴۴ و ۱۰۸۷۶ مترمکعب در هکتار از اقلیم ۶۱۰۲ و کم‌ترین میزان آب موردنیاز و تبخیر و تعرق با میانگین ۳۶۷۱ و ۴۸۵۳ مترمکعب در هکتار از اقلیم ۶۱۰۲ به‌دست آمد (جدول ۴). بیش‌ترین تعداد آبیاری با میانگین ۲۱ بار مربوط به اقلیم ۴۱۰۲ و ۸۰۰۳ و کم‌ترین تعداد آبیاری با میانگین هفت بار متعلق به اقلیم ۵۲۰۲ و ۶۱۰۲ بود (جدول ۴). در سطح ملی میزان تبخیر و تعرق و مقدار آب مصرفی تحت تأثیر تغییر اقلیم نسبت به شرایط کنونی برای سناریوی RCP4.5 (۸۶۵۹ و ۸۰۱۸ مترمکعب در هکتار) به‌ترتیب به میزان ۰/۱+ و ۰/۹+ درصد افزایش و برای سناریوی RCP8.5 (۸۶۴۷ و ۷۹۲۳ مترمکعب در هکتار) به میزان ۰/۷- و ۰/۳- درصد کاهش خواهد یافت که میزان این تغییرات چندان زیاد نخواهد بود (جدول ۴). تعداد دفعات آبیاری در هر دو سناریو (۱۴ بار آبیاری) نیز روند ثابتی را نشان داد (جدول ۴).

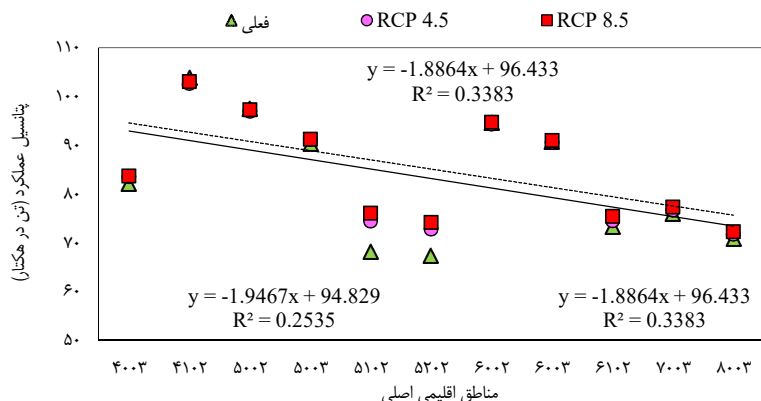


الف)

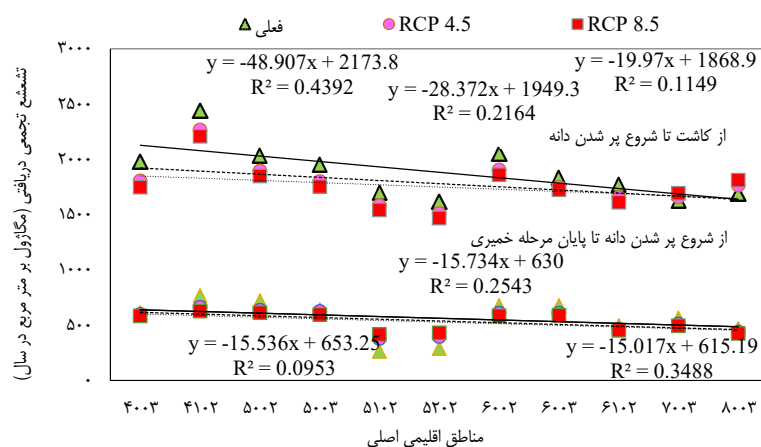


ب)

شکل ۳. الف) میانگین دمای کمینه و بیشینه در طول دوره رشد؛ ب) مقدار تابش دریافتی تجمعی در مراحل مختلف رشد (از کاشت تا پر شدن دانه و شروع پر شدن دانه تا مرحله خمیری)؛ ج) روز تا رسیدگی محصول



ج)



د)

ادامه شکل ۳. د) پتانسیل عملکرد در اقلیم‌های اصلی تولید ذرت علوفه‌ای.

جدول ۴. شبیه‌سازی مقدار نیاز آبی (مترمکعب بر هکتار)، تعداد دفعات آبیاری، میزان تبخیر و تعرق (مترمکعب در هکتار) و بهره‌وری آب براساس وزن تر علوفه (+۷ درصد) توسط مدل SSM برای شرایط فعلی (۹۴-۱۳۸۰) و آینده (سال ۲۰۵۰) براساس سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5 در اقلیم‌های اصلی کشت ذرت علوفه‌ای در کشور. اعداد داخل پرانتز نشان‌دهنده درصد تغییرات می‌باشند.

مقدار نیاز آبی (m ³ /ha)		تعداد دفعات آبیاری		میزان تبخیر و تعرق (m ³ /ha)		بهره‌وری آب براساس وزن تر علوفه (m ³ /ha)		مناطق اقلیمی اصلی
سناریو ۴/۵	سناریو ۸/۵	سناریو ۴/۵	سناریو ۸/۵	سناریو ۴/۵	سناریو ۸/۵	سناریو ۴/۵	سناریو ۸/۵	
۶۶۲۵	۶۶۶۷	۱۴	۱۴	۷۱۶۲	۷۲۳۰	۱۱/۶	۱۱/۸ (+۱/۹)	۴۰۰۳
۱۰۲۴۴	۱۰۰۴۷	۲۱	۲۱	۱۰۸۷۶	۱۰۶۸۴	۹/۶	۹/۸ (+۲/۳)	۴۱۰۲
۸۵۹۷	۸۵۹۸	۱۷	۱۷	۹۲۰۹	۹۱۴۳	۱۰/۷	۱۰/۸ (+۱/۴)	۵۰۰۲
۷۰۰۹	۷۳۷۸	۱۱	۱۱	۷۷۴۳	۷۸۶۶	۱۱/۸	۱۱/۷ (-۰/۵)	۵۰۰۳
۴۵۷۴	۴۸۸۷	۸	۸	۵۳۱۲	۵۶۶۱	۱۳/۰	۱۳/۳ (+۲/۶)	۵۱۰۲
۴۰۰۴	۴۴۷۸	۷	۷	۵۱۰۲	۵۴۲۲	۱۳/۴	۱۳/۷ (+۲/۲)	۵۲۰۲
۹۲۴۱	۹۱۷۰	۱۴	۱۴	۱۰۰۷۶	۹۹۷۳	۹/۸	۱۰/۱ (+۲/۷)	۶۰۰۲
۸۹۹۹	۹۰۸۵	۱۴	۱۴	۹۷۱۱	۹۷۱۵	۹/۵	۹/۶ (+۱/۰)	۶۰۰۳
۳۶۷۱	۳۶۵۹	۷	۷	۴۸۵۳	۴۷۷۵	۱۵/۲	۱۶ (+۵/۰)	۶۱۰۲
۸۹۶۴	۸۸۸۲	۱۵	۱۵	۹۶۳۰	۹۵۴۸	۸/۰	۸/۳ (+۳/۷)	۷۰۰۳
۱۰۱۵۷	۹۹۱۳	۲۱	۲۱	۱۰۷۰۹	۱۰۵۱۲	۶/۶	۷/۰ (+۶/۰)	۸۰۰۳
۷۹۴۸	۸۰۱۸	۱۴	۱۴	۸۶۴۷	۸۶۵۹	۱۰/۴	۱۰/۵ (+۱/۶)	برآورد در سطح ملی

دی‌اکسیدکربن و دما دو عامل مهم و تأثیرگذار بر میزان تبخیر و تعرق می‌باشد به این معنی، که اگر تنها افزایش دی‌اکسیدکربن مدنظر اتفاق بیفتد، تعرق در اثر تغییر اقلیم کاهش خواهد یافت چرا که هدایت روزنه‌ای و همچنین تعداد روزنه‌ها در واحد سطح تحت تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن کاهش خواهد یافت (Xu *et al.*, 2006). از طرف دیگر با افزایش دما تا حد ۲۵ الی ۳۰ درجه سانتی‌گراد میزان تعرق افزایش می‌یابد، اما پس از آن این افزایش موجب بسته‌شدن روزنه‌ها شده و میزان تعرق کاهش خواهد یافت. همچنین، دما علاوه بر تأثیری که بر روی رطوبت نسبی می‌گذارد موجب افزایش میزان تبخیر از سطح خاک شده و نیز با تأثیر بر روی فنولوژی، باعث زودرس شدن گیاه خواهد شد (Daccache *et al.*, 2011). این در حالی است که اثر متقابل دما و دی‌اکسیدکربن بر میزان تبخیر و تعرق بسته به نوع خاک، گیاه و شرایط اقلیمی متفاوت است (Chen *et al.*, 2010).

در مطالعه‌ای تأثیر گرمایش جهانی بر کمینه و بیشینه دما، الگوی بارش و تبخیر و تعرق گیاهانی نظیر گندم، ذرت، گوجه‌فرنگی و چغندر قند برای سه دوره زمانی آینده (۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰، ۲۰۹۹-۲۰۷۰) بیانگر آن بود که در آینده بارش با مدل‌های مختلف وضعیت متفاوتی خواهد داشت، اما دما و تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد (Sayari *et al.*, 2011). نتایج پژوهش Islam *et al.* (2012) نشان داد که تغییر اقلیم نیاز آبیاری را افزایش نمی‌دهد و علت آن را کاهش طول دوره رشد گیاه و نیز کاهش تعرق در گیاه به دلیل افزایش غلظت CO₂ بیان کردند. شبیه‌سازی رشد و تولید ذرت، تحت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار گویای آن است که افزایش دی‌اکسیدکربن، علاوه بر کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه می‌تواند تولید محصول را نیز افزایش دهد (Vanuytrecht *et al.*, 2011).

۳.۳. بهره‌وری آب در سطح کشور

دامنه تغییرات مقدار بهره‌وری آب در اقلیم‌های اصلی در شرایط کنونی بین ۶/۶ (اقلیم ۸۰۰۳) تا ۱۵/۲ (اقلیم ۶۱۰۲) کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود (جدول ۴). این در حالی است که برای سناریوی RCP4.5 دامنه تغییرات برابر ۶/۸ تا ۱۵/۷ کیلوگرم بر مترمکعب و در سناریو RCP8.5 این تغییرات افزایش یافته و به ۷ تا ۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید. در هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ کم‌ترین میزان بهره‌وری آب در اقلیم ۸۰۰۳ و بیش‌ترین میزان بهره‌وری آب در اقلیم ۶۱۰۲ مشاهده شد (جدول ۴). براساس نتایج به دست آمده میزان بهره‌وری آب برای ذرت علوفه‌ای در شرایط کنونی ۱۰/۴ کیلوگرم بر مترمکعب است که این میزان در سال ۲۰۵۰ برای سناریوی RCP4.5 با ۰/۴ درصد و برای سناریوی RCP8.5 با ۱/۶ درصد افزایش به ترتیب به ۱۰/۴ و ۱۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد رسید (جدول ۴).

به‌طور کلی، دلیل احتمالی افزایش بهره‌وری آب را می‌توان ناشی از افزایش غلظت CO₂ و بسته‌تر شدن روزنه‌ها دانست. همچنین، با توجه به این که تغییر چندان در میزان آب مورد نیاز، تبخیر و تعرق و تعداد دفعات آبیاری در اثر تغییر اقلیم مشاهده نشد می‌توان افزایش بهره‌وری آب در ذرت علوفه‌ای را به افزایش پتانسیل عملکرد نسبت داد. در همین ارتباط Ramazani Etedali *et al.* (2018) گزارش کردند که با افزایش غلظت CO₂ تحت سناریوهای مختلف (A1B، A2، B1 و B2) در منطقه دشت قزوین، میزان بهره‌وری آب برای گندم، جو و ذرت به ترتیب ۱۳، ۶ و ۴ درصد افزایش خواهد یافت. آن‌ها علت این افزایش را کاهش تعرق به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای دانستند. در پژوهش دیگری Li *et al.* (2010) با بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی دو گیاه C3 از خانواده Cyperaceae و C4 از خانواده Poaceae به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت CO₂ باعث کاهش تبخیر و تعرق و افزایش کارایی مصرف آب می‌شود. در پژوهشی مشاهده شد که با افزایش دما به میزان دو درجه سانتی‌گراد، بهره‌وری آب در گندم دیم و آبی به میزان ۰/۱۹ و ۰/۱۰ درصد افزایش خواهد یافت (Zahed *et al.*, 2018). نتایج به دست آمده از بررسی

اثر تغییر اقلیم بر روی سیب‌زمینی در ایران نشان داد که بهره‌وری آب در شرایط فعلی $8/80$ کیلوگرم بر مترمکعب بوده که این میزان در سال 2050 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به $9/1$ و $9/4$ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد رسید. آن‌ها علت این امر را افزایش در میزان پتانسیل عملکرد و کاهش در میزان آب موردنیاز، میزان تبخیر و تعرق و تعداد آبیاری در اثر تغییر اقلیم دانستند (Dadrasi *et al.*, 2019). در پژوهشی مشابه Mohammadzadeh *et al.* (2018) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی چغندر قند در ایران پرداخته و نشان دادند تحت تأثیر تغییر اقلیم میزان بهره‌وری آب، تبخیر و تعرق و آب موردنیاز تحت سناریوی RCP4.5 به ترتیب $3/8$ ، $2/5$ و $2/7$ درصد و برای سناریوی RCP8.5 به ترتیب $6/2$ ، $2/6$ و $2/8$ درصد نسبت به شرایط فعلی در سطح ملی افزایش خواهد یافت. مقادیر گزارش شده توسط آن‌ها برای سناریوی RCP4.5 به ترتیب $7/9$ کیلوگرم بر مترمکعب، 14325 و 12891 مترمکعب در هکتار و برای سناریوی RCP8.5 به ترتیب $8/1$ کیلوگرم بر مترمکعب، 14346 و 12910 مترمکعب در هکتار بود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر متغیرهای اقلیمی بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت علوفه‌ای در شرایط اقلیمی آینده در کشور برآورد شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر اقلیم براساس هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 تأثیر قابل‌اعتنایی بر پتانسیل عملکرد ذرت علوفه‌ای نسبت به شرایط فعلی ($85/6$ تن در هکتار) ندارد و فقط موجب افزایشی معادل $0/9$ و $1/4$ درصد در دو سناریوی یادشده نسبت به شرایط فعلی خواهد شد. این نتیجه را می‌توان ناشی از چهارکربنه‌بودن گیاه ذرت و در نتیجه عدم تأثیر افزایش CO_2 بر رشد و عملکرد و همچنین، باقی‌ماندن دمای محیط در دامنه بهینه در بیش‌تر مناطق اقلیمی اصلی تولید ذرت علوفه‌ای در ایران دانست که موجب مطلوب‌تر شدن شرایط رشد و افزایش پتانسیل عملکرد علوفه در شرایط اقلیمی آینده خواهد شد. بیش‌ترین اختلاف افزایش عملکرد برای دو اقلیم 5102 و 5202 در شرایط اقلیمی آینده را به مطلوب‌تر شدن دما برای رشد، عدم تغییر در تعداد روز برای رسیدگی و افزایش در میزان تابش دریافتی در طول دوره پرشدن دانه (شروع پرشدن دانه تا مرحله خمیری) نسبت به سایر اقلیم‌ها نسبت داد. میزان بهره‌وری آب نیز در هر دو سناریو به میزان $0/4$ و $1/6$ درصد نسبت به شرایط فعلی ($10/4$ کیلوگرم بر مترمکعب) افزایش می‌یابد که دلیل احتمالی آن افزایش غلظت CO_2 و بسته‌تر شدن روزنه‌ها می‌باشد. همچنین، به دلیل آن‌که تغییر چندانی در میزان آب موردنیاز، تبخیر و تعرق و تعداد دفعات آبیاری در اثر تغییر اقلیم مشاهده نشد می‌توان افزایش بهره‌وری آب در ذرت علوفه‌ای را به افزایش پتانسیل عملکرد نسبت داد.

۵. تشکر و قدردانی

از سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی کشور که در ارائه اطلاعات و داده‌های لازم برای انجام این مطالعه همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع مورد استفاده

- Alasti, O., Zeinali, E., Soltani, A., & Torabi, B. (2020). Estimation of yield gap and potential of rainfed barley production increasing in Iran. *Crop Production*, 13(3), 41-60. (In Persian). <https://doi.org/doi: 10.22069/ejcp.2021.16896.2250>
- Alder, J.R., & Hostetler, S.W. (2013). An interactive web application for visualizing climate data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(22), 197-198. <https://doi.org/10.1002/2013EO220001>
- Chen, S.X., Zhang, H., Sun, T., & Ren, Y.W. (2010). Effects of winter wheat row spacing on evapotranspiration, grain yield and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 97, 1126 -1132. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.005>
- Daccache, A., Weatherhead, E.K., Stalham, M.A., & Knox, J.W. (2011). Impacts of climate change on irrigated potato production in a humid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1641-1653. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.018>
- Dadrasi, A., Torabi, B., Rahemi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2020). Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM-iCrop2) for Potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield in Iran. *Potato. Research*, 63, 545-563. <https://doi.org/10.1007/s11540-020-09456-y>
- Dadrasi, A., Torabi, B., Rahemi, A., Soltani, A., & Zeinali, E. (2019). Modeling the production and yield gap of Potato in present and future climatic conditions in Iran. Ph.D. Dissertation, Rafsanjan Vali Asr University, Iran. (In Persian)
- Densley, R.J., Austin, G.M., Williams, I.D., Tsimba, R., & Edmeades, G.O. (2006). Maize silage and winter crop options to maximize dry matter and energy for NZ dairy systems, In Proceedings of the New Zealand Grassland Association, 68, 193-197. <https://doi.org/10.33584/jnzg.2006.68.2647>
- Faraji, A., & Soltani, A. (2006). Determining the optimal phenology and initial growth rate for chickpeas in rainfed conditions of Gonbad and Gorgan. *Agricultural Science and industry*, 2(7), 49-58. (In Persian)
- Fischer, R.A. (2015). Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research*, 182, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.12.006>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2017). The FAOSTAT Database. Available at Web site <http://faostat.fao.org/default.aspx> (Last accessed July 2019).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change WGI, Fourth Assessment Report, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. IPCC Secretariat, c/o WMO, 7bis, Avenue de la Paix, C.P.N. 2300, 1211 Geneva 2, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I, II and III to Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), In: R. Pachauri and L. Meyer (eds). Geneva Switzerland. 151p.
- Islam, A., Ahuja, L.R., Garcia, L.A., Ma, L., Saseendran, A.S., & Trout, T.J. (2012). Modeling the impacts of climate change on irrigated corn production in the Central Great Plains. *Agricultural Water Management*, 110(1), 94-108. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.004>
- Johnston, R.Z., Sandefur, H.N., Bandekar, P., Matlock, M.D., Haggard, B.E., & Thoma, G. (2015). Predicting changes in yield and water use in the production of corn in the United States under climate change scenarios. *Ecological Engineering*, 82, 555-565. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.021>
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., & Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)

- Kang, Y., Khan, S., & Ma, X. (2015). Analysing climate change impacts on water productivity of cropping systems in the Murray Darling Basin, Australia. *Irrigation and Drainage*, 64(4), 443-453. <https://doi.org/10.1002/ird.1914>
- Kim, S.H., Kim, J., Walko, R., Myoung, B., Stack, D., & Kafatos, M. (2015). *Climate Change Impacts on Maize-yield Potential in the Southwestern United States*. In ASABE 1st Climate change symposium: Adaptation and mitigation conference proceedings (pp. 1-3), American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Kjellstrom, E., Barring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Ullerstig, A., Willwn, U., & Wyser, K. (2005). *A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3)*, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 108, 54 pp.
- Koocheki, A., & Nassiri Mahalati, M. (2008). Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Field Crop Research*, 6(1), 139-154. (In Persian)
- Li, J., Erickson, J.E., Peresta, G., & Drake, B.G. (2010). Evapotranspiration and water use efficiency in a Chesapeake Bay wetland under carbon dioxide enrichment. *Global Change Biology*, 16(1), 234-245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01941.x>.
- Lollato, R. P., Patrignani, A., Ochsner, T. E., & Edwards, J. T. (2016). Prediction of plant available water at sowing for winter wheat in the southern great plains. *Agronomy Journal*, 108(2), 745-757. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0433>
- Mahmoodi, A., & Parhizkari, A. (2016). Economic Analysis of the Climate Change Impacts on Products Yield, Cropping Pattern and Farmer's Gross Margin (Case Study: Qazvin Plain). *Economic Growth and Development Research*, 5(20), 25-40. (In Persian)
- Ministry of agricultural Jihad statistics. (2001-2015). <https://www.maj.ir/Index.aspx?page=form&lang=1&PageID=11583&tempname=amar&sub=65> method Name=Show Module Content, (Last accessed November 2017).
- Miri, H.R. (2013). Effect of CO₂ enrichment under drought stress condition on growth and weed competetiveness against corn. *Plant Ecophysiology*, 5(14), 60-73. (In Persian)
- Mohammadzadeh, Z., Soltani, A., Ajamnoroezi, H., & Bazrgar, A. (2019). *Modeling production capacity and yield of sugar beet according to current and future climatic conditions in Iran*. Ph.D. Dissertation, Islamic Azad University, 90pp. (In Persian)
- Nehbandani, A.R., Soltani, A., Zeinali, E., Hoseini, F., Shahoseini, A., & Mehmandoy, M. (2017). Soybean (*Glycine max* L. Merr.) yield gap analysis using boundary line method in Gorgan and Aliabad Katul, *Agroecology*, 9(3), 760-776. (In Persian)
- Rahimi Jahangirlou, M., Kambouzia, J., Soufizadeh, S., Zand, E., & Rezayi, M. (2016). Study and comparison of temperature changes impacts on grain yield of irrigated maize (*Zea mays* L.) in Khuzestan and Fars provinces. *Agroecology*, 6(1), 118-134. (In Persian)
- Ramazani Etedali, H., Ababai, B., & Kaviyani, A. (2018). Impact of Increased Atmosphere CO₂ Concentration on Crop Yield, Transpiration and Water Productivity of Main Cereals in the Qazvin Plain. *Water Resources Engineering*, 11(38), 39-48. (In Persian)
- Sayari, N., Alizadeh, A., Bannayan Awal, M., Hossaini, F., & Hesami Kermani, M.R. (2011). Comparison of two GCM models (HadCM3 and CGCM2) for the prediction of climate parameters and crop water use under climate change (case study: Kashafrud Basin). *Water and soil*, 25(4), 912-925. (In Persian)
- Sinclair, T. R., Hammer, G. L., & Van Oosterom, E. J. (2005). Potential yield and water-use efficiency benefits in sorghum from limited maximum transpiration rate. *Functional Plant Biology*, 32(10), 945-952. <https://doi.org/10.1071/FP05047>
- Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crops Research*, 124(2), 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.021>
- Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2012). Identifying plant traits to increase chickpea yield in water-limited environments. *Field Crops Research*, 133(1), 86-196. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.04.006>

- Soltani, A., Alimaghani, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R. S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., van Ittersum, M. K., & Sinclair, T. R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agricultural Systems*, 182, 102855. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102855>
- Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T. R. (2013). SSM-Wheat: A simulation model for wheat development, growth and yield. *International Journal of Plant Production*, 7(4), 711-740. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2013.1266>
- Tubiello, F. N., & Ewert, F. (2002). Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: approaches and applications for climate change. *European Journal of Agronomy*, 18(1-2), 57-74. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00097-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00097-7)
- Van Bussel, L.G., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., de Groot, H., Saito, K., Cassman, K.G., & van Ittersum, M.K. (2015). From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98-108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>
- Van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance-a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Van Wart, J., van Bussel, L.G., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N.D., Claessens, L., & van Ittersum, M.K. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research*, 143, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., & Willmiams, P. (2011). Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1753-1762. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.011>
- Xu, Z., Zheng, X., Wang, Y., Wang, Y., Huang, Y., & Zhu, J. (2006). Effect of free-air atmospheric CO₂ enrichment on dark respiration of rice plants (*Oryza sativa* L.). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 115(1-4), 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.017>
- Zahed, M., Soltani, A., Zeinali, E., Torabi, B., Zand, E., & Alimaghani, S.M. (2018). *Modeling the production and yield gap of wheat in Iran*. Ph.D. Dissertation, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. (In Persian)