



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۰ | دی ۱۴۰۰ (ص ۲۵۲۷-۲۵۱۵)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.327604.669034>

(مقاله علمی - پژوهشی)

Investigation the Effect of Climate Change and Planting Date on Maize Yield using WOFOST Model

PEZHMAN SALARIEH¹, MOJTABA KHOSHRAVESH^{1*}, REZA NOROOZ VALASHEDI¹, ALIREZA KIANI²

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

2. Agricultural Engineering Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran.

(Received: July. 22, 2021- Revised: Sep. 10, 2021- Accepted: Sep. 18, 2021)

ABSTRACT

Given the advancement of technology and the growing population in the world, the need to recognize and pay attention to the phenomenon of climate change is inevitable. The purpose of this study is to investigate the changes in maize yield for future years in Gorgan with a change in planting date. In this research, the grain yield of maize SC late maturing for future conditions was investigated using WOFOST model in Gorgan city based on different deficit irrigation treatments and different planting dates. Irrigation treatments including 100% (T1), 75% (T2) and 50% (T3) of water requirement. For this purpose, using SDSM statistical model and HadCM3 general circulation model for all scenarios, the fifth microscale report was performed in the next two thirty-year periods (2020-2050 and 2050-2080). Data for the period 1980-1995 were used to calibrate the SDSM model and data for the period 1995-2010 were used for validation. The WOFOST model was calibrated by the measurement data of 1391 and then the data of 1392 were used for validation. Statistical indices of root mean square error (RMSE), compatibility index (d), model efficiency coefficient (E), explanation coefficient (R^2) and residual coefficient (CRM) related to grain yield simulation in calibration period was equal to 0.217 tons per hectare, 0.97, 0.94, 0.93 and 0.15, respectively and in the validation period, was obtained 0.241 tons per hectare, 0.98, 0.93, 0.96 and 0.14, respectively. The numbers obtained indicate the good performance of the WOFOST model. Also, the maize grain yield was simulated for four different planting dates in three treatments of T1, T2 and T3. In the period 2020-2050, the lowest yield was predicted 4.3 tons per hectare in T3 treatment under the RCP8.5 scenario on 2 June, which is a decrease of 32.81% compared to the base period. In the period 2050-2080, the lowest yield was predicted 3.3 tons per hectare in T3 treatment under the RCP8.5 scenario on 2 June, which is a decrease of 48.43% compared to the base period. The best planting date for corn in Gorgan city is June 23, which can be used for better management of cultivation and irrigation in Gorgan.

Keywords: SDSM Model, Downscaling Model, HadCM3, Grain Yield.

*Corresponding author's E-mail: m.khoshravesh@sanru.ac.ir, khoshravesh_m24@yahoo.com

بررسی اثر تغییر اقلیم و تاریخ کشت بر عملکرد ذرت با استفاده از مدل WOFOST

بژمان سالاریه^۱، مجتبی خوشروش^{۱*}، رضا نوروز ولاشدی^۱، علی رضا کیانی^۲

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زارعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
۲. بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۳۱ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۶/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۶/۲۷)

چکیده

با توجه به پیشرفت فناوری و افزایش روزافزون جمعیت در دنیا لزوم شناخت و توجه به پدیده تغییر اقلیم امری اجتناب‌ناپذیر است. هدف از پژوهش بررسی تغییرات عملکرد گیاه ذرت برای سال‌های آتی در شهرستان گرگان به همراه تغییر تاریخ کشت می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از مدل گیاهی WOFOST در شهرستان گرگان بر اساس تیمارهای مختلف کم آبیاری و تاریخ‌های مختلف کشت به بررسی عملکرد دانه گیاه ذرت سینگل کراس دیر رس برای شرایط آینده پرداخته شد. تیمارهای آبیاری شامل ۱۰۰ درصد (T_1)، ۷۵ درصد (T_2) و ۵۰ درصد (T_3) آب مورد نیاز گیاه می‌باشد. به این منظور با کمک مدل آماری SDSM و مدل گردش عمومی جو HadCM3 برای تمام سناریوهای گزارش پنجم ریزمقیاس‌نمایی در دو دوره سی‌ساله آتی (۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰) انجام شد. برای واسنجی مدل SDSM از داده‌های دوره ۱۹۸۰-۱۹۹۵ و برای صحت‌سنجی از داده‌های دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۰ استفاده شد. مدل WOFOST توسط داده‌های اندازه‌گیری سال ۱۳۹۱ واسنجی و بعد از آن برای صحت‌سنجی از داده‌های سال ۱۳۹۲ استفاده شد. شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص سازگاری (d)، ضریب کارایی مدل (E)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب باقی‌مانده (CRM) مربوط به شبیه‌سازی عملکرد دانه در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۰/۲۱۷، تن بر هکتار، ۰/۹۷، ۰/۹۴، ۰/۹۳ و ۰/۱۵ و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۲۴۱، تن بر هکتار، ۰/۹۸، ۰/۹۳، ۰/۹۶ و ۰/۱۴ به دست آمد. اعداد به دست آمده نشان‌دهنده کارایی خوب مدل WOFOST می‌باشد. همچنین برای چهار تاریخ کشت مختلف در سه تیمار T_1 ، T_2 و T_3 عملکرد گیاه ذرت شبیه‌سازی شد. در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ کم‌ترین عملکرد در تیمار T_3 تحت سناریوی RCP8.5 در تاریخ ۱۲ خرداد به مقدار ۴/۳ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۳۲/۸۱ درصد کاهش دارد. در دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۰ کم‌ترین عملکرد در تیمار T_3 تحت سناریوی RCP8.5 در تاریخ ۱۲ خرداد به مقدار ۳/۳ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۴۸/۴۳ درصد کاهش دارد. بهترین زمان تاریخ کشت برای گیاه ذرت در شهرستان گرگان ۲ تیر می‌باشد که از این نتایج می‌توان برای مدیریت بهتر کشت و آبیاری در شهرستان گرگان استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مدل SDSM، ریزمقیاس‌نمایی، HadCM3، عملکرد دانه.

مقدمه

اساس آمار سازمان تجارت جهانی (Dowswell, 2019)، کل تولید ذرت علوفه‌ای جهان ۱۵۱۵ میلیون تن اعلام شده است. در ایران نیز بر اساس آمارنامه محصولات کشاورزی در سال زراعی ۱۳۹۶، میزان تولید ذرت علوفه‌ای بیش از ۱۱/۳ میلیون تن بوده و اهمیت این محصول در چرخه تولید مواد غذایی را بیان می‌کند (Mohammadkhani *et al.*, 2020). با توجه به مقدار سطح زیر کشت ذرت، هرگونه اقدام برای افزایش بهره‌وری مصرف آب، سبب افزایش تولید به ازای واحد مصرف آب خواهد شد و همچنین تضمین کننده امنیت غذایی در کشور است. بنابراین یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر رشد و عملکرد محصول، اثرات تغییر اقلیم است. تغییر اقلیم دارای تبعات منفی است ولی با شناخت

تغییر اقلیم تاکنون به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر محیط در جوامع علمی سراسر دنیا معرفی شده است. به گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، میانگین دمای سطح زمین طی ۱۳۰ سال گذشته ۱/۰۶-۰/۶۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است و این افزایش تا انتهای سال ۲۱۰۰ به ۱/۵ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد خواهد رسید (IPCC, 2014). از علل بارز و قابل توجه پدیده این پدیده، روند رو به افزایش گازهای گلخانه‌ای، صنعتی شدن جوامع و در پی آن رشد بی‌سابقه استفاده از سوخت‌های فسیلی است. به‌طوری‌که هرگونه تغییر در وضعیت آب‌وهوای جهان، به‌صورت مستقیم در تولید محصولات کشاورزی تاثیرگذار خواهد بود. بر

WOFOST دقت بیشتری نسبت به مدل AquaCrop داشت. *Ahmadi et al.* (2019) به واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST برای گندم زمستانه در دشت قزوین پرداختند و گزارش کردند که مدل شبیه‌سازی برازش قابل قبولی با داده‌های مشاهده‌ای نشان داد. و کلیه مقادیر کمتر از مقدار مزرعه‌ای برآورد شد و بیشترین کارایی در برآورد شاخص سطح برگ برابر $0/98$ بود. *Ceglar & Bogataj* (2012) عملکرد ذرت را با استفاده از مدل WOFOST در شرایط تغییر اقلیم آینده پیش‌بینی کردند و نشان دادند که عملکرد در دهه 2050 به طور متوسط بین 10 تا 16 درصد و در دهه 2090 بین 27 تا 34 درصد کاهش می‌یابد. *Wilby et al.* (2006) مدل شبیه‌سازی WOFOST را برای سنجش پتانسیل تولید ذرت در دشت شمالی چین به کار گرفتند. در این مطالعه از آمار 40 ساله 22 ایستگاه هواشناسی استفاده شد. پتانسیل عملکرد در بخش شمالی دشت به‌وسیله بارش محدودیت می‌یابد و در بخش جنوبی دشت تابش کم و دمای بالا مهم‌ترین عامل محدودیت عملکرد بود. به‌طور کلی پتانسیل عملکرد ذرت در بخش شمالی دشت بالاتر از بخش جنوبی آن است. *Bhatia et al.* (2008) مطالعه‌ای را با هدف تعیین پتانسیل تولید گندم در بزرگ‌ترین منطقه کشت گندم در چین و با در نظر گرفتن تغییرات مکانی و زمانی عملکرد انجام دادند. آن‌ها از مدل WOFOST برای تعیین عملکرد پتانسیل، تحت شرایط محدودیت آب استفاده کردند. در بخش شمالی منطقه، پتانسیل تولید $9/7$ تن بر هکتار برآورد شد. این در حالی است که میانگین عملکرد در شرایط محدودیت آب 3 تن بر هکتار تخمین زده شد. در قسمت‌های جنوبی متوسط عملکرد در شرایط محدودیت آب $7/5$ تن بر هکتار تخمین زده شد و نتیجه گرفته شد که در مناطق شمالی بارندگی محدودکننده عملکرد بوده است. *Rahimi-Moghaddam et al.* (2019) گزارش نمودند که به‌طور متوسط عملکرد دانه ذرت در استان کرمانشاه در سال 2050 نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب $60/82$ و $80/73$ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که به‌طور میانگین بالاترین عملکرد در شرایط تغییر اقلیم در یک تاریخ کاشت زود هنگام (16 فروردین) با $7071/2$ و 4743 کیلوگرم بر هکتار به‌ترتیب در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به دست آمد. در دوره آینده به‌طور متوسط طول دوره رشد، رشد رویشی و رشد زایشی به ترتیب 4 ، $4/7$ و $1/7$ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت. همچنین در دوره آینده میانگین وزن دانه در استان کرمانشاه کاهش خواهد یافت به‌طوری‌که تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب برابر $31/8$ و $59/3$ درصد می‌باشد. با توجه به اهمیت تولید ذرت به عنوان یک محصول

آن می‌توان این اثرات را به نقطه قوت تبدیل کرد. طبق گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، بیشترین افزایش دما در سطح زمین در پایان قرن بیستم از سال 1910 تا 1945 و از سال 1976 تا 2000 اتفاق افتاده است (*Sarafrouzeh et al.*, 2014). افزایش دما، فرایندهای مختلف گیاهی مانند فتوسنتز، تنفس و توزیع و تخصیص تولیدات فتوسنتزی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم سبب کاهش عملکرد گیاهان زراعی و پاسخ‌های رشدی پیچیده شده و این اثرات در مناطق و گیاهان مختلف می‌تواند متفاوت باشد. *Ghonchehpour et al.* (2019) عملکرد مدل SDSM برای سه دوره $2006-2100$ در حوضه رودخانه گرگان‌رود را تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که مقدار بارش در ایستگاه‌های تمر، چشمه‌خان، بهلکه‌داشلی و غفارحاجی در هر سه دوره زمانی بررسی شده و تحت هر دو سناریو افزایش یافته و در مقابل، در ایستگاه‌های گرگان و آرازکوسه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقدار کمترین دما نیز در دوره‌های بررسی شده و تحت هر دو سناریو در ایستگاه‌های گرگان، چشمه‌خان، و آرازکوسه به‌جز دوره‌ی $2100-2071$ تحت سناریوی RCP8.5 افزایش یافته و در ایستگاه‌های تمر، بهلکه‌داشلی و غفارحاجی کاهش می‌یابد.

برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تولید گیاهان زراعی، می‌توان از مدل‌های گیاهی استفاده کرد و با تولید داده‌های روزانه برای سال‌های آینده، خروجی این مدل‌های ریزمقیاس‌کننده را به‌عنوان ورودی مدل‌های گیاهی لحاظ و میزان عملکرد گیاهان را تحت تغییرات اقلیمی دهه‌های آتی برآورد کرد. مدل‌های گیاهی زیادی برای بررسی پدیده تغییر اقلیم وجود دارد. یکی از آن‌ها مدل WOFOST است. مدل WOFOST به دلیل دقت بالا در اثر پارامترهای ورودی بیشتر و قابلیت تلفیق با سامانه اطلاعات جغرافیایی، ابزاری مناسب برای تحلیل و ارزیابی سامانه‌های مزرعه است. این مدل یک مدل عمومی و دینامیکی برای شبیه‌سازی رشد گیاهان است که برای استفاده از مدل نیاز به استفاده از داده‌های به‌روز اقلیمی، گیاهی و خصوصیات خاک است. این مدل در دانشگاه واخنینگن هلند طراحی و برای اولین بار در سه کشور آفریقایی غنا، کنیا و بورکینافاسو انجام شد (*Ma et al.*, 2013).

Egdernezhad et al. (2018) دو مدل AquaCrop و WOFOST را برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت تحت مدیریت‌های مختلف آب مصرفی (50 ، 75 ، 100 و 150 میلی‌متر) در شهرستان اهواز استفاده کردند. نتایج آماره RMSE برای عملکرد دانه ذرت توسط مدل‌های AquaCrop و WOFOST به‌ترتیب برابر با $0/16$ و $0/15$ تن بر هکتار و برای زیست توده به‌ترتیب برابر با $0/92$ و $0/88$ تن در هکتار بود و به‌طور کلی مدل

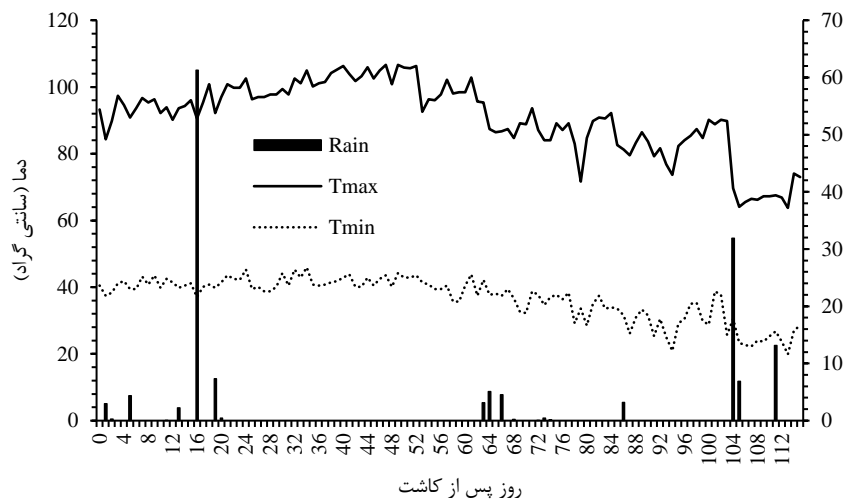
بیشتر از سه برابر خشک‌ترین ماه سال است و بارش خشک‌ترین ماه سال کمتر از ۳۰ میلی‌متر است. ایستگاه فوق بر اساس روش کوپن دارای آب و هوای معتدل و مرطوب با دمای حداقل ۱۰- درجه سانتی‌گراد در دی ماه و حداکثر ۴۵ درجه سانتی‌گراد در مرداد ماه و میانگین بارش سالیانه ۵۲۷/۴ میلی‌متر است.

در کرت‌هایی به ابعاد ۳ متر در ۲۰ متر با سه تکرار، کشت ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ دیررس انجام شد. در زمینی به ابعاد متر تاریخ کاشت ذرت در سال اول و دوم کشت به ترتیب ۱۳۹۱/۴/۱۱ و ۱۳۹۲/۴/۱۳ بود. تاریخ برداشت محصول ذرت نیز به ترتیب ۱۳۹۱/۸/۳ و ۱۳۹۲/۸/۱۸ بود. نمودار تغییرات دمای حداقل و حداکثر و بارش روزانه در طول دوره رشد گیاه برای سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شده است.

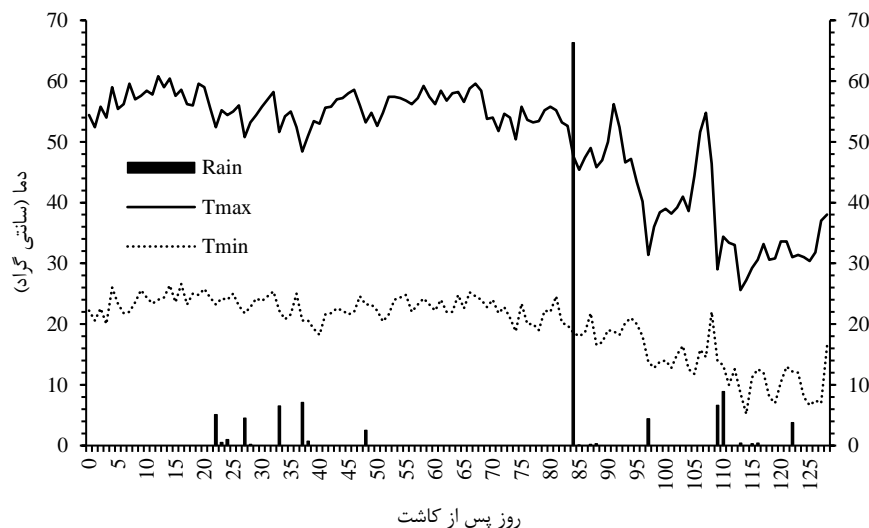
استراتژیک جهت امنیت غذایی و همچنین افزایش کارایی مصرف آب، شبیه‌سازی عملکرد گیاه ذرت با مدل WOFOST برای سال‌های آبی و در شرایط تغییر تاریخ کشت در شهرستان گرگان از اهداف این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه تحقیقات کشاورزی شهرستان گرگان وابسته به مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی با متوسط بارندگی سالانه ۵۲۷/۴ میلی‌متر با میانگین بیشترین و کمترین درجه حرارت روزانه به ترتیب ۳۲/۵ و ۱۳/۳ درجه سانتی‌گراد اجرا شد. در ایستگاه هاشم آباد گرگان، حداقل بارش مرطوب‌ترین ماه سال



شکل ۱- تغییرات دمای حداقل و حداکثر و بارش روزانه در طول دوره رشد گیاه در سال ۱۳۹۱



شکل ۲- تغییرات دمای حداقل و حداکثر و بارش روزانه در طول دوره رشد گیاه در سال ۱۳۹۲

برای آبیاری از سیستم قطره‌ای- نواری استفاده شده است. سیستم آبیاری قطره‌ای شامل یک لوله اصلی در جهت طولی زمین و کنار مزرعه قرار داده و به فواصل ۲۰ متر در یک انشعاب فرعی برای هر یک از تکرارها در نظر گرفته شده است. نوارهای تیپ در هر ردیف ۲۰ متر و در هر ۲۰ سانتی‌متر یک روزنه خروج

آب با دبی اسمی ۲ لیتر در ساعت (۱۰ لیتر در ساعت به ازای هر متر طول نوار) در فشار یک اتمسفر تعبیه شده بود. برای بدست آوردن مقدار نیاز آبیاری از رطوبت خاک به صورت وزنی استفاده شد. خصوصیات فیزیکی خاک و تیمارهای مورد مطالعه در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد مطالعه

ρ_b (gr/cm ³)	PWP درصد وزنی رطوبت	FC درصد وزنی رطوبت	بافت خاک	درصد ذرات خاک			عمق (cm)
				رس	سیلت	شن	
۱/۳	۱۱/۵	۲۴	لوم	۲۱/۲	۴۶	۳۲/۸	۰-۳۰
۱/۳۵	۱۲/۸	۲۵	لومی سیلتی	۲۱/۲	۵۶	۲۲/۸	۳۰-۶۰
۱/۳	۱۱/۶	۲۴/۹	لوم	۲۷/۲	۴۸	۲۴/۸	۶۰-۹۰

جدول ۲- تیمارهای مورد مطالعه در طرح آزمایشی و مقدار آب دریافتی

تیمار	سال اول کشت	سال دوم کشت
T ₁	۱۰۰ درصد آب مورد نیاز گیاه (۲۸۴ میلی‌متر)	۱۰۰ درصد آب مورد نیاز (۳۸۵ میلی‌متر)
T ₂	۷۵ درصد آب مورد نیاز گیاه (۲۱۳ میلی‌متر)	۷۵ درصد آب مورد نیاز (۲۸۹ میلی‌متر)
T ₃	۵۰ درصد آب مورد نیاز گیاه (۱۴۶ میلی‌متر)	۵۰ درصد آب مورد نیاز (۱۹۳ میلی‌متر)

در این رابطه I_g عمق ناخالص آب کاربردی بر حسب میلی‌متر و I_n عمق خالص نیاز آبیاری بر حسب میلی‌متر که برابر SMD می‌باشد و E_n راندمان کاربرد آبیاری که در این طرح برابر ۸۵ درصد در نظر گرفته شد. همچنین برای به دست آوردن بهره‌وری آب آبیاری و بارش از روابط ۴ و ۵ استفاده شد (Zabihi *et al.*, 2017).

برای به دست آوردن آب کاربردی از پایش رطوبت خاک استفاده شد. رطوبت خاک در سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. عمق آب آبیاری مزرعه آزمایشی بر اساس اندازه‌گیری رطوبت خاک و محاسبه کمبود رطوبت خاک در تیمار بدون تنش (T1) در بازه زمانی ۷ روزه که تخلیه رطوبت خاک به ۵۰ درصد آب قابل دسترس می‌رسید به شرح زیر برآورد شد. میزان رطوبت حجمی خاک در زمان آبیاری از رابطه ۱ محاسبه شد (Pourgholam-Amiji *et al.*, 2020).

(رابطه ۱)

$$\theta_{RI} = \theta_{FC} - (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) * MAD$$

که در آن θ_{RI} میزان رطوبت حجمی خاک در زمان آبیاری، θ_{PWP} میزان رطوبت در نقطه پژمردگی دائم، θ_{FC} میزان رطوبت در حد گنجایش زراعی و MAD میزان مجاز تخلیه رطوبتی است که برابر ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. پایش رطوبت به صورت روزانه در هر سه سطح آبیاری انجام گرفت. کمبود رطوبت خاک تا حد (SMD)FC از رابطه ۲ به دست آمد.

$$SMD = \sum_{i=1}^n (\theta_{FC} - \theta_{BI}) * D_i \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن D_i عمق لایه i ام خاک، n تعداد لایه‌ها در عمق توسعه ریشه، θ_{BI} رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری، θ_{FC} رطوبت حجمی خاک در حد گنجایش زراعی و i شماره لایه‌های خاک در عمق توسعه ریشه‌ها می‌باشد. با برابر فرض کردن عمق خالص آبیاری با کمبود رطوبت خاک عمق ناخالص آبیاری از رابطه ۳ به دست آمد.

$$I_g = I_n / E_n \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\text{رابطه ۴)} \quad (\text{کیلوگرم در هکتار}) / \text{عملکرد محصول} = \text{بهره‌وری آب آبیاری} / \text{مترمکعب در هکتار} \quad (\text{مقدار آب آبیاری})$$

$$\text{رابطه ۵)} \quad (\text{کیلوگرم در هکتار}) / \text{عملکرد محصول} = \text{بهره‌وری} / \text{مترمکعب در هکتار} \quad (\text{مقدار آب آبیاری و بارش})$$

داده‌های اقلیمی از ایستگاه هواشناسی هاشم‌آباد در مجاورت ایستگاه تحقیقاتی کشاورزی شهرستان گرگان برای دوره ۲۰۱۰-۱۹۸۰ جمع‌آوری شد. عملکرد محصول ذرت نیز بر اساس این پارامترها شامل (دما، بارش، رطوبت نسبی و ...) شبیه‌سازی شد. مدل HadCM3 از مدل‌های گردش عمومی جفت شده جوی-اقیانوسی است که توسط گوردن و همکاران و پوپ و همکاران در سال ۲۰۰۰ این مدل دارای قدرت تفکیک افقی ۲/۵ در ۳/۷۵ درجه عرض و طول جغرافیایی است. تعداد لایه‌های این مدل در راستای قائم جو ۱۹ و در عمق خاک ۴ لایه است. همچنین گام زمانی مدل ۳۰ دقیقه است. مدل اقیانوسی HadCM3 دارای ۲۰ لایه با قدرت تفکیک افقی ۱/۲۵ در ۱/۲۵ درجه است. بنابراین برای هر نقطه شبکه‌ای در مدل جوی، شش نقطه در مدل اقیانوسی وجود دارد. شبیه‌سازی مدل گردش

عمومی جو GCM برای بررسی روند افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای تأثیری زیادی دارد، در این مدل داده‌ها در مقیاس بزرگ است. لذا برای شبیه‌سازی بیشتر با شرایط واقعی محل مطالعه و همانندی بیشتر با داده‌های پیش‌بینی‌شده نیاز است که داده‌ها ریزمقیاس شوند. ریزمقیاس‌نمایی به دو روش دینامیکی و آماری صورت می‌پذیرد. از نقاط قوت روش ریزمقیاس‌نمایی آماری می‌توان به محاسبات ساده، تولید انواع متغیرها، تولید داده‌های اقلیمی در مقیاس ایستگاه و امکان بررسی انواع سناریوهای اقلیمی و تحلیل عدم قطعیت آن‌ها اشاره کرد. روش SDSM یکی از روش‌های آماری است، که به دلیل سهولت، اقتصادی بودن و سادگی مورد توجه است (Khoshravesh & Norooz Valashedi, 2020). مدل گیاهی که در این مطالعه برای شبیه‌سازی و تخمین عملکرد گیاه ذرت مورد استفاده قرار گرفت، مدل WOFOST می‌باشد. این مدل دینامیکی قادر است در شرایط کمبود، پتانسیل و کمبود مواد مغذی رشد گیاه را از نظر فنولوژیکی از دوره آغاز رشد گیاه تا برداشت شبیه‌سازی کند. خصوصیات فیزیکی خاک، پارامترهای گیاهی و مقادیر آب و هواشناسی داده‌های مورد نیاز در این مدل است (Shafiei et al., 2018). داده‌های ورودی به این مدل شامل بارش، حداقل دما، حداکثر دما، سرعت باد و فشار بخار است. در حالت تولید پتانسیل، سرعت رشد گیاه بر اساس خصوصیات گیاهی و شرایط آب و هوایی تعیین می‌شود. در حالت کمبود آب تأثیر دوره‌های کمبود رطوبتی خاک روی رشد گیاه در نظر گرفته می‌شود و بیشترین مقدار محصول در این حالت است (Boogaard et al., 1998). با استفاده از این مدل عوامل موثر بر رشد فنولوژیکی شامل جذب CO₂، تعرق، تنفس، تقسیم کربوهیدرات‌ها به اندام‌های مختلف و تشکیل ماده خشک و همچنین شکل‌گیری و رشد گیاه را از دوره جوانه‌زنی تا زمان رسیدن محصول بر اساس شرایط محیطی و ژنتیکی محصول می‌توان محاسبه نمود؛ همچنین میزان جذب CO₂ ناخالص از یک گیاه را بر پایه تابش فعال فتوسنتزی جذب‌شده توسط گیاه شبیه‌سازی می‌کند. برای واسنجی مدل از فاکتورهای اندازه‌گیری شده خصوصیات فیزیکی خاک، فاکتورهای گیاهی و داده‌های مشاهداتی فنولوژیکی استفاده شد که در این پژوهش برای واسنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۹۱ و برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۹۲ استفاده شد. در واسنجی و صحت‌سنجی بر اساس مراحل زیر اجرا و تمامی تیمارهای آبیاری در نظر گرفته شد (Zabihi et al., 2015).

- اجرای مدل و تعیین عملکرد شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف
- مقایسه عملکرد واقعی حاصل از آزمایش مزرعه‌ای با

عملکرد شبیه‌سازی شده برای همان شرایط - در صورت عدم تطابق عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد واقعی، با تغییر پارامترهای واسنجی، مراحل فوق‌الذکر تکرار شد تا نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده با دقت قابل قبولی بر عملکرد واقعی منطبق گردد.

- به منظور صحت‌سنجی مدل، با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده، عملکرد محصول در تیمارهای مختلف شبیه‌سازی و با عملکرد واقعی مقایسه شد.

پس از پردازش اولیه داده‌ها، به بررسی شبیه‌سازی عملکرد دانه گیاه ذرت، تحت تیمارهای مختلف آبیاری و برای تاریخ‌های مختلف کشت، در دوره‌های آبی پرداخته شد. پیش‌بینی عملکرد محصول ذرت در اثر تغییرات اقلیمی آبی، در تاریخ‌های کشت مختلف بررسی و تاریخی که بیشترین عملکرد را دارد با عملکرد محصول در شرایط گذشته مقایسه شد. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل و ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل از شاخص‌های آماری RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) (Mirnaseri et al., 2015)، E (ضریب کارایی مدل) (Khoshravesh et al., 2017)، d (شاخص سازگاری) (Pourgholam-Amiji et al., 2021) و CRM (ضریب توده باقی‌مانده) (Pourgholam Amiji et al., 2019) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در این پژوهش برای مقایسه مقادیر واقعی و شبیه‌سازی در مدل WOFOST و مدل SDSM از آزمون t جفت نشده استفاده شد. در این آزمون دو فرض صفر و یک در نظر گرفته شد. اگر فرض صفر پذیرفته شد اختلاف معنی‌داری بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی نیست و اگر فرض یک پذیرفته شد، اختلاف معنی‌داری بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی وجود دارد. همچنین از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (KS) برای توزیع نرمال بودن داده‌ها برای پارامترهای دما و بارش در مدل SDSM استفاده شد (Khoshravesh et al., 2016; Shafiei et al., 2018).

هدف از آنالیز حساسیت، شناخت پارامترهای تأثیرگذار بر نتایج خروجی مدل می‌باشد که برای واسنجی و تحلیل عدم

(2018).

نتایج و بحث

برای واسنجی مدل SDSM از داده‌های ۱۵ سال اول ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد گرگان (۱۹۸۰-۱۹۹۵) و برای صحت‌سنجی از داده‌های ۱۵ سال دوم (۱۹۹۵-۲۰۱۰) استفاده شد. مقادیر مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) با استفاده از داده‌های هواشناسی در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- شاخص‌های آماری ارزیابی مدل SDSM

RCP8.5			RCP4.5			RCP2.6			شاخص ارزیابی
بارش	دمای کمینه	دمای بیشینه	بارش	دمای کمینه	دمای بیشینه	بارش	دمای کمینه	دمای بیشینه	
۱۱/۲۴	۴/۲۸	۴/۷۶	۱۱/۲۲	۳/۶۱	۳/۸۶	۵/۶	۳/۴۰	۳/۵۶	RMSE
۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۹۰	۰/۹۲	R^2
۹/۳۳	۳/۹۷	۴/۱۲	۹/۳۲	۳/۲۷	۳/۳۹	۴/۲۱	۳/۱۴	۳/۲۲	MAE

این پژوهش با نتایج تحقیقات Hosseini et al. (2016) در مورد دقت بالای مدل SDSM در محاسبه پارامتر دما، مطابقت دارد. شکل‌های (۳) و (۴) نتایج حاصل از میانگین ماهانه پارامترهای دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد)، دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد) و بارش (میلی‌متر) را تحت سناریوهای اقلیمی مختلف به ترتیب در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰ نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) میانگین ماهانه دمای حداقل در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ نشان می‌دهد که در ایستگاه هاشم‌آباد کم‌ترین افزایش دمای حداقل در فصل زمستان و سناریوی RCP2.6 است. همچنین طبق نتایج به‌دست‌آمده بیش‌ترین افزایش دما مربوط به فصل تابستان و سناریوی RCP8.5 است. در شکل (۴) کم‌ترین افزایش دمای حداکثر برای سناریوی RCP2.6 در ماه اوت است. با مقایسه دمای حداقل و حداکثر در دوره آتی، این نتیجه حاصل می‌شود که پارامتر دما در دوره‌های آتی در تمامی ماه‌ها با افزایش همراه خواهد بود که در دوره دوم آتی (۲۰۸۰-۲۰۵۰) با افزایش ۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین ماهانه بارش در بیشتر ماه‌های سال در دوره آتی نسبت به دوره پایه دچار تغییرات شده است. با توجه به شکل‌های (۳) و (۴) برای میانگین بارش ماهانه، برای سناریوی RCP8.5 کم‌ترین مقدار بارش برای ماه اوت در فصل تابستان است. همچنین با توجه به این شکل‌ها برای سناریوی RCP2.6 بیش‌ترین مقدار بارش برای ماه مارس در اوایل بهار و اواخر زمستان است. یافته‌های این بخش از پژوهش با نتایج تحقیق Basheer et al. (2016) مطابقت دارد. آن‌ها گزارش کردند که دما برای سناریوهای مختلف در دوره‌های آتی افزایش خواهد یافت در

قطعی‌مدل بسیار موثر است (Nikkhoo Amiri et al., 2019). برای آنالیز حساسیت از روش تحلیل حساسیت منطقه‌ای استفاده شد. در این روش با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی مربع لاتین از فضای پارامتری مدل نمونه‌گیری شد و مجموعه پارامترهای مختلفی به صورت تصادفی تولید شد و خروجی‌های مدل متناسب با آن‌ها بعد از اجرای مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از نمونه‌گیری از فضای پارامتری، مجموعه پارامترهای تولید شده بر اساس مقادیر تابع هدف به‌دست آمده متناظر مرتب شد. سپس تابع توزیع تجمعی پارامترهای مدل توسط آزمون کولموگروف-اسمیرنوف با یکدیگر مقایسه شدند (Shafiei et al.,

با توجه به جدول (۳) مشاهده می‌شود که مقادیر شاخص ارزیابی RMSE در بین هر سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای پارامترهای هواشناسی (دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش) بیشترین مقدار را در سناریوی بدبینانه RCP8.5 نسبت به حالت خوش‌بینانه نشان می‌دهد. شاخص R^2 بیشترین همبستگی را برای سناریوی RCP2.6 در مقایسه با سایر سناریوها به‌جز در مورد دمای کمینه دارا است و برای معیار MAE نیز مطابق با شاخص RMSE در حالت بدبینانه (RCP8.5) مقدار خطای بیشتری را به‌خصوص برای بارش نشان می‌دهد و این نشان‌دهنده متغیر بودن و ثابت نبودن پارامتر بارش در مدل SDSM نسبت به پارامترهای دیگر است.

همچنین از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف (KS) برای مقایسه بین توابع توزیع احتمالی استفاده شد (جدول ۴). از آزمون KS برای همسان‌سازی اطلاعات تجربی با توزیع آماری منتخب و از آزمون t برای مقایسه و ارزیابی میانگین نمونه با میانگین جامعه به‌طوری‌که انحراف معیار جامعه مجهول باشد. در هر یک از آزمون‌ها احتمال یکسان بودن توزیع مشاهداتی و محاسباتی محاسبه شدند. اگر این مقدار کوچک و کمتر از سطح معنی‌داری (۰/۰۵ تا ۰/۰۱) باشد، یکسان بودن شبیه‌سازی تولیدی اقلیم واقعی غیرمحمتمل خواهد بود (Daneshfaraz & Razaghpour, 2014). در جدول‌های (۴) و (۵) نتایج حاصل از آزمون‌های KS و t برای پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ارائه شده است. نتایج ارزیابی مدل SDSM نشان داد که پارامترهای حداقل دما و حداکثر دما با دقت بالایی شبیه‌سازی شده و پارامتر بارش خطای بیش‌تری در شبیه‌سازی دارد ولی در حد قابل قبول است. یافته‌های

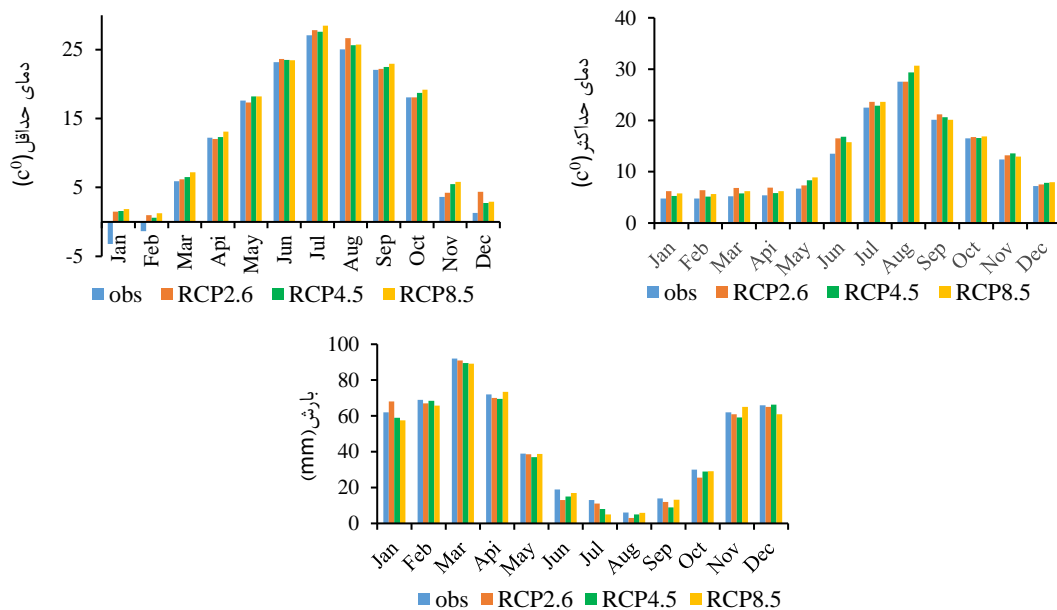
حالی که بارش از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. بود. Bayatani *et al.* (2020) بیان کردند که سناریوهای مختلف اقلیمی در دوره آتی نشان می‌دهند که در اثر تغییر اقلیم، آستانه دوره برگشت دیدبانی یک ساله است و احتمال وقوع دمای زیر ۵ درجه در سناریوی RCP2.6 به یک درصد افزایش و در سناریوی RCP4.5 به ۸۳ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴- نتایج آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (KS) برای توزیع‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ماهانه

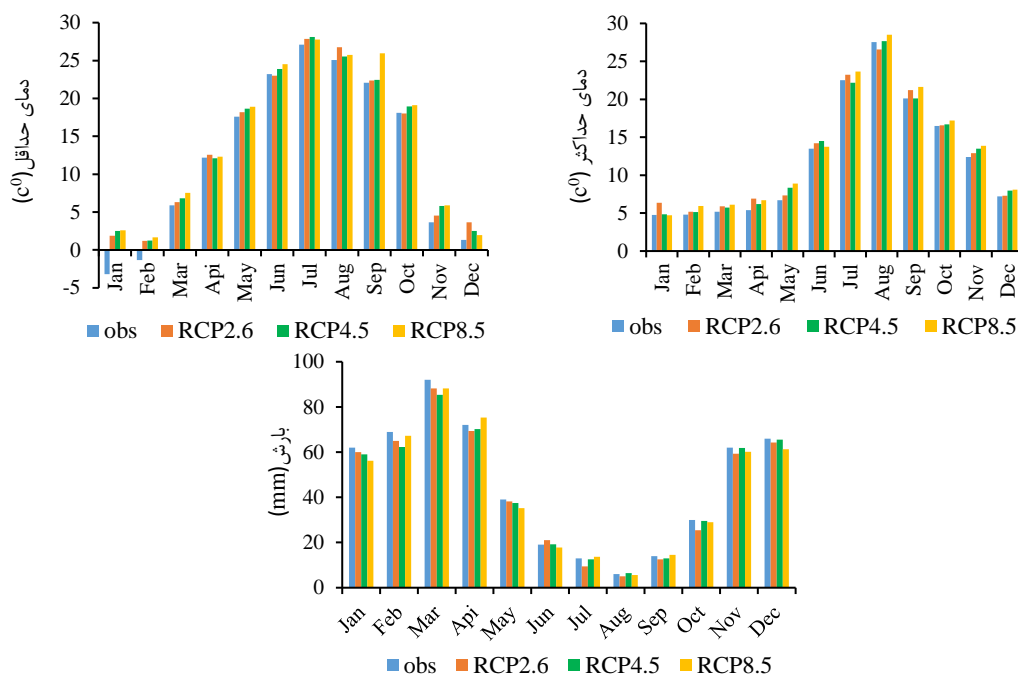
توسط مدل SDSM													
پارامتر	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دمای کمینه	آزمون KS	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶
	احتمال	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸
دمای بیشینه	آزمون KS	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۴	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۷۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶	۰/۱۵۶
	احتمال	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۷۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸
بارش	آزمون KS	۰/۰۸۴	۰/۰۷۲	۰/۰۶۳	۰/۰۶۱	۰/۰۴۳	۰/۰۴۴	۰/۰۹۱	۰/۰۸۶	۰/۱۱۵	۰/۰۸۷	۰/۰۴۳	۰/۰۸۱
	احتمال	۰/۰۸۴	۰/۰۷۲	۰/۰۶۳	۰/۰۶۱	۰/۰۴۳	۰/۰۴۴	۰/۰۹۱	۰/۰۸۶	۰/۱۱۵	۰/۰۸۷	۰/۰۴۳	۰/۰۸۱

جدول ۵- مقایسه مقادیر میانگین دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل SDSM

	ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
دمای کمینه	میانگین مشاهداتی	۴	۴/۵	۶/۹	۱۰/۸	۱۵/۷	۲۰/۲	۲۴/۲	۲۴/۵	۲۰/۳	۱۴/۴	۹/۲	۴/۹
	میانگین محاسباتی	۴/۱	۴/۴	۶/۳	۱۰/۷	۱۵/۱	۱۹/۶۷	۲۳	۲۳/۲	۱۹/۹	۱۳/۹	۸/۷	۵/۳
دمای بیشینه	میانگین مشاهداتی	۱۲/۹	۱۳/۷	۱۶/۲	۲۲/۴	۲۷/۴	۳۱/۹	۳۱/۹	۳۳/۲	۳۳/۷	۳۱/۳	۲۶/۳	۱۴/۵
	میانگین محاسباتی	۱۲/۶	۱۳/۱	۱۶/۱	۲۲/۴	۲۷/۳	۳۰/۴	۳۲/۴	۳۳/۱	۳۱	۲۴	۱۸	۱۴/۸
بارش	میانگین مشاهداتی	۴۹/۹	۴۹/۴۳	۶۸/۸۷	۴۴/۳۳	۴۱/۵۴	۲۴/۲۳	۱۶/۷۴	۲۱	۴۱/۲۷	۵۰/۷۸	۶۷/۲۴	۵۴/۴۷
	میانگین محاسباتی	۵۱/۳۲	۵۱/۴۹	۶۶/۲۳	۵۰/۱۷	۳۸/۵۴	۲۶/۲۸	۲۱/۵۷	۲۴/۲۴	۲۶/۲۴	۲۶/۲۴	۷۴/۷۸	۵۵/۲۸
بارش	میانگین محاسباتی	۰/۳۸۹	-۰/۳۵۴	۰/۴۷۶	۰/۹۳۷	۰/۶۴۹	-۰/۲۲۱	-۰/۹۱۵	-۰/۵۶۱	۳/۱۸۹	۰/۳۴۷	۰/۵۷۹	-۰/۱۱۲
	احتمال	۰/۷۴۶	۰/۷۸۳	۰/۶۵۳	۰/۳۸۳	۰/۵۴۷	۰/۹۲۴	۰/۴۲۵	۰/۶۱۴	۰/۰۶۲	۰/۹۱۸	۰/۶۸۴	۰/۹۴۵



شکل ۳- میانگین ماهانه متغیرها در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت سناریوهای اقلیمی مختلف



شکل ۴- میانگین ماهانه متغیرها در دوره ۲۰۵۰-۲۰۸۰ تحت سناریوهای اقلیمی مختلف

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل WOFOST برای گیاه ذرت علوفه‌ای پرداختند، نشان دادند که تاثیرگذارترین پارامترها در شبیه‌سازی عملکرد مربوط به تاثیر دما (پارامترهای TSUMEA و TSUMAM) و فرایند جذب نور (SLA، AMAX و EFF) در گیاه می‌باشند.

جدول (۶) نتیجه آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی مدل WOFOST را نشان می‌دهد. در این مدل پارامترهای دما، جذب دی اکسیدکربن (AMAX) و (TSUMEA، TSUMAM)، جذب دی اکسیدکربن (AMAX) و سطح ویژه برگ (SLA) جزو پارامترهای تاثیرگذار در مدل WOFOST است. Shafiei at al. (2018) نیز در پژوهشی که به

جدول ۶- آنالیز حساسیت پارامترهای مدل WOFOST

پارامترهای گیاهی	شرح	واحد	شدت حساسیت	درجه حساسیت
TSUMEA1	مجموع درجه حرارت از کاشت تا سبزشدن	C ⁰	۰/۳۱۱	زیاد
TSUMAM2	مجموع درجه حرارت از سبزشدن تا بلوغ	C ⁰	۰/۱۵۴	زیاد
LAIEM	شاخص سطح برگ در ابتدای رشد	ha ha ⁻¹	۰/۰۱۱	غیر حساس
SPAN	طول دوره رشد برگ‌ها در دمای ۳۵ درجه	d	۰/۰۰۹	غیر حساس
SLA	سطح ویژه برگ	ha kg ⁻¹	۰/۳۹۵	زیاد
KDIF	ضریب خاموشی	-	۰/۰۰۵	غیر حساس
KDIR	ضریب روشنایی	-	۰/۰۱۱	کم
EFF	راندمان مصرف نور	Kg ha ⁻¹ hr ⁻¹ J ⁻¹ m ² s	۰/۱۴۲	زیاد
AMAX	حداکثر شدت جذب CO ₂	Kg ha ⁻¹ hr ⁻¹	۰/۱۵۱	زیاد
CVL	راندمان تبدیل	Kg kg ⁻¹	۰/۰۳۹	متوسط
RGRLAE	حداکثر در شاخص سطح	-	۰/۳۳۹	زیاد
CVO	راندمان تبدیل CO ₂ جذب‌شده به اندام‌های ذخیره‌ای	Kg Kg ⁻¹	۰/۰۱۹	کم
CVR	راندمان تبدیل CO ₂ جذب‌شده به ریشه	Kg Kg ⁻¹	۰/۰۲۱	کم
CVS	راندمان تبدیل CO ₂ جذب‌شده به ساقه	Kg Kg ⁻¹	۰/۰۷۸	متوسط
RML	تنفس نگهداری نسبی برگ‌ها	Kg CH ₂ O Kg ⁻¹ d ⁻¹	۰/۰۲۳	کم
RMO	تنفس نگهداری نسبی اندام ذخیره‌ای	Kg CH ₂ O Kg ⁻¹ d ⁻¹	۰/۰۱۰	غیر حساس
RMR	تنفس نگهداری نسبی ریشه‌ها	Kg CH ₂ O Kg ⁻¹ d ⁻¹	۰/۰۱۷	کم
RMS	تنفس نگهداری نسبی ساقه‌ها	Kg CH ₂ O Kg ⁻¹ d ⁻¹	۰/۰۴۲	متوسط

به‌منظور صحت‌سنجی مدل، با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری شده، عملکرد محصول در شرایط تیمارهای مختلف آبیاری

با استفاده از اطلاعات دو ساله مزرعه مورد مطالعه، داده‌های ورودی مورد نیاز تهیه و واسنجی مدل WOFOST انجام شد.

شبهه‌سازی و با عملکرد واقعی مقایسه شد. جدول (۷) پارامترهای واسنجی شده مدل WOFOST برای گیاه ذرت تحت شرایط مختلف آب آبیاری را ارائه می‌دهد که پس از وارد نمودن تمامی اطلاعات مورد نیاز، مدل WOFOST اجرا شد.

جدول ۷- پارامترهای واسنجی شده مدل WOFOST

شرح	پارامتر	مقدار
واحدهای حرارتی تجمع یافته از سبز شدن تا گلدهی	TSUM1	۹۰۰-۱۱۰۰
واحدهای حرارتی تجمع یافته از گلدهی تا رسیدن فیزیولوژیک	TSUM2	۸۷۹-۹۰۲
سطح برگ ویژه	SLA	۰/۰۱۵-۰/۰۲۲
حداکثر افزایش نسبی در شاخص سطح برگ	RGR LAE	۰/۰۱۹۴-۰/۰۲۸۳
راندمان تبدیل CO ₂ جذب شده به برگ	CVL	۰/۰۶-۰/۰۸
راندمان تبدیل CO ₂ جذب شده به اندام‌های ذخیره‌ای	CVO	۰/۰۶-۰/۰۸
راندمان تبدیل CO ₂ جذب شده به ریشه	CVR	۰/۰۶-۰/۰۸
راندمان تبدیل CO ₂ جذب شده به ساقه	CVS	۰/۰۶-۰/۰۸

کاهش عملکرد محصول با کاهش مقدار آب آبیاری در مدل نسبت به روند عملکرد محصول اندازه‌گیری شده در سطح مزرعه می‌باشد. مقدار بازده نیز برای مزرعه مورد مطالعه بیشتر از ۸۶ درصد به دست آمد. همچنین مدل توانست با همبستگی بالایی (بیشتر از ۰/۹۳) مقدار عملکرد دانه را شبیه‌سازی کند. Afzali *et al.* (2019) به شبیه‌سازی رشد و نمو گیاه ذرت در جیرفت پرداختند و نشان دادند که ضریب کارایی مدل برای عملکرد دانه، زیست توده و شاخص برداشت به ترتیب برابر ۰/۹۹، ۰/۸۷ و ۰/۸۲ بود.

جدول (۸) مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه توسط مدل WOFOST برای تمام تیمارهای آبیاری ارائه شده است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد دانه مربوط به سال ۱۳۹۲ بوده و برابر ۹/۵ تن بر هکتار به دست آمد. نتایج شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که مدل WOFOST توانست مقدار عملکرد دانه را با دقت بالایی در اثر کم‌آبیاری و ایجاد تنش شبیه‌سازی کند (جدول ۸). نتایج هر دو سال کشت نشان می‌دهد که مقدار RMSE در حد پایین می‌باشد. مقدار شاخص سازگاری بیشتر از ۹۵ درصد به دست آمد که نشان‌دهنده سازگاری روند

جدول ۸- مقادیر عملکرد دانه واقعی و شبیه‌سازی شده برای تیمارهای مختلف آب آبیاری

سال کشت	پارامتر گیاهی	اندازه‌گیری شده (تن بر هکتار)			شبیه‌سازی شده (تن بر هکتار)			شاخص‌های آماری			
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃	CRM	R ²	E	
سال اول	عملکرد دانه	۸/۴	۷/۹	۶/۴	۷/۳	۵/۹	۰/۲۱۷	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۱۵
سال دوم	عملکرد دانه	۹/۵	۸/۷	۷/۸	۷/۸	۶/۶	۰/۲۴۱	۰/۹۸	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۱۴

پایه ۸/۴۲ درصد کاهش دارد. در این دوره کم‌ترین عملکرد در تیمار T₃ تحت سناریوی RCP8.5 در تاریخ ۱۲ خرداد به مقدار ۳/۳ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۴۸/۴۳ درصد کاهش دارد. کاهش عملکرد ذرت به دلیل افزایش دما در شرایط سناریوهای اقلیمی آینده می‌باشد. با توجه به مقایسه نتایج عملکرد سناریوهای مختلف، بهترین تاریخ کشت در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۰ تاریخ ۲ تیر (با دامنه تغییرات ±۳ روز) برای ذرت دیر رس با ۱۸۰۰ GDD می‌باشد. Ceglar & Bogataj (2012) گزارش کردند که عملکرد ذرت بیشتر به شرایط آب و هوایی در طول دوره ۹۰ تا ۱۱۰ روز پس از کاشت بستگی دارد و دمای بالا، رطوبت نسبی کم و بارندگی کم در این دوره بر رشد ذرت تاثیر منفی می‌گذارد و منجر به کاهش تولید ماده خشک می‌شود. Moradi *et al.* (2014) در پژوهشی به ارزیابی تغییر تاریخ کشت بر عملکرد ذرت در شهرستان مشهد پرداختند. نتایج شبیه‌سازی

به منظور کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد ذرت تغییر تاریخ کشت به عنوان راهکار سازگاری در نظر گرفته شد و مقدار عملکرد دانه شبیه‌سازی شده توسط مدل WOFOST تحت سناریوهای مختلف اقلیمی برای تاریخ‌های مختلف کشت در دوره‌های ۲۰۵۰-۲۰۲۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰ به ترتیب در جدول‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است. در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ بیش‌ترین عملکرد دانه ذرت در تیمار T₁ تحت سناریوی RCP2.6 در تاریخ ۲ تیر به مقدار ۹/۸ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۳/۱۵ درصد کاهش دارد. در این دوره کم‌ترین عملکرد در تیمار T₃ تحت سناریوی RCP8.5 در تاریخ ۱۲ خرداد به مقدار ۴/۳ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۳۲/۸۱ درصد کاهش دارد. در دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۰ نیز بیش‌ترین عملکرد دانه ذرت در تیمار T₁ تحت سناریوی RCP2.6 در تاریخ ۲ تیر به مقدار ۸/۷ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره

میزان فتوسنتز گیاهان زراعی گذاشته و بر عملکرد آن‌ها اثرگذار است. Li *et al.* (2011) با بررسی تغییرات اقلیمی گزارش کردند که عملکرد ذرت تا سال ۲۰۳۰ در چین و آمریکا به ترتیب ۲۳ و ۸ درصد کاهش خواهد داشت.

آن‌ها نشان داد که عملکرد ذرت تحت تاثیر تغییر اقلیم از ۱۱ تا ۳۸ درصد نسبت به شرایط پایه کاهش یافت. Mera *et al.* (2006) گزارش کردند که افزایش درجه حرارت با تاثیر بر مرحله گلدهی و کاهش درصد تلقیح، باعث کاهش عملکرد ذرت می‌شود. Meza *et al.* (2008) نشان دادند که تغییر اقلیم بیشترین تاثیر را بر

جدول ۹- شبیه‌سازی عملکرد دانه (تن بر هکتار) در تاریخ‌های کشت مختلف در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰

تاریخ	۱۰۰ درصد آب مورد نیاز گیاه			۷۵ درصد آب مورد نیاز گیاه			۵۰ درصد آب مورد نیاز گیاه		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
۱۲ خرداد	۷/۹	۷/۴	۶/۸	۵/۹	۵/۴	۵/۱	۴/۳	۴/۸	۴/۳
۱۹ خرداد	۸/۲	۷/۸	۷/۲	۶/۲	۵/۸	۵/۶	۴/۹	۵/۲	۴/۹
۲۶ خرداد	۹/۴	۹/۱	۸/۷	۷/۸	۷/۲	۶/۹	۵/۵	۶/۴	۵/۵
۲ تیر	۹/۸	۹/۵	۹/۱	۸/۴	۸/۱	۷/۹	۶/۹	۷/۴	۶/۹

جدول ۱۰- شبیه‌سازی عملکرد دانه (تن بر هکتار) در تاریخ‌های کشت مختلف در دوره ۲۰۵۰-۲۰۸۰

تاریخ	۱۰۰ درصد آب مورد نیاز گیاه			۷۵ درصد آب مورد نیاز گیاه			۵۰ درصد آب مورد نیاز گیاه		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
۱۲ خرداد	۷/۴	۶/۹	۶/۳	۵/۷	۵/۴	۴/۹	۳/۳	۳/۹	۳/۳
۱۹ خرداد	۷/۸	۷/۴	۶/۹	۶/۳	۵/۷	۵/۳	۳/۹	۴/۲	۳/۹
۲۶ خرداد	۸/۳	۷/۹	۷/۶	۷/۱	۶/۶	۶/۲	۴/۵	۵/۱	۴/۵
۲ تیر	۸/۷	۸/۳	۷/۹	۷/۶	۷/۱	۶/۶	۴/۸	۵/۴	۴/۸

نتیجه‌گیری

در دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۰ نیز بیش‌ترین عملکرد دانه ذرت در تیمار T₁ تحت سناریوی RCP2.6 در تاریخ ۲ تیر به مقدار ۸/۷ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۸/۴۲ درصد کاهش دارد. در این دوره کم‌ترین عملکرد در تیمار T₃ تحت سناریوی RCP8.5 در تاریخ ۱۲ خرداد به مقدار ۳/۳ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۴۸/۴۳ درصد کاهش دارد. کاهش عملکرد ذرت به دلیل افزایش دما در شرایط سناریوهای اقلیمی آینده می‌باشد. بررسی‌های اقلیمی بر مقدار عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل WOFOST در تاریخ‌های مختلف کشت نشان داد که کشت ذرت سینگل کراس دیر رس برای شرایط اقلیمی معتدل و مرطوب در تاریخ ۲ تیر ماه (با دامنه تغییرات ۳± روز) باعث تولید عملکرد بالاتری نسبت به سایر تاریخ‌های کاشت در شرایط تغییر اقلیم خواهد شد. مدیریت مناسب تاریخ کشت برای تعدیل اثرات منفی تغییر اقلیم بر عملکرد گیاه ذرت را می‌توان به عنوان یک راهکار مناسب در شهرستان گرگان در نظر گرفت تا از کاهش عملکرد به دلیل انتخاب تاریخ کاشت نامناسب جلوگیری نمود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

در این پژوهش اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد دانه گیاه ذرت در دوره‌های زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰ تحت سناریوهای اقلیمی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مورد بررسی قرار گرفت و تغییر تاریخ کاشت به عنوان راهکار سازگاری برای بهبود عملکرد گیاه ذرت ارزیابی شد. نتایج ارزیابی سناریوهای اقلیمی مختلف نشان داد مدل SDSM با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی پارامترهای دمای حداقل و دمای حداکثر بوده ولی در شبیه‌سازی بارش نسبت به دیگر پارامترها خطای بیشتر اما در حد قابل قبول بود. مقدار عملکرد ذرت در شهرستان گرگان در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه کاهش خواهد داشت و این کاهش عملکرد در دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۰ به دلیل افزایش دما بیشتر از دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ خواهد بود. در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ بیش‌ترین عملکرد دانه ذرت در تیمار T₁ تحت سناریوی RCP2.6 در تاریخ ۲ تیر به مقدار ۹/۸ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۳/۱۵ درصد کاهش دارد. در این دوره کم‌ترین عملکرد در تیمار T₃ تحت سناریوی RCP8.5 در تاریخ ۱۲ خرداد به مقدار ۴/۳ تن بر هکتار پیش‌بینی شد که نسبت به دوره پایه ۳۲/۸۱ درصد کاهش دارد.

REFERENCES

Afzali, M., Taei Semiroimi, J., & Amirinezhad, M. (2018). Evaluation of WOFOST model for growth and development simulation of maize under

summer cropping system conditions in sub-tropical region of Southern Kerman. Iranian Journal of Field Crop Science, 49(1): 57-64. In

Farsi

- Ahmadi, M., Hooshmand, A., Broomand Nasab, S., & Sharifi, M. A. (2019). Calibration and validation of WOFOST model for wheat in Qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(2): 329-338. In Farsi
- Basheer, A. K., Lu, H., Omer, A., Ali, A. B., & Abdeldgader, A. M. S. (2016). Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on the streamflow in the Dinder River and ecosystem habitats in Dinder National Park, Sudan. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20: 1331-1353.
- Bayatani, F., Fallah Ghalhari, G., Karami, M., & Taei Samiromi, J. (2020). The impacts of climate change on the risk of cold stress in autumn crop pattern (Case study: Tropical and subtropical areas of Kerman province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(24): 63-78. In Farsi
- Bhatia, V.S., P., Singh, S. P., Wani, G. S., Chauhan, A. V. R., Rao Mishra, A. K., & Srinivas, K. (2008). Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology* 148: 1252-1265.
- Boogaard, H. L., Van Diepen, C. A., Roetter, R. P., Cabrera, J. M. C. A. & Van Laar, H. H. (1998). WOFOST 7.1; User's Guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5 DLO Winand Staring Center, Wageningen, The Netherlands.
- Ceglar, A., & Kajfez-Bogataj, L. (2012). Simulation of maize yield in current and changed climatic conditions: Addressing modelling uncertainties and the importance of bias correction in climate model simulations. *European Journal of Agronomy*, 37: 83-95.
- Daneshfaraz, R., & Razaghpour, H. (2014). Evaluation of climate change impacts on potential evapotranspiration in the west Azerbaijan province. *Journal of Geographic Space*, 14(46): 199-211. In Farsi
- Dowswell, C. (2019). Maize in the third world. *CRC Press*.
- Egdernezhad, A., Masjedi, A. R., Shokouhfar, A. R., & Alavifazel, M. (2018). Evaluation of AquaCrop and WOFOST in simulating of corn yield under deficit irrigation. *Journal of Plant Production Science*, 8(1): 69-82. In Farsi
- Ghonchehpour, D., Sadoddin, A., Bahremand, A., Salmanmahini, A., & Jakeman, A. (2019). Application of a quantitative screening approach in statistical downscaling model (SDSM) to generate climate change scenarios (Case study: the Gorgan-roud River Basin). *Ecohydrology*, 6(2): 397-414. In Farsi
- Hosseini, S. T., Khoshravesh, M., & Ziatabar Ahmadi, M. (2016). Effect of climate change and evaluation of planting date on soybean yield. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(4): 559-575. In Farsi
- 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, 48-Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Khoshravesh, M., & Norooz Valashedi, R. (2020). Investigation the effect of climate change scenarios on the monthly flow discharge at the outlet of Gelevar Dam. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(4): 23-43. In Farsi
- Khoshravesh, M., Abedi-Koupai, J., & Nikzad-Tehrani, E. (2016). Detection of trends in hydro-climatological variables using parametric and non-parametric tests in Neka basin. *Journal of Water and Soil Science*, 19(74), 1-14. In Farsi
- Khoshravesh, M., Valipour, M., & Gholami Sefidkouhi, M. A. (2017). Estimation and trend evaluation of reference evapotranspiration in a humid region. *Italian Journal of Agrometeorology*, 1, 19-36.
- Li, X., Takahashi, T., Suzuki, N., & Kaiser, H. M. (2011). The impact of climate change on maize yields in the United States and China. *Agricultural Systems* 104: 348-353
- Ma, G., Huang, J., Wu, W., Fan, J., Zou, J., & Wu, S. (2013). Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3): 634-643.
- Mera, R. J., Niyogi, D., Buol, G. S., Wilkerson, G. G., & Semazzi, F. H. M. (2006). Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C3) and maize (C4) crops: An agrotechnology model-based study. *Global and Planetary Change* 54: 163-182.
- Meza, F. J., Silva, D., & Vigil, H. (2008). Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems* 98: 21-30
- Mirnasari, M., Khoshravesh, M., Gholami, M. A. & Abbaspalangi, J. (2015). Estimation of nitrate concentrations in well and spring water using ANFIS and SVM models (Case study: Golestan province). 2(2): 1-12.
- Mohammadkhani, A., Pourgholam-Amiji, M., Sohrabi, T., & Liaghat, A. (2020). The effect of different levels of water stress in two surface and subsurface drip irrigation systems on yield and water productivity of maize. *Journal of Water and Irrigation Management*, 10(2): 247-264. In Farsi
- Moradi, R., Koochaki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2014). Effect of climate change on maize production and shifting of planting date as adaptation strategy in Mashhad. *Agricultural Science and Sustainable Production*, 23(4): 111-130.
- Nikkhoo Amiri, S., Khoshravesh, M., Norooz Valashedi, R. (2019). Simulation of outflow time series at shahid Rajaei dam using SWAT model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*,

- 10(1), 66-80. In Farsi
- Pourgholam Amiji, M., Liaghat, A., Nazi Ghameshlou, A., & Khoshravesh, M. (2019). The evaluation of Drainmod-S model for simulating the water table fluctuations and salt concentration in soil profiles in Paddy fields areas with a shallow water table and saline. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(6), 1418-1434. In Farsi
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Ghameshlou, A. N., & Khoshravesh, M. (2021). The evaluation of DRAINMOD-S and AquaCrop models for simulating the salt concentration in soil profiles in areas with a saline and shallow water table. *Journal of Hydrology*, 598, 126259.
- Pourgholam-Amiji, M., Liaghat, A., Ghameshlou, A., Khoshravesh, M., & Waqas, M. M. (2020). Investigation of the yield and yield components of rice in shallow water table and saline. *Big Data in Agriculture (BDA)*, 2(1), 36-40.
- Rahimi-Moghaddam, S., Eyni Nargeseh, H., Deihimfard, R., & Haghghat, M. (2019). Simulating climate change effect on maize grain yield in Kermanshah province using a process-based simulation model. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 20(4): 315-328. In Farsi
- Sarafrouzeh, F., Jalali, M., Jalali, T., & Jamali, A. (2014). Changing the effect of future climate on water consumption of wheat in Tabriz. *Journal of Geographic Space*, 12(37): 96-81. In Farsi
- Shafiei, M., Ghahreman, B., Saghafian, B., Davari, K., & Vazifeh Doost, M. (2018). Global sensitivity analysis of WOFOST model parameters for maize and wheat yield simulation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(4): 831-839. In Farsi
- Wilby, R. L., Dawson C. W., & Barrow, E. M. (2006). SDSM-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modeling and Software*, 17(3):147-159.
- Zabihi, A., Darzi-Nafchali, A., & Khoshravesh, M. (2015). Rice yield under surface and subsurface drainage managements and evaluation of AquaCrop model. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 20(5), 149-162. In Farsi
- Zabihi, A., Darzi-Nafchali, A., & Khoshravesh, M. (2017). Analysing drought stress effects on yield and water use efficiency of rice and the root zone salinity. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 9(4), 375-385. In Farsi