

Simulating Potato Plant Growth Stages in Iran under RCP Scenarios Using the WOFOST Model

F. Bayatani¹, Gh. Fallah-Ghalhari^{2*}

1- Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Jiroft University, Jiroft, Iran

2- Department of Geography and Tourism, University of Kashan, Kashan, Iran

(*- Corresponding Author Email: Fallah.g@kashanu.ac.ir)

Received: 04 March 2025	How to cite this article:
Revised: 01 June 2025	Bayatani, F., & Fallah-Ghalhari, Gh. (2025). Simulating potato plant growth stages in Iran under RCP scenarios using the WOFOST model. <i>Journal of Water and Soil</i> , 39(2), 193-218. (In Persian with English abstract).
Accepted: 02 June 2025	https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92402.1471
Available Online: 02 June 2025	

Introduction

Increasing food security is at the heart of United Nations policies for sustainable development. On the other hand, the growth of the global population, the reduction of vital natural resources used in agriculture and environmental stress and continuous climate change undermine the achievement of this goal. In addition, plant diseases and pests cause the loss of 40% of agricultural production of some major crops on a global scale, which puts food security at serious risk. The intensity and frequency of extreme climatic events—such as heatwaves, droughts, and increased climate variability—are projected to rise due to climate change. As a result, pressure on agricultural production is expected to intensify, given the sensitivity of crop growth to shifting weather conditions. This study aims to assess the impacts of climate change on the phenological development of potatoes in Iran's major potato-growing regions.

Methodology

In order to prepare field data for calibration and determining the validity of the WOFOST model in potential conditions (conditions without water and food restrictions, disease and weed control), data from research projects of agricultural research centers in Hamedan, Isfahan regions Ardabil, Shiraz, Tabriz, Shahrekord, Jiroft, Kohnouj, Manojan and Sanandaj, which are the main centers of potato production in the country, were collected during 2012-2016 and used as a base or monitoring period. This information includes planting dates, phenological stages from planting to greening, greening to flowering and greening to physiological maturity of potato plants in each of the study areas. In order to calibrate the WOFOST model using field data, phenological and performance data in 2012, 2013 and 2015 and phenological and performance data in 2014 and 2016 were used to determine the validity of the model.

Results and Discussion

The WOFOST growth simulation model showed that the length of different phenological stages and potato tuber yield under potential conditions will be reduced in the study areas. The stage of germination to the physiological maturation of the tubers, due to its longer duration, the greatest reduction in the length of the period occurred in this stage. The simulation results indicated a decline in potato tuber yield across the studied regions. According to the results, the highest reduction in performance was observed in the third period (2071-2100). The



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.92402.1471>

percentage of glandular function reduction was observed on average between 2 and 4.3%. In general, the results showed an increase in the average minimum and maximum temperatures of 0.37 to 0.9 degrees Celsius over the next three periods. The length of the phenological stages of the potato plant from emergence to physiological maturity has decreased in parallel with the increase in the mean minimum and maximum temperatures. The reduction in the length of the germination stage is between 0.2 to 1.9 days, the flowering stage is between 0.5 to 1.7 days, and the maturation stage to maturity is between 1.4 to 3.5 days. The greatest reduction during the phenological stages is related to the emergence stage to maturity of 3.5 days.

In general, the results of this study indicate an increase in the negative effects of climate change on the potato plants in three stations of Jiroft, Kahnooj, and Manojan. As temperatures rise and rainfall decreases, the growing season shortens and potato yields decline, leading to greater potential damage under future climate scenarios. Generally, for a one degree Celsius increase in average annual temperature, tuber yield will decrease by 4.99%.

The results of calibration and validation of the WOFOST model indicated the high accuracy of the model in simulating the phenological stages of the potato plant (planting to greening, greening to flowering and greening to physiological ripening), so that the average value of the Root Mean Square error (RMSE) for all three stages Potato growth in the studied areas was less than 10%. The results of this study showed that the length of the growth period in the studied areas will decrease under future climate conditions. The length of the growth period is reduced by 4.36 days on average in the studied areas. This reduction was also observed at different stages of growth, so that the stage of planting to greening had the least amount of reduction with an average decrease of one day, and the stage of greening to physiological ripening had the largest amount of reduction in the length of the growth period.

Keywords: Climate change, Potato physiological stages, SDSM model

شبیه‌سازی مراحل رشد گیاه سیب‌زمینی در ایران تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

فاطمه بیاتانی^۱ - غلامعباس فلاح قاله‌ری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

چکیده

در این تحقیق به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مراحل رشد گیاه سیب‌زمینی در سطح کشور پرداخته شد. به این منظور ابتدا میانگین تولید و سطح زیر کشت هر استان طی سال‌های ۱۳۶۱-۱۳۹۵ محاسبه و سپس از میان استان‌هایی که بیشترین سطح زیر کشت و تولید را داشتند، ۱۰ ایستگاه به‌عنوان مراکز اصلی تولید سیب‌زمینی کشور انتخاب شدند. در ادامه جهت شبیه‌سازی اقلیم آینده از آمار دما، بارش، میانگین رطوبت‌نسبی، سرعت متوسط باد و ساعات آفتابی استفاده شد. برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در آینده از داده‌های مدل گردش کلی CanESM2 تحت سناریوهای انتشار RCP، برای دوره ۲۰۱۱-۲۱۰۰ استفاده شد. برای ریزگردانی خروجی مدل CanESM2 از نرم‌افزار آماری SDSM و برای شبیه‌سازی مراحل رشد سیب‌زمینی از مدل WOFOST استفاده شد. نتایج نشان داد طول مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی در دوره آینده تحت سناریوهای RCP کاهش می‌یابد. به‌طور متوسط در مناطق مورد مطالعه حداکثر کاهش طول مرحله سبز شدن ۲/۳ روز، مرحله گلدهی ۲/۴ روز و مرحله سبز شدن تا رسیدگی ۶/۷ روز می‌باشد. بیشترین کاهش در طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم (۲۰۷۱-۲۱۰۰) ثبت شده است. از نظر ایستگاهی بیشترین کاهش طول مراحل فنولوژیکی مربوط به ایستگاه همدان و اردبیل و کمترین کاهش در ایستگاه‌های جنوبی رخ داد. بنابراین با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که مناطق سردسیر کشور بیشتر از مناطق گرمسیر کشور تحت تأثیر اثرات تغییر اقلیم در رابطه با دوره رشد این محصول خواهند بود، همچنان که متغیرهای اقلیمی این مناطق تحت تأثیر شرایط گرمایش جهانی بیشترین افزایش دما (حداقل و حداکثر) و بیشترین کاهش بارش را داشتند.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، سیب‌زمینی، مدل SDSM، مراحل فیزیولوژیکی

مقدمه

Galloway, & D'Odorico, 2016, Godfray, Beddington, Crute, et al., 2010). به علاوه، بیماری‌ها و آفات گیاهی باعث اتلاف ۴۰ درصد از تولیدات کشاورزی در بعضی محصولات عمده در مقیاس جهانی می‌شود که امنیت غذایی را در مخاطره جدی قرار می‌دهد (Sayari, Willocquet, Pethybridge, Esker, McRoberts, & Nelson, 2019). شدت و فراوانی رخداد‌های حادی اقلیمی از قبیل امواج گرما و خشکسالی و تغییرپذیری اقلیمی ناشی از پدیده تغییر اقلیم در آینده نیز رو به فزونی خواهد گذاشت. بنابراین انتظار می‌رود فشار بر

افزایش امنیت غذایی در بطن سیاست‌های ملل متحد برای توسعه پایدار قرار دارد (UN, 2015). از طرف دیگر، رشد جمعیت جهانی، کاهش منابع طبیعی حیاتی مورد استفاده در کشاورزی و تنش‌های محیطی و تغییر اقلیم مداوم، دستیابی به این هدف را تضعیف می‌کند (González-Jiménez, Andersson, Wiik, & Zhan, 2023). تولید غذا می‌بایست بدون استفاده از منابع اضافی از قبیل انرژی و زمین قابل کشت انجام شود (Davis, Gephart, Emery, Leach,)

۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران

۲- گروه جغرافیا و گردشگری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: Fallah.g@kashanu.ac.ir)

میانگین طول فصل رشد تا دوره ۲۰۵۰ برای گندم و گوجه‌فرنگی به ترتیب ۱۵ و ۱۲ روز کوتاه‌تر تخمین زده شده است (Saadi, Todorovic, Tanasijevic, Pereira, Pizzigalli, & Lionello, 2015). سازگاری ارقام سیب‌زمینی و نقش آنها در سازش با تغییرات اقلیمی آینده در کشور هندوستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد از مجموع ۸۱ رقم، ۴۵ رقم در هند پذیرفته شده است و در هر ایالت ارقام مقاوم با تحمل بالا کشت می‌شوند که درجاتی از انعطاف‌پذیری وارسته را ارائه می‌کنند. بلوغ زودرس مهم‌ترین و تحمل گرما کم اهمیت‌ترین صفت بوده است (Pradel, Gatto, Hareau, Pandey, & Bhardway, 2019).

در مطالعه‌ای به بررسی اثرات گرم شدن آب و هوا بر فنولوژی سیب زمینی در ۱۲ منطقه پنجاب پاکستان طی دوره دیدبانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۸ در دو کشت بهار و پاییز پرداخته شده است. نتایج این مطالعه حاکی از کاهش مدت زمان مراحل رشد در بهار به‌طور متوسط ۲/۴ روز در دهه (از کاشت تا غده‌زایی)، ۱/۸ روز در دهه (از غده‌زایی تا رسیدگی) و ۴/۲ روز در دهه (از کاشت تا رسیدگی) می‌باشد. در پاییز نیز این مدت زمان به‌ترتیب ۱/۹ روز در دهه، ۱ روز در دهه و ۲/۹ روز در دهه کاهش نشان داد. بر اساس مشاهدات هواشناسی محلی، میانگین دمای هوا از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۸ در هر دهه ۰٫۸ درجه سلسیوس برای هر دو فصل بهار و پاییز افزایش یافته است. تفاوت‌های فنولوژیکی بهار و پاییز همبستگی منفی معناداری با افزایش دما در این دوره داشتند (Sahrish, Shakeel, Ghulam, et al., 2022).

مطالعه تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تولید سیب‌زمینی در شرق آفریقا توسط (Thomas, Iwan, Annemarie, Fulco, & Teferi, 2025) انجام گرفته است. برای ارزیابی این تأثیرات، از مدل زراعی WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد بالقوه Yp و عملکرد تحت محدودیت آبی Yw در دوره‌ی دیدبانی (۲۰۱۰-۱۹۸۱)، آینده نزدیک (۲۰۳۶-۲۰۶۵) و آینده دور (۲۰۶۶-۲۱۰۰) تحت دو سناریوی اقلیمی SSP3.7 و SSP8.5 استفاده شد. این شبیه‌سازی‌ها با استفاده از یک مجموعه پنج‌تایی از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) از پروژه ISIMIP انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها به‌طور پیوسته کاهش قابل توجهی را در هر دو شاخص Yp و Yw در تمام دوره‌های آینده نشان می‌دهد.

جیانژائو و همکاران (Jianzhao, Huizi, Shenghai, et al., 2024) با استفاده از ۱۳ مدل آب و هوایی جهانی (GCMs) از سری مدل‌های جفت شده فاز ۶ (CMIP6) تحت دو سناریو انتشار SSP4.5 و SSP8.5 به ارزیابی تأثیرات تغییرات آب و هوایی بر تولید سیب‌زمینی جهت بهینه‌سازی تاریخ کاشت، آبیاری و مصرف کود در کشت سیب زمینی در ایستگاه ووچوان چین پرداختند. نتایج نشان داد در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰)، تاریخ‌های کاشت در دهه‌های ۲۰۴۰ (۲۰۳۱-۲۰۶۰) و ۲۰۸۰ (۲۰۷۱-۲۱۰۰) گسترده‌تر خواهد بود. تاریخ

تولیدات کشاورزی افزایش یابد، چون رشد محصولات کشاورزی به تغییر شرایط هواشناسی حساس است (Agovino, Casaccia, Ciommi, Ferrara, & Marchesano, 2018; UN, 2015; Lobell & Field, 2007). چندین روش آماری و فرایند محور رابطه بین تغییر اقلیم و تولیدات کشاورزی را توصیف می‌کنند. مدل‌های آماری مبتنی بر روابط تجربی بین عملکرد و عوامل محیطی در چندین مشاهدات تجربی در یک مکان یا منطقه خاص، رویکرد غالب در ارزیابی تلفات عملکرد بوده‌اند (Jones, Antle, Basso, et al., 2017). مدلسازی سیستم‌های کشاورزی در طول دهه‌های گذشته عمدتاً برای درک بهتر سهم مؤلفه‌های مختلف (تولید، کاربری زمین، منابع طبیعی، بیماری‌ها و عوامل انسانی) و برهمکنش‌های پیچیده بین آن‌ها برای تولید اولیه مورد استفاده قرار گرفته است (Jones et al., 2017).

سیب‌زمینی در میان مهم‌ترین محصولات کشاورزی مورد مصرف انسان در سطح جهان قرار دارد (Devaux, Goffart, Petsakos, et al., 2020). اما تولید سیب‌زمینی به‌طور پیوسته توسط عوامل غیرزیستی (حاصلخیزی خاک، ذخیره آب، یخبندان‌ها و خشکسالی‌ها) و عوامل زیستی تحت تأثیر قرار می‌گیرد که مورد دوم منجر به اتلاف ۲۰ درصدی تولید جهانی سیب‌زمینی می‌شود (Savary et al., 2019). اثرات تغییر اقلیم بر روی کشت سیب‌زمینی در هندوستان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دوره رشد محصول و راندمان آب قابل آبیاری کاهش، تبخیر- تعرق افزایش و موجب کاهش ۱۱ درصدی عملکرد سیب‌زمینی در دوره ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ خواهد شد. مهم‌ترین گزینه در سازگاری با شرایط آینده، تغییر زمان کاشت در آینده خواهد بود (Naresh Kumar, Govindakrishnan, Swarooparani, Nitin, Surabhi, & Aggarwal, 2015). مطالعه اثرات بالقوه گرم شدن هوا بر روی فنولوژی محصول سیب‌زمینی و تنش دمایی در شمال اروپا نشان داد با کشت زودتر سیب‌زمینی می‌توان سیب‌زمینی را یک ماه زودتر برداشت کرد. ولی با این حال ظهور اولیه سیب‌زمینی با افزایش ریسک خطر سرمازدگی در بیشتر نقاط شمال اروپا همراه خواهد بود (Pulatov, Linderson, Hall, & Jönsson, 2015). اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر روی رشد زیتون در منطقه مدیترانه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این پژوهش حاکی از گسترش کشت بالقوه زیتون به سمت شمال و ارتفاعات بالاتر منطقه در ۵۰ سال آینده خواهد بود. با توجه به افزایش تبخیر- تعرق (به میزان ۸ درصد) و آب آبیاری مورد نیاز (با افزایش ۱۸/۵ درصد) و کاهش بارش، پرورش زیتون بصورت دیم دیگر امکان‌پذیر نخواهد بود (Pereira, Pizzigalli, & Lionello, 2014). با استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی اثرات تغییرات اقلیم بر روی آب مورد نیاز گندم زمستانه و گوجه‌فرنگی در منطقه مدیترانه شبیه‌سازی شد. با توجه به نتایج حاصل، بارش کاهش، افزایش دما (به میزان $1/5 \pm 0/27$) و تبخیر- تعرق مرجع سالیانه به میزان ۶/۷ درصد افزایش نشان می‌دهند.

Massah-Bovani, Ajorlou, Broomandnasab, & Andarzian, 2014). با مطالعه بر روی اثرات تغییر اقلیم بر روی کشت سیب‌زمینی در منطقه فریدون‌شهر اصفهان نتایج نشان داد که عملکرد غده سیب‌زمینی تحت شرایط اقلیم آینده کاهش خواهد یافت (Adavi, 2015). در مطالعه‌ای با بکارگیری مدل SWAP اثرات تغییر اقلیم بر محصولات کشاورزی در حوضه سیمینه‌رود شبیه‌سازی و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از افزایش متوسط تنش آبی و دمایی و کاهش عملکرد محصولات است (Rezaee Zaman & Afruzi, 2015). با به کارگیری دو مدل GFDL-ESM2g و HadGEM2-es و سناریوهای RCP اثرات تغییر اقلیم بر ویژگی‌های زراعی و تولید سیب‌زمینی در ایران (همدان، اردبیل، اصفهان، قروه کردستان، شیراز، جیرفت، مشهد، گرگان، شاهرود و دزفول) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد همراه با افزایش میانگین دمای حداکثر بین ۱٫۲ تا ۷٫۵ درجه و دمای حداقل بین ۱٫۳ تا ۵٫۸ درجه طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی کاهش خواهد یافت. این کاهش بطور متوسط در مرحله سبز شدن به میزان ۳٫۲ روز، در مرحله گلدهی به میزان ۳٫۲ روز و مدت زمان پر شدن غده‌ها به میزان ۱۰٫۳ روز خواهد بود (Torkaman, 2016).

با توجه به اهمیت گیاه سیب‌زمینی در جیره غذایی بشر و تأثیر پذیری از شرایط اقلیمی و محیطی بخصوص دما و رطوبت و همچنین ضرورت بررسی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آتی بررسی شرایط کشت گیاه سیب‌زمینی تحت شرایط تغییر اقلیم در کشور یک ضرورت می‌باشد. اطلاع از وضعیت اقلیمی آینده می‌تواند نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آبی در ادامه کشت گیاه سیب‌زمینی ایفا نماید.

روش پژوهش

جهت مطالعه و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر مراحل مختلف رشد و تولید محصولات زراعی بایستی وضعیت اقلیمی آینده برآورد گردد. در حال حاضر به وسیله‌ی مدل‌های گردش عمومی (GCM) و با استفاده از سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای وضعیت اقلیمی آینده مورد مطالعه و ارزیابی قرار می‌گیرد. تلفیق نتایج حاصل از مدل‌های اقلیمی با مدل‌های شبیه‌ساز رشد و نمو، امکان شبیه‌سازی مراحل مختلف فنولوژیکی و عملکرد گیاهان زراعی را در شرایط اقلیمی آینده فراهم می‌سازد (Carson, 1999).

مدل‌های اقلیم جهانی

مدل‌های اقلیم جهانی^۱، انواع خاصی از مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع هوا^۲ هستند. در این مدل‌ها شبکه‌ی منظمی از نقاط، جهان را می‌پوشاند و شبیه‌سازی‌ها در نقاط شبکه‌ای، از طریق حل عددی مجموعه معادلات تفاضل محدود در هر گام زمانی، اجرا می‌شوند.

کاشت بهینه در سیب‌زمینی دیم تحت سناریوی SSP4.5 باید با تأخیر و تحت SSP8.5 با تقدیم انجام شود. تاریخ کاشت بهینه سیب‌زمینی آبی تحت هر دو سناریو SSP4.5 و SSP58.5 باید زودتر برنامه‌ریزی شود. اثرات تغییرات اقلیمی بر گیاه چغندر قند و گندم در مقیاس ماهانه در استان خراسان رضوی مورد ارزیابی قرار گرفت. دوره رشد و نیاز آبی با به کارگیری مدل OPTIWAT برآورد شده است. نتایج نشان داد نیاز آبی هر دو گیاه در تربت جام افزایش و در سرخس کاهش خواهد یافت. در سایر شهرستان‌های استان تغییر محسوسی در نیاز آبی این دو گیاه طی دوره مورد مطالعه رخ نخواهد داد (Ashraf, 2012). اثرات تغییر اقلیم بر حداقل و حداکثر دما، الگوی بارش و تبخیر- تعرق گیاهانی نظیر گندم، ذرت، گوجه‌فرنگی و چغندر قند در حوضه کشف‌رود تحت دو سناریو A2 و B2 و دو مدل گردش عمومی CGCM2 و HadCM3 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش و با کاهش بارش بسته به نوع مدل استفاده شده می‌باشد. دما حداقل و حداکثر در هر دو مدل و سناریوی مورد استفاده افزایش یافت. میزان تبخیر- تعرق در دوره‌های آینده با مدل HadCM3 و با هر دو سناریو افزایشی بود در صورتی‌که در مدل CGCM2 با هر دو سناریو افزایش بسیار ناچیز بود (Sayari, 2011). تأثیر پدیده تغییر اقلیم بر نیاز آبی محصولات عمده کشاورزی در شبکه آبیاری آیدوغموش (شامل گندم، جو، یونجه، سیب‌زمینی و ...) با استفاده از مدل HADCM3 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج افزایش ریسک میزان نیاز آبی محصولات را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که این افزایش تا حدود ۱۰ و ۱۳ درصد به ترتیب برای ریسک ۵۰ و ۲۵ درصد می‌رسد (Ashofteh, 2012). میزان نیاز آبی سویا برای دو کشت آبی و دیم در منطقه گرگان با بکارگیری مدل آب و هوا- محصول SSM شبیه‌سازی شد. نتایج حاکی از کاهش اندک تبخیر از سطح خاک و افزایش اندک تعرق از سطح گیاه برای دوره آینده خواهد بود. البته این افزایش تعرق در کشت دیم مشهودتر است. بطور کلی تبخیر- تعرق برای کشت آبی تغییر محسوسی نخواهد داشت ولی در کشت دیم تا حدود ۱۰ درصد افزایش را نشان می‌دهد (Ghorbani, Zakerinia, & Hezarjaribi, 2013). تغییر اقلیم بر محصول ذرت در سه دوره زمانی ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ انجام شد. نتایج نشان داد که طول دوره کاشت تحت تأثیر تغییر اقلیم در اکثر سناریوهای مورد استفاده کاهش می‌یابد. عملکرد ذرت در دوره‌های آتی از ۱۱ تا ۳۸ درصد نسبت به شرایط کنونی کاهش می‌یابد و بطور کلی کاشت زود هنگام ذرت باعث تولید عملکرد بالاتری نسبت به تاریخ‌های کاشت در شرایط تغییر اقلیم خواهد شد (Moradi, Koocheki, & Nassiri Mahallati, 2015). مدل گیاهی CERES-Wheat برای شبیه‌سازی رشد گندم در شهر اهواز واسنجی شد. نتایج نشان داد در اثر تغییر اقلیم، دوره رشد کوتاه‌تر می‌شود (Dalghandi,

به صورت روزانه، ماهانه، فصلی و یا سالانه را دارا می باشد. ورودی این مدل داده های دیدبانی روزانه ایستگاه (پیش بینی شونده)، متغیرهای بزرگ مقیاس NCEP (پیش بینی کننده) در دوره مشابه دیدبانی (جدول ۲) و برون داد متغیرهای بزرگ مقیاس مدل های گردش عمومی تحت سناریوهای انتشار گوناگون برای دوره مطالعاتی آینده می باشد. مدل SDSM روابط آماری را بر مبنای روش رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس (پیش بینی کننده ها) و محلی (پیش بینی شونده ها) محاسبه می کند (Wilby, Dawson, & Barrow, 2002).

مدل WOFOST^۸

مدل WOFOST در چارچوب مطالعات جهانی امنیت غذا و پتانسیل جهانی تولید غذا، توسط مرکز جهانی مطالعات غذایی در همکاری با دانشگاه واخنینگن و مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک واخنینگن ایجاد گردید (Van Keuler & van Diepen, 1990; Spitters, Toussaint, & Goudriaan, 1990; Van Laar, Goudriaan, & van Keulen, 1992). هسته اصلی مدل رشد محصول WOFOST از مدل SUCROS گرفته شده است (Spitters et al., 1990; Van Laar et al., 1992). مدل WOFOST رشد گیاهان زراعی یک ساله را بصورت روزانه در شرایط پتانسیل، محدودیت آبیاری و مواد غذایی (نیتروژن) بر اساس خصوصیات گیاهی، پارامترهای روزانه هواشناسی و خصوصیات فیزیکی خاک شبیه سازی می کند (Boogaard, Van Diepen, Rotter, 1998; Cabrera, & Van Laar, 1998). مدل WOFOST، رشد و تجمع ماده خشک گیاه را بر مبنای سرعت روزانه فتوسنتز کانوپی شبیه سازی می کند. این مدل از پارامترها و توابع برای توصیف اثرات دما، تشعشع و تنش آبی بر فرآیندهای اصلی رشد محصول استفاده می کند. خروجی های مدل شامل عملکرد نهایی، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، میزان تجمع ماده خشک در هر یک از اندام ها و مراحل نمو با فواصل یک روزه هستند. در تحقیق حاضر برای ارزیابی دوره های فنولوژیکی سیب زمینی از مدل WOFOST استفاده شد.

متاسفانه فواید GCM ها، برای تحلیل های اقلیم منطقه ای به دلیل دقت پایین منطقه ای (معمولاً به اندازه ۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع) و ناتوانی آن ها در حل مسائل و فرآیندهایی که در مقیاس خرد رخ می دهد، همچون ابرها و توپوگرافی، محدود می شود. به همین علت دو روش برای بدست آوردن اقلیم محلی از متغیرهای پیش بینی کننده ی جوی در سطح منطقه ای به وجود آمد. روش اول: ریزمقیاس نمایی آماری است که برای شبیه سازی اقلیم یک ایستگاه (در مقیاس محلی) برای دوره حاضر و آتی تحت سناریوهای تغییر اقلیم بکار می روند. در این روش یک ارتباط آماری با استفاده از رگرسیون ساده، چند متغیره، شبکه عصبی و بین رفتار واقعی ایستگاه و برون داد مدل گردش عمومی ایجاد می شود. روش دوم ریزمقیاس نمایی دینامیکی است که در آن مدل های اقلیم منطقه ای (RCMs)، ویژگی های دینامیکی اقلیم را در مقیاس زیر شبکه مدل های GCM با استفاده از شرایط جوی متغیر زمانی فراهم شده توسط یک GCM که به یک حوزه معین محدود می شود، شبیه سازی می کند (Fallah Ghalheri, 2014).

مدل CanESM2^۱

مدل CanESM2 یک مدل جامع جفت شده AOGCM^۲ از مرکز کانادایی تحلیل و مدل سازی اقلیم (CCCma) و جزء سری مدل های CMIP5 گزارش پنجم (AR5) و هیئت بین الدول تغییر اقلیم IPCC می باشد (Arora, Scinocca, Boer, et al., 2011). جدول ۱ مشخصات این مدل را نشان می دهد.

سناریوهای انتشار RCP^۴

هیئت بین الدول تغییر اقلیم در پنجمین گزارش خود AR5^۵ از سناریوهای RCP^۶ به عنوان نماینده های خطوط سیر غلظت های گوناگون گازهای گلخانه ای استفاده کرده است. سناریوهای انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می باشند که بر اساس میزان واداشت تابشی آنها در سال ۲۱۰۰ نام گذاری شده اند.

مدل SDSM^۷

مدل SDSM یک مدل ریز مقیاس کننده آماری است که قابلیت توسعه سریع و کم هزینه داده های ریز مقیاس شده در مقیاس ایستگاهی

5- Fifth Assessment Report
6- Representative Concentration Pathways
7- Statistical Downscaling Model
8- World Food Studies

1- Canadian Earth System Model
2- Atmosphere/Ocean General Circulation Model or Atmosphere/Ocean Global Climate Model
3 The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)
4- Representative Concentration Pathways

جدول ۱- مشخصات مدل CanESM2

Table 1- Specifications of the CanESM2 model

نام مدل Model Name	CanESM2
قدرت تفکیک اتمسفری (درجه) (طول×عرض) Atmospheric Resolution (degree) (length x width)	2.8°×2.81°
قدرت تفکیک اقیانوسی (درجه) (طول×عرض) Ocean Resolution (degree) (length x width)	1.41°×0.94°
گروه موسس Founding Group	(CCCMA) Canada
دوره شبیه‌سازی (تاریخی/آینده) Simulation Period (historical/future)	2011-2100/1850-2005
سناریوهای شبیه‌سازی Simulation Scenarios	RCP 8.5 و RCP6 ،RCP4.5 ،RCP2.6

آن به ۱+ نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در شبیه‌سازی داده‌ها است. به‌طور کلی مقدار عددی RMSE و ME برابر صفر و مقدار E و R² برابر با یک خواهند بود. نتایج مقادیر آزمون (T) بیشتر از مقدار ۰.۰۵ باشد نشان‌دهنده این مفهوم است که مقادیر شبیه‌سازی شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف معنی‌داری ندارند. لذا مدل از دقت بالایی در شبیه‌سازی برخوردار است (Torkaman, 2016).

داده‌های هواشناسی و مزرعه‌ای مورد نیاز

داده‌های روزانه متغیرهای اقلیمی شامل بیشینه دما، کمینه دما، بارش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و میانگین سرعت باد طی سال‌های ۱۹۸۱-۲۰۰۵ مربوط به ایستگاه‌های همدید مورد مطالعه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. برای ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم بر طول دوره رشد و مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی از داده‌های مدل CanESM2 در دوره ۲۰۱۱-۲۰۹۹ تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCPs) استفاده شد. داده‌های مدل CanESM2 نیز توسط مدل SDSM ریزگردانی شدند.

به‌منظور تهیه داده‌های مزرعه‌ای جهت کالبراسیون و تعیین اعتبار مدل WOFOST در شرایط پتانسیل (شرایط بدون محدودیت آب و غذا، کنترل بیماری‌ها و علف‌های هرز)، داده‌های طرح‌های تحقیقاتی مراکز تحقیقات کشاورزی مناطق همدان، اصفهان، اردبیل، شیراز، تبریز، شهرکرد، جیرفت، کهنوج، منوجان و سنندج که مراکز اصلی تولید سیب زمینی کشور می‌باشند، طی سال‌های ۹۳-۱۳۸۹ جمع‌آوری و به‌عنوان دوره دیدبانی مورد استفاده قرار گرفت.

واسنجی و تعیین اعتبار مدل

جهت ارزیابی توانمندی و دقت مدل SDSM در شبیه‌سازی داده‌های دیدبانی (۱۹۸۱-۲۰۰۵) و هم‌منظور تعیین اعتبار و ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی مختلف گیاه سیب‌زمینی از معیارهای آماری، همچون ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE^۱)، جذر میانگین مجذور خطای نرمال شده (RMSEn^۲)، حداکثر خطا (ME^۳)، ضریب کارایی مدل (E^۴)، ضریب تبیین (R²) و آزمون (T) (معادلات ۱-۳ تا ۱۳-۳) استفاده گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad (۱)$$

$$RMSEn = 100 \sqrt{\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\frac{\bar{M}}{100}}} \quad (۲)$$

$$ME = \max |S_i - M_i| \frac{100}{\bar{M}} \quad (۳)$$

$$E = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})} \right)^2 \quad (۴)$$

در این معادلات، S_i و M_i به‌ترتیب مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده، $\bar{M}$ میانگین مقادیر M_i و n تعداد مشاهدات می‌باشد. RMSE میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده است که نشان‌دهنده اطمینان مدل می‌باشد. هر چه مقدار RMSE به صفر نزدیکتر باشد نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل می‌باشد. RMSEn به صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر دیدبانی عنوان می‌شود و بر اساس تعریف، دقت شبیه‌سازی مدل در صورتی که مقدار RMSE کمتر از ۱۰٪ باشد، عالی، اگر بین ۱۰ تا ۲۰٪ باشد، خوب، اگر بین ۲۰ تا ۳۰٪ باشد، متوسط و اگر بالاتر از ۳۰٪ باشد، ضعیف برآورد می‌گردد (Taei Semiromi, Moradi, & Khodagholi, 2014). مقادیر بالای ME نشان‌دهنده بدترین حالت کارایی مدل می‌باشد. ضریب کارایی E بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از میانگین می‌باشد. مقدار E بین -∞ تا ۱+ متغیر است. هر چه مقدار

3- Maximum Error

4- Coefficient of efficiency

1- Root Mean Square Error

2- Root Mean Square Error-Normalized

جدول ۲- فهرست متغیرهای NCEP

Table 2- List of NCEP variables

ردیف Row	متغیر پیش‌بینی کننده Predictor variable	توضیحات Description
1	P5_f	سرعت باد زمینگرد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Geostrophic airflow velocity at 500 hPa
2	P5_u	مؤلفه مداری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Horizontal wind at 500 hPa
3	P5_v	مؤلفه نصف‌النهاری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Zonal wind at 500 hPa
4	P5_z	تاوایی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Vorticity at 500 hPa
5	P5th	سمت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Wind direction at 500 hpa
6	P5zh	واگرایی باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Divergence at 500 hPa
7	P500	ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Geopotential height at 500 hPa
8	r500	رطوبت نسبی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 500 hPa
9	P_f	سرعت باد زمینگرد Surface geostrophic airflow
10	P_u	مؤلفه مداری سرعت باد Surface horizontal wind
11	P_v	مؤلفه نصف‌النهاری سرعت باد Surface zonal wind
12	P_z	تاوایی Surface vorticity
13	P_th	سمت باد Surface wind direction
14	P_zh	واگرایی باد Surface divergence
15	P8_f	سرعت باد زمینگرد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Geostrophic airflow velocity at 850 hPa
16	P8_u	مؤلفه مداری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Horizontal wind at 850 hPa
17	P8_v	مؤلفه نصف‌النهاری سرعت باد در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال Zonal wind at 850 hPa
18	P8_z	تاوایی در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Vorticity at 850 hPa
19	P8th	سمت باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Wind direction at 850 hpa
20	P8zh	واگرایی باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Divergence at 850 hPa
21	P850	ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Geopotential height at 850 hPa
22	r850	رطوبت نسبی در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 850 hPa
23	Mslp	میانگین فشار سطح دریا Mean sea level pressure
24	Rhum	رطوبت نسبی نزدیک سطح زمین Near surface relative humidity
25	Shum	رطوبت ویژه نزدیک سطح زمین Near surface specific humidity
26	temp	دمای هوا در ارتفاع ۲ متری 2-m air temperature

این اطلاعات شامل تاریخ کاشت، مراحل فنولوژیکی از کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه سیبزمینی در هر یک از مناطق مطالعاتی می‌باشد. به‌منظور کالیبراسیون مدل WOFOST با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای، از داده‌های فنولوژیکی در سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ و از داده‌های فنولوژیکی در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای تعیین اعتبار مدل استفاده شد. به‌منظور واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST در مناطق مورد مطالعه ابتدا لازم است تا پارامترها (ضرایب) گیاهی سیبزمینی برای شرایط مختلف اقلیمی تنظیم شوند. بر همین اساس ایجاد فایل گیاهی که حساس‌ترین قسمت کالیبراسیون مدل WOFOST است، انجام شد.

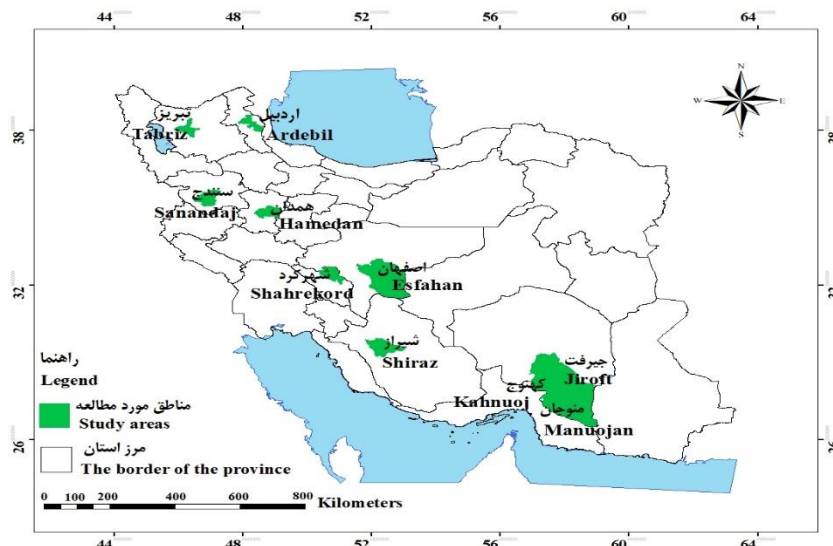
مناطق مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در این پژوهش مناطقی از کشور هستند که بالاترین سطح تولید سیبزمینی را در کشور دارا می‌باشند. با توجه به تنوع اقلیمی در کشور محصول سیبزمینی به دو صورت بهار و پاییزه کشت و برداشت می‌شود. بنابراین در انتخاب ایستگاه‌های مورد مطالعه سعی بر این بوده است که هر دو کشت بهار و پاییزه مورد بررسی قرار گیرند. مناطق مورد مطالعه در این تحقیق شامل ایستگاه‌های اردبیل، تبریز، شهرکرد، همدان، اصفهان، سنندج و شیراز (کشت بهار) و جیرفت، کهنوج، منوجان (کشت پاییزه) می‌باشند. مناطق نام برده جزو مراکز اصلی تولید سیبزمینی کشور محسوب می‌شوند. اساس انتخاب این مناطق بر پایه میانگین درصد سطح تولید و سطح زیر کشت هر

استان از تولید سیبزمینی کشور طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۶۱ بود (Agricultural Statistics, 2016). از میان استان‌هایی که بیشترین سطح زیر کشت و تولید را داشتند، ۱۰ ایستگاه به‌عنوان مراکز اصلی تولید سیبزمینی کشور انتخاب شدند (شکل ۱). مناطق نامبرده ۶۲٫۷۲ درصد سطح زیر کشت و ۶۸٫۲۷ درصد تولیدات سیبزمینی کشور را به خود اختصاص داده‌اند.

نتایج

مدل WOFOST به‌منظور پیش‌بینی مدت زمان مراحل کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا آغاز گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی، برای تمام ۱۰ ایستگاه تولید کننده سیبزمینی در کشور طی سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ واسنجی و در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ صحت‌سنجی شد. بطور میانگین Tsum1 و Tsum2 به‌ترتیب ۵۰۲/۱ و ۸۱۵/۳۷ درجه-روز (Cd°) محاسبه گردید (جدول ۳). جدول ۴ مقادیر استفاده شده‌ی Tsum1 و Tsum2 را برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در مرحله کالیبراسیون و در شرایط پتانسیل در مدل WOFOST نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مقادیر اندازه‌گیری شده در مدت ۵ سال با تاریخ کاشت‌های مرسوم (جدول ۴) و (جدول ۵)، میانگین طول دوره کاشت تا سبز شدن ۲۳/۴۸ روز، میانگین دوره سبز شدن تا آغاز گلدهی ۲۹/۹۲ روز و میانگین طول دوره سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی ۱۰۹/۹۴ روز، برای هر ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه محاسبه و تعیین گردید.



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه
Figure 1- Location of the study areas

مدل در مرحله کالیبراسیون طول دوره سبز شدن را ۲۳/۲۷ روز، دوره آغاز گلدهی را ۲۹/۸۳ روز و طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی را ۱۰۹/۷۳ روز، برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه شبیه‌سازی نمود. در مرحله اعتبارسنجی مدل بطور میانگین طول دوره سبز شدن را ۲۳/۸ روز، دوره آغاز غده‌زایی را ۳۰/۰۵ روز و طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی را ۱۱۰/۲۵ روز برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه شبیه‌سازی و پیش بینی نمود. نتایج شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در مراحل مختلف فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی در جدول‌های ۶، ۷ و ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل در مرحله کالیبراسیون و اعتبارسنجی است.

طول دوره کاشت تا سبز شدن

مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مرحله فنولوژی کاشت تا سبز شدن بطور متوسط ۱/۳ روز در مرحله کالیبراسیون (سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲) و ۱ روز در مرحله اعتبارسنجی (سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳) مدل به‌دست آمد. ایستگاه جیرفت و شهرکرد با ۱/۷ روز بیشترین میزان خطا و ایستگاه اردبیل با ۰/۶ روز کمترین خطا را در مرحله کالیبراسیون به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۶). حداکثر انحراف (RMSEn) در مرحله‌ی سبز شدن بطور متوسط ۵/۷ درصد در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل به‌دست آمد. در مرحله اعتبارسنجی این میزان تا ۴/۳ درصد کاهش یافت (جدول ۶). در شکل ۲ مقایسه‌ی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل برای مرحله‌ی فنولوژیکی سبز شدن نشان داده شده است.

جدول ۳- پارامترهای گیاهی مدل WOFOST در مرحله کالیبراسیون در شرایط پتانسیل
Table 3- Plant parameters of the WOFOST model in the calibration stage under potential conditions

پارامتر	توصیف پارامتر	مقدار	واحد
Parameter	Parameter description	Value	Unit
TBASEEM	دمای پایین‌تر از آستانه برای ظهور Temperatures below the threshold for emergence	5	° C
TSUMEM	مجموعه درجه روز از کاشت تا سبز شدن Daily degree set from planting to emergence	434.9	° Cd
TSUM1	مجموعه درجه روز از سبز شدن تا گلدهی Daytime collection from emergence to flowering	502.1	° Cd
TSUM2	مجموعه درجه روز از گلدهی تا بلوغ یا برداشت Daily degree set from flowering to maturity or harvest	815.37	° Cd
SLATB	سطح ویژه برگ Special surface of leaves	0.0020	Ha kg ⁻¹
AMAXTB	CO ₂ حداکثر سرعت جذب Maximum rate of CO ₂ uptake	35	Kg ha ⁻¹ hr ⁻¹
CVL	بهره‌وری تبدیل CO ₂ جذب شده به برگ Conversion Productivity CO ₂ Absorbed to Leaf	0.760	kg kg ⁻¹
CVR	بهره‌وری تبدیل CO ₂ جذب شده به ریشه Conversion Productivity CO ₂ Absorbed to Root	0.755	kg kg ⁻¹
CVS	جذب شده به ساقه CO ₂ بهره‌وری تبدیل Conversion Productivity CO ₂ Absorbed to Stem	0.758	kg kg ⁻¹

جدول ۴- مقادیر TSUM1 و TSUM2 در مرحله کالیبراسیون در شرایط پتانسیل
Table 4- TSUM1 and TSUM2 values in the calibration phase under potential conditions

ایستگاه	کهنوج	جیرفت	همدان	اصفهان	شیراز	شهرکرد	سنندج	تبریز	اردبیل	منوجان
Station	Kahnuoj	Jiroft	Hamedan	Esfahan	Shiraz	Shahrekord	Sanandaj	Tabriz	Ardebil	Manujan
TSUM1	560	363.3	730	363.34	420	560	338.67	649	525.3	552.3
TSUM2	630	809.2	1143.07	730	737.57	835.55	747.9	1325	771.44	757.1

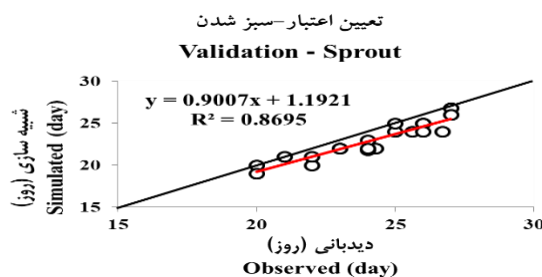
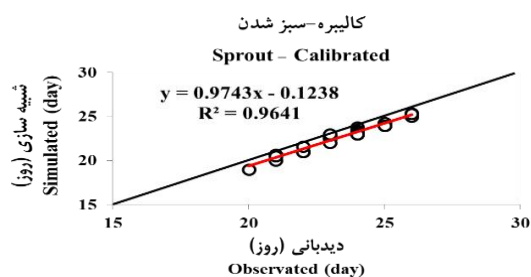
جدول ۵- شبیه‌سازی طول دوره مراحل فنولوژیکی بر اساس تاریخ کاشت (روز از اول ژانویه) بصورت میانگین طی سال‌های ۹۳-۱۳۸۹

Table 5- Simulation of the duration of phenological stages based on planting date (days from January 1) as an average during the years 2010-2014

شهر City	مرحله فنولوژیکی Phenological stages			
	تاریخ کاشت Date of planting (day)	کاشت تا سبز شدن Planting-Sprout (day)	سبز شدن تا گلدهی Sprout-flowering (day)	سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی Sprout-physiological maturity (day)
اردبیل Ardebil	140	24.8	26.8	118.8
تبریز Tabriz	130	21.4	27.2	107.8
سنندج Sanandaj	90	24.4	30.2	107
شهرکرد Shahrekord	140	25	28.2	120
شیراز Shiraz	60	22.4	27.4	109.4
اصفهان Esfahan	70	22.8	29.4	111.4
همدان Hamedan	90	23.4	27.6	116.8
جیرفت Jiroft	260	24.8	35	104.2
کهنوج Kahnuoj	260	23.6	34.4	101.6
منوجان Manujan	260	22.2	33	102.4
میانگین Avrage	---	23.48	29.9	109.9

کالیبراسیون و اعتبارسنجی حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است. مقادیر شاخص حداکثر خطا (ME) نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی است (جدول ۶).

نتایج آزمون T در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده نزدیک به مقادیر واقعی است. مقدار ضریب تبیین برای مرحله‌ی سبز شدن بصورت میانگین ۰/۹۷ در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل محاسبه شد. نتایج حاصل از ارزیابی ضریب کارایی در مراحل



شکل ۲- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برای مرحله‌ی سبز شدن گیاه سیب‌زمینی (داده‌های سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای مرحله‌ی کالیبراسیون و داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای مرحله‌ی اعتبارسنجی)، خط یک به یک نیز در شکل نشان داده شده است.

Figure 2- Comparison of simulated values with measured values for the potato plant emergence stage (Data from 2010, 2011, and 2013 for the calibration stage and data from 2012 and 2014 for the validation stage), the one-to-one line is also shown in the figure.

جدول ۶- ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مرحله‌ی سبز شدن گیاه سیب‌زمینی با استفاده از شاخص‌های آماری

Table 6- Evaluation of the WOFOST model in simulating the germination stage of potato plants using statistical indicators

Table 3 Validation of the WOI-GM model in simulating the germination stage of potato plants using statistical indicators										
ایستگاه Station	دیدبانی Observation	شبیه سازی Simulation	تفاوت Difference	RMSE %	RMSE	R ²	T	ME	E	
کالیبراسیون Calibrated	اردبیل Ardebil	23.7	23.4	0.27	2.5	0.6	0.99	0.78	4.2	0.7
	تبریز Tabriz	21.3	20	1.3	6.6	1.4	0.96	0.6	9.4	0.4
	سنندج Sanandaj	23	22.1	0.87	4.05	0.93	0.98	0.75	5.2	0.5
	شهرکرد Shahrekord	24.7	23	1.7	7	1.7	0.99	0.67	8.1	0.3
	شیراز Shiraz	22.3	21	1.3	6.3	1.4	0.99	0.74	6.9	0.4
	اصفهان Esfahan	24	22.5	1.5	6.3	1.5	0.99	0.69	8.3	0.34
	همدان Hamedan	22.7	21.3	1.3	6.2	1.4	0.98	0.74	8.8	0.45
	جیرفت Jiroft	25	23.3	1.7	6.9	1.7	0.93	0.53	8	0.34
	کهنوج Kahnuoj	23.3	22.3	1	5.5	1.3	0.94	0.65	8.6	0.48
	منوجان Manuojan	22.7	21.7	1	5.7	1.3	1	0.61	8.8	0.46
	اردبیل Ardebil	26.5	25.4	1.1	2.2	0.6	1	0.61	3.7	-1.4
	تبریز Tabriz	21.5	20.5	1	3.8	0.82	1	0.7	4.6	0.55
	سنندج Sanandaj	26.5	25	1.5	4.9	1.3	1	0.44	7.5	-5
	شهرکرد Shahrekord	25.5	24.5	1	2.3	0.6	1	0.58	3.9	-1
اعتبار سنجی Validation	شیراز Shiraz	22.5	21.5	1	5.1	1.1	1	0.63	8.8	0.6
	اصفهان Esfahan	21	20.5	0.5	2.7	0.58	1	0.77	4.8	0.5
	همدان Hamedan	24.5	23.5	1	3.3	0.82	1	0.43	4.1	-3
	جیرفت Jiroft	24.5	23	1.5	5.3	1.3	1	0.56	6.3	0.4
	کهنوج Kahnuoj	24	23	1	7.9	2	1	0.46	10.6	-0.3
	منوجان Manuojan	21.5	21	0.5	5.7	1.3	1	0.31	8.8	-5

طول دوره سبزشدن تا گلدهی

مقدار جذر میانگین مربعات خطا RMSE برای مرحله فنولوژی سبزشدن تا گلدهی بطور متوسط ۰/۹۹ روز در مرحله کالیبراسیون (۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲) و ۰/۹۰ روز در مرحله اعتبارسنجی مدل (سال های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳) به دست آمد. در ایستگاه جیرفت با ۱/۷ روز

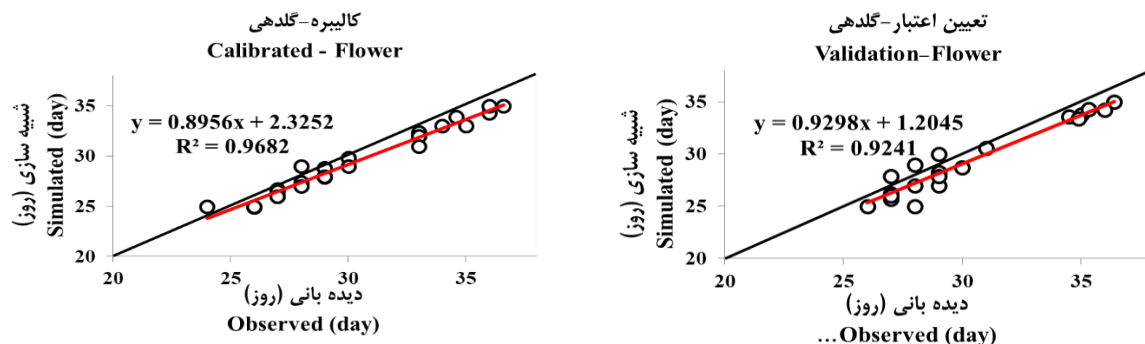
بیشترین میزان خطا و ایستگاه اصفهان با ۰/۳ روز کمترین خطا در مرحله کالیبراسیون محاسبه شد. در مرحله اعتبارسنجی ایستگاه سنندج، همدان و منوجان با ۱/۳ روز و ایستگاه کهنوج با ۰/۱۳ روز به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار RMSE بدست آمد (جدول ۷). بیشینه انحراف (RMSEn) در مرحله ی گلدهی بطور متوسط ۳/۳۳ درصد در مرحله ی کالیبراسیون و در مرحله اعتبارسنجی ۳/۲ درصد محاسبه شد

(جدول ۷). در مرحله کالیبراسیون حداکثر انحراف مربوط به ایستگاه جیرفت به میزان ۴/۹ درصد و در مرحله اعتبارسنجی حداکثر انحراف مربوط به ایستگاه همدان به میزان ۵/۴ درصد می‌باشد (جدول ۷). در شکل ۳ مقایسه‌ی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در

مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل برای مرحله‌ی فنولوژیکی گلدهی نشان داده شده است. نتایج آزمون T در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده نزدیک به مقادیر واقعی است.

جدول ۷- ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مرحله‌ی گلدهی گیاه سیب‌زمینی با استفاده از شاخص‌های آماری
Table 7- Evaluation of the WOFOST model in simulating the flowering stage of potato plants using statistical indicators

Table 7. Evaluation of the WOI-GSI model in simulating the flowering stage of potato plants using statistical indicators										
	ایستگاه	دیدبانی	شبیه‌سازی	تفاوت	RMSE %	RMSE	R ²	T	ME	E
	Station	Observation	Simulation	Difference						
کالیبراسیون Calibrated	اردبیل Ardebil	26.7	26	0.7	3.8	1	0.92	0.81	3.8	0.88
	تبریز Tabriz	27	25.7	1.3	3.7	1	0.99	0.81	3.7	0.5
	سنندج Sanandaj	30.7	29	1.7	4.6	1.4	0.99	0.42	6.5	0.54
	شهرکرد Shahrekord	28.3	27.7	0.6	2.3	0.65	0.88	0.58	3.5	0.36
	شیراز Shiraz	27.3	26.3	1	3.8	1	0.99	0.46	4	0.33
	اصفهان Esfahan	29	28.5	0.5	1.3	0.38	0.96	0.73	2.1	0.5
	همدان Hamedan	27.6	27	0.6	2.5	0.7	0.99	0.49	3.9	0.32
	جیرفت Jiroft	35.3	35	0.3	4.9	1.7	0.75	0.72	5.7	0.62
	کهنوج Kahnuoj	34.4	33.1	1.3	3.9	1.3	0.81	0.4	5.8	0.23
	منوجان Manuojan	32.3	33	0.7	2.5	0.82	0.78	0.98	3.1	0.98
	اردبیل Ardebil	27.5	25.5	2	3.3	0.9	1	0.96	4.4	0.6
	تبریز Tabriz	27.5	26.3	1.2	3.4	0.95	1	0.94	4.7	0.4
اعتبارسنجی Validation	سنندج Sanandaj	29.5	28.2	1.3	3.2	0.92	1	0.87	4.4	0.4
	شهرکرد Shahrekord	28	27	1	2.1	0.58	1	0.68	2.8	0.3
	شیراز Shiraz	27.5	26	1.5	4.7	1.3	1	0.49	7.3	0.3
	اصفهان Esfahan	30	29.4	0.5	2.8	0.77	1	0.95	3.6	0.8
	همدان Hamedan	27.5	27.4	0.1	5.4	1.3	1	0.3	6.7	0.96
	جیرفت Jiroft	34.5	34.4	0.1	2.6	0.9	1	0.96	3.47	0.6
	کهنوج Kahnuoj	34.5	34.4	0.15	0.37	0.13	1	0.86	0.58	0.4
	منوجان Manuojan	34	33.5	0.5	3.8	1.3	1	0.7	5.9	0.5



شکل ۳- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برای مرحله‌ی گلدهی گیاه سیب‌زمینی (داده‌های سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای مرحله‌ی کالیبراسیون و داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای مرحله‌ی اعتبارسنجی)، خط یک به یک نیز در شکل نشان داده شده است.

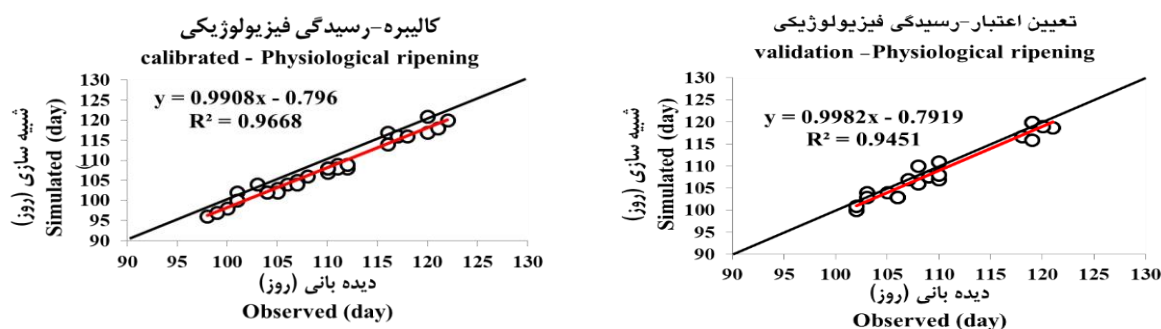
Figure 3- Comparison of simulated values with measured values for the flowering stage of potato plants (Data from 2010, 2011 and 2013 for the calibration stage and data from 2012 and 2014 for the validation stage), the one-to-one line is also shown in the figure.

ایستگاه منوجان با ۰/۵۸ روز به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار RMSE بدست آمد (جدول ۸). حداکثر انحراف (RMSEn) در مرحله‌ی رسیدگی بطور متوسط ۲/۱۳ درصد در مرحله‌ی کالیبراسیون و در مرحله اعتبارسنجی ۱/۵ درصد محاسبه شد (جدول ۸). در شکل ۴ مقایسه‌ی مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل برای مرحله‌ی فنولوژیکی سبزشدن تا رسیدگی نشان داده شده است. نتایج آزمون T در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده نزدیک به مقادیر واقعی است. مقدار ضریب تبیین برای مرحله‌ی رسیدگی بطور متوسط ۰/۸۵، در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل محاسبه گردید. نتایج حاصل از ارزیابی ضریب کارایی در مرحله‌ی کالیبراسیون و اعتبارسنجی حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است. مقادیر شاخص حداکثر خطا ME نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی مرحله رسیدگی گیاه سیب‌زمینی است (جدول ۸).

مقدار ضریب تبیین برای مرحله‌ی گلدهی بطور متوسط ۰/۸۹ در مرحله‌ی کالیبراسیون مدل محاسبه گردید. نتایج حاصل از ارزیابی ضریب کارایی در مرحله‌ی کالیبراسیون حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است. مقادیر شاخص حداکثر خطا ME نشان از دقت مدل در شبیه‌سازی مرحله گلدهی گیاه سیب‌زمینی است (جدول ۷).

طول دوره سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی

بطور متوسط مقدار جذر میانگین مربعات خطا RMSE برای مرحله فنولوژی سبزشدن تا رسیدگی ۲/۳۴ روز در مرحله کالیبراسیون (۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲) و ۱/۶۴ روز در مرحله اعتبارسنجی (۱۳۹۱ و ۱۳۹۳) مدل به‌دست آمد. در ایستگاه جیرفت با ۳/۵۶ روز بیشترین میزان خطا و در ایستگاه اردبیل با ۱/۴ روز کمترین خطا در مرحله کالیبراسیون محاسبه شد. در مرحله اعتبارسنجی نیز ایستگاه جیرفت با ۴/۹ روز و



شکل ۴- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برای مرحله‌ی رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه سیب‌زمینی (داده‌های سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای مرحله‌ی کالیبراسیون و داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای مرحله‌ی اعتبارسنجی)، خط یک به یک نیز در شکل نشان داده شده است.

Figure 4- Comparison of simulated values with measured values for the physiological maturity stage of potato plants (Data from 2010, 2011 and 2013 for the calibration stage and data from 2012 and 2014 for the validation stage), the one-to-one line is also shown in the figure

جدول ۸- ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی مرحله‌ی رسیدگی گیاه سیب‌زمینی با استفاده از شاخص‌های آماری
Table 8- Evaluation of the WOFOST model in simulating the potato plant maturity stage using statistical indicators

Table 6- Evaluation of the WOI CSI model in simulating the potato plant maturity stage using statistical indicators										
ایستگاه Station	دیدبانی Observation	شبیه سازی Simulation	تفاوت Difference	RMSE %	RMSE	R ²	T	ME	E	
کالیبراسیون Calibrated	اردبیل Ardebil	118.3	117.7	0.7	1.2	1.4	0.86	0.74	1.7	0.6
	تبریز Tabriz	107.3	105	2.3	2.2	2.4	0.96	0.36	2.8	0.45
	سنندج Sanandaj	107	104.7	2.3	2.2	2.4	0.96	0.4	2.8	0.61
	شهرکرد Shahreکرد	120	118	2	1.8	2.2	0.77	0.36	2.5	0.57
	شیراز Shiraz	110.3	107.7	2.7	2.4	2.7	0.88	0.15	2.7	0.1
	اصفهان Esfahan	112.7	110.7	2	2.6	2.9	0.76	0.6	3.5	0.68
	همدان Hamedan	115.7	113.3	3.3	2	2.4	0.98	0.54	2.6	0.83
	جیرفت Jiroft	103.7	110.3	4	3.4	3.6	0.81	0.3	4.8	0.52
	کهنوج Kahnuoj	101	100	1	1.7	1.7	0.72	0.94	2.5	0.92
	منوجان Manuojan	101.3	99.7	1.7	1.7	1.7	0.95	0.46	2	0.6
	اردبیل Ardebil	119.5	117.5	2	0.83	0.99	1	0.86	1.2	0.8
	تبریز Tabriz	108.5	107.5	1	1.1	1.2	1	0.6	1.8	0.56
	سنندج Sanandaj	107	106.5	0.5	1.9	2.1	1	0.9	2.8	0.5
	شهرکرد Shahreکرد	120	119.3	0.65	1.2	1.5	1	0.64	1.9	0.35
اعتبار سنجی Validation	شیراز Shiraz	108	105	3	2.3	2.4	1	0.4	2.8	0.25
	اصفهان Esfahan	109.5	109.3	0.2	0.91	0.99	1	0.92	1.3	0.2
	همدان Hamedan	118.5	118.5	0.1	0.76	0.9	1	0.96	1	0.6
	جیرفت Jiroft	105	99.5	5.5	4.7	4.9	1	0.47	7.6	0.39
	کهنوج Kahnuoj	102.5	102.4	0.15	0.92	0.94	1	0.93	1.3	0.4
	منوجان Manuojan	104	103.5	0.5	0.55	0.58	1	0.7	0.96	0.5

کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM

عملکرد مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای اقلیمی بوسیله‌ی شاخص‌های آماری (جدول ۹) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب تبیین R² در همه موارد از مقدار قابل توجهی برخوردار است (بالای ۰/۹۹). حداکثر خطا (ME) برای شبیه‌سازی

دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی بطور میانگین برای هر ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه به ترتیب ۱/۳، ۰/۲۵، ۱۳/۶، ۷/۳، ۵ و ۲/۳ بدست آمد که نشان از خطای بیشتر شبیه سازی بارش نسبت به پارامترهای دیگر می‌باشد. شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبیه‌سازی بارش نیز نسبت به دیگر

پارامترها به مراتب بیشتر بوده (۱/۱) و خطای بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به نتایج **جدول ۹** توانایی مدل SDSM در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی تأیید شده ولی با این حال مدل در شبیه‌سازی بارش دقت کمتری را نشان می‌دهد که با یافته‌های محققین (Jafarpour, 2016; Nazari, Taheriun, & Ahmadi, 2015;)

(Tai Samiromi *et al.*, 2014) مطابقت دارد. در ادامه نتایج بدست آمده از ارزیابی مدل SDSM در **جدول ۹**، ارائه شده است. در **جدول ۱۰**، متغیرهای بزرگ مقیاس (پیش‌بینی کننده) استفاده شده مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای انتشار RCP برای دوره مطالعاتی آینده به‌عنوان نمونه در ایستگاه اصفهان ذکر شده است.

جدول ۹- کارایی مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش (P) و میانگین دمای حداقل (Tmin) و حداکثر (Tmax) در دوره دیدبانی با داده‌های NCEP
Table 9- Efficiency of the SDSM model in simulating precipitation (P) and average minimum (Tmin) and maximum temperatures (Tmax) during the observation period with NCEP data

ایستگاه Station	متغیر Variable	معیار دقت Accuracy criteria							
		درصد خطا Percentage error	Ens	R ²	RMSE%	RMSE	E	ME	T
اردبیل Ardebil	دمای حداقل T-min	-0.35	0.99	1	0.97	0.02	0.99	2.1	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.04	0.99	1	0.2	0.03	0.99	0.4	0.99
	بارش Precipitation	-3.76	0.99	0.99	0.56	1.65	0.99	16.3	0.92
	سرعت باد FF	0.3	0.99	0.99	0.2	0.009	0.98	0.3	0.93
	رطوبت نسبی HUM	-0.003	0.99	1	0.65	0.001	0.99	0.03	0.99
	ساعات آفتابی SUN	0.1	0.99	0.99	0.08	0.05	0.98	0.1	0.92
	دمای حداقل T-min	0.15	0.99	1	0.4	0.03	1	1	0.99
	دمای حداکثر T-max	0.006	0.99	1	0.16	0.03	1	0.34	0.99
	بارش Precipitation	-1.4	0.99	0.99	0.19	0.5	0.99	5.96	0.96
	سرعت باد FF	0.08	0.99	0.99	0.06	0.003	0.98	0.08	0.97
تبریز Tabriz	رطوبت نسبی HUM	-0.03	0.99	0.99	0.02	0.01	0.97	0.03	0.95
	ساعات آفتابی SUN	-0.1	0.99	0.99	0.07	0.005	0.94	0.1	0.92
	دمای حداقل T-min	-0.004	0.99	1	0.5	0.03	0.99	1.2	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.05	0.99	1	0.15	0.03	0.99	0.4	0.99
	بارش Precipitation	-0.99	0.99	0.99	0.26	1.2	1	6.7	0.98
	سرعت باد FF	-0.3	0.99	0.99	0.2	0.004	0.97	0.3	0.97
	رطوبت نسبی HUM	-0.7	0.99	0.99	5.4	0.6	0.98	7.7	0.95
	ساعات آفتابی SUN	0.7	0.99	0.99	1.8	0.1	0.98	2.5	0.98
	دمای حداقل T-min	-0.004	0.99	1	0.5	0.03	0.99	1.2	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.05	0.99	1	0.15	0.03	0.99	0.4	0.99
سنندج Sanandaj	بارش Precipitation	-0.99	0.99	0.99	0.26	1.2	1	6.7	0.98
	سرعت باد FF	-0.3	0.99	0.99	0.2	0.004	0.97	0.3	0.97
	رطوبت نسبی HUM	-0.7	0.99	0.99	5.4	0.6	0.98	7.7	0.95
	ساعات آفتابی SUN	0.7	0.99	0.99	1.8	0.1	0.98	2.5	0.98
	دمای حداقل T-min	-0.004	0.99	1	0.5	0.03	0.99	1.2	0.99

ایستگاه Station	متغیر Variable	معیار دقت Accuracy criteria							
		درصد خطا Percentage error	E _{ns}	R ²	RMSE%	RMSE	E	ME	T
همدان Hamedan	دمای حداقل T-min	0.3	0.99	1	1.8	0.04	1	4.6	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.03	0.99	1	0.15	0.03	0.99	0.3	0.99
	بارش Precipitation	-2.5	0.99	0.99	0.31	1.03	0.99	9.87	0.93
	سرعت باد FF	-2.9	0.99	0.99	10.7	0.3	0.97	15.3	0.92
	رطوبت نسبی HUM	-1.9	0.99	0.99	6.4	0.4	0.99	9.1	0.94
	ساعات آفتابی SUN	1.6	0.99	0.99	4.4	0.3	0.98	6.2	0.95
اصفهان Esfahan	دمای حداقل T-min	-0.54	0.99	1	0.18	0.02	0.99	0.46	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.37	0.99	1	0.15	0.04	0.99	0.3	0.99
	بارش Precipitation	-2.37	0.99	0.99	0.49	0.5	0.99	12.3	0.94
	سرعت باد FF	1.3	0.99	0.99	2.1	0.3	0.99	3.9	0.97
	رطوبت نسبی HUM	2	0.99	0.99	4.1	0.4	0.99	2.8	0.98
	ساعات آفتابی SUN	0.2	0.99	1	0.1	0.01	1	0.2	0.99
شهرکرد Shahrekord	دمای حداقل T-min	0.4	0.99	1	1.1	0.03	1	2.5	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.004	0.99	1	0.06	0.01	1	0.13	0.99
	بارش Precipitation	-2.8	0.99	0.99	0.41	1.3	0.99	14.05	0.94
	سرعت باد FF	2	0.99	0.99	1.4	0.2	0.99	2	0.97
	رطوبت نسبی HUM	-1	0.99	0.99	0.7	0.33	0.99	10	0.96
	ساعات آفتابی SUN	2.5	0.99	0.99	1.8	0.2	1	2.5	0.99
همدان Hamedan	دمای حداقل T-min	0.13	0.99	1	0.2	0.02	1	0.5	0.99
	دمای حداکثر T-max	0.07	0.99	1	0.1	0.03	1	0.24	0.99
	بارش Precipitation	-2.48	0.99	0.99	0.34	1.2	0.99	10.7	0.96
	سرعت باد FF	-1.9	0.99	0.99	13.6	0.6	0.99	19.2	0.94
	رطوبت نسبی HUM	0.9	0.99	0.99	0.7	0.3	1	0.8	0.99
	ساعات آفتابی SUN	2.3	0.99	0.99	1.7	0.15	0.99	2.4	0.98

ایستگاه Station	متغیر Variable	معیار دقت Accuracy criteria							
		درصد خطا Percentage error	E _{ns}	R ²	RMSE%	RMSE	E	ME	T
جیرفت Jiroft	دمای حداقل T-min	-0.02	0.99	1	0.13	0.02	0.99	0.21	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.02	0.99	1	0.1	0.03	0.99	0.24	0.99
	بارش Precipitation	-4.5	0.99	0.99	0.69	1.2	0.99	21	0.92
	سرعت باد FF	5.3	0.99	0.99	16.3	0.2	0.99	23	0.93
	رطوبت نسبی HUM	4.5	0.99	0.99	6.3	1.4	0.97	8.9	0.96
	ساعات آفتابی SUN	3.4	0.99	0.99	2.4	0.2	0.98	3.4	0.95
	دمای حداقل T-min	-0.03	0.99	1	0.1	0.02	0.99	0.2	0.99
	دمای حداکثر T-max	0.004	0.99	1	0.05	0.02	1	0.09	0.99
	بارش Precipitation	-1.7	0.99	0.99	0.37	0.68	0.99	10.8	0.97
	سرعت باد FF	-1.4	0.99	0.99	10.2	0.6	0.99	4.4	0.98
کهنوج Kahnuoj	رطوبت نسبی HUM	-2.6	0.99	0.99	4.4	1.7	0.99	6	0.98
	ساعات آفتابی SUN	2.7	0.99	0.99	2	0.2	0.99	2.6	0.98
	دمای حداقل T-min	-0.04	0.99	1	0.07	0.01	1	0.1	0.99
	دمای حداکثر T-max	-0.04	0.99	1	0.1	0.03	0.99	0.12	0.99
	بارش Precipitation	-1.77	0.99	0.99	0.77	1.58	0.99	28	0.97
	سرعت باد FF	-2.9	0.99	0.99	3.1	0.2	0.99	4.3	0.96
	رطوبت نسبی HUM	-3.6	0.99	0.99	3.4	1.4	0.99	4.7	0.96
	ساعات آفتابی SUN	3	0.99	0.99	2.1	0.2	0.99	3	0.95
	بارش Precipitation	-1.77	0.99	0.99	0.77	1.58	0.99	28	0.97
	سرعت باد FF	-2.9	0.99	0.99	3.1	0.2	0.99	4.3	0.96
منوجان Manuojan	رطوبت نسبی HUM	-3.6	0.99	0.99	3.4	1.4	0.99	4.7	0.96
	ساعات آفتابی SUN	3	0.99	0.99	2.1	0.2	0.99	3	0.95
	بارش Precipitation	-1.77	0.99	0.99	0.77	1.58	0.99	28	0.97
	سرعت باد FF	-2.9	0.99	0.99	3.1	0.2	0.99	4.3	0.96
	رطوبت نسبی HUM	-3.6	0.99	0.99	3.4	1.4	0.99	4.7	0.96

جدول ۱۰- متغیرهای پیش‌بینی کننده بزرگ مقیاس NCEP استفاده شده در شبیه‌سازی داده‌های دما و بارش در ایستگاه اصفهان

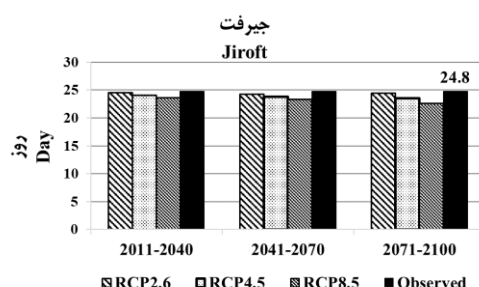
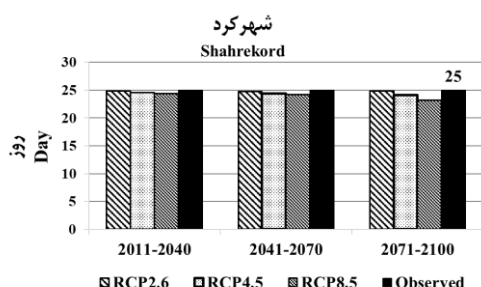
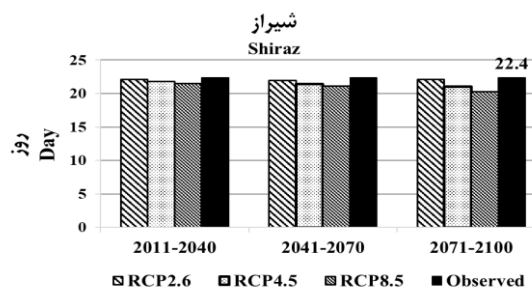
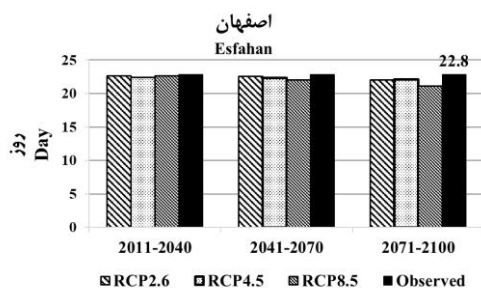
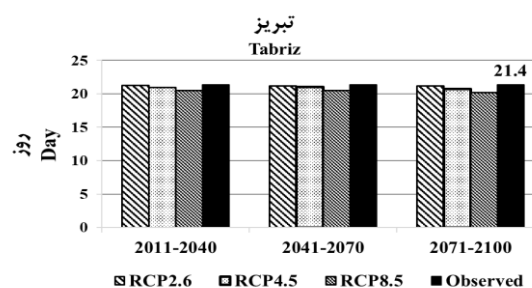
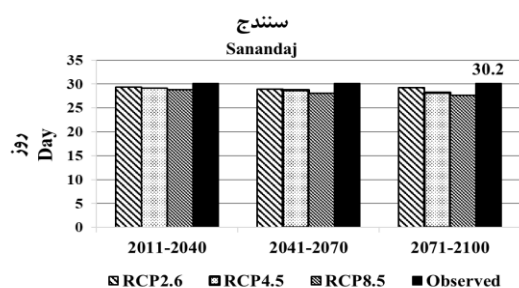
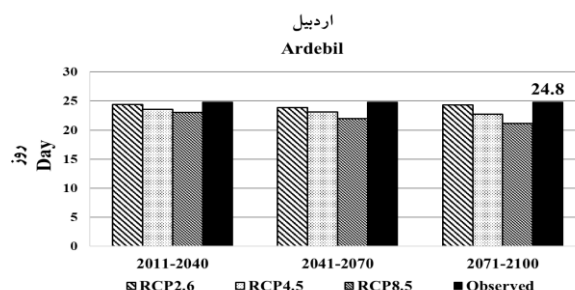
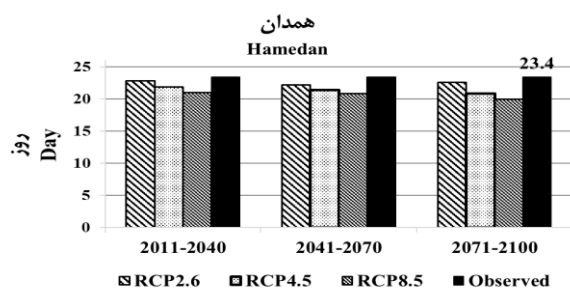
Table 10- NCEP large-scale predictor variables used in simulating temperature and precipitation data at Isfahan station

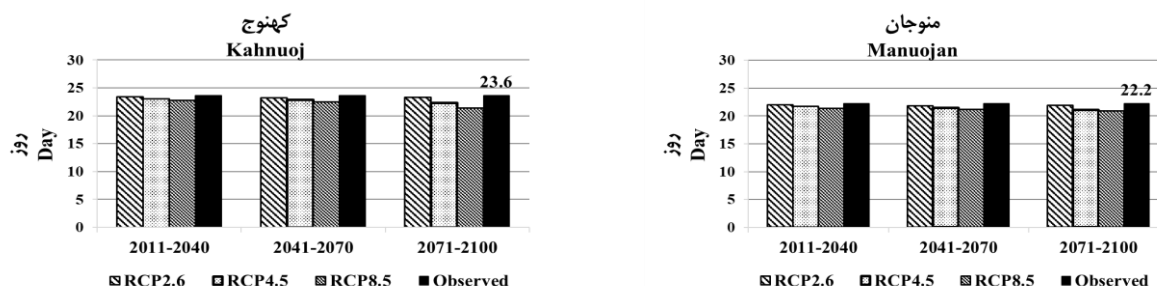
شهر اصفهان Esfahan City	پارامترهای NCEP Parameters NCEP
دمای حداقل T-min	P500, p1-u, mslp, p8-u, s500, shum, temp
دمای حداکثر T-max	Mslp, p500, p8-u, temp
بارش Precipitation	Prcp, mslp, s500, temp
سرعت باد FF	Mslp, p850, s00,temp, p1zh, p8-z
رطوبت نسبی HUM	Mslp, p1-z, p500, p850, temp, shum
ساعات آفتابی SUN	Mslp, p500, p8-u, s500, temp

بدست آمد. نتایج شبیه‌سازی مراحل مختلف فنولوژیکی، از کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی در شرایط پتانسیل در مناطق مورد مطالعه تحت سناریوهای RCP، نشان داد که طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در شرایط اقلیمی آینده کاهش خواهد یافت.

شبیه‌سازی طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی مراحل رشد و عملکرد غده سیب زمینی با استفاده مدل گردش کلی CanESM2، تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای مناطق تحت مطالعه در سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ شبیه‌سازی دما (کمینه دما و بیشینه دما)، بارش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت متوسط باد انجام گرفت. با کارگیری مدل شبیه‌ساز رشد ونمو WOFOST، شبیه‌سازی قابل قبولی از مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی





شکل ۵- شبیه‌سازی مدت زمان کاشت تا سبز شدن گیاه سیب‌زمینی بر اساس مدل CanESM2 برای سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰، تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

Figure 5- Simulation of the time from planting to emergence of potato plants based on the CanESM2 model for three climate periods 2011-2040, 2070-2041, and 2071-2100, under RCP scenarios using the WOFOST model

سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ در مناطق مورد مطالعه انجام شده است (جدول ۳). بنابراین موضوع تغییر تاریخ کاشت یکی از آثار گرمایش جهانی و راهکار سازگاری با پدیده گرمایش جهانی می‌باشد. در شکل ۵ شبیه‌سازی طول دوره کاشت تا سبز شدن گیاه سیب‌زمینی در سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوهای RCP مشاهده می‌شود.

شبیه‌سازی مرحله فنولوژیکی سبز شدن تا گلدهی

گلدهی که اصلی‌ترین مرحله‌ی نمو گیاهان است، توسط دمای محیط تنظیم می‌شود. بنابراین افزایش دما در شرایط تغییر اقلیم الگوی گلدهی گیاهان را به شدت تحت تأثیر قرار خواهد داد (Bradley, Leopold, Ross, & Huffaker, 1999). نتایج شبیه‌سازی مرحله فنولوژیکی سبز شدن تا گلدهی با استفاده از مدل گردش کلی CanESM2 تحت سناریوهای RCP انجام شد (شکل ۶). نتایج حاصله بیانگر کاهش طول دوره‌ی گلدهی در مناطق مورد مطالعه تحت سناریوی RCP است. طول دوره سبز شدن تا گلدهی بطور میانگین بین ۰/۶ روز تا ۲/۴۲ روز کاهش مشاهده شد. بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ در مناطقی نظیر اردبیل و همدان به میزان ۴/۴ روز مشاهده شد. کمترین کاهش در سناریوی RCP8.5 در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ در ایستگاه اصفهان با ۰/۱۸ روز و سناریوی RCP4.5 در دوره‌ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ در ایستگاه شهرکرد به میزان ۰/۲ روز مشاهده شد (شکل ۶). حداکثر کاهش طول دوره گلدهی در این دو ایستگاه در سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی سوم به ترتیب ۱/۶ و ۱/۹ روز برای ایستگاه اصفهان و شهرکرد مشاهده می‌شود. این درحالی است که کمترین میزان کاهش دوره گلدهی در ایستگاه اردبیل و همدان به ۱/۱ و ۱/۶ روز در سناریوی RCP2.6 در دوره‌ی اول می‌رسد (شکل ۶). بطور متوسط میزان کاهش دوره‌ی گلدهی در سناریوی RCP2.6 بین ۰/۷ تا ۰/۸۲ روز، در سناریوی RCP4.5 در محدوده‌ی ۱/۰۱ تا ۱/۵۸ روز و در سناریوی RCP8.5 در محدوده‌ی

شبیه‌سازی مرحله فنولوژیکی کاشت تا سبز شدن

بازه زمانی تاریخ کاشت گیاهان معمولاً توسط دو عامل اقلیمی دما و بارش مشخص می‌شود. بنابراین بررسی این عوامل اقلیمی در دوره رشد گیاهان از اهمیت بالایی برخوردار است. مرحله کاشت تا سبز شدن نسبت به سایر مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی کمتر تحت تأثیر تغییر اقلیم و اثرات ناشی از آن قرار می‌گیرد. دلیل این امر تغییر تاریخ کاشت و شرایط خنک آب و هوایی در ابتدای زمان کاشت می‌باشد. البته قابل ذکر است که در مناطق گرمسیری که دارای زمستان‌های معتدل هستند و کشت پاییزه سیب‌زمینی انجام می‌شود، مرحله‌ی کاشت تا سبز شدن بیشتر از سایر مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی، تحت تأثیر اثرات ناشی از گرمایش جهانی خواهد بود. بر اساس نتایج شبیه‌سازی در تمام مناطق مورد مطالعه در دوره اقلیمی آینده، طول دوره کاشت تا سبز شدن بطور میانگین بین ۰/۲۷ روز تا ۲/۳ روز کاهش مشاهده شد. بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ بویژه در مناطق سردسیر کشور نظیر اردبیل، سنندج و همدان به ترتیب با ۳/۷ روز، ۳/۵ روز و ۳/۴ روز مشاهده شد. کمترین کاهش مربوط به سناریوی RCP2.6 و در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ است، بطوری که در بعضی از مناطق مانند تبریز، اصفهان و شهرکرد میزان کاهش به کمتر از ۰/۲ روز می‌رسد. تا کنون تأثیر منفی کاهش طول دوره کاشت تا سبز شدن به علت گرمایش جهانی بر عملکرد نهایی غده‌های سیب‌زمینی گزارش نشده است (Torkaman, 2016). اما این موضوع می‌تواند به عنوان یک مزیت نسبی در مواجهه با سرمای ابتدای فصل کاشت در کشت بهاره محسوب شود با این وجود افزایش دما، ناشی از تغییر اقلیم طول دوره رشد را در مناطق گرمسیری به شدت کاهش خواهد داد. کاهش این دوره از سناریوی RCP2.6 به سناریوی RCP8.5 همراه با افزایش شدت واداشتهای تابشی، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ مشهودتر می‌باشد. بطور کلی شدت کاهش این مرحله از رشد گیاه، به تاریخ کاشت وابسته است. تاریخ‌های کاشت به کار رفته در شبیه‌سازی مدل در واقع تاریخ کاشت‌های متداولی است که توسط کشاورزان طی

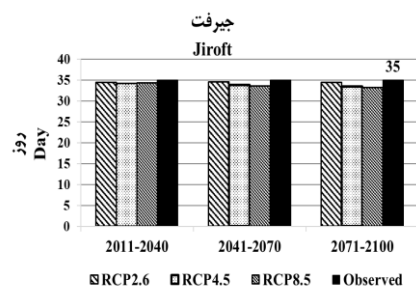
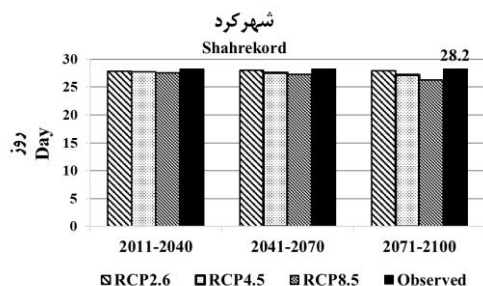
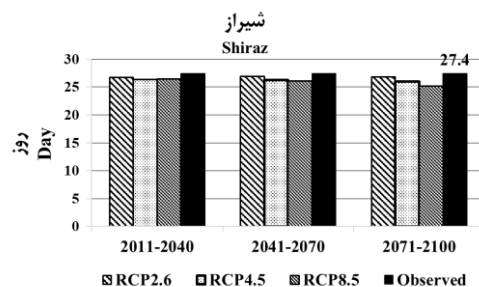
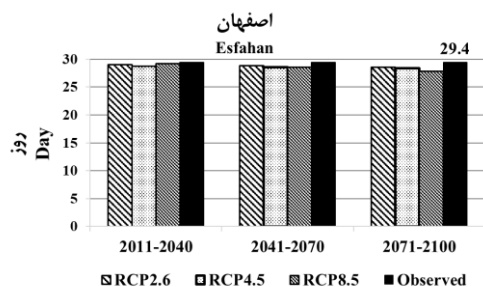
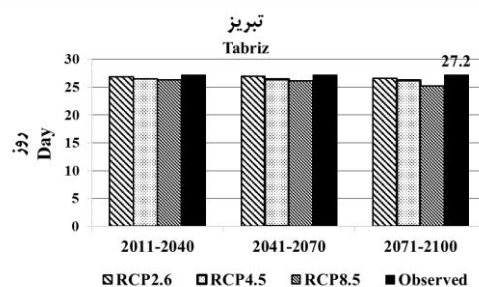
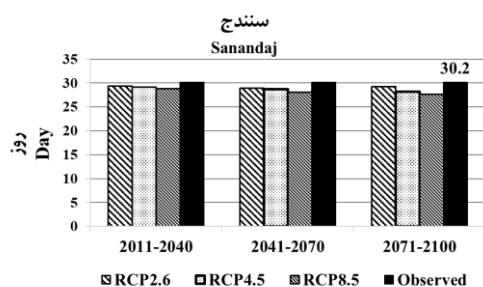
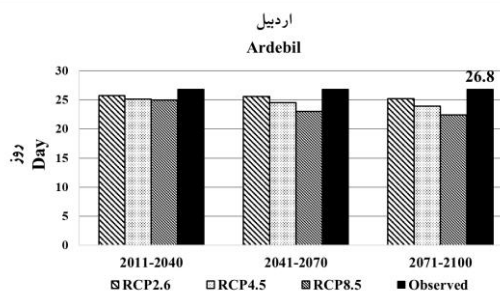
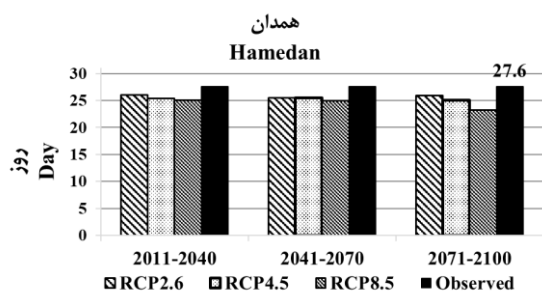
۱/۰۵ تا ۲/۴۲ روز است.

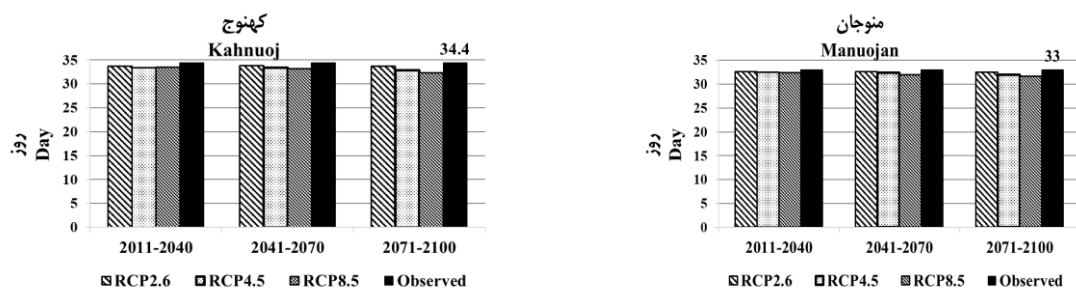
شبیه‌سازی مرحله‌ی فنولوژیکی سبزشدن تا رسیدگی

فیزیولوژیکی

مرحله‌ی سبزشدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی غده‌ها به علت طولانی‌تر بودن آن و همچنین همراه شدن این مرحله با روند افزایش دمای هوا، بیشترین کاهش طول دوره در این مرحله اتفاق افتاد. به‌طور

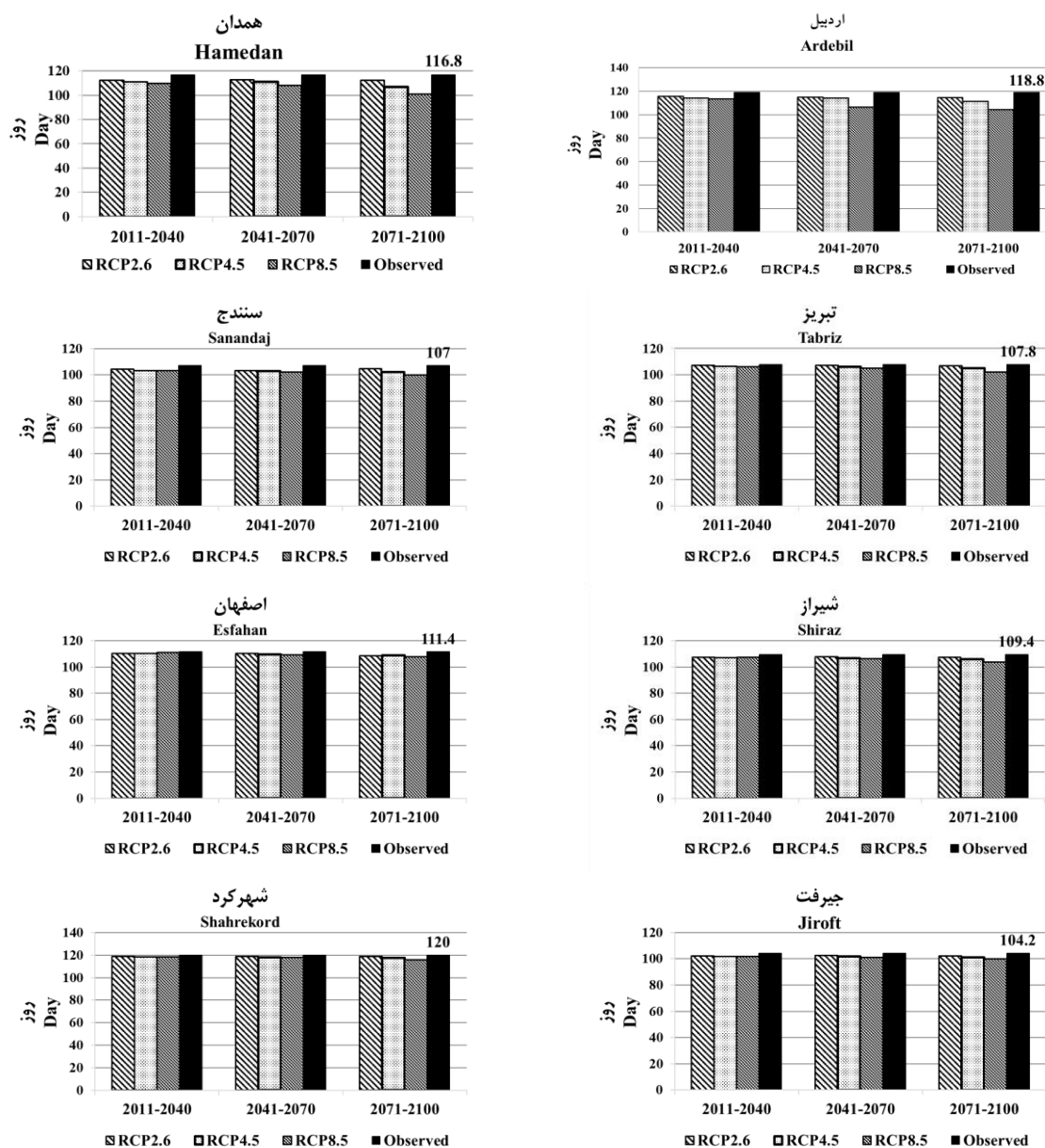
متوسط میزان کاهش طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی غده‌ها برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه بین ۱/۹۶ روز در سناریوی RCP2.6 در دوره‌ی اول و ۶/۷ روز در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم قرار گرفته است (شکل ۷). بیشترین کاهش طول این دوره در ایستگاه همدان با ۱۵/۸ روز و ایستگاه اردبیل با ۱۴/۶ روز هر دو در سناریوی RCP8.5 و در دوره‌ی سوم مشاهده شد. کمترین میزان کاهش طول دوره‌ی رسیدگی فیزیولوژیکی غده در ایستگاه تبریز به میزان ۰/۶ روز در سناریوی RCP2.6 در دوره‌ی اول مشاهده شد (شکل ۷).

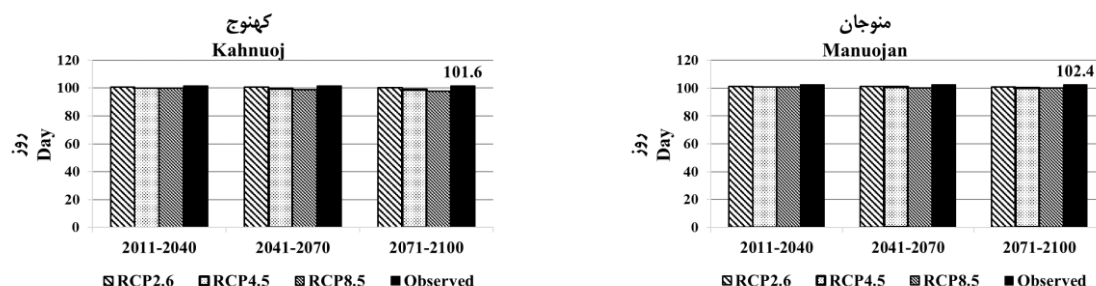




شکل ۶- شبیه‌سازی مدت زمان سبزشدن تا گلدهی گیاه سیب‌زمینی بر اساس مدل CanESM2 برای سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۷۰، ۲۰۷۰-۲۱۰۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱، تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

Figure 6- Simulation of the duration of germination to flowering of potato plant based on the CanESM2 model for three climate periods 2011-2040, 2070-2041 and 2071-2100, under RCP scenarios using the WOFOST model





شکل ۷- شبیه‌سازی مدت زمان سبزشدن تا رسیدگی گیاه سیب‌زمینی بر اساس مدل CanESM2 برای سه دوره اقلیمی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۷۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰، تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST

Figure 7- Simulation of the duration of germination to maturity of potato plant based on the CanESM2 model for three climate periods 2011-2040, 2070-2041 and 2071-2100, under RCP scenarios using the WOFOST model

(Sahrish et al., 2022) به اثرات گرم شدن آب و هوا بر فنولوژی سیب‌زمینی در کشور پاکستان در دو کشت بهاره و پاییزه پرداخته شد. نتایج حاکی از افزایش دما و کاهش مدت زمان مراحل رشد در بهار و پاییز می‌باشد. پالاتو و همکاران (Pulatov et al., 2015) با مطالعه اثرات بالقوه گرم شدن هوا بر روی فنولوژی محصول سیب‌زمینی و تنش دمایی در شمال اروپا نشان دادند که آب و هوای گرم‌تر و کاشت زودتر ممکن است برداشت را جلو بیاورد.

نتیجه‌گیری

از مصادیق بارز تغییر اقلیم، افزایش دما و کاهش بارش در اقلیم آینده است. بنابراین هرگونه تغییر در وضعیت اقلیم جهان، به‌طور مستقیم بر تولید محصولات کشاورزی و در نتیجه بر موضوع تأمین امنیت غذایی در سطح جهان تأثیرگذار است. گیاه سیب‌زمینی بعد از گندم، برنج و جو بالاترین سطح تولید را در جهان داراست و در داخل کشور رتبه سوم تولیدات کشاورزی را به خود اختصاص داده است. در همین راستا در این مطالعه به ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر طول مراحل فنولوژیکی سیب‌زمینی در ۱۰ ایستگاه اردبیل، تبریز، سمنان، شهرکرد، اصفهان، همدان، شیراز، جیرفت، کهنوج و منوجان، که از مراکز اصلی تولید سیب‌زمینی در کشور محسوب می‌شوند، در آینده پرداخته شد. برای ایستگاه‌های مذکور، در این مطالعه جهت شبیه‌سازی اقلیم آینده، از داده‌های مدل گردش کلی CanESM2 تحت سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، برای دوره ۲۰۱۱-۲۱۰۰ استفاده گردید. برای ریزگردانی خروجی مدل CanESM2 از نرم‌افزار آماری SDSM و برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی از مدل رشد و نمو WOFOST استفاده شد. نتایج حاصل از تعیین اعتبار مدل SDSM طی دوره واسنجی نشان داد که استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده برای برآورد طول دوره‌های فنولوژیکی سیب‌زمینی در دوره‌های

این درحالی است که کاهش طول این دوره در دو ایستگاه اردبیل و همدان در سناریوی RCP2.6 و دوره‌ی اول به‌ترتیب ۳/۱۳ و ۴/۲ روز می‌باشد. در سایر ایستگاه‌ها (بدون احتساب ایستگاه اردبیل و همدان) بطور متوسط بین ۱/۳ تا ۴/۶ روز کاهش در طول این دوره مشاهده شد.

بحث

مقایسه نتایج بدست آمده از این پژوهش با مطالعات انجام گرفته در مورد اثرات تغییر اقلیم بر گیاه سیب‌زمینی حاکی از کاهش طول دوره‌های فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی در دوره‌های آتی تحت تأثیر شرایط تغییر اقلیم می‌باشد که همسو با نتایج بدست آمده از محققین (Sahrish et al., 2022; Pulatov et al., Torkaman, 2016;) می‌باشد. در این مطالعه دمای حداقل به‌طور میانگین بین ۰/۱ تا ۲/۹۹ درجه سانتی‌گراد و حداکثر دما به‌طور میانگین بین ۰/۱۷ تا ۲/۳ درجه سانتی‌گراد افزایش دما نشان می‌دهد. طول دوره کاشت تا سبز شدن بطور میانگین بین ۰/۲۷ روز تا ۲/۳ روز، طول دوره سبز شدن تا گلدهی بطور میانگین بین ۰/۶ روز تا ۲/۴۲ روز و دوره رسیدگی فیزیولوژیکی بین ۲ تا ۶/۷ روز کاهش مشاهده شد. (Torkaman, 2016) با به کارگیری دو مدل GFDL-ESM2g و HadGEM2-es و سناریوهای RCP اثرات تغییر اقلیم بر ویژگی‌های زراعی و تولید سیب زمینی در ایران (همدان، اردبیل، اصفهان، قزوین، کردستان، شیراز، جیرفت، مشهد، گرگان، شاه‌رود و دزفول) مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد افزایش میانگین دمای حداکثر بین ۱/۲ تا ۷/۵ درجه سانتی‌گراد و دمای حداقل بین ۱/۳ تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد خواهد بود و طول دوره فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی بطور متوسط در مرحله سبز شدن به میزان ۳،۲ روز، در مرحله گلدهی به میزان ۳/۲ روز و مدت زمان پر شدن غده‌ها به میزان ۱۰/۳ روز کاهش خواهد یافت. در مطالعه‌ای که توسط

است. با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که طول مراحل فنولوژیک گیاه سیب‌زمینی در مناطق سردسیر کشور بیشتر از مناطق گرمسیر کشور تحت تأثیر اثرات تغییر اقلیم خواهند بود، همچنان که پارامترهای اقلیمی این مناطق تحت تأثیر شرایط گرمایش جهانی بیشترین افزایش دما (حداقل و حداکثر) و بیشترین کاهش بارش را داشتند. ترکمان (Torkaman, 2016) نیز با مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر ویژگی‌های زراعی و تولید سیب‌زمینی در ایران دریافت که همراه با افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر طول مراحل فنولوژیکی سیب زمینی کاهش خواهد یافت که همسو با نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌باشد.

با مطالعه اثرات تغییرات اقلیمی بر طول دوره‌های فنولوژیکی سیب زمینی در مناطق مورد مطالعه و کاهش طول دوره رشد محصول مهمترین گزینه در سازگاری با شرایط اقلیمی آینده، تغییر زمان کاشت و استفاده از رقم‌های زودرس در آینده خواهد بود. با تغییر در تاریخ کاشت سیب‌زمینی در هر دو کشت بهاره و پاییزه به ترتیب ریسک سرمازدگی ناشی از سرمای دیررس بهاره و سرمای زودرس پاییزه، افزایش می‌یابد. بنابراین برای کاهش ریسک سرمازدگی استفاده از رقم‌های زودرس یکی از اقدامات مهم در جهت سازگاری با شرایط اقلیمی آینده باشد.

آتی قابل اعتماد می‌باشند. مقدار ضریب تبیین R^2 در همه‌ی ایستگاه‌ها و برای شش متغیر بالای ۰/۹۹ بود و حداکثر خطا (ME) برای شبیه سازی دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی بطور میانگین برای هر ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه به ترتیب ۱/۳، ۰/۲۵ و ۱۳/۶، ۷/۳، ۵ و ۲/۳ بدست آمد. نتایج واسنجی و تعیین اعتبار مدل WOFOST در بازه زمانی ۱۳۸۹-۱۳۹۳ حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی گیاه سیب‌زمینی (کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی) بود، بطوری که مقدار متوسط ریشه میانگین مربعات خطا (RMSEn) برای هر سه مرحله رشد سیب‌زمینی در مناطق تحت مطالعه زیر ۱۰ درصد بود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد طول دوره کاشت تا سبز شدن بطور میانگین بین ۰/۲۷ روز تا ۲/۳ روز کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش مربوط به سناریوی RCP8.5 در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۷۱ بوژه در مناطق سردسیر کشور نظیر اردبیل، سمنان و همدان به ترتیب با ۳/۷ روز، ۳/۵ روز و ۳/۴ روز مشاهده شد. طول دوره سبز شدن تا گلدهی بطور میانگین بین ۰/۶ روز تا ۲/۴۲ روز کاهش مشاهده شد. به‌طور متوسط کمترین میزان کاهش طول دوره رسیدگی فیزیولوژیکی غده‌ها برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه بین ۱/۹۶ روز در سناریوی RCP2.6 در دوره‌ی اول و ۶/۷ روز در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم قرار گرفته

References

- Adavi, Z. (2013). *Simulating the effects of climate change on potato production in Fereydown area of Isfahan city and providing adaptation solutions based on modeling approaches*. Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. <https://doi.org/10.29252/jcpp.9.2.79>
- Agricultural statistics, crop year 2015-2016, first volume, crops, Ministry of Jihad Agriculture, Information and Communication Technology Center.
- Agovino, M., Casaccia, M., Ciommi, M., Ferrara, M., & Marchesano, K. (2018). Agriculture, climate change and sustainability: the case of EU-28. *Ecol. Indic* 105, 525-543. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.064>
- Arora, V.K., Scinocca, J.F., Boer, G.J., Christian, J.R., Denman, K.L., Flato, G.M., Kharin, V.V., Lee, W.G., & Merryfield, W.J. (2011). Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters*, 38(5), 1-6. <https://doi.org/10.1029/2010gl046270>
- Ashofteh, F. (2012). Climate change impact on the crop water requirement using HadCM3 model in Aidoghmosh irrigation network. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 3(6), 142-151. (In Persian with English abstract)
- Ashraf, B. (2011). *Estimating the water requirement of sugar beet and wheat in the period 2011-2030 using simulated data by the LARS-WG5 model (case study: Razavi Khorasan province)*, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. <https://doi.org/10.52547/fsct.19.124.257>
- Boogaard, H.L., Van Diepen, C.A., Rotter, R.P., Cabrera, J.C.M.A., & Van Laar, H.H. (1998). WOFOST 7.1 User guide for the WOFOST 7.1 Crop Growth Simulation Model 161 and WOFOST Control Center 1.5, Technical Document 52. DLO Winand Staring Center. Wageningen, The Netherlands. <https://doi.org/10.32614/cran.package.rwofost>
- Bradley, N.L., Leopold, A.C., Ross, J., & Huffaker, W. (1999). Phenological changes reflect climate change in Wisconsin: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96, 9701-9704. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.17.9701>
- Carson, D.J. (1999). Climate modelling: achievements and prospects: *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 125, 1-28. <https://doi.org/10.1256/smsqj.55301>
- Davis, K.F., Gephart, J.A., Emery, K.A., Leach, A.M., Galloway, J.N., & D'Odorico, P. (2016). Meeting future food demand with current agricultural resources: *Glob. Environment Change*, 39, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.004>
- Delghandi, M., Massah-Bovani, A.R., Ajorlou, M.J., Broomandnasab, S., & Andarzian, B. (2014). Risk assessment

- of climate change impacts on production and phenology of wheat (case study: Ahvaz Region). *Journal of Water and Irrigation Management*, 4, 161-175. (In Persian with English abstract).
12. Devaux, A., Goffart, J.P., Petsakos, A., Kromann, P., Gatto, M., Okello, J., Suarez, V., & Hareau, G. (2020). Global food security, contributions from sustainable potato agrifood systems. In: Campos, H., Ortiz, O. (Eds.), *The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind*. Springer International Publishing, Cham, 3–35. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5_1
13. Fallah Ghalheri, G.H.A. (2014). Principles and Fundamentals of Meteorology. Mashhad, *Climatology Research Institute*.
14. Ghorbani, K.H., Zakerinia, M., & Hezarjaribi, A. (2013). The effect of climate change on water requirement of soybean in Gorgan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2(1), 60-72. (In Persian with English abstract)
15. Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., & Toulmin, C. (2010). Food security: the Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 80(327), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
16. González-Jiménez, J., Andersson, B., Wiik, L., & Zhan, J. (2023). Modelling potato yield losses caused by *Phytophthora infestans*: Aspects of disease growth rate, infection time and temperature under climate change, *Field Crops Research*, 299, 108977. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108977>
17. Jafarpour, S. (2016). Investigating the effects of climate change on water demand and yield of major crops in Ardabil plain. Master Thesis, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Mohaghegh Ardabili University of Ardabil, Iran. <https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.1>
18. Jianzhao, T., Huizi, B., Shenghai, Z., Dengpan, X., Zheng, T., De, L.L., Bin, W., & Puyu, F. (2024). Adaptations of potato production to future climate change by optimizing planting date, irrigation and fertilizer in the Agro-Pastoral Ecotone of Chin. *Climate Risk Management*, 44, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100604>
19. Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., & Wheeler, T.R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agriculture Systematic*, 155, 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.05.014>
20. Lobell, D.B., & Field, C.B. (2007). Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(1), 1-7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/1/014002>
21. Moradi, R., Koocheki, A., & Nassiri Mahallati, M. (2015). Effect of climate change on maize production and shifting of planting date as adaptation strategy in Mashhad. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 23(4), 111-130. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9410-6>
22. Naresh Kumar, S., Govindakrishnan, P., Swarooparani, D., Nitin, C., Surabhi, J., & Aggarwal, P. (2015). Assessment of impact of climate change on potato and potential adaptation gains in the Indo-Gangetic Plains of India. *International Journal of Plant Production*, 9, 151-170.
23. Nazari, S.H., Taheriun, M., & Ahmadi, A. (2015). Investigation of the effects of climate change on temperature and precipitation in the catchment area of Mahabad Dam (using CanESM2 model), the second national conference on architecture. New Urban Development, National Center of Iranian Architects, Urmia, 5 October 2015.
24. Pradel, W., Gatto, M., Hareau, G., Pandey, S.K., & Bhardway, V. (2019). Adoption of potato varieties and their role for climate change adaptation in India. *Climate Risk Management*, 23, 114-123, <https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.01.001>
25. Pulatov, B., Linderson, M., Hall, K., & Jönsson, A.M. (2015). Modeling climate change impact on potato crop phenology, and risk of frost damage and heat stress in northern Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214(2015), 281-292. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.266>
26. Rezai Zaman, M., & Afrozi, A. (2015). Evaluation of the effects of climate change on crop yield and presenting a strategy for changing the cultivation pattern (case study: Simine River basin). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 4, 51-64. (In Persian with English abstract).
27. Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L.S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>
28. Sahrish, N., Shakeel, A., Ghulam, A., Zartash, F., Sajjad, H., Mukhtar, A., Muhammad, A. K., Ahmad, K., Shah, F., Wajid, N., Sezai, E., Carol Jo, W., & Gerrit, H. (2022). Modeling the impact of climate warming on potato phenology. *European Journal of Agronomy*, 132, 126404. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126404>
29. Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
30. Sayari, N. (2011). *Prediction of changes in temperature and precipitation under global warming and its impact on the water needs of agricultural plants in the Kashf Roud basin*, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
31. Spitters, C.J.T., Toussaint, H.A.J.M., & Goudriaan, J. (1990). Separating the diffuse and direct component of global

- radiation and its implications for modelling canopy photosynthesis. Part I: Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* 38, 217-229. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(86\)90060-2](https://doi.org/10.1016/0168-1923(86)90060-2)
32. Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L.S., Pizzigalli, C., & Lionello, P. (2014). Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 144, 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.019>
33. Taei Semiromi, S., Moradi, H.R., & Khodaghali, M. (2014). Simulation and prediction some of climate variable by using multi line SDSM and Global Circulation Models (Case study: Bar Watershed Nayshabour). *Human & Environment*, 39, 1-15.
34. Torkaman, M. (2016). *Effect of warming and future climate change on crop characteristics and potato production in Iran*. Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. <https://doi.org/10.26420/annagriccrops.2022.1109>
35. Thomas, K., Iwan, S., Annemarie, G., Fulco, L., & Teferi, D. (2025). Projected climate change impacts on Potato yield in East Africa. *European Journal of Agronomy*, 166, 127560. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127560>
36. UN. (2015). WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2015. The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. UNESCO, Paris. 2-122. <https://doi.org/10.18356/82cad0af-en>
37. Van Laar, H.H., Goudriaan, J., & van Keulen, H. (1992). Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations (as applied to spring wheat). Simulation Reports CABO-TT 27. CABO-DLO, WAU-TPE, Wageningen.
38. Van Keulen, H., & van Diepen, C.A. (1990). Crop growth models and agroecological characterization. In: Scaife, A. (ed.): Proceedings of the first congress of the European Society of Agronomy, 5-7 December 1990, Paris. CEC, ESA, INRA. session 2:1-16. Paris.
39. Willby, R.L., Dawson, C.W., & Barrow, E.M. (2002). SDSM a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17, 145-157. [https://doi.org/10.1016/s1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/s1364-8152(01)00060-3)