



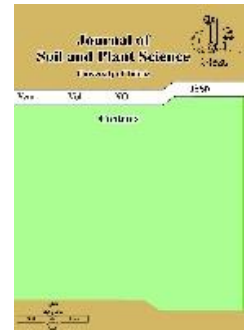
J Soil Plant Sci (Water Soil Sci), 2024, 34(4): 75–90.

DOI: [10.22034/sps.2024.19184](https://doi.org/10.22034/sps.2024.19184)

**Journal of Soil and Plant Science**

Online ISSN: 3092-6106

<https://sps.tabrizu.ac.ir>



Research Article

## Simulation of Potato Tuber Performance under Climate Change Conditions Using the WOFOST Model

Fatemeh Bayatani<sup>1</sup>, Gholamabbas Fallah-Ghalhari<sup>2</sup>

1-Department of Meteorology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: [bayanifateme@gmail.com](mailto:bayanifateme@gmail.com)

2-Corresponding's Author, Department of Geography and Tourism, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran. Email: [Fallah.g@kashanu.ac.ir](mailto:Fallah.g@kashanu.ac.ir) or [ab\\_fa789@yahoo.com](mailto:ab_fa789@yahoo.com)

Received: August 24, 2024

Revised: October 9, 2024

Accepted: October 12, 2024

Published: December 21, 2024

### Extended Abstract

#### Background and Objectives

After wheat, rice and corn, potato is the fourth product in the food basket of human societies, which shows the importance of its role in providing protein and food needs of people. Potatoes contain large amounts of vitamins A, B1, B2, and C along with potassium, phosphorus, and calcium, and consumption of 300 grams of potatoes tuber per day provides more than 50% of the human need for vitamin C and potassium. The World Food and Agriculture Organization (FAO) has introduced potatoes as a product that provides future food security in the world, and the country of Iran, having a diverse climate and with an annual production of five million tons of potatoes, ranks thirteenth in the production of this product in the world. So, in this research, the consequences of climate change on the yield of potato tuber, the statistics of the production values, and the area under cultivation of potatoes were evaluated.

#### Methodology

The data of Ardabil, Tabriz, Shahrekord, Hamadan, Jiroft, Kohnouj, Manojan, Isfahan, Sanandaj, and Shiraz stations in the statistical period of 1982–2015 were used. The mentioned regions are among the main centers of potato production in the Iran and account for 62.7% of the cultivated area and 68.3% of the country's potato production. In this research, the production and performance data of 10 meteorological stations inside Iran were used and the data of the fifth report of the Representative Concentration Pathway scenarios (RCPs) have been used to evaluate the consequences of climate change on potato tuber yield. In order to prepare field data for calibration and determining the validity of the WOFOST model in potential conditions (conditions without water and nutrients restrictions, disease, and weed control) the data of the Agricultural Research Stations of Hamedan, Isfahan, Ardabil, Shiraz, Tabriz, Shahrekord, Jiroft, Kohnouj, Manojan and Sanandaj were collected during 2010-2014 and used as a base or monitoring period. This information includes planting date, phenological stages from planting to germination, germination to flowering, and germination to physiological maturity of the potato plant in each of the regions.

The SDSM statistical model was used for downscaling of CanESM2 model data, and the WOFOST model was used to simulate the performance of the potato tuber. In order to calibrate the WOFOST model using field data, the phenological and performance data in the years of 2010, 2011, and 2013 were used to calibration of the model, and from phenological and performance data in the years of 2012 and 2014 were used to determine the validity of the model. In order to calibrate and determine the validity of the WOFOST model in the study areas, it is first necessary to adjust the potato plant parameters (coefficients) for different climatic conditions. Therefore, the creation of the plant file, which is the most sensitive part of WOFOST model calibration, was done for tuber performance. In this study, WOFOST version 7.1 was used. This model uses

parameters and functions to describe the effects of temperature, radiation and water stress on the main processes of crop growth. The outputs of the model include the final yield, leaf area index, crop growth rate, dry matter accumulation rate in each organ, and development stages with one-day intervals. The calibration of the model and the determination of the coefficients of the model were done in such a way that the expected performance of the tuber was simulated by the WOFOST model. Parameters of specific leaf area as a function of development stage (SLATB), maximum leaf CO<sub>2</sub> assimilation rate as a function of development stage of the crop (AMAXTB), efficiency of conversion into leaves (CVL), efficiency of conversion into roots (CVR), efficiency of conversion into stems (CVS) and Lower threshold temperature for emergence (TBASEM), which were necessary for the simulation of plant function, were calibrated and determined based on the permissible range of model coefficients changes and using resources. Then, in order to simulate the potential performance of the potato plant for all 10 study areas and every five years, with conventional planting dates and also with a range of planting dates (three dates) a total of 150 loads were executed.

## Results

According to the obtained results, the average yield for the 10 studied stations was 46190 kg/ha for the calibration stage and 44434 kg/ha for the validation data. In the model implementation stage, the average yield during five years for the 10 studied stations was 45919 kg/ha for calibration and 43813 kg/ha for the validation stage by the model. Therefore, by evaluating the statistical indicators, the WOFOST model has high accuracy for simulating performance in all regions.

## Conclusion

The results of the simulation of the yield of potato tuber under the future climate conditions indicated a decrease in yield in the studied stations. Thus, the greatest decline in performance was observed in the period of 2071-2099 and under the RCP8.5 scenario. In the studied areas, on average, the highest yield decrease was related to Ardebil station with 2397 kg/ha and Hamedan with 1817 kg/ha, and the lowest decrease in the yield of potato belonged to Sanandaj station with 813 kg/ha and Isfahan station with 982 kg/ha. On average, in the 10 studied areas, a decrease in potato tuber yield was observed by 1436 kg/ha. Reducing the length of the potato ripening period has the biggest contribution in reducing the potato tuber yield. The results obtained from the simulation of the yield of potato tuber showed that in parallel with the increase in temperature, the yield of potato also decreases, so that for one degree Celsius increase in the average annual temperature, the yield of potato will decrease by 3.77%.

**Keywords:** Climate Change, Potato, RCPs Scenarios, Tuber Performance, WOFOST Model.

## Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

**Cite this article:** Bayatani, F. & Fallah-Ghalhari, G. (2024). Simulation of potato tuber performance under climate change conditions using the WOFOST model. *Journal of Soil and Plant Science*, 34(4), 75–90. <https://doi.org/10.22034/sps.2024.19184>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2024 The Authors.  
Publisher: The University of Tabriz

OPEN ACCESS  
JOURNALS



مقاله پژوهشی

## شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل WOFOST

فاطمه بیاتانی<sup>۱</sup>، غلامعباس فلاح قالمهری<sup>۲</sup>✉

۱- گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

رایانامه: [bayatanifateme@gmail.com](mailto:bayatanifateme@gmail.com)

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

رایانامه: [Fallah.g@kashanu.ac.ir](mailto:Fallah.g@kashanu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۱	تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

### چکیده

با توجه به پدیده گرمایش جهانی و اثر آن بر تولید محصولات کشاورزی، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر تولید سیب زمینی در کشور ضروری است. بدین منظور از داده‌های مدل اقلیمی CanESM2، تحت سناریوهای انتشار RCP در مناطق عمده کشت سیب زمینی (اردبیل، تبریز، شهرکرد، همدان، جیرفت، کهنوج، منوجان، اصفهان، سنندج و شیراز) استفاده شد. از مدل آماری SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل CanESM2، و از مدل WOFOST برای شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی استفاده شد. در این مطالعه مدل WOFOST با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ واسنجی و با داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ اعتبارسنجی شد. نتایج به دست آمده از شاخص‌های آماری، نشان از دقت بالای مدل SDSM و مدل WOFOST و مطابقت نتایج واسنجی و اعتبارسنجی با داده‌های دیدبانی بود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی در شرایط اقلیم آینده حاکی از کاهش میزان عملکرد در مناطق مورد مطالعه بود؛ به طوری که بیشترین کاهش عملکرد در دوره سوم و در سناریوی RCP8.5 بود. در مناطق مورد مطالعه به طور میانگین بیشترین و کمترین کاهش میزان عملکرد به ترتیب مربوط به ایستگاه اردبیل با ۲۳۹۷ و سنندج با ۸۱۳ کیلوگرم بر هکتار بود. به طور میانگین، در مناطق مورد مطالعه به میزان ۱۴۶۳ کیلوگرم بر هکتار کاهش عملکرد غده سیب زمینی مشاهده شد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی نشان داد که با افزایش دما، میزان عملکرد غده نیز کاهش می‌یابد، به طوری که به ازای یک درجه سلسیوس افزایش میانگین دمای سالانه، عملکرد غده به میزان ۳/۷۷ درصد کاهش خواهد یافت. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، بهترین راهکار برای انطباق با تغییرات اقلیمی، تغییر تاریخ کشت و انتخاب رقم‌های زودرس برای کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد گیاه سیب زمینی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر اقلیم، سناریوهای RCP، سیب زمینی، عملکرد غده، مدل WOFOST.

استناد به این مقاله: بیاتانی، ف. و فلاح قالمهری، غ. (۱۴۰۳). شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل WOFOST. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۴(۴)، ۷۵-۹۰.

<https://doi.org/10.22034/sps.2024.19184>

## مقدمه

سیب زمینی چهارمین محصول غذایی بزرگ جهان پس از ذرت، گندم و برنج است (FAO, 2016; Tang et al., 2023). چین از سال ۱۹۹۳ بیشترین تولید کننده سیب زمینی بوده است. سطح تولید و سطح زیر کشت سیب زمینی در چین به ترتیب ۲۵/۱ و ۲۹/۶ درصد از کل جهان را تشکیل می‌دهد (FAO, 2016; Li et al., 2022). در سال‌های اخیر، سطح زیر کشت و عملکرد سیب زمینی به دلیل سازگاری گسترده، تغذیه غنی، فرآوری چندمنظوره و پتانسیل زیاد برای افزایش تولید و درآمد، سال به سال افزایش یافته است و نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی و افزایش درآمد کشاورزان داشته است (Wang et al., 2019a; Wang et al., 2019b; FAO, 2022). سیب زمینی به عنوان یک محصول با ریشه کم عمق، هم به زیادی و هم به کمبود آب در خاک حساس است (Nurmanov et al., 2019; King et al., 2020). رشد سریع جمعیت و توسعه اقتصادی، رقابت بین منابع آب را تشدید کرده و سبب کاهش آب آبیاری برای کشاورزی شده است (FAO, 2022; Wang et al., 2019a).

Van Keulen and Van Diepen (1990) عملکرد سیب زمینی را در اتحادیه اروپا با استفاده از مدل WOFOST و داده‌های هواشناسی و ویژگی‌های خاک شبیه‌سازی کردند. نتایج آنان نشان داد که عملکرد سیب زمینی کاهش خواهد یافت و تقاضا برای آبیاری سیب زمینی به‌ویژه در شرق ایرلند در فصل تابستان بسیار قابل توجه خواهد بود. Lobell et al. (2005) با ترکیب مدل‌های آماری و دینامیکی (مدل CERES-Wheat) نشان دادند که بخش اعظمی از روند رو به رشد عملکرد گندم در ایالات شمال غربی مکزیک به دلیل تغییرات اقلیمی، خصوصاً کاهش دمای شبانه در طی فصل رشد است. Daccachea et al. (2011) اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی و عملکرد گیاه سیب زمینی را با استفاده از مدل SUBSTOR-Potato در انگلستان بررسی و مشاهده کردند که با فرض اینکه عوامل مؤثر بر زراعت سیب زمینی تغییر نکنند، با تغییر اقلیم ممکن است تنها ۶-۳ درصد افزایش در عملکرد محصول به وجود آید. در مقابل پیش‌بینی شد که عملکرد پتانسیل در آینده بدون محدودیت آب و کود حدود ۱۶-۱۳ درصد قابل‌افزایش است و با توجه به لزوم افزایش عملکرد پیش‌بینی شده، حدود ۳۰-۱۴ درصد افزایش در حجم آب آبیاری لازم است (Wang et al., 2014). در یک مطالعه تغییرات عملکرد برنج، آب مصرفی تبخیر و تعرق پتانسیل<sup>۱</sup> (ET)، آب مورد نیاز آبیاری<sup>۲</sup> (IWR) و راندمان مصرف آب آبیاری<sup>۳</sup> (IWUE) را در حوضه رودخانه یانگتس و کایفنگ در حوضه رودخانه پلو در کشور چین ارزیابی و گزارش کردند که عملکرد برنج کاهش، میزان ET و IWUE افزایش و دوره رشد برنج کوتاه‌تر می‌شود. (Raymundo et al., 2018) پیامدهای تغییر اقلیم را بر تولید جهانی سیب زمینی محاسبه نمودند. اعمال سناریوهای تغییر اقلیم آینده بر نظام‌های جاری کشت سیب زمینی نشان دهنده کاهش ۲ تا ۲۶ درصدی تولید سیب زمینی است که به نوع سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای بستگی دارد. (Tang et al., 2023) سازگاری تولید سیب زمینی به تغییر اقلیم آینده را از طریق بهینه‌سازی تاریخ کشت، آبیاری و کوددهی در اکوتون‌های چین بررسی و مشاهده نمودند که در پاسخ به تغییرات اقلیمی آینده، تاریخ کشت زودتر آغاز خواهد شد. (Ababai et al., 2009) اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم را در منطقه روددشت اصفهان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از کاهش متوسط عملکرد نسبی محصول در دو سناریوی A2 و B1 نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) بود. اثرات تغییر اقلیم بر نیاز خالص آبیاری و عملکرد گندم در ایستگاه بهشهر توسط Soleimani Nanadegani et al. (2013) مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نیاز خالص آبیاری با جابه‌جایی تاریخ کشت به سمت فصل زمستان افزایش یافته که این افزایش طی دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم تشدید خواهد شد. (Mazaheri, 2017) عملکرد سیب زمینی را در شرایط تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار داد. در این تحقیق که در ایستگاه مشهد انجام شد عملکرد، زیست‌توده و شاخص سطح برگ توسط مدل SUBSTOR برآورد گردید. در مجموع نتایج نشان داد که طی ۱۰۰ سال آینده، عملکرد سیب زمینی در منطقه مورد مطالعه نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. (Izadi et al., 2017) از مدل AquaCrop برای

<sup>1</sup> Evapotranspiration

<sup>2</sup> Irrigation Water Requirement

<sup>3</sup> Irrigation Water Use Efficiency

رشد و عملکرد سیب زمینی در شرایط تنش آبی استفاده نمودند. نتایج آنان نشان داد که ضریب تبیین برای عملکرد و زیست‌توده در مرحله صحت‌سنجی بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ متغیر بود که نشان دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی رشد و عملکرد سیب زمینی بود. (Jovzi et al. (2019 از مدل AquaCrop برای بررسی عملکرد ماده خشک و کارایی مصرف آب در ۵ کلون سیب زمینی در شرایط کم‌آبیاری استفاده نمودند. نتایج نشان داد که این مدل در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب سیب زمینی به‌طور متوسط بین همه تیمارهای آبیاری و کلون‌ها به‌ترتیب دارای خطای ۱۰/۹۵ و ۴۷/۳۴ درصد بوده است. (Turkaman et al. (2022 از مدل WOFOST برای پیش‌بینی فنولوژی و عملکرد سیب زمینی در ایران استفاده و گزارش نمودند که جذر میانگین مربعات خطا برای مراحل فنولوژیکی سبز شدن، گل‌دهی و رسیدگی فیزیولوژیکی به‌ترتیب ۱/۶، ۲/۳ و ۶/۴ روز و برای عملکرد غده ۲۹۳۳ کیلوگرم بر هکتار است. همچنین، نتایج آنان نشان داد که مدل قادر است عملکرد و مراحل فنولوژیکی را در مناطق مختلف ایران با دقت خوبی شبیه‌سازی نماید.

## مواد و روش‌ها

### مناطق مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در این پژوهش مناطقی از کشور هستند که بالاترین سطح زیر کشت و تولید سیب زمینی را در کشور دارا می‌باشند. با توجه به تنوع اقلیمی در کشور محصول سیب زمینی 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، جیرفت، کهنوج، منوجان، اصفهان، سنندج و شیراز می‌باشند. مناطق نام برده جزو مراکز اصلی تولید سیب زمینی کشور محسوب می‌شوند. اساس انتخاب این مناطق بر پایه میانگین درصد سطح تولید و سطح زیر کشت هر استان از تولید سیب زمینی کشور طی سال‌های ۱۳۶۱-۱۳۹۵ بود (جدول ۱). مناطق نامبرده ۶۲/۷۲ درصد سطح زیر کشت و ۶۸/۲۷ درصد تولیدات سیب زمینی کشور را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۱- میانگین درصد سطح زیر کشت و تولید سیب زمینی در ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه در سال‌های ۹۵-۱۳۶۱

ایستگاه	تبریز	اردبیل	اصفهان	جنوب کرمان	شهرکرد	شیراز	سنندج	همدان	مجموع
سطح زیر کشت (%)	۶/۸۷	۱۴/۷۵	۱۰/۸۹	۵/۰۷	۲/۳۵	۵/۳۹	۵/۱۷	۱۲/۲۳	۶۲/۷۲
تولید (%)	۷/۸۶	۱۵/۵۵	۱۰/۶۷	۴/۵۲	۲/۶۶	۵/۱۸	۵/۶۹	۱۶/۱۳	۶۸/۲۷

### داده‌های اقلیمی

داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل بیشینه دما، کمینه دما، بارش، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و میانگین سرعت باد طی سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۸۱ (دوره پایه مورد مطالعه) مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک مورد نظر از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید.

### داده‌های کشاورزی

به منظور تهیه داده‌های مزرعه‌ای برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST در شرایط پتانسیل (شرایط بدون محدودیت آب و غذا، کنترل بیماری‌ها و علف‌های هرز) از 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 به عنوان دوره پایه یا دیدبانی مورد استفاده قرار گرفت. این اطلاعات شامل تاریخ کاشت، مراحل فنولوژیکی از کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گل‌دهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه سیب زمینی (نوع زودرس و میان‌رس شامل نوع سانتا، راموس، اشنیا، آریندا و بورن) در هر یک از مناطق مطالعاتی

می‌باشد. به منظور واسنجی مدل WOFOST با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای، از داده‌های فنولوژیکی و عملکرد در سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ و از داده‌های فنولوژیکی و عملکرد در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد.

#### مدل تولید داده SDSM

یکی از مهمترین مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری مدل SDSM<sup>۱</sup> است که مولد مصنوعی داده‌های هواشناسی می‌باشد. در این تحقیق، از داده‌های خروجی مدل گردش عمومی جو<sup>۲</sup> (CanESM2) در سه سناریوی RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 استفاده شده است. مدل SDSM در سال ۲۰۰۲ در انگلستان تهیه شده است. مدل SDSM روابط آماری را بر مبنای روش رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس (پیش‌بینی‌کننده‌ها) و محلی (پیش‌بینی شونده‌ها) محاسبه می‌کند (Wilby et al., 2002). در این مطالعه جهت ریزمقیاس‌نمایی از داده‌های دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش، میانگین رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد و ساعات آفتابی در مقیاس زمانی روزانه استفاده گردید. خروجی مدل‌های گردش عمومی جو بزرگ مقیاس می‌باشند، بنابراین، جهت ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل گردش عمومی از مدل ریزمقیاس‌کننده SDSM استفاده شد. در مدل SDSM به منظور ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی از سه نوع داده الف- متغیرهای بزرگ مقیاس در دوره آینده (۲۰۱۱-۲۱۰۰) مدل گردش کلی CanESM2، ب- متغیرهای بزرگ مقیاس NCEP<sup>۳</sup> در دوره (۲۰۰۵-۱۹۸۹) و ج- داده‌های دیده‌بانی (دمای حداکثر، دمای حداقل، بارش، میانگین رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد و ساعات آفتابی) روزانه مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت پس از کسب اطمینان از توانایی مدل CanESM2 در کوچک مقیاس کردن متغیرهای اقلیمی مناطق مورد مطالعه، سری زمانی متغیرها با معرفی متغیرهای بزرگ مقیاس مدل CanESM2 در دوره‌های (۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱، ۲۱۰۰-۲۰۷۱) به مدل SDSM برای دوره‌های آتی شبیه‌سازی شدند.

#### معرفی مدل WOFOST

در تحقیق حاضر برای ارزیابی عملکرد پتانسیل سیب زمینی از مدل WOFOST<sup>۴</sup> استفاده شد. مدل WOFOST رشد گیاهان زراعی یک ساله را به صورت روزانه در شرایط پتانسیل، محدودیت آبیاری و مواد غذایی (نیتروژن) بر اساس خصوصیات گیاهی، پارامترهای روزانه هواشناسی و خصوصیات فیزیکی خاک شبیه‌سازی می‌کند (Boogaard et al., 1998). مدل WOFOST، رشد و تجمع ماده خشک گیاه را بر مبنای سرعت روزانه فتوسنتز تاج پوشش شبیه‌سازی می‌کند. در این مطالعه از WOFOST ver 7.1 استفاده شد که توسط مرکز تحقیقات اگروبیولوژی و حاصلخیزی خاک و مرکز تحقیقات کشاورزی هلند در دانشگاه واگنینگن ساخته شده است. WOFOST مدلی از گروه مدل‌های دویت است که از مدل دیگری به نام SUCROS مشتق شده است. این مدل از پارامترها و توابع برای توصیف اثرات دما، تشعشع و تنش آبی بر فرآیندهای اصلی رشد محصول استفاده می‌کند. خروجی‌های مدل شامل عملکرد نهایی، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، میزان تجمع ماده خشک در هر یک از اندام‌ها و مراحل نمو با فواصل یک روزه هستند.

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST

به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل WOFOST در مناطق مورد مطالعه ابتدا لازم است تا پارامترها (ضرایب) گیاهی سیب زمینی برای شرایط مختلف اقلیمی تنظیم شوند. بر همین اساس ایجاد فایل گیاهی که حساس‌ترین قسمت واسنجی مدل WOFOST است، برای عملکرد غده انجام شد.

#### روش تحقیق

مدل WOFOST به منظور شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی، برای تمام ۱۰ ایستگاه تولیدکننده سیب زمینی در کشور واسنجی شد. عملکرد پتانسیل تحت شرایط مطلوب آبیاری، کود دهی و کنترل مناسب آفات و علف‌های هرز (به منظور اجتناب از هر گونه تنش رطوبتی، عناصر غذایی و تنش زیستی) شبیه‌سازی می‌گردد. واسنجی مدل و تعیین ضرایب مدل به گونه‌ای انجام شد که عملکرد مورد انتظار غده توسط مدل WOFOST شبیه‌سازی شود. پارامترهای سطح ویژه برگ

1 Statistical Downscaling Model

2 Canadian Earth System Model

3 National Center Environment Prediction

4 World FOod STudies (WOFOST)

(SLATB)، حداکثر سرعت جذب دی اکسید کربن (AMAXTB)، بهره‌وری تبدیل به برگ (CVL)، بهره‌وری تبدیل به ریشه (CVR) بهره‌وری تبدیل به ساقه (CVS) و دمای پایین‌تراز آستانه برای ظهور (TBASEEM) که برای شبیه‌سازی عملکرد غده لازم بودند، بر اساس حد مجاز دامنه‌ی تغییرات ضرایب مدل و با استفاده از منابع، واسنجی و تعیین شدند. سپس به منظور شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل گیاه سیب زمینی برای هر ۱۰ منطقه مطالعاتی و هر پنج سال، با تاریخ کاشت‌های مرسوم و نیز با دامنه‌ای از تاریخ‌های کاشت (سه تاریخ) به‌طور جداگانه و در مجموع ۱۵۰ مرتبه اجرا شد.

## نتایج و بحث

با توجه به نتایج عملکرد پتانسیل غده سیب زمینی به‌دست آمده از اطلاعات جمع‌آوری شده طی پنج سال، میانگین عملکرد برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه در مرحله واسنجی ۴۶۱۹۰ کیلوگرم بر هکتار و ۴۴۴۳۴ کیلوگرم بر هکتار برای داده‌های اعتبارسنجی به‌دست آمد. در مرحله اجرای مدل، میانگین عملکرد در طی این پنج سال برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه ۴۵۹۱۹ کیلوگرم بر هکتار برای واسنجی و ۴۳۸۱۳ کیلوگرم بر هکتار برای مرحله اعتبارسنجی توسط مدل شبیه‌سازی شد. بنابراین، با ارزیابی شاخص‌های آماری (جدول ۲)، مدل WOFOST از دقت بالایی برای شبیه‌سازی عملکرد در تمام مناطق برخوردار می‌باشد. شکل ۱ تغییرات مقادیر شبیه‌سازی را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی برای عملکرد غده نشان می‌دهد. نتایج آزمون (t) نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد در شرایط واسنجی و اعتبارسنجی مدل در مناطق مورد مطالعه در سطح احتمال ۹۵ درصد نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد گیاه سیب زمینی می‌باشد.

## تولید سناریوهای تغییر اقلیم در دوره های آتی

عملکرد مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی به‌وسیله شاخص‌های آماری (جدول ۳) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار ضریب تبیین  $R^2$  در همه موارد از مقدار قابل توجهی برخوردار بود (بالای ۰/۹۹). حداکثر خطای شبیه‌سازی (ME) بارش نسبت به دمای حداقل و دمای حداکثر بیشتر بود. شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در شبیه‌سازی بارش نیز نسبت به دیگر پارامترها به مراتب بیشتر بوده (۱/۶) و خطای بیشتری را نشان داد. بنابراین، با توجه به نتایج جدول ۳، توانایی مدل SDSM در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی تأیید شده ولی با این حال مدل در شبیه‌سازی بارش دقت کمتری را نشان داد که با یافته‌های (Jafarpour, Nazari et al. 2015; Taei Semiroimi et al., 2014) مطابقت داشت. در ادامه، نتایج به‌دست آمده از ارزیابی مدل SDSM در جدول ۳ ارائه شده است.

## شبیه‌سازی عملکرد غده

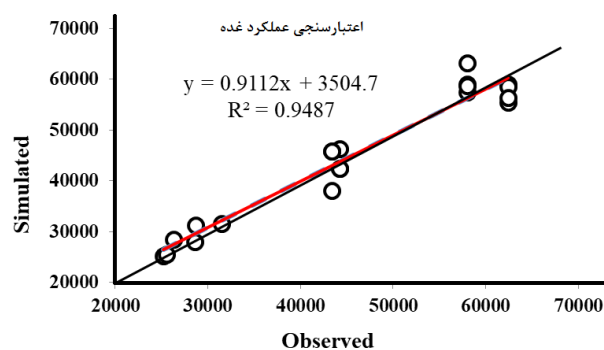
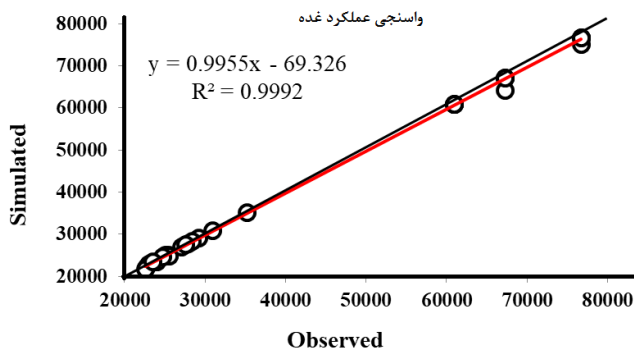
نتایج شبیه‌سازی در شرایط پتانسیل (بدون محدودیت آب و عناصر غذایی) در مناطق مورد مطالعه تحت سناریوهای RCP، نشان داد که عملکرد غده سیب زمینی در شرایط اقلیمی آینده کاهش خواهد یافت. (Adavi (2014) با مطالعه بر روی اثرات تغییر اقلیم بر روی کشت سیب زمینی در منطقه فریدون‌شهر اصفهان دریافت که عملکرد غده سیب زمینی تحت شرایط اقلیم آینده کاهش خواهد یافت. (Turkaman (2014) با به‌کارگیری دو مدل GFDL-ESM2g و HadGEM2-es و سناریوهای RCP نشان داد که با افزایش دمای حداقل در محدوده‌ی ۶/۹-۰/۴۹ درجه سلسیوس و دمای بیشینه در محدوده‌ی ۷/۳-۰/۷ درجه سلسیوس تا پایان سال ۲۱۰۰ میلادی، عملکرد گیاه سیب زمینی را کاهش می‌دهد.

جدول ۲- ارزیابی مدل WOFOST در شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی با استفاده از شاخص‌های آماری.

T	ME	E	R <sup>2</sup>	RMSE-n%	RMSE	تفاوت	شبیه‌سازی	دیدبانی	ایستگاه
۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۵۸۵۹۴٫۳	۵۸۵۹۴٫۳	اردبیل
۰٫۸۲	۴٫۳	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۲٫۸	۱۹۳۱٫۷	۱۵۸۳٫۳	۴۶۷۶۷٫۷	۴۸۳۵۱	تیریز
۰٫۹۹	۰٫۰۱	۰٫۹۹	۱	۰٫۰۱	۲٫۷	۲٫۲	۳۸۱۹۹	۳۸۲۰۱٫۲	سنندج
۰٫۹۹	۰٫۰۰۳	۱	۱	۰٫۰۰۲	۱٫۳	۱	۶۸۲۸۱٫۳	۶۸۲۸۰٫۳	شهرکرد
۰٫۹۹	۰٫۰۰۹	۰٫۹۹	۱	۰٫۰۰۵	۱٫۵	۰٫۹۷	۲۸۷۶۲٫۷	۲۸۷۶۳٫۶	شیراز
۰٫۹۹	۰٫۰۲	۰٫۹۹	۱	۰٫۰۱	۲٫۹	۱٫۴۴	۳۷۸۳۰٫۷	۳۷۸۳۲٫۱	اصفهان
۰٫۹۹	۰٫۰۰۱	۰٫۹۹	۱	۰٫۰۰۰۸	۰٫۵۸	۰٫۴	۴۸۹۸۱	۴۸۹۸۱٫۴	همدان
۰٫۶۱	۱٫۸	۰٫۹۸	۰٫۹۷	۱٫۵	۳۷۱٫۵	۳۵۴	۴۴۵۴۵	۴۴۸۹۹	جیرفت
۰٫۲۶	۳٫۵	۱	۰٫۹۹	۲٫۵	۵۶۷٫۵	۴۸۴٫۶	۴۲۲۸۱	۴۲۷۶۵٫۷	کهنوج
۰٫۱۲	۲٫۶	۰٫۹۹	۰٫۸۲	۱٫۲	۳۹۰٫۶	۲۸۲	۴۴۹۵۰٫۴	۴۵۲۳۲٫۳	منوجان
۰٫۹۹	۲٫۷	۰٫۹۹	۱	۷٫۴	۱۰۵۰	۳۷۷٫۵	۶۴۹۶۴٫۵	۶۵۳۴۲	اردبیل
۰٫۹۹	۶	۰٫۹۹	۱	۴٫۳	۲۵۶۹٫۲	۳۰۸۵	۴۰۴۹۴	۴۳۵۷۹	تیریز
۱	۹٫۳	۱	۱	۷٫۲	۱۹۸۷	۲۴۲۹٫۷	۳۹۹۰۷٫۵	۳۷۴۷۷٫۸	سنندج
۰٫۹۹	۵٫۵	۰٫۹۹	۱	۳٫۲	۱۹۴۱٫۵	۱۳۰۸٫۵	۵۹۹۶۷٫۵	۶۱۲۷۶	شهرکرد
۱	۰٫۲	۱	۱	۰٫۱۲	۳۵٫۷	۱۶٫۳۵	۲۸۵۳۶	۲۸۵۱۹٫۶۵	شیراز
۰٫۹۹	۲٫۱	۰٫۹۹	۱	۱٫۲	۳۲۸٫۵	۲۸۵٫۵	۳۶۶۰۲	۳۶۸۸۷٫۵	اصفهان
۰٫۹۹	۵٫۶	۰٫۹۹	۱	۳٫۳	۱۹۶۶٫۷	۱۹۰۵٫۶	۳۸۲۷۰	۴۰۱۷۵٫۵	همدان
۰٫۷۷	۱۲	۰٫۹۹	۱	۷٫۴	۳۲۶۷٫۵	۱۵۹۴٫۵	۴۲۲۱۲	۴۳۸۰۶٫۵	جیرفت
۰٫۸۵	۵٫۷	۱	۱	۴٫۱	۱۳۶۶٫۷	۴۶۴	۴۳۱۸۰	۴۲۷۱۶	کهنوج
۰٫۸۱	۹٫۳	۱	۱	۴٫۹	۱۴۷۶٫۷	۵۶۷	۴۳۹۹۶	۴۴۵۶۳	منوجان

واسنجی

اعتبارسنجی



شکل ۱- مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده برای عملکرد غده گیاه سیب زمینی (داده‌های سال‌های ۱۳۸۹، ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ برای مرحله‌ی واسنجی و داده‌های سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۳ برای مرحله‌ی اعتبارسنجی). خط یک به یک نیز در شکل نشان داده شده است.



جدول ۳- کارایی مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش و میانگین دمای حداقل و حداکثر در دوره دیدبانی با داده‌های NCEP

ایستگاه	متغیر	معیار دقت							
		درصد خطا	$E_{ms}$	RMSE	RMSE-n(%)	$R^2$	ME	E	P(t)
اردبیل	دمای حداقل	-۰٫۳۵	۰٫۹۹	۰٫۰۲	۰٫۹۷	۱	۲٫۱	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	-۰٫۰۴	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۲	۱	۰٫۴	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۳٫۷۶	۰٫۹۹	۱٫۶۵	۰٫۵۶	۰٫۹۹	۱۶٫۳	۰٫۹۹	۰٫۹۲
تبریز	دمای حداقل	۰٫۱۵	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۴	۱	۱	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	۰٫۰۰۶	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۱۶	۱	۰٫۳۴	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۱٫۴	۰٫۹۹	۰٫۵	۰٫۱۹	۱	۵٫۹۶	۰٫۹۹	۰٫۹۶
سنندج	دمای حداقل	-۰٫۰۰۴	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۵	۱	۱٫۲	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	-۰٫۰۵	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۱۵	۱	۰٫۴	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱٫۲	۰٫۲۶	۰٫۹۹	۶٫۷	۰٫۹۹	۰٫۹۸
همدان	دمای حداقل	۰٫۳	۰٫۹۹	۰٫۰۴	۱٫۸	۱	۴٫۶	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	-۰٫۰۳	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۱۵	۱	۰٫۳	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۲٫۵	۰٫۹۹	۱٫۰۳	۰٫۳۱	۰٫۹۹	۹٫۸۷	۰٫۹۹	۰٫۹۳
اصفهان	دمای حداقل	-۰٫۵۴	۰٫۹۹	۰٫۰۲	۰٫۱۸	۱	۰٫۴۶	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	-۰٫۳۷	۰٫۹۹	۰٫۰۴	۰٫۱۵	۱	۰٫۳	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۲٫۳۷	۰٫۹۹	۰٫۵	۰٫۴۹	۰٫۹۹	۱۲٫۲۷	۰٫۹۹	۰٫۹۴
شهرکرد	دمای حداقل	۰٫۴	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۱٫۱	۱	۲٫۵	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	-۰٫۰۰۴	۰٫۹۹	۰٫۰۱	۰٫۰۶	۱	۰٫۱۳	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۲٫۸	۰٫۹۹	۱٫۳	۰٫۴۱	۰٫۹۹	۱۴٫۰۵	۰٫۹۹	۰٫۹۴
شیراز	دمای حداقل	۰٫۱۳	۰٫۹۹	۰٫۰۲	۰٫۲	۱	۰٫۵	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	۰٫۰۷	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۱	۱	۰٫۲۴	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۲٫۴۸	۰٫۹۹	۱٫۲	۰٫۳۴	۱	۱۰٫۷	۰٫۹۹	۰٫۹۶
جیرفت	دمای حداقل	-۰٫۰۲	۰٫۹۹	۰٫۰۲	۰٫۱۳	۱	۰٫۲۱	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	-۰٫۰۲	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۱	۱	۰٫۲۴	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۴٫۵	۰٫۹۹	۱٫۲	۰٫۶۹	۰٫۹۹	۲۱	۰٫۹۹	۰٫۹۲
کهنوج	دمای حداقل	-۰٫۰۳	۰٫۹۹	۰٫۰۲	۰٫۱	۱	۰٫۲	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	۰٫۰۰۴	۰٫۹۹	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۱	۰٫۰۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۱٫۷	۰٫۹۹	۰٫۶۸	۰٫۳۷	۰٫۹۹	۱۰٫۸	۰٫۹۹	۰٫۹۷
منوجان	دمای حداقل	-۰٫۰۴	۰٫۹۹	۰٫۰۱	۰٫۰۷	۱	۰٫۱	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	دمای حداکثر	-۰٫۰۴	۰٫۹۹	۰٫۰۳	۰٫۱	۱	۰٫۱۲	۰٫۹۹	۰٫۹۹
	بارش	-۱٫۷۷	۰٫۹۹	۱٫۵۸	۰٫۷۷	۰٫۹۹	۲۸	۰٫۹۹	۰٫۹۷

## شبیه‌سازی عملکرد غده در شرایط تغییر اقلیم

عملکرد غده سیب زمینی بر اساس مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP در شرایط دوره اقلیمی آینده (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، درصد کاهش عملکرد (جدول ۶) برای سه دوره اقلیمی بر اساس سناریوهای RCP محاسبه گردید. نتایج شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی نشان دهنده کاهش عملکرد در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه است (شکل ۲). با توجه به نتایج به‌دست آمده، بیشترین میزان کاهش عملکرد در دوره سوم (۲۰۷۱-۲۱۰۰) مشاهده شد؛ به‌طوری که با افزایش واداشت‌های تابشی در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 درصد کاهش عملکرد به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. درصد کاهش عملکرد غده بین ۰٫۷۳ تا ۱۰٫۲۷ درصد در تمام ایستگاه‌ها و سناریوها مورد بررسی محاسبه شد (جدول ۶). بر اساس گزارشات موجود واکنش عملکرد سیب زمینی نسبت به تغییر اقلیم بسته به منطقه و سناریوی تغییر اقلیم متفاوت

است (Turkaman, 2014). در این مطالعه نتایج حاکی از جبران اندک، کاهش عملکرد در سناریوی RCP2.6 در دوره سوم (۲۰۷۰-۲۱۰۰) نسبت به دوره دوم (۲۰۴۱-۲۰۷۰) اقلیمی بود. این در حالی است که در سایر سناریوها، به‌ویژه در سناریوی RCP8.5 میزان کاهش عملکرد با شدت بیشتری در تمام مناطق مورد مطالعه مشاهده شد.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل غده سیب زمینی در مناطق مورد مطالعه بیانگر بیشترین کاهش عملکرد در مناطق سردسیر کشور نظیر همدان و اردبیل بود. با این حال کاهش کمتر عملکرد در مناطق گرمسیر کشور مانند جیرفت، کهنوج و منوجان که کشت پاییزه در این مناطق انجام می‌گیرد، مشاهده شد. بنابراین، این نتایج نشان از تأثیرپذیری بیشتر عملکرد سیب زمینی از پدیده‌ی گرمایش جهانی در مناطق سردسیر نسبت به مناطق گرمسیر کشور می‌باشد. نتایج آزمون من‌کندال نیز این مطلب را به خوبی نشان می‌دهد (جدول ۷). در سناریوی RCP2.6 روند کاهشی عملکرد غده سیب زمینی تنها در چند ایستگاه همدان، اردبیل، تبریز و اصفهان در سطح احتمال ۱٪ معنادار بود و در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه روند کاهشی عملکرد سیب زمینی معنادار نبود. در سناریوی RCP4.5 روند کاهشی عملکرد سیب زمینی در تمامی ایستگاه‌ها (به‌جز ایستگاه سنندج) در سطح احتمال ۱٪ معنادار بود. در سناریوی RCP8.5 تمام ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه اصفهان روند کاهشی عملکرد در سطح احتمال ۱٪ معنادار بود (جدول ۷).

جدول ۴- شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی (کیلوگرم بر هکتار) بر اساس مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP در مناطق مورد مطالعه در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۷۰، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰.

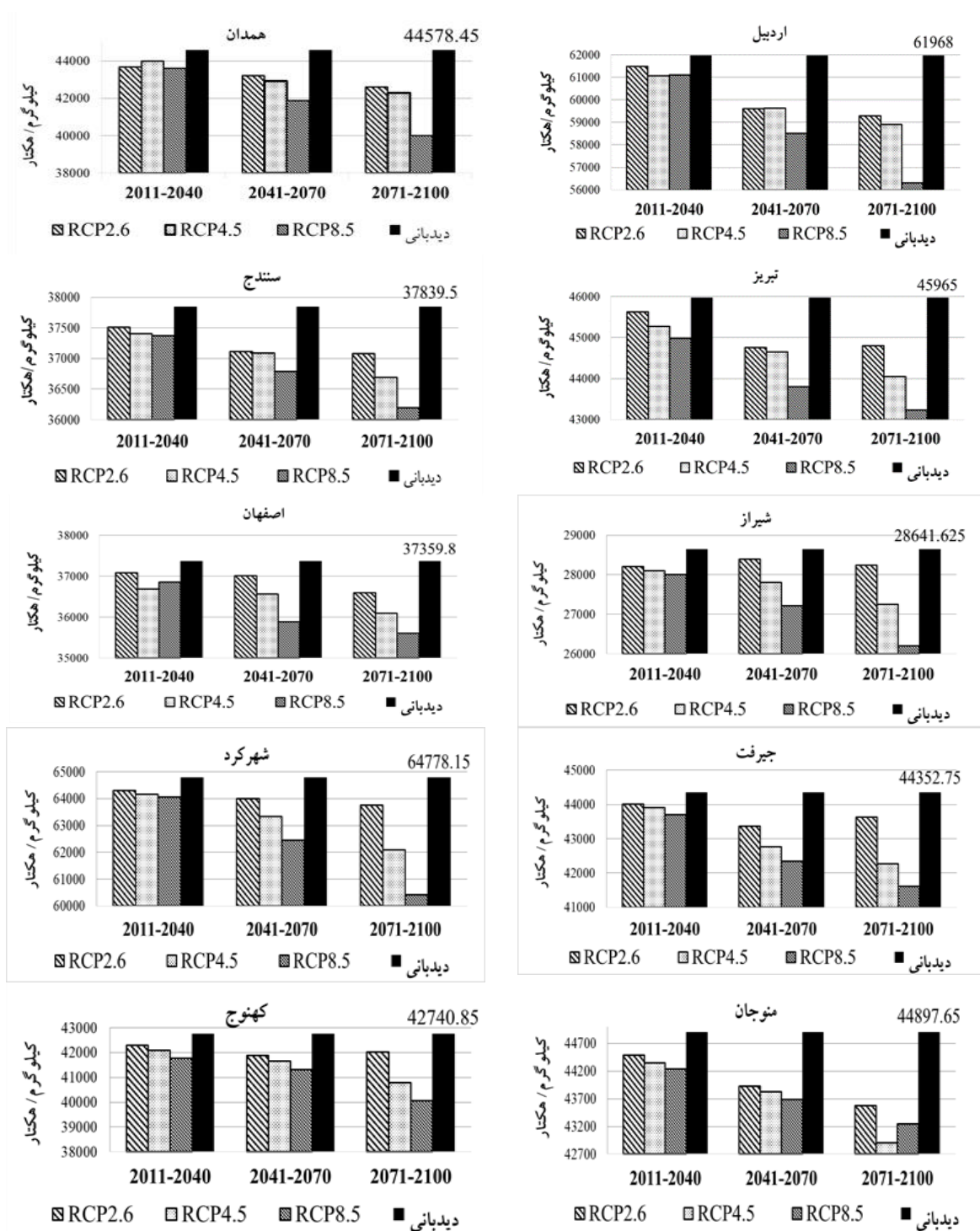
ایستگاه	عملکرد			۲۰۴۰-۲۰۷۰			۲۰۷۱-۲۱۰۰			
	دوره دیدبانی	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
اردبیل	۶۱۹۶۸	۶۱۴۸۶٫۸	۶۱۰۵۴٫۳	۶۱۱۰۳٫۶	۵۹۵۹۹٫۳	۵۹۶۲۸٫۵	۵۸۵۱۵٫۷	۵۹۲۹۳٫۴	۵۸۸۹۹٫۹	۵۶۳۰۱٫۹
همدان	۴۴۵۷۸٫۴	۴۳۶۸۲٫۷	۴۳۹۸۵٫۱	۴۳۶۰۴٫۲	۴۳۲۰۷٫۷	۴۲۹۲۲٫۶	۴۱۸۶۶٫۸	۴۲۶۱۳٫۵	۴۲۳۰۰٫۱	۴۰۰۱٫۹۳
سنندج	۳۷۸۳۹٫۵	۳۷۵۰۶٫۶	۳۷۴۰۲٫۱	۳۷۳۷۵٫۳	۳۷۱۰۹٫۷	۳۷۰۹۰٫۱	۳۶۷۹۰٫۶	۳۷۰۸۱٫۴	۳۶۶۸۹٫۷	۳۶۱۹۱٫۶
تبریز	۴۵۹۶۵	۴۵۶۳۱	۴۵۲۷۰٫۷	۴۴۹۰۳٫۵	۴۴۷۵۳	۴۴۶۵۰٫۱	۴۳۷۹۷٫۴	۴۴۸۰۲	۴۴۰۴۷٫۱	۴۳۲۳۶٫۸
اصفهان	۳۷۳۵۹٫۸	۳۷۰۸۰٫۷	۳۷۰۰۷٫۲	۳۶۸۵۱٫۲۷	۳۷۰۰۷٫۸	۳۶۵۶۲٫۲	۳۵۸۸۵٫۳	۳۵۵۹۶٫۸	۳۶۰۹۵٫۴	۳۵۶۰۶٫۲
شهرکرد	۶۴۷۷۸٫۱۵	۶۴۲۹۹٫۲	۶۴۱۶۴٫۵	۶۴۰۵۲٫۶	۶۳۹۹۹٫۲	۶۳۳۲۸٫۵	۶۲۴۵۴٫۹	۶۳۷۵۶٫۴	۶۲۰۸۹٫۸	۶۰۴۱۶٫۴
شیراز	۲۸۶۴۱٫۶۳	۲۸۲۰۲٫۶	۲۸۱۰۴٫۴	۲۸۰۰۳٫۴	۲۸۳۸۹٫۹	۲۷۸۰۵٫۵	۲۷۲۱۷٫۸	۲۸۲۳۵٫۹	۲۷۲۵۲٫۵	۲۶۱۹۹٫۴
جیرفت	۴۴۳۵۲٫۸	۴۴۰۰۹٫۸	۴۳۹۱۴٫۳	۴۳۷۰۷	۴۳۳۶۹٫۸	۴۲۷۶۷	۴۲۳۴۵٫۳	۴۳۶۳۶٫۶	۴۲۲۶۲٫۴	۴۱۶۰۵٫۳
کهنوج	۴۲۷۴۰٫۹	۴۲۲۸۸٫۶	۴۲۰۹۱٫۱	۴۱۷۶۱٫۱	۴۱۸۷۷٫۸	۴۱۶۶۰٫۸	۴۱۳۲۲٫۸	۴۲۰۱۳٫۱	۴۰۷۹۰٫۲	۴۰۰۶۰
منوجان	۴۴۸۹۷٫۶۵	۴۴۴۸۲٫۲	۴۴۳۴۷٫۱	۴۳۲۴۱	۴۳۹۲۹٫۵	۴۳۸۲۵	۴۳۶۸۹٫۷	۴۳۵۷۸٫۶	۴۲۹۰۰٫۴	۴۲۲۴۹

جدول ۵- عملکرد نسبی غده سیب زمینی بر اساس مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP در مناطق مورد مطالعه در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۷۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰.

ایستگاه	۲۰۷۱-۲۱۰۰			۲۰۴۱-۲۰۷۰			۲۰۱۱-۲۰۴۰		
	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
اردبیل	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹
همدان	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷
سنندج	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
تبریز	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۹
اصفهان	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹
شهرکرد	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
شیراز	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸
جیرفت	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹
کهنوج	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹
منوجان	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۹

جدول ۶- درصد کاهش عملکرد سیب زمینی بر اساس مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP در مناطق مورد مطالعه در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۷۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰.

ایستگاه	۲۰۷۱-۲۱۰۰			۲۰۴۱-۲۰۷۰			۲۰۱۱-۲۰۴۰		
	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
اردبیل	-۹/۱۴	-۴/۹۵	-۴/۳۲	-۵/۵۷	-۳/۷۷	-۳/۸۲	-۱/۳۹	-۱/۴۷	-۰/۷۸
همدان	-۱۰/۲۷	-۵/۱۱	-۴/۴۱	-۶/۰۸	-۳/۷۱	-۳/۰۷	-۲/۱۸	-۱/۳۳	-۲
سنندج	-۴/۳۵	-۳/۰۴	-۲	-۲/۷۷	-۱/۹۸	-۱/۹۲	-۱/۲۳	-۱/۱۶	-۰/۸۷
تبریز	-۵/۹۳	-۴/۱۷	-۲/۵۳	-۴/۷۱	-۲/۸۶	-۲/۶۴	-۲/۳۱	-۱/۵۱	-۰/۷۳
اصفهان	-۴/۶۹	-۳/۳۸	-۲/۰۴	-۳/۹۴	-۲/۱۳	-۰/۹۴	-۱/۳۶	-۱/۷۹	-۰/۷۵
شهرکرد	-۶/۷۳	-۴/۱۵	-۱/۵۸	-۳/۵۸	-۲/۲۳	-۱/۲	-۱/۱۲	-۰/۹۵	-۰/۷۴
شیراز	-۸/۵	-۴/۸۵	-۱/۴۲	-۴/۹۷	-۲/۹۲	-۰/۸۸	-۲/۲۳	-۱/۸۷	-۱/۵۳
جیرفت	-۶/۱۹	-۴/۷۱	-۱/۶۱	-۴/۵۳	-۳/۵۷	-۲/۲۱	-۱/۴۵	-۰/۹۹	-۰/۷۷
کهنوج	-۶/۲۷	-۴/۵۶	-۱/۷	-۳/۳۲	-۲/۵۳	-۲/۰۲	-۲/۲۹	-۱/۵۲	-۱/۰۶
منوجان	-۳/۶۷	-۴/۴۵	-۲/۹۳	-۲/۶۹	-۲/۳۹	-۲/۱۶	-۱/۴۶	-۱/۲۳	-۰/۹۲



شکل ۲- شبیه‌سازی عملکرد گیاه سیب زمینی بر اساس مدل CanESM2 برای سه دوره اقلیمی ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰، تحت سناریوهای RCP با استفاده از مدل WOFOST.

جدول ۷- نتایج حاصل از آزمون من کندال عملکرد غده سیب زمینی در سطح احتمال ۵ درصد در ایستگاه های منتخب.

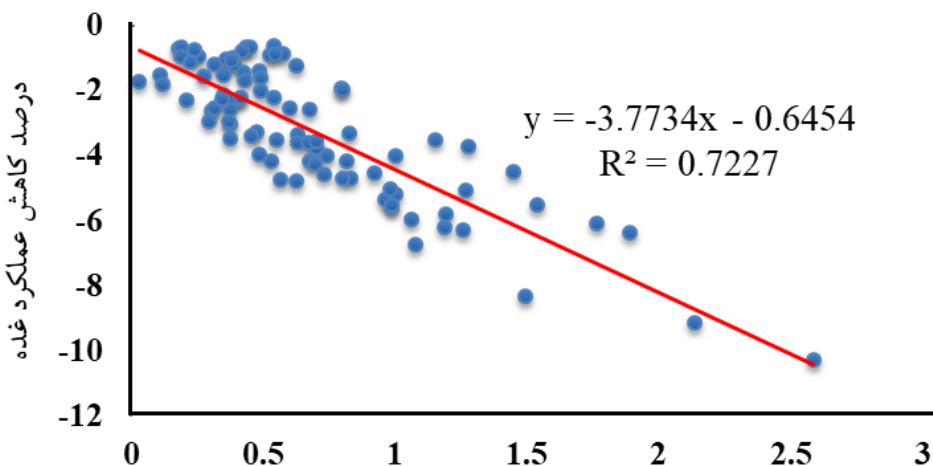
ایستگاه	۲۰۱۱-۲۰۱۰		
	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
	Z	Z	Z
اردبیل	-۹,۳**	-۶,۹**	-۳,۷**
تبریز	۱۰,۳**	-۶,۹**	-۳,۳**
سنندج	-۷,۲**	-۲,۹*	-۱,۴
همدان	-۱۰,۳**	-۶,۶**	-۳,۵**
اصفهان	-۰,۲	-۳,۱**	۵,۸**
شهرکرد	-۹,۳**	-۵,۱**	-۰,۹
جیرفت	-۵,۷**	-۳,۲**	-۱,۵
کهنوج	-۶,۱**	-۳,۳**	-۱,۸
منوجان	-۳,۵**	-۳,۹۹**	-۱,۸
شیراز	-۶,۹**	-۳**	۱,۲

**اثرات تغییرات طول دوره مراحل فنولوژیکی بر عملکرد سیب زمینی**

برای ارزیابی روند عملکرد سیب زمینی کشور در مناطق مورد مطالعه تحت تأثیر تغییرات ایجاد شده در طول دوره رشد گیاه سیب زمینی (کاشت تا سبز شدن، سبز شدن تا گلدهی و سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی دمای حداقل و دمای حداکثر با نتایج شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی و عملکرد غده سیب زمینی تلفیق گردید. نتایج بیانگر افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر به میزان ۰/۴ تا ۱/۴ درجه سلسیوس طی سه دوره آینده می‌باشد (جدول ۸). طول مراحل فنولوژیکی گیاه سیب زمینی از سبز شدن تا رسیدگی فیزیولوژیکی به موازات افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر کاهش یافته‌اند (جدول ۸). کاهش طول مرحله سبز شدن بین ۰/۳ تا ۲/۳ روز، مرحله گلدهی بین ۰/۷ تا ۲/۴ روز و مرحله سبز شدن تا رسیدگی بین ۲ تا ۶/۷ روز قرار دارد. نتایج جدول ۷ حاکی از آن است که با افزایش میانگین دما، طول مراحل رشد فنولوژیکی گیاه کاهش خواهد یافت و به تبع آن کاهش میزان عملکرد غده سیب زمینی را در پی خواهد داشت. همان‌طور که در جدول ۸ نیز مشاهده می‌شود، میزان کاهش عملکرد غده در سناریوی RCP2.6 در دوره اول (۲۰۴۰-۲۰۱۱) از ۴۶۷/۷ کیلوگرم بر هکتار به مقدار ۳۰۸۸/۹ کیلوگرم بر هکتار در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم (۲۱۰۰-۲۰۷۱) رسیده است. بیشترین کاهش در طول مراحل فنولوژیکی گیاه سیب زمینی در سناریوی RCP8.5 در دوره سوم (۲۱۰۰-۲۰۷۱) ثبت شده است. بیشترین کاهش در طول مراحل فنولوژیکی مربوط به مرحله سبز شدن تا رسیدگی به میزان ۶/۷ روز است. شکل ۳ نشان می‌دهد که به ازای یک درجه سلسیوس افزایش میانگین دمای سالانه، عملکرد غده به میزان ۳/۷۷ درصد کاهش خواهد یافت.

جدول ۸- مقایسه مدت زمان کاهش مراحل فنولوژیکی (روز) و عملکرد غده سیب زمینی (کیلوگرم بر هکتار) و افزایش میانگین دمای حداقل و حداکثر (درجه سلسیوس) بر اساس مدل گردش عمومی CanEMS2 تحت سناریوهای RCP در مناطق مورد مطالعه.

پارامترها	۲۰۱۱-۲۰۴۰			۲۰۴۱-۲۰۷۰			۲۰۷۱-۲۱۰۰		
	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
سبز شدن	-۱,۱	-۰,۷	-۰,۳	-۱,۵	-۱	-۰,۶	-۲,۳	-۱,۴	-۰,۴
گلدهی	-۱	-۱	-۰,۷	-۱,۶	-۱,۲	-۰,۷	-۲,۴	-۱,۶	-۰,۸
رسیدگی	-۲,۸	-۲,۶	-۲	-۴,۵	-۲,۹	-۲	-۶,۷	-۴,۲	-۲,۳
عملکرد	-۷۶۲	-۵۹۶	-۴۶۸	-۱۴۶۸	-۱۰۴۸	-۱۰۴۸	-۳۰۸۹	-۲۱۵۸	-۱۲۴۰
میانگین دما	۰,۵	۰,۴	۰,۴	۰,۷	۰,۶	۰,۶	۱,۴	۰,۸	۰,۵



میانگین دمای سالیانه (درجه سلسیوس)

شکل ۳- درصد کاهش عملکرد غده سیب زمینی به ازای افزایش میانگین دمای سالانه با استفاده از مدل گردش عمومی CanEMS2 تحت سناریوهای RCP در مناطق مورد مطالعه.

### نتیجه گیری کلی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی تحت شرایط اقلیم آینده حاکی از کاهش میزان عملکرد در مناطق مورد مطالعه بود؛ به طوری که بیشترین کاهش عملکرد در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۱ و تحت سناریوی RCP8.5 مشاهده شد. در مناطق مورد مطالعه به طور متوسط بیشترین کاهش عملکرد مربوط به ایستگاه اردبیل با ۲۳۹۷ کیلوگرم بر هکتار و همدان با ۱۸۱۷ کیلوگرم بر هکتار و کمترین کاهش عملکرد متعلق به ایستگاه سنندج با ۸۱۳ کیلوگرم بر هکتار و اصفهان با ۹۸۱ کیلوگرم بر هکتار بود. به طور متوسط در ۱۰ منطقه مورد مطالعه، به میزان ۱۴۳۶ کیلوگرم بر هکتار کاهش عملکرد غده سیب زمینی مشاهده شد. کاهش طول دوره رسیدگی سیب زمینی، بیشترین سهم را در کاهش عملکرد غده سیب زمینی دارد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عملکرد غده سیب زمینی نشان می‌دهد که به موازات افزایش دما، میزان عملکرد غده نیز کاهش می‌یابد؛ به طوری که به ازای یک درجه سلسیوس افزایش میانگین دمای سالانه، عملکرد غده به میزان ۳/۷۷ درصد کاهش خواهد یافت. با توجه به نتایج حاصله بهترین راهکار برای انطباق با تغییرات اقلیمی در آینده در مناطق مورد مطالعه تغییر تاریخ کشت و انتخاب رقم‌های زودرس برای کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد گیاه سیب زمینی می‌باشد.

### منابع مورد استفاده

#### References

- Ababai, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F., Rezavardinejad, V. & Karimi, B. (2009). Climate change impact on wheat yield and analysis of the related risks (Case study: Esfahan Ruddasht region). *Journal of Water and Soil Science*, 20(4), 135–150. (In Persian with English abstract)
- Adavi, Z. (2014). *Simulating the effects of climate change on potato production in Faridan area of Isfahan city and providing adaptation solutions based on modeling approaches*. Ph.D Thesis, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
- Boogaard, H.L., van Diepen, C.A., Rotter, 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*, Technical document, DLO Winand Staring Centre, No. 52, Staring Centrum, Wageningen University, the Netherlands.
- Daccachea, E.K., Weatherheada, M.A., Stalhamb, J.W. & Knox, M. (2011). Impacts of climate change on irrigated potato production in a humid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 1641–1653. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.018>

- FAO. (2016). Online statistical databases. <http://faostat3.fao.org>
- FAO. (2022). Online statistical databases. <http://www.fao.org/aquastat/en>
- Izadi, Z., Nasrollahi, A.H. & Haghghati Borojeni, B. (2017). Evaluation of the AquaCrop model to simulation of the potato growth and yield under water stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(1), 171–180. (In Persian with English abstract) DOI: [10.22059/ijswr.2017.232438.667675](https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.232438.667675)
- Jafarpour, Sh. (2016). Investigating the effects of climate change on water demand and yield of major crops in Ardabil plain. M.Sc Thesis, Mohaghegh Ardabili University, Ardabil, Iran. (In Persian with English abstract)
- Jovzi, M., Ghorbani, Z., Ghadami Firouzabadi, A., Sepehri, N.A. & Zare Abianeh, H. (2019). Evaluation of AquaCrop model under deficit irrigation management of potato new clones in Hamedan. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(1), 230–240. (In Persian with English abstract) DOR: [20.1001.1.20087942.1399.14.1.20.3](https://doi.org/20.1001.1.20087942.1399.14.1.20.3)
- King, B.A., Stark, J.C. & Neibling, H. (2020). Potato irrigation management. Pp. 417–446. In: Stark, J., Thornton, M., Nolte, P. (Eds.), *Potato Production Systems*. Springer Cham, Switzerland.
- Li, Y., Tang, J.Z., Wang, J., Zhao, G., Yu, Q., Wang, Y.X., Hu, Q., Zhang, J., Pan, Z.H., Pan, X.B. & Xiao, D.P. (2022). Diverging water saving potential across China's potato planting regions. *European Journal of Agronomy*, 134, 126450. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126450>
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., Asner, G.P., Matson, P.A., Naylor, R.L. & Falcon, W.P. (2005). Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 94, 250–256. DOI: [10.1016/j.fcr.2005.01.007](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.007)
- Mazaheri, S. (2017). Evaluation of potato yield under climate change conditions in three time periods using the DSSAT crop model in Mashhad region. M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian with English abstract)
- Nazari, Sh., 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). In: the Second National Conference on Architecture, New Urban Development, National Center of Iranian Architects, Urmia, 5 October 2015, <https://civilica.com/doc/418378>.
- Nurmanov, Y.T., Cherneno, V.G. & Kuzdanova, R.S. (2019). Potato in response to nitrogen nutrition regime and nitrogen fertilization. *Field Crops Research*, 231, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.11.014>
- Raymundo, R., Asseng, S., Robertson, R., Petsakos, A., Hoogenboom, G., Quiroz, R., Hareau, G. & Wolf, J. (2018). Climate change impact on global potato production. *European Journal of Agronomy*, 100, 87–98. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.11.008>
- Soleimani Nanadegani, M., Parsinejad, M., Iraqinejad, Sh. & Masah Boani, A. (2013). Study on climate change effect on net irrigation requirement. *Water and Soil Journal (Sciences and Agricultural Industries)*, 25(2), 397–389. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.9485>
- Taei Semiromi, J., 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 and Environment Quarterly*, 28, 15–1.
- Tang, J., Bai, H., Zhang, S., Xiao, D., Tianzhu, Z., Li, L.D., Wang, B. & Feng, P. (2023). Adaptations of potato production to future climate change by optimizing planting date, irrigation and fertilizer in the Agro-Pastoral Ecotone of China. *Climate Risk Management*, 44, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100604>
- Turkaman, M. (2014). Investigating the effect of global warming and future climate change on crop characteristics and potato production in Iran. Ph.D thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
- Turkaman, M., Nasiri Mahalati, M. & Koukhi, A. (2022). Calibration and validation of WOFOST model for predicting the phenology and yield in potato (*Solanum tuberosum* L.) growing regions in Iran. *Journal of Agroecology*, 14(4), 601–615. (In Persian with English abstract) DOI: [10.22067/jag.v1i1.47502](https://doi.org/10.22067/jag.v1i1.47502)
- Van Keulen, H. & Van Diepen, C.A. (1990). Crop growth models and agroecological characterization. Pp. 1–16. In: Scaife A. (Ed.) *Proceedings of the First Congress of the European Society of Agronomy*, 5–7 December, 1990, Paris, France.
- Wang, H., Wang, X., Bi, L., Wang, Y., Fan, J., Zhang, F., Hou, X., Cheng, M., Hu, W., Wu, L. & Xiang, Y. (2019a). Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy

- areas of northern China based on TOPSIS. *Field Crops Research*, 240, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.005>
- Wang, K., Tang, M., Hu, J., Wang, C., Liu, K., Yang, W. and He, W. (2019b). Effect of nitrogen levels on growth and yield of potato in an aeroponic system. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 5, 38–45. (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Yu, Z., Zhang, W., Shao, Q., Zhang, Y., Luo, Y., Jiao, X., & Xu, J. (2014). Responses of rice yield, irrigation water requirement and water use efficiency to climate change in China: Historical simulation and future projections. *Agricultural Water Management*, 146, 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.019>
- Wilby, 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)