

# Economic Evaluation of Rainfed Cultivation of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Different Climate Change Scenarios

Vahid Kalantar<sup>1</sup>  and Seyed Habibollah Mosavi<sup>2\*</sup> 

1. M.Sc., Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author: shamosavi@modares.ac.ir

## Introduction

Climate change is one of the fundamental and influential challenges of the twenty-first century, which, through consequences such as reduced precipitation, rising temperatures, changes in seasonal patterns, and the intensification of extreme events, has increased the vulnerability of agricultural production systems, particularly in semi-arid regions. This challenge leads to yield reduction, greater uncertainty in production, and decreased economic sustainability for farmers. Under such conditions, adaptation strategies such as the use of drought-tolerant crops play a critical role in adjusting to future circumstances. Safflower, as a low-water-requiring oilseed–medicinal crop that is tolerant to heat and drought stresses and suitable for cultivation in water-limited areas, is one of the key options for adapting to climate change. Therefore, evaluating the agronomic and economic performance of this crop within cropping systems of sensitive regions is of great importance. The present study was conducted to assess the effects of climate change on crop yields and to examine the economic adaptation potential of safflower in the Hamedan–Bahar Plain.

## Materials and Methods

To project climate change, outputs from General Circulation Models (GCMs) of the CMIP6 ensemble, including ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5, MPI-ESM1-2-HR, GFDL-ESM4, and MRI-ESM2-0, were used under three scenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP3-7.0. To reduce uncertainty and correct the statistical bias of the climate model outputs, the Quantile Mapping (QM) bias-correction method was applied. Projections were performed for two future periods: 2026–2050 and 2051–2075. After generating future climate data, the effects of these data on the yields of cropping-system field crops and the oilseed–medicinal crop safflower were simulated using the DSSAT crop growth model. Baseline data were collected through questionnaires completed by 360 farmers during the 2023–2024 (1402–1403) cropping year. Subsequently, the simulated yield data under future conditions were incorporated into a Positive Mathematical Programming (PMP) model representing the extended economic cropping-pattern model of the Hamedan–Bahar Plain to evaluate the economic impacts of climate change and the consequences of yield variation on optimal land allocation and agricultural net profit.

## Results and Discussion

The climate projections indicated that the Hamedan–Bahar Plain will experience a decrease in average precipitation in both future periods (2026–2050 and 2051–2075) under all three climate scenarios. Minimum temperature, maximum temperature, and reference evapotranspiration also exhibited increasing trends. Overall, these changes had adverse effects on the yields of most major field crops in the region, and the DSSAT simulations confirmed their yield reductions. In contrast, safflower showed a favorable response to climate change across all scenarios and periods, with its yield increasing by 4 to 7 percent. Incorporating these data into the PMP model showed that, under climate change conditions, the cropping pattern shifts toward expanding safflower cultivation. The economic model results revealed that safflower's cultivated area increases by approximately 189 hectares, and this cropping-pattern adjustment leads to an increase of more than 9.02 billion tomans in the agricultural sector's net profit compared to a scenario in which safflower is not included in the cropping pattern. These findings highlight the significant economic role of safflower in improving farmers' income and reducing their vulnerability to future climatic conditions.

## Conclusion

The present study demonstrated that climate change in the Hamedan–Bahar Plain will be accompanied by reduced precipitation and increased temperature changes that threaten the stability of most existing field crops. However, safflower, due to its inherent tolerance to water scarcity and high temperatures, shows compatible and even enhanced



performance under future conditions. The economic results also confirm that expanding safflower cultivation constitutes not only a biological adaptation strategy but also an economically viable adaptation measure, capable of increasing farmers' income, reducing production risks, and strengthening the resilience of agricultural systems. Accordingly, it is recommended that safflower be promoted as a high-potential oilseed–medicinal crop in regions similar to the Hamedan–Bahar Plain. Moreover, this strategy can be employed alongside other risk-management and climate-adaptation measures to improve the economic and environmental sustainability of the agricultural sector.

**Keywords:** Adaptation, Hamedan-Bahar Plain, Positive Mathematical Programming, Productivity, Sustainable Agriculture

JEL Classification: Q15, Q18, Q54



# بررسی اقتصادی کشت دیم گیاه دارویی گلرنگ (*Carthamus Tinctorius L.*) تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم

وحید کلاتر<sup>۱</sup>  و سید حبیب اله موسوی<sup>۲\*</sup> 

۱. کارشناسی ارشد، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

\*نویسنده مسئول: shamosavi@modares.ac.ir

## چکیده

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی قرن حاضر، با ایجاد تغییراتی مانند کاهش بارندگی، افزایش دما و تشدید رخدادهای حدی، اثر قابل توجهی بر پایداری تولیدات کشاورزی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک بر جای گذاشته است. در این میان، گلرنگ به‌عنوان یک گونه روغنی-دارویی کم‌آب‌بر و متحمل به تنش‌های اقلیمی، ظرفیت بالایی برای سازگاری با شرایط اقلیمی آینده دارد. این پژوهش باهدف ارزیابی اثرهای تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات زراعی و بررسی پتانسیل سازگاری اقتصادی گیاه دارویی گلرنگ به‌عنوان یک گیاه متحمل به خشکی در دشت همدان-بهار انجام شد. برای این منظور، ابتدا تغییرات آینده بارش، دما و تبخیر-تعرق مرجع تحت سه سناریوی اقلیمی پیش‌نگری شد و سپس اثرهای این تغییرات بر عملکرد محصولات و الگوی کشت منطقه با بهره‌گیری از مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی شبیه‌سازی گردید. داده‌های پایه از سال زراعی ۱۴۰۲-۰۳ از طریق تکمیل پرسش‌نامه جمع‌آوری شد. نتایج پیش‌نگری اقلیمی نشان داد که دشت همدان-بهار در دوره‌های آتی به‌طور متوسط با کاهش بارش و افزایش دمای حداقل و حداکثر تحت سه سناریوی اقلیمی مواجه خواهد بود؛ شرایطی که موجب کاهش عملکرد اغلب محصولات زراعی منطقه می‌شود. با این حال، گیاه گلرنگ در تمامی سناریوها واکنش مطلوبی به تغییر اقلیم نشان داد و عملکرد آن بین ۴ تا ۷ درصد افزایش یافت. تحلیل اقتصادی نیز بیانگر آن است که این افزایش عملکرد می‌تواند زمینه گسترش حدود ۱۸۹ هکتار سطح زیرکشت گلرنگ و افزایش بیش از ۹/۰۲ میلیارد تومان سود خالص بخش کشاورزی را فراهم خواهد ساخت. بر این اساس، توسعه کشت گلرنگ در شرایط تنش، یک راهبرد سازگار با اقلیم و اقتصادی محسوب می‌شود که می‌تواند به افزایش درآمد کشاورزان و تقویت تاب‌آوری و پایداری سامانه‌های کشاورزی منطقه کمک کند. همچنین، می‌توان جهت افزایش رفاه کشاورزان از این راهبرد در کنار سایر راهبردهای مناسب برای سازگاری با تغییر اقلیم در این دشت و سایر دشت‌های مشابه به دشت مورد مطالعه به کار برد.

**کلیدواژه‌ها:** بهره‌وری، برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی، دشت همدان - بهار، سازگاری، کشاورزی پایدار

طبقه‌بندی JEL: Q15, Q18, Q54

## مقدمه

بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه اقتصادی و اجتماعی، نقش اساسی در تأمین امنیت غذایی و پایداری اشتغال در نواحی روستایی دارد. با این حال، تغییر اقلیم طی دهه‌های اخیر با افزایش دما، کاهش بارندگی و تشدید نوسانات اقلیمی، چالش‌های جدی برای پایداری تولیدات کشاورزی ایجاد کرده است (Muzammal et al., 2024). در چنین شرایطی، بازنگری در الگوی کشت، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک، ضرورتی اساسی در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی به شمار می‌آید (Muratoglu et al., 2025). بررسی شیوه‌های سازگاری نظام‌های زراعی با تغییر اقلیم، می‌تواند به منظور ارتقای بهره‌وری منابع و افزایش تاب‌آوری اقتصادی و زیست‌محیطی بخش کشاورزی نقش مهمی ایفا کند (Sharma and Neupane, 2025)؛ از این‌رو، ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات و شناسایی راهبردهای سازگار با چالش‌های به‌وجود آمده، از اولویت‌های کلیدی پژوهش‌های کشاورزی محسوب می‌شود. در این راستا، نتایج مطالعه‌های جهانی نشان می‌دهد که تداوم این روند می‌تواند الگوی نیاز آبی و دوره رشد محصولات را تغییر دهد (Ahmad et al., 2023). همچنین، بهره‌گیری از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه می‌تواند در تحلیل سناریوهای اقلیمی و بهینه‌سازی الگوی کشت نقش کلیدی ایفا کند (Banerjee et al., 2024).

در دهه‌های اخیر، روند افزایشی دما، تغییر الگوی بارش و وقوع خشکسالی‌های متوالی، فشار مضاعفی بر منابع آب تجدیدپذیر وارد کرده و تعادل اکولوژیک بسیاری از دشت‌های کشور را بر هم زده است ( Zeydalinejad and Nassery, 2023; Ramezani Etedali & Koochi, 2025). کاهش بارش‌های مؤثر، افت سطح آب‌های زیرزمینی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع، در کنار رشد جمعیت و گسترش نامتوازن اراضی کشاورزی، از عوامل اصلی تشدید بحران آب و کاهش بهره‌وری تولیدات کشاورزی به‌شمار می‌آیند (Golmohammadi, 2022). استمرار این وضعیت، چالشی جدی برای امنیت غذایی و پایداری زیست‌بوم‌های طبیعی کشور محسوب می‌شود. در چنین شرایطی، اتخاذ راهبردهای سازگاری همچون توسعه کشت گیاهان متحمل به خشکی (Rastegaripour et al., 2024)، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین آبیاری (Shaabani et al., 2024)، اصلاح الگوی کشت بر پایه کارایی اقتصادی-اقلیمی (Sabbaghi et al., 2020) و ارتقای بهره‌وری در مقیاس مزرعه و حوضه (Mikhak et al., 2022)، می‌تواند نقشی کلیدی در کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری بخش کشاورزی ایفا کند. دشت همدان-بهار، به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی در غرب ایران، طی دهه‌های اخیر با اثرات مخرب تغییر اقلیم مواجه شده است (Soltani et al., 2023). در این منطقه، مطالعه‌های متعددی باهدف ارتقای سازگاری بخش کشاورزی در مواجهه با پیامدهای تغییر اقلیم انجام شده که راهکارهایی از جمله اصلاح الگوی کشت، توسعه کشت گیاهان متحمل به خشکی و استفاده از فناوری‌های نوین آبیاری را پیشنهاد کرده‌اند (Mosavi et al., 2020; Moazzezi et al., 2021; Mousavi Moayyed et al., 2025; Kalantar et al., 2025). در این میان، گلرنگ (*Carthamus tinctorius L.*) که یکی از گیاهان دارویی متحمل به تنش‌های اقلیمی است (Beyyavas et al., 2024)؛ می‌تواند ظرفیت بالایی برای توسعه در مناطقی نظیر دشت همدان-بهار داشته باشد. این گیاه به دلیل ویژگی‌هایی همچون مقاومت به کم‌آبی، تحمل گرمای بالا، سازگاری با خاک‌های کم‌بازده و نیاز اندک به نهاده‌های زراعی، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود کارایی مصرف آب و پایداری تولید ایفا کند (Ojaq et al., 2020). همچنین، دانه‌های گلرنگ منبع روغن باکیفیت هستند و به همین دلیل این گیاه از نظر اقتصادی برای صنایع غذایی، دارویی و آرایشی اهمیت بالایی دارد (Cançelik, 2021). باوجود این ظرفیت‌ها، مطالعه‌های داخلی و بین‌المللی تاکنون کمتر به بررسی نقش توسعه کشت گلرنگ به‌عنوان راهبردی مناسب برای سازگاری با تغییر اقلیم پرداخته‌اند. در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل شبیه‌سازی رشد گیاه و چارچوب مدل اقتصادی کشاورزی، اثر کشت گیاه گلرنگ بر الگو کشت و بهره‌وری اقتصادی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در دشت همدان-بهار بررسی خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

### مراحل انجام پژوهش

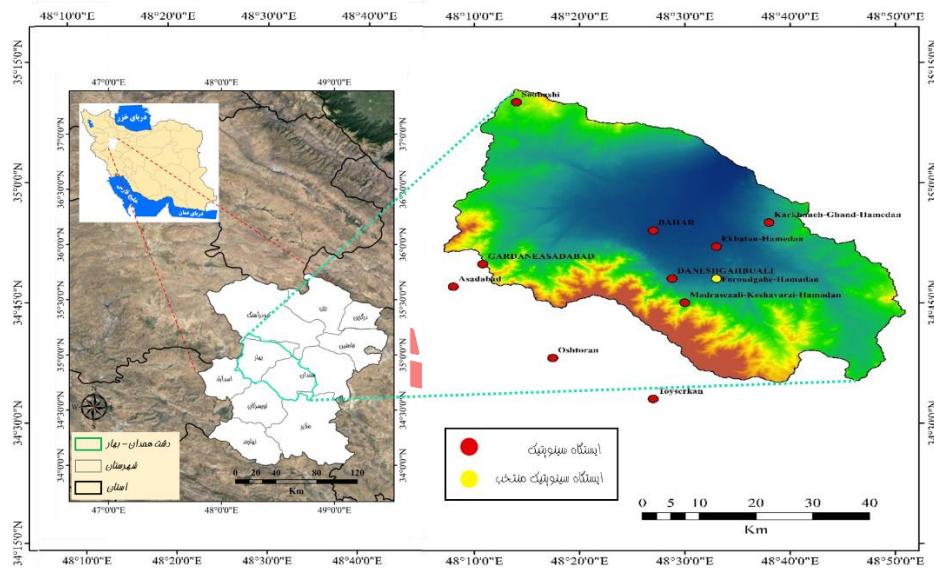
در این پژوهش، فرآیند انجام کار به‌صورت مرحله‌ای و تلفیقی طراحی شد. ابتدا، به‌منظور بررسی اثرهای تغییر اقلیم، روند بلندمدت متغیرهای اقلیمی با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان تحلیل گردید. سپس داده‌های شبیه‌سازی شده مدل‌های گردش عمومی جو از پایگاه C3S<sup>1</sup> برای ایستگاه مورد مطالعه استخراج و به‌منظور کاهش خطاهای سیستماتیک، با روش‌های تصحیح اریبی اصلاح شدند. عملکرد مدل‌های اقلیمی با استفاده از شاخص‌های آماری ارزیابی و مدل برتر انتخاب شد. در ادامه، خروجی تصحیح‌شده مدل منتخب تحت سناریوهای SSP برای دو دوره ۲۵ ساله آینده (۲۰۲۶-۷۵) به‌کار گرفته شد. به‌منظور بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر عملکرد گلرنگ و سایر محصولات رایج منطقه، از مدل شبیه‌ساز رشد گیاه DSSAT استفاده شد. همچنین، یک مدل اقتصادی-ریاضی در مقیاس دشت توسعه یافت تا تغییرات الگوی کشت و درآمد بهره‌برداران تحت شرایط اقلیمی آینده و سناریوهای توسعه کشت گلرنگ ارزیابی شود. در نهایت، پیامدهای اقلیمی-اقتصادی کشت گلرنگ در مقایسه با الگوی کشت پایه منطقه تحلیل گردید.

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعه این پژوهش شامل اراضی کشاورزی دشت همدان-بهار است. این منطقه با اقلیم سرد و نیمه‌خشک، میانگین دمای سالانه حدود ۱۳ درجه سانتی‌گراد و بارندگی متوسط نزدیک به ۳۰۲ میلی‌متر دارد (HPMO, 2024). مطابق آمار و اطلاعات هواشناسی استان همدان، بررسی داده‌های اقلیمی طی دوره ۱۳۵۵ تا ۱۴۰۳ نشان می‌دهد که میانگین دمای کمینه و بیشینه سالانه روندی افزایشی و

<sup>1</sup> Copernicus Climate Change Service (C3S) <https://climate.copernicus.eu/>

بارش‌ها روندی کاهشی داشته‌اند؛ پدیده‌ای که موجب تشدید تبخیر، کاهش رطوبت خاک و افت سطح آب‌های زیرزمینی شده است (HPMO, 2024). این شرایط، همراه با بهره‌برداری ناپایدار از منابع آب و گسترش کشت محصولات آب‌بر، پایداری نظام تولید کشاورزی را با چالشی جدی قرار داده است. موقعیت جغرافیایی دشت همدان-بهار در شکل (۱) نشان داده شده است. این دشت که در حوزه آبریز سیمینه‌رود قرار دارد، با وسعت ۲۴۵۹ کیلومترمربع در دامنه شمالی ارتفاعات الوند واقع شده است. وسعت دشت به ۸۸۰ کیلومترمربع می‌رسد و گسترش سطحی آبخوان اصلی آن ۴۶۸ کیلومترمربع است، در حالی که وسعت ارتفاعات ۱۵۷۹ کیلومترمربع است. محدوده دشت (۴۶۸ کیلومترمربع) بین طول‌های شرقی  $17^{\circ}48'$  تا  $33^{\circ}48'$  و عرض‌های شمالی  $34^{\circ}34'$  تا  $34^{\circ}35'$  قرار دارد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت همدان-بهار و ایستگاه سینوپتیک موجود در دشت

Fig 1. Geographical Location of Hamadan-Bahar Plain and the Synoptic Station Located in the Plain

دشت همدان-بهار با دارا بودن حدود ۱۳۴ هزار هکتار زمین زراعی و باتوجه‌به وضعیت دیم‌خیزی استان همدان، که در آن حدود دو سوم اراضی زراعی به روش کشت دیم اختصاص دارد، به‌شدت نسبت به تغییرات بارندگی و دما آسیب‌پذیر ارزیابی می‌شود (MAJH, 2024). وابستگی بخش قابل توجهی از تولیدات این دشت به بارش‌های فصلی، در کنار محدودیت منابع آب زیرزمینی، سبب می‌شود هرگونه تغییر اقلیم مستقیماً بر عملکرد محصولات، الگوی کشت و پایداری اقتصادی بخش کشاورزی اثرگذار باشد. افزون بر این، مطالعه‌های منابع آب منطقه‌ای حاکی از روند کاهشی ذخایر آب زیرزمینی و افت تراز آبخوان‌ها در سال‌های اخیر است (Afruzi et al., 2021; Talebmorad et al., 2021; Balali & Kasbian Lal., 2022)؛ مسئله‌ای که ضرورت مدیریت الگوی کشت و توسعه گونه‌های متحمل به تنش آبی را دوچندان کرده است.

### مدل‌های گردش عمومی جو

مدل‌های گردش عمومی جو<sup>۲</sup> به‌عنوان یکی از معتبرترین منابع داده در مطالعه‌های تغییر اقلیم شناخته می‌شوند و نقش کلیدی در شبیه‌سازی الگوهای اقلیمی گذشته و پیش‌نگری شرایط آینده ایفا می‌کنند. این مدل‌ها پس از واسنجی و اعتبارسنجی با داده‌های مشاهده‌ای، امکان تحلیل دقیق تغییر اقلیم و ارزیابی مخاطرات ناشی از تغییرات آن را در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی فراهم می‌سازند. در این پژوهش، به‌منظور پیش‌نگری و بررسی تغییر اقلیم در دشت همدان-بهار، از خروجی پنج مدل منتخب از ششمین فاز پروژه مقایسه

<sup>2</sup> General Circulation Model (GCM)

مدل‌های جفت‌شده اقلیمی<sup>۳</sup> استفاده شد. فاز ششم این پروژه که تحت نظارت برنامه تحقیقات اقلیم جهانی<sup>۴</sup> اجرا می‌شود، جدیدترین چارچوب مدل‌سازی اقلیمی محسوب می‌شود و باهدف ارتقای درک علمی از فرآیندهای اقلیمی و بررسی سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای توسعه‌یافته است. مدل‌های انتخاب‌شده توسط مراکز تحقیقاتی معتبر جهانی طراحی شده‌اند و توانایی شبیه‌سازی متغیرهایی نظیر دما و بارش را در مقیاس‌های مختلف دارند. از آنجاکه هر مدل دارای وضوح مکانی متفاوتی است، میزان دقت پیش‌نگری‌ها نیز متناسب با آن تغییر می‌کند. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل مقادیر روزانه بارش، دمای کمینه و بیشینه ایستگاه سینوپتیک همدان (فرودگاه) برای دوره پایه ۱۹۹۰-۲۰۱۴ و دو دوره ۲۵ ساله آتی پیش‌نگری بوده که از پایگاه داده سرویس تغییرات اقلیمی کوپرنیک<sup>۵</sup> استخراج شد. این داده‌ها تحت سه سناریوی مختلف مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک<sup>۶</sup> مورد تحلیل قرار گرفتند که شامل سناریوی SSP1-2.6 با کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، سناریوی SSP2-4.5 با روند توسعه متعادل و سناریوی SSP3-7.0 با افزایش شدید انتشار همراه هستند. انتخاب مدل‌ها و سناریوهای فوق باهدف پوشش تنوع مکانی و دینامیکی گسترده مراکز ارائه‌دهنده در پروژه CMIP6، دقت در شبیه‌سازی بارش و دما و سازگاری با مطالعه‌های پیشین در نواحی خشک ایران صورت گرفت (Kheyruri et al., 2024; Afsari et al., 2024; Nemati Shishehgaran, et al., 2025; Sarvestan and Zarei, 2026). خروجی مدل‌ها که در قالب فرمت NetCDF ارائه شده بودند، پس از انجام پردازش‌های فنی و تطبیق با محیط نرم‌افزار ArcGIS برای مراحل بعدی تحلیل و ترسیم نقشه‌های اقلیمی آماده گردیدند. مشخصات فنی هر یک از مدل‌های مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مدل‌ها و مؤسسات آماده‌سازی پروژه CMIP6

Table 1. CMIP6 Project Preparation Models and Institutions

مؤسسات تحقیقاتی توسعه‌دهنده مدل Research institutions developing models	مدل Model	درجه وضوح Degree of resolution
استرالیا Australia	ACCESS-CM2	1.25 × 1.00
استرالیا Australia	ACCESS-ESM1-5	1.25 × 1.00
آلمان Germany	MPI-ESM1-2-HR	0.90 × 0.40
ایالات متحده آمریکا USA	GFDL-ESM4	1.00 × 0.25
ژاپن Japan	MRI-ESM2-0	1.10 × 0.50

## روش‌های تصحیح اریبی

در این پژوهش، به منظور افزایش دقت و کاهش اریبی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، از فن نگاشت چندک (QM)<sup>۷</sup> برای تصحیح داده‌ها استفاده گردید. این روش با تطبیق توابع توزیع تجمعی داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل، قادر به اصلاح گشتاورهای آماری اولیه و دوم مدل‌ها است و بدین ترتیب دقت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی ارتقا می‌یابد. به طور مشخص، روش QM با تعریف توابع توزیع تجمعی مجزا برای روزهای بارانی و خشک، توزیع بارش، دمای کمینه و بیشینه شبیه‌سازی شده توسط مدل را با توزیع مشاهدات همگرا می‌کند. اساس این روش بر پایه تبدیل تجربی توابع توزیع استوار است و کارایی آن در اصلاح اریب‌های موجود در خروجی مدل‌های

<sup>3</sup> Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

<sup>4</sup> World Climate Research Programme (WCRP)

<sup>5</sup> Copernicus Climate Change Service (CCCS)

<sup>6</sup> Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

<sup>7</sup> Quantile Mapping (QM)

GCM به طور گسترده مورد تأیید قرار گرفته است. در این مطالعه، با اعمال یک تابع تبدیل ریاضی، مقادیر شبیه‌سازی شده به توزیع‌های متناظر با داده‌های واقعی نگاشت شده و بدین ترتیب توزیع خروجی مدل‌ها با شرایط واقعی اقلیمی منطقه همخوانی پیدا کرد.

$$X_0 = f(X_m) \quad (1)$$

مبنای این شیوه بر فرض قابل‌شناسایی بودن تابع توزیع تجمعی متغیرهای اقلیمی نظیر بارش و دما استوار است. در این چارچوب، یک تابع تبدیل ریاضی ( $f$ ) بر مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل ( $X_m$ )، اعمال می‌شود تا توزیع آن‌ها با توزیع داده‌های مشاهده‌ای ( $X_0$ ) منطبق گردد. این فرآیند موجب کاهش اختلافات آماری بین مقادیر مدل و مشاهدات و در نتیجه، بهبود دقت پیش‌نگری متغیرهای هیدروکلیماتیک در مقیاس منطقه‌ای می‌گردد. رابطه ریاضی این تبدیل به صورت زیر قابل بیان است:

$$P_0 = F_0^{-1}(F_m(P_m)) = F_0^{-1}(Q_n) \quad (2)$$

در این روش، تابع توزیع تجمعی مشاهدات ( $F_0$ ) با تابع توزیع تجمعی پیش‌نگری‌ها ( $F_m$ ) مقایسه می‌شود. چندانک مقدار پیش‌نگری ( $Q_n$ ) در تابع توزیع تجمعی پیش‌نگری تصحیح شده ( $F_m$ ) تعیین می‌شود. مقدار پیش‌نگری تصحیح شده اریبی ( $P_0$ ) با مقدار پیش‌نگری اولیه ( $P_m$ ) مقایسه گردید.<sup>۹</sup>

باتوجه به اهمیت شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل در مطالعه‌های هیدرولوژی و اقلیم‌شناسی، نتایج حاصل از این تحلیل قابلیت تعمیم به طیف وسیعی از کاربردهای مدل‌های اقلیمی را دارا هستند. در این پژوهش، شاخص‌های مورد استفاده شامل میانگین خطای مطلق<sup>۹</sup>، میانگین خطای انحراف<sup>۱۰</sup>، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱۱</sup> و راندمان نش-ساتکلیف<sup>۱۲</sup> بودند که به طور گسترده در ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی به کار می‌روند. این شاخص‌ها به ترتیب میزان خطای مطلق، جهت‌دار و مربعی پیش‌نگری‌ها را اندازه‌گیری کرده و شاخص NSE به عنوان معیاری برای سنجش همبستگی و همخوانی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهداتی به کار می‌رود.

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{t=1}^n F_t - A_t}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{\sum_{t=1}^n (A_t - \bar{A}_t)^2} \quad (6)$$

در این روابط، ارزیابی عملکرد مدل‌ها از طریق مقایسه مقادیر پیش‌نگری شده ( $F_t$ ) و مقادیر مشاهده شده ( $A_t$ ) برای هر متغیر اقلیمی در هر ایستگاه سینوپتیک و بر اساس حجم داده‌های موجود ( $n$ ) انجام شد. به منظور تحلیل روندهای بلندمدت، تغییرات احتمالی شاخص‌های مذکور در دو دوره زمانی آینده شامل ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۵ مورد بررسی قرار گرفت تا روند تغییرات اقلیمی و عملکرد مدل‌ها در بازه‌های بلندمدت ارزیابی شود.

### شبیه‌سازی عملکرد محصولات

<sup>۹</sup> برای آشنایی بیشتر با جزئیات فنی این روش، به مطالعه Nemati Shihgaran et al., 2024 مراجعه می‌شود.

<sup>۹</sup> Mean Absolute Error (MAE)

<sup>۱۰</sup> Mean Bias Error (MBE)

<sup>۱۱</sup> Root-Mean-Square Error (RMSE)

<sup>۱۲</sup> Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)

در گام بعدی، به منظور شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصولات کشاورزی تحت شرایط اقلیمی و مدیریتی متفاوت، از مدل شبیه‌ساز سامانه‌های تصمیم‌گیری برای کشاورزی<sup>۱۳</sup> برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات موجود در الگوی کشت دشت همدان-بهار و همچنین گیاه متحمل به خشکی گلرنگ در دو دوره زمانی آینده استفاده شد. این مدل، ابزاری جامع و معتبر برای تحلیل فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه از جمله فتوسنتز، تنفس، رشد رویشی و زایشی، مصرف آب و نیازهای نیتروژنی به صورت کمی است و واکنش محصولات را نسبت به تغییرات اقلیمی و مدیریت شبیه‌سازی می‌کند. DSSAT با بهره‌گیری از معادلات ریاضی، فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه از جمله فتوسنتز، تنفس، رشد رویشی و زایشی، مصرف آب و نیازهای نیتروژنی را شبیه‌سازی می‌کند. عملکرد محصول (Y) در این مدل تابعی از شرایط اقلیمی (C)، مدیریت کشاورزی (M) و ژنوتیپ گیاه (G) است.<sup>۱۴</sup>

$$Y = f(C, M, G) \quad (7)$$

مدیریت کشاورزی در DSSAT به صورت کمی تعریف می‌شود و شامل زمان‌بندی و میزان آبیاری، نوع و مقدار کوددهی، تاریخ کاشت و برداشت و روش‌های کنترل آفات است، تا اثر تغییرات این عوامل بر عملکرد محصولات قابل تحلیل باشد. بهره‌گیری از این مدل امکان پیش‌نگری تغییرات عملکرد محصولات زراعی درون الگوی کشت منطقه و گیاه متحمل به خشکی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی را فراهم کرده و تحلیل دقیق اثرهای تغییر اقلیم بر تاب‌آوری تولید را ممکن می‌سازد.

### شبیه‌سازی اقتصادی منطقه

در این پژوهش، به منظور تحلیل اقتصادی و شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر الگوی کشت و سودآوری کشاورزی در دشت همدان-بهار، از رهیافت برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی<sup>۱۵</sup> استفاده شد. این روش که جایگزینی کارآمد برای رهیافت برنامه‌ریزی ریاضی نرمیتو<sup>۱۶</sup> محسوب می‌شود، امکان مدل‌سازی اقتصادی فعالیت‌های کشاورزی با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع و نهاده‌ها را فراهم می‌آورد (Moulogianni, 2022; Wilke, 2024). مدل توسعه‌یافته یک مدل ایستای چندسناریویی است که بازده ناخالص کل فعالیت‌های زراعی منطقه ( $\omega$ ) را در دوره‌های ۲۵ساله شبیه‌سازی می‌کند و اثر تغییر اقلیم بر سود ناخالص کشاورزی را در دو دوره آتی ارزیابی می‌نماید.

$$\text{Max } \omega = \sum_{i=1}^{18} X_i(P_i Y_i - C_i) + X_s(P_s Y_s - C_s) \quad (8)$$

st:

$$\sum_{i=1}^{19} X_{i,s} \leq X \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{19} W_{i,s} X_{i,s} \leq W \quad (10)$$

<sup>13</sup> Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)

<sup>۱۴</sup> برای آشنایی بیشتر با جزئیات فنی این روش، به مطالعات Gunawat et al., 2022، Tooley et al., 2021، Mubeen et al., 2020 و Eghbalishahabad et al., 2024 مراجعه شود.

<sup>15</sup> Positive mathematical programming (PMP)

<sup>16</sup> Normative Mathematical Programming (NMP)

$$\sum_{i=1}^{19} L_{i,s} X_{i,s} \leq L \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{19} T_{i,s} X_{i,s} \leq T \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{19} N_{i,s} X_{i,s} \leq N_i \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{19} P_{h_{i,s}} X_{i,s} \leq P_h \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{19} P_{o_{i,s}} X_{i,s} \leq P_o \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{19} K_{i,s} X_{i,s} \geq K \quad (16)$$

$$X_{i,s} \geq 0 \quad (17)$$

در این مدل،  $X$  سطح زیرکشت محصولات بر حسب هکتار،  $P$  قیمت هر تن محصول،  $Y$  عملکرد محصول بر حسب تن در هکتار و  $C$  کل هزینه تولید هر محصول در واحد سطح را نشان می‌دهد. اندیس  $i$  مربوط به محصولات زراعی در الگوی کشت منطقه، نظیر یونجه، جو، لوبیا، خیار، سیر، نخود، سیب‌زمینی، شبدر، کلزا، چغندر، گوجه‌فرنگی، هندوانه، گندم و محصولات دیم است، و اندیس  $s$  مربوط به گیاه متحمل به خشکی گلرنگ است. پارامترهای  $L, W, T, N_i, P_h, P_o$  و  $K$  به ترتیب میزان نیاز به آب، نیروی کار، ساعات کار ماشین‌آلات، مصرف کودهای نیتروژن، فسفر و پتاسیم و سرمایه موردنیاز برای تأمین نهاده‌ها و هزینه‌های جاری تولید را نشان می‌دهند. محدودیت‌های مدل به گونه‌ای تعریف شده‌اند که مجموع مصرف هر نهاده در کل محصولات، از منابع در دسترس منطقه بیشتر نخواهد شد و توازن استفاده از منابع بین محصولات مختلف، از جمله گلرنگ، برقرار شود. علاوه بر این، شرط غیرمنفی بودن متغیرهای تصمیم  $(X \geq 0)$  تضمین می‌کند که سطح زیرکشت هر محصول، مقادیر واقعی و عملیاتی داشته باشد. این چارچوب امکان تحلیل اقتصادی جامع و ارزیابی اثرات سناریوهای اقلیمی و توسعه کشت گلرنگ بر سودآوری کشاورزی در منطقه را فراهم می‌سازد (Petsakos and Rozakis, 2022; Ghaffari et al., 2022; Yao et al., 2025).

برای جمع‌آوری داده‌های موردنیاز در سال زراعی ۱۴۰۲-۰۳، یک پرسشنامه ساختاریافته طراحی و با مراجعه میدانی توسط کشاورزان منطقه تکمیل شد. این پرسشنامه اطلاعاتی از قبیل سطح زیرکشت، عملکرد محصولات، درآمد حاصل از فروش، قیمت بازار، میزان مصرف نهاده‌ها مانند کود و سم و نحوه استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی را فراهم کرد. همچنین، داده‌های اقلیمی شامل دما، بارش، تبخیر-تعرق از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد و برای اعتبارسنجی و تکمیل، داده‌های آماری رسمی از سازمان جهاد کشاورزی استان و کشور و مرکز آمار ایران با داده‌های میدانی مقایسه گردید تا دقت تحلیل‌ها افزایش یابد. به منظور تعیین روابط فنی میان محصولات و نهاده‌ها، از روش نمونه‌گیری خوشه‌ای دو مرحله‌ای استفاده شد (Brunner et al., 2023; Li et al., 2024)؛ در مرحله نخست، چهار بخش منطقه به عنوان خوشه‌های اصلی بر اساس همگنی اقلیمی انتخاب شدند و در مرحله دوم، روستاهای هر بخش بر اساس شباهت‌های خاک و پستی‌وبلندی خوشه‌بندی و به صورت تصادفی ساده نمونه‌گیری شدند. سطح زیرکشت گلرنگ نیز از طریق داده‌های میدانی و تطبیق با اطلاعات جهاد کشاورزی برآورد شد و در مزارعی که کشت ترکیبی گلرنگ و سایر محصولات داشتند، سهم گلرنگ بر اساس میانگین مساحت اعلامی کشاورزان و تأیید منطقه‌ای محاسبه و در داده‌های نهایی لحاظ گردید.

$$n = \frac{N\sigma^2}{(N-1)\frac{B^2}{4} + \sigma^2} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)،  $n$  حجم نمونه لازم،  $N$  تعداد کل بهره‌برداران زراعی دشت،  $\sigma^2$  واریانس عملکرد محصولات کشت‌شده در دشت (بر حسب تن در هکتار) و  $B$  خطای برآورد میانگین جامعه با احتمال تقریبی ۹۵٪ است. با اعمال این روش، حجم نمونه ۳۶۰ بهره‌بردار تعیین شد و اطلاعات موردنیاز از طریق تکمیل پرسشنامه توسط کشاورزان منطقه جمع‌آوری گردید. لازم به ذکر است که این نمونه آماری به‌گونه‌ای انتخاب شد که کلیه محصولات زراعی موجود در منطقه را پوشش داده و نماینده‌ای کامل از جامعه آماری مورد مطالعه باشد.

## نتایج و بحث

### ارزیابی مدل‌های اقلیمی

به‌منظور سنجش دقت مدل‌های اقلیمی در بازتولید متغیرهای بارش، دمای کمینه و بیشینه منطقه مورد مطالعه پس از اعمال روش تصحیح اریبی در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، خروجی مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه گردید. ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری معرفی شده در بخش روش‌شناسی، شامل میانگین خطای مطلق، ضریب کارایی نش-ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای انحراف انجام شد. به‌منظور بررسی کارایی مدل‌ها در شبیه‌سازی مؤلفه‌های اقلیمی بارش، دمای کمینه و بیشینه، داده‌های پنج مدل منتخب CMIP6 به همراه مدل همادی حاصل از روش نگاشت چندک برای ایستگاه سینوپتیک فرودگاه (همدان) طی دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های آماری (جدول ۲) نشان داد که از میان مدل‌های اقلیمی مورد ارزیابی، مدل GFDL-ESM4 در هر سه پارامتر اقلیمی شامل بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه عملکرد به‌مراتب دقیق‌تری نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. به‌طور مشخص، در شبیه‌سازی بارش، شاخص‌های آماری مدل GFDL-ESM4 به‌ترتیب برای نش-ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای انحراف و میانگین خطای مطلق به‌ترتیب برابر با ۰/۹۱، ۰/۸۰، ۶/۷۰ و ۰/۱۸۴ به‌دست آمد که نشان‌دهنده انطباق بسیار مطلوب این مدل با مقادیر مشاهده‌ای و توانایی بالای آن در بازتولید تغییرات بارش در مقیاس منطقه‌ای است. در مقابل، مدل ACCESS-ESM ضعیف‌ترین دقت را در شبیه‌سازی بارش نشان داد، به‌طوری که مقدار شاخص نش-ساتکلیف برای این مدل برابر با ۰/۷۵- و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۴۸/۱۰ میلی‌متر به‌دست آمد که بیانگر انحراف قابل توجه نتایج شبیه‌سازی از داده‌های مشاهده‌ای است. دمای بیشینه نیز الگوی مشابهی مشاهده شد؛ به‌طوری که شاخص‌های آماری مدل GFDL-ESM4 به‌ترتیب برای نش-ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای انحراف به‌ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۱/۰۹ و ۰/۹۶ محاسبه شد که بیانگر دقت بالای این مدل در بازنمایی نوسانات دمای حداکثر است. در مقابل، مدل ACCESS-ESM مجدداً کمترین میزان تطابق با داده‌های مشاهده‌ای را نشان داد و مقدار شاخص نش-ساتکلیف برای آن برابر با ۰/۷۵- به‌دست آمد. همچنین مدل MPI-ESM1-2-HR پس از مدل GFDL-ESM4 در رتبه دوم دقت قرار گرفت، به‌طوری که مقدار شاخص نش-ساتکلیف آن برابر با ۰/۹۶ و مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۱/۳۳ درجه سانتی‌گراد برآورد شد. در شبیه‌سازی دمای کمینه نیز نتایج نشان داد که شاخص‌های آماری مدل GFDL-ESM4 به‌ترتیب برای نش-ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای انحراف به‌ترتیب برابر با ۰/۹۶، ۱/۰۳ و ۰/۰۱- بوده است که بیانگر بیشترین میزان تطابق این مدل با داده‌های مشاهده‌شده و توانایی مناسب آن در بازنمایی تغییرات دمای کمینه است. در مقابل، مدل ACCESS-ESM با مقدار نش-ساتکلیف برابر با ۰/۶۲- و میانگین خطای انحراف برابر با ۰/۵۶- درجه سانتی‌گراد کمترین دقت را در شبیه‌سازی دمای کمینه نشان داد. به‌طور کلی، مقایسه شاخص‌های آماری میان مدل‌های مختلف اقلیمی نشان می‌دهد که مدل GFDL-ESM4 در هر سه متغیر اقلیمی دارای کمترین میزان خطا و بیشترین ضریب کارایی بوده و بنابراین از انطباق بسیار بالایی با داده‌های مشاهده‌ای برخوردار است. از این‌رو، این مدل به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای بازنمایی شرایط اقلیمی منطقه شناسایی شد و به‌عنوان مدل پایه برای پیش‌نگری تغییرات اقلیمی در دو دوره آتی ۲۵ ساله از سال ۲۰۲۶ تا ۲۰۷۵ مورد استفاده قرار گرفت. این نتایج همچنین با یافته‌های پژوهش‌های انجام‌شده در سایر مناطق نیمه‌خشک ایران همخوانی دارد که دقت بالاتر مدل GFDL-ESM4 را نسبت به سایر مدل‌های نسل ششم اقلیمی تأیید می‌کنند.

جدول ۲. شاخص‌های صحت‌سنجی مدل‌های اقلیمی

Table 2. The accuracy indices of climate models

مدل Model	میانگین خطای مطلق MAE	میانگین خطای انحراف MBE	ریشه میانگین مربعات خطا RMSE	نش-سانکلیف NSE
بارش (میلی‌متر) Precipitation (Amm)				
ACCESS-CM2	0.063	13.70	16.60	0.57
ACCESS-ESM	0.015	30.40	48.10	-0.75
GFDL-ESM4	0.184	6.70	7.80	0.91
MPI-ESM1-2-HR	0.022	7.10	8.20	0.89
MRI-ESM2-0	0.054	12.90	17.70	0.61
بیشینه دما (درجه سانتی‌گراد) Maximum Temperatures ( $\Delta^{\circ}\text{C}$ )				
ACCESS-CM2	0.035	3.21	5.33	0.62
ACCESS-ESM	0.028	6.74	4.89	-0.75
GFDL-ESM4	0.030	0.96	1.09	0.97
MPI-ESM1-2-HR	0.043	1.10	1.33	0.96
MRI-ESM2-0	0.035	3.67	3.93	0.67
کمینه دما (درجه سانتی‌گراد) Minimum Temperatures ( $\Delta^{\circ}\text{C}$ )				
ACCESS-CM2	-0.026	3.13	4.96	0.67
ACCESS-ESM	-0.056	6.63	4.35	-0.62
GFDL-ESM4	-0.001	0.95	1.03	0.96
MPI-ESM1-2-HR	-0.051	1.00	1.93	0.94
MRI-ESM2-0	-0.017	3.74	3.78	0.71

Source: Research findings

### پیش‌نگری دوره آتی

بر اساس نتایج مدل اقلیمی GFDL-ESM4 به‌عنوان دقیق‌ترین مدل سازگار با شرایط اقلیمی دشت همدان-بهار شناسایی شد که خروجی‌های این مدل تحت سه سناریوی اقلیمی مورد بررسی با بهره‌گیری از روش نگاشت چندک برای دو دوره زمانی آینده مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج حاصل که در جدول ۳ قابل‌مشاهده است، بیانگر آن است که میانگین بارندگی در تمامی سناریوهای بلندمدت و دوره‌های زمانی نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) کاهش یافته است.

جدول ۳. تغییرات مولفه‌های اقلیمی در دوره‌های آتی طبق سناریوهای اقلیمی نسبت به دوره تاریخی

Table 3. Changes in Climatic Components in Future Periods According to Climate Scenarios Relative to the Historical Period

دوره Period	سناریوی SSP1-2.6 Scenario SSP1-2.6	سناریوی SSP2-4.5 Scenario SSP2-4.5	سناریوی SSP3-7.0 Scenario SSP3-7.0
بارش (میلی‌متر) Precipitation (Amm)			
2026-2050	-9.19	-18.20	-32.63
2051-2075	-21.29	-32.26	-37.34
بیشینه دما (درجه سانتی‌گراد) Maximum Temperatures ( $\Delta^{\circ}\text{C}$ )			
2026-2050	0.45	0.81	1.26
2051-2075	0.57	0.89	1.34
کمینه دما (درجه سانتی‌گراد) Minimum Temperatures ( $\Delta^{\circ}\text{C}$ )			
2026-2050	0.52	0.67	0.80
2051-2075	0.71	0.72	0.88

تبخیر-تعرق مرجع (میلی متر/دوره)			
ET <sub>0</sub> (Δmm/period)			
2026-2050	0.62	2.03	2.73
2026-2050	4.25	5.71	2.73

Source: Research findings

روند کاهشی بارش نشان‌دهنده احتمال تشدید کمبود منابع آبی و بروز پدیده‌های خشکسالی در منطقه طی دهه‌های آتی است. در مقابل، دمای کمینه و بیشینه در هر سه سناریو روندی افزایشی را نشان می‌دهند، به‌گونه‌ای که حتی در سناریوی SSP1-2.6 نیز افزایش محسوس دما پیش‌نگری شده است. این روند گرمایش همراه با کاهش بارش، بیانگر تشدید اثرهای تغییر اقلیم در منطقه و افزایش تبخیر-تعرق مرجع در مقیاس‌های زمانی مختلف است. افزایش دما و کاهش بارندگی، به‌ویژه در سناریوی SSP3-7.0، می‌تواند منجر به وقوع خشکسالی‌های مکرر و طولانی‌مدت، افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش تولید محصولات زراعی، و تهدید جدی برای اکوسیستم‌های طبیعی و منابع آبی سطحی از جمله تالاب‌ها و رودخانه‌ها شود (Afruzi and Zare Abiyaneh, 2020; Moazezzi et al., 2021; Soltani et al., 2023; Farh Enshad et al., 2023). در مجموع، نتایج پیش‌نگری‌ها نشان می‌دهد که دشت مورد مطالعه در دوره آتی با ناپایداری اقلیمی قابل توجهی روبه‌رو خواهد شد که مدیریت پایدار منابع آب و اصلاح الگوی کشت را به ضرورتی انکارناپذیر تبدیل می‌کند.

### شبیه‌سازی عملکرد محصولات در دوره آتی

به‌منظور ارزیابی و پیش‌نگری اثر تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات زراعی و گیاه دارویی گلرنگ در دو دوره آتی، داده‌های ماهانه بلندمدت حاصل از مدل اقلیمی منتخب به‌عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی عملکرد گیاه وارد گردید. مدل شبیه‌ساز، با در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای اقلیمی در بازه‌های زمانی آینده، فرایند رشد و عملکرد محصولات زراعی منطقه را تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بازتولید نمود.

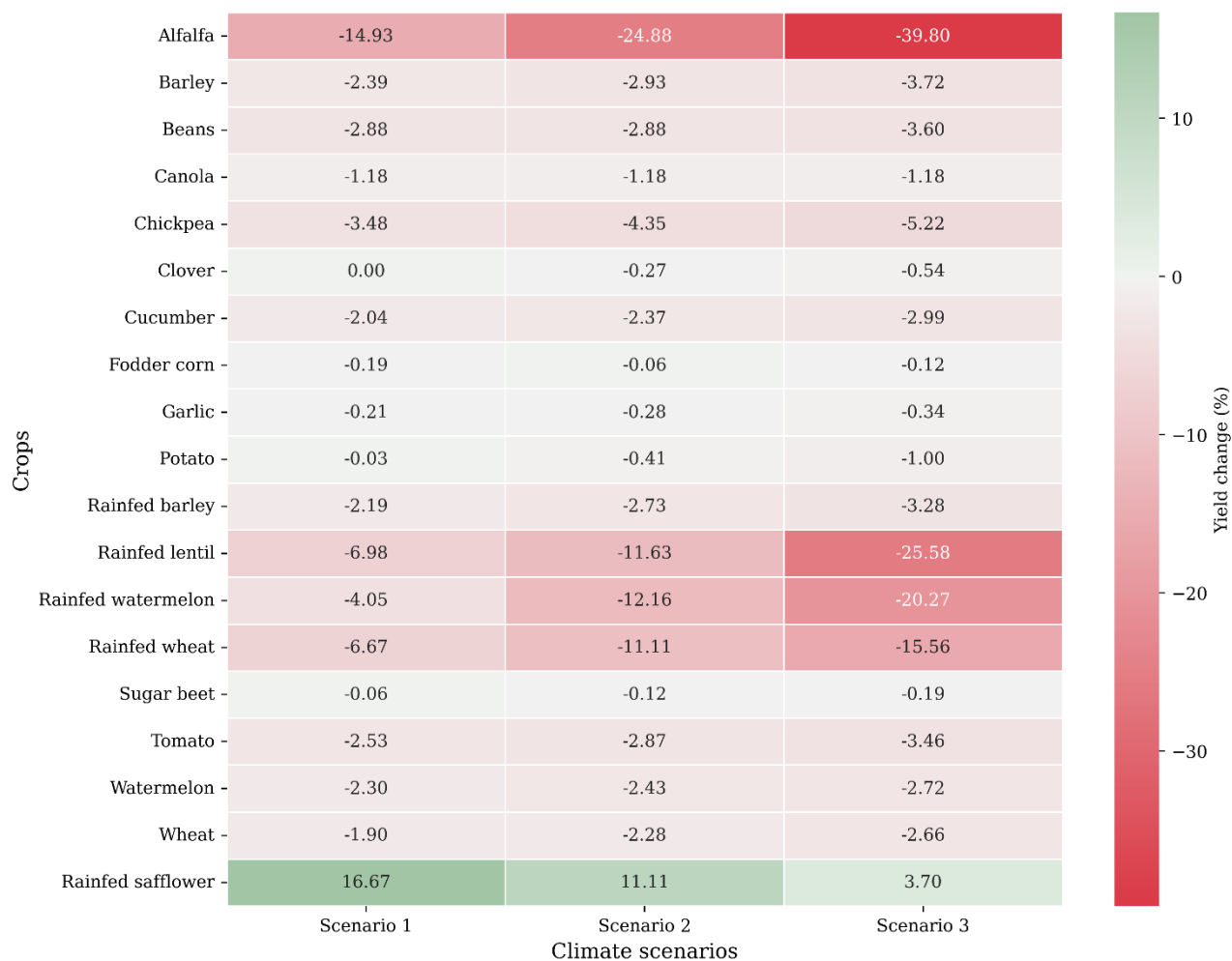
جدول ۳. شاخص‌های آماری برای ارزیابی کارایی مدل DSSAT در دشت همدان-بهار

Table 3. Statistical indices for evaluating the performance of the DSSAT model in the Hamedan-Bahar Plain

پارامتر Parameter	MAE (t/ha)	MBE (t/ha)	RMSE (t/ha)	NSE
عملکرد گیاه Crop yield	0.43	0.27	0.82	0.99

Source: Research findings

بر اساس مقادیر و حدود بهینه شاخص‌های آماری فوق می‌توان گفت که شبیه‌سازی مدل DSSAT در رده خوب ارزیابی می‌شود. از این رو کاربرد مدل در شرایط اقلیمی پیش‌نگری شده منطقه مناسب است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در شکل ۲ ارائه شده است، بیانگر تغییرات عملکرد محصولات در پاسخ به شرایط متفاوت دما، بارش و سایر متغیرهای اقلیمی طی دو دوره آتی آینده است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در الگوی کشت دشت همدان-بهار، بسیاری از محصولات زراعی طی دو دوره آتی آینده در بازه ۲۵ ساله و تحت سناریوهای اقلیمی مورد بررسی، نسبت به دوره پایه با کاهش عملکرد روبه‌رو خواهند شد. این کاهش عمدتاً به دلیل دو عامل اصلی یعنی کاهش بارندگی و افزایش تبخیر-تعرق مرجع است؛ شرایطی که هم میزان دسترس گیاه به آب را محدود می‌کند و هم با کوتاه‌تر کردن دوره رشد، اجازه نمی‌دهد گیاه به پتانسیل کامل خود برسد.

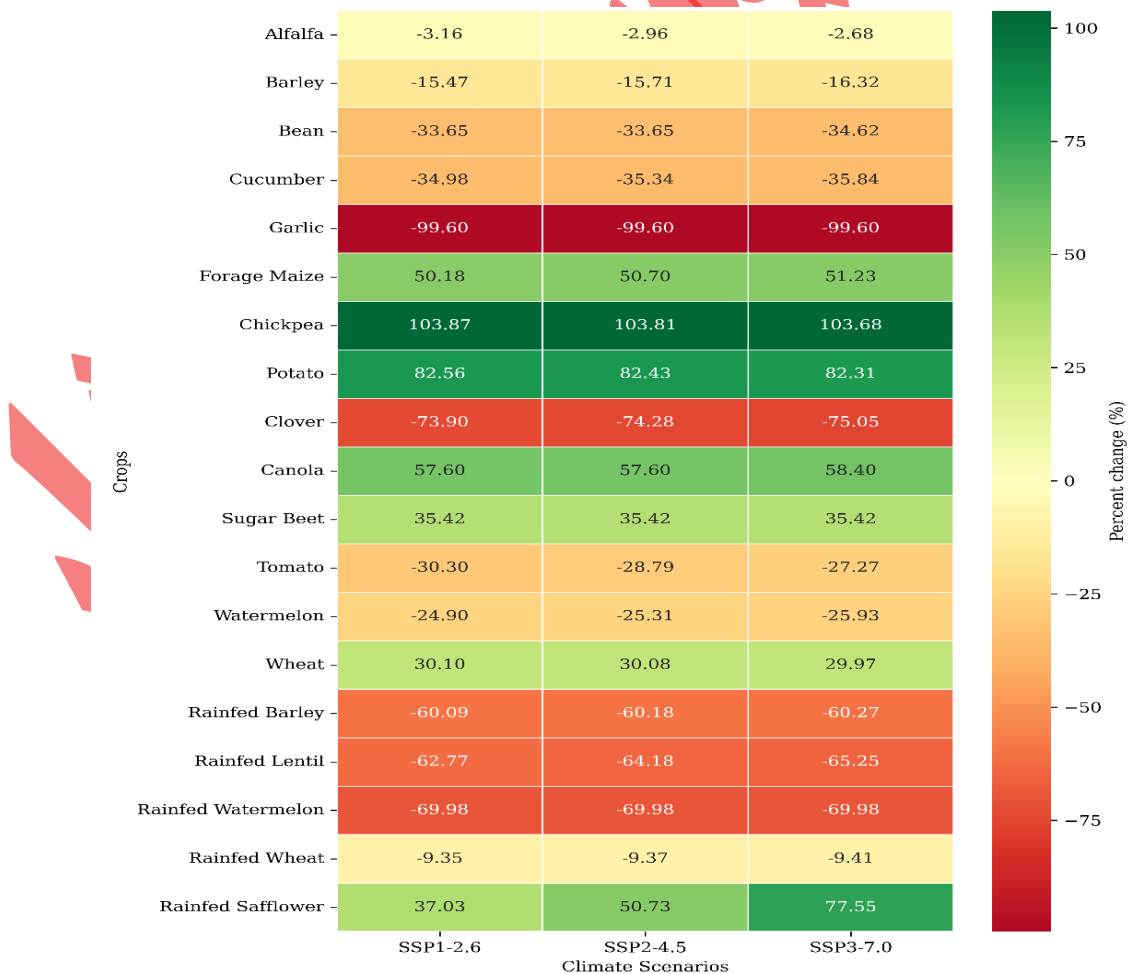


شکل ۲. درصد تغییرات متوسط عملکرد محصولات الگوی کشت و گلرنگ در سناریوهای اقلیمی آینده طی دوره ۲۰۲۶-۲۰۷۵  
**Fig 2. Percentage Change in Average Yield of Crops in the Cropping Pattern and Safflower Under Future Climate Scenarios (2026-2075)**

در این میان محصولات بررسی شده، افزایش عملکرد گلرنگ در سناریوهای تغییر اقلیم را می‌توان با ویژگی‌های فیزیولوژیک و سازگاری‌های مؤثر این گیاه در برابر تنش‌های آبی و حرارتی تبیین کرد. گلرنگ به دلیل برخورداری از سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده قادر است رطوبت لایه‌های زیرین خاک را جذب کند و کاهش رطوبت سطحی ناشی از کاهش بارش را تا حد زیادی جبران نماید. این گیاه همچنین از سازوکار کارآمد تنظیم روزه‌ها برخوردار است؛ به گونه‌ای که در دماهای بالا با کاهش تعرق، تلفات آب را محدود کرده و درعین حال فرایند فتوسنتز را حفظ می‌کند. دامنه حرارتی مطلوب گلرنگ موجب می‌شود افزایش دمای حداقل و حداکثر در محدوده‌های ثبت شده، رشد رویشی و زایشی آن را تسریع کرده و شرایط مناسب‌تری برای تشکیل گل و دانه فراهم آورد. علاوه بر این، واکنش‌های مورفولوژیک نظیر کاهش سطح برگ و تقویت رشد ریشه در شرایط خشکی، کارایی مصرف آب را افزایش داده و پایداری عملکرد را در دوره‌های گرم و خشک بهبود می‌بخشد. مجموعه این سازوکارها باعث شده است که گلرنگ در سناریوهای اقلیمی آینده، با وجود کاهش بارندگی و افزایش دما، دچار کاهش عملکرد نشود و حتی در برخی دوره‌ها به دلیل سازگاری حرارتی و بهره‌گیری مؤثرتر از رطوبت خاک، نسبت به دوره پایه افزایش عملکرد نشان دهد. براین اساس، واکنش مثبت گلرنگ به تغییر اقلیم نتیجه سازوکارهای فیزیولوژیک پایدار است که این گیاه را به گزینه‌ای مناسب برای توسعه کشت در مناطق نیمه‌خشک تبدیل می‌کند. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های پیشین از جمله Farzi Aminabad et al., 2021; Houshmand et al., 2022; Pasban Eslam, 2022 و Sajid et al., 2024 هم‌راستا است.

شبیه‌سازی اقتصادی الگوی کشت منطقه در دوره آتی

به منظور واسنجی مدل بر اساس رهیافت برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی، تابع هدف مدل برنامه‌ریزی خطی به صورت غیرخطی بازتعریف شد تا رفتار واقعی بهره‌برداران در شرایط پایه به دقت بازتولید گردد. نتایج حاصل از این مرحله (شکل ۳) نشان داد که اختلاف میان سطوح زیرکشت مشاهده شده در سال پایه و مقادیر برآورد شده پس از واسنجی بسیار ناچیز است؛ موضوعی که بیانگر دقت بالای مدل در بازسازی وضعیت واقعی منطقه است. در این فرآیند، پارامترهای غیرخطی به گونه‌ای برآورد شدند که بازتولید صحیح از شرایط پایه و هم‌خوانی منطقی بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده حاصل شود. این ویژگی، توان مدل PMP در بازنمایی رفتار واقعی کشاورزان و انعطاف‌پذیری آن در شرایط تغییر یافته را به خوبی نشان می‌دهد. به واسطه‌ی این دقت در واسنجی، مدل قابلیت استفاده برای تحلیل‌های آتی و شبیه‌سازی سیاست‌های مختلف مدیریتی و اقلیمی را پیدا کرده است. بر این اساس، در ادامه، با بهره‌گیری از مدل واسنجی شده و با در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم پیش‌نگری شده، اثر توسعه کشت گلرنگ جهت سازگاری با تغییر اقلیم منطقه مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های اقلیمی پیش‌نگری شده به مدل شبیه‌سازی رشد گیاه وارد شد تا اثر مستقیم و غیرمستقیم تغییر اقلیم بر نیاز آبی محصولات، راندمان آبیاری و وضعیت منابع آب منطقه مشخص گردد. نتایج حاصل از این تحلیل، چشم‌انداز روشنی از میزان پایداری توسعه‌ی گوی کشت در شرایط اقلیمی آینده ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل تغییرات سطح زیرکشت تحت سه سناریوی اقلیمی نشان‌دهنده تغییرات در گوی کشت محصولات زراعی دشت همدان-بهار است. اثر تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات سبب شد که سطح زیرکشت بسیاری از گیاهان، از جمله یونجه، جو، لوبیا، خیار، سیر، شبدر، گوجه‌فرنگی و هندوانه، به ویژه در اراضی دیم، روندی کاهشی داشته باشد. در مقابل، برخی محصولات با افزایش سطح زیرکشت مواجه شدند که در این میان، گلرنگ به عنوان محصول راهبردی پژوهش حاضر، برخلاف سایر محصولات، به دلیل پایداری عملکرد و مقاومت بالا در برابر تنش‌های حرارتی و آبی، افزایش چشمگیری در سطح زیرکشت و عملکرد نشان داد.



شکل ۳. درصد تغییرات متوسط سطح زیرکشت محصولات الگوی کشت در سناریوهای اقلیمی آینده طی دوره ۲۰۲۶-۲۰۷۵

Fig 3. Percentage Change in Average Cultivated Area of Crops Under Future Climate Scenarios (2026-2075)

نتایج نشان‌دهنده تغییرات قابل توجهی در سطح زیرکشت محصولات مختلف تحت سناریوهای اقلیمی مورد بررسی (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0) است. بر این اساس، برخی محصولات با کاهش قابل توجهی در سطح زیرکشت مواجه خواهند شد؛ به طوری که بیشترین کاهش مربوط به سیر (۹۹/۶- درصد)، شبدر (حدود ۷۴ تا ۷۵- درصد)، هندوانه دیم (۶۹/۹۸- درصد)، عدس دیم (۶۲/۷۷- تا ۶۵/۲۵- درصد) و جو دیم (حدود ۶۰- درصد) است. همچنین برای برخی محصولات آبی کاهش‌های متوسطی پیش‌بینی شده‌است؛ به‌گونه‌ای که سطح زیرکشت خیار (حدود ۳۵- درصد)، لوبیا (حدود ۳۳ تا ۳۵- درصد)، گوجه‌فرنگی (۲۷- تا ۳۰- درصد)، هندوانه (حدود ۲۵- درصد) و جو (حدود ۱۵ تا ۱۶- درصد) روندی کاهشی را نشان می‌دهد. در مقابل، تعدادی از محصولات افزایش قابل توجهی در سطح زیرکشت خواهند داشت. در این میان، نخود بیشترین افزایش را نشان می‌دهد (حدود ۱۰۳ درصد)، پس از آن سیب‌زمینی (حدود ۸۲ درصد)، کلزا (حدود ۵۷ تا ۵۸ درصد)، ذرت علوفه‌ای (حدود ۵۰ تا ۵۱ درصد)، چغندرقد (حدود ۳۵ درصد) و گندم (حدود ۳۰ درصد) قرار دارند. همچنین سطح زیرکشت گلرنگ دیم افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد (حدود ۳۷ تا ۷۸ درصد) که این افزایش در سناریوی انتشار بالاتر بارزتر است. در مقابل، یونجه تنها کاهش اندکی در سطح زیرکشت (حدود ۳ درصد) نشان می‌دهد. به طور کلی، الگوی پیش‌بینی‌شده بیانگر یک تغییر الگوی کشت از برخی محصولات نسبتاً پرمصرف آب یا کم‌تحمل به تنش‌های اقلیمی به سمت محصولاتی با سازگاری بیشتر با شرایط اقلیمی-اقتصادی در آینده است؛ موضوعی که می‌تواند بازتابی از سازگاری احتمالی کشاورزان با تغییر اقلیم و محدودیت‌های منابع، به‌ویژه منابع آب، در الگوی کشت منطقه باشد. نتایج شبیه‌سازی اقتصادی دشت همدان-بهار تحت سه سناریوی اقلیمی نشان داد که تغییر اقلیم، اگرچه در مجموع سبب کاهش عملکرد برخی محصولات زراعی می‌شود، اما اثر این تغییرات بر سودآوری خالص کشاورزی بسته به نوع الگوی کشت متفاوت است (جدول ۶). در حالت بدون توسعه کشت گلرنگ، سود خالص نسبت به دوره پایه (۸۶۴/۱۵ میلیارد تومان معادل ۲۰/۵۸ میلیون دلار) در تمامی سناریوها کاهش نشان داد و به ترتیب در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 به مقادیر ۸۶۳/۸۵ میلیارد تومان (معادل ۲۰/۵۶ میلیون دلار)، ۸۶۰/۸۲ میلیارد تومان (معادل ۲۰/۴۹ میلیون دلار) و ۸۵۶/۰۴ میلیارد تومان (معادل ۲۰/۳۸ میلیون دلار) رسید. این کاهش تدریجی بیانگر اثر منفی تغییرات اقلیمی بر نظام تولید فعلی منطقه است، به‌ویژه در سناریوی شدید SSP3-7.0 که بیشترین افت نسبت به پایه را نشان می‌دهد. در مقابل، با افزودن کشت گلرنگ به الگوی کشت منطقه، روند سودآوری کاملاً معکوس شد؛ به‌گونه‌ای که سود خالص در سه سناریو به ترتیب به ۸۷۰/۰۹ میلیارد تومان (معادل ۲۰/۷۱ میلیون دلار)، ۸۶۹/۶۸ میلیارد تومان (معادل ۲۰/۷۰ میلیون دلار) و ۸۶۸/۰۲ میلیارد تومان (معادل ۲۰/۶۶ میلیون دلار) افزایش یافت. براین اساس، میزان تغییرات مثبت نسبت به حالت پایه در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 به ترتیب برابر با ۶/۲۴ میلیارد تومان (معادل ۰/۱۵ میلیون دلار)، ۸/۸۶ میلیارد تومان (معادل ۰/۲۱ میلیون دلار) و ۱۱/۹۸ میلیارد تومان (معادل ۰/۲۹ میلیون دلار) برآورد شد. بیشترین افزایش سود خالص در سناریوی SSP3-7.0 به دست آمد که نشان می‌دهد در شرایط اقلیمی شدیدتر، مزیت نسبی اقتصادی گلرنگ به‌عنوان گیاهی متحمل به خشکی و گرما بیشتر آشکار می‌شود. در مجموع، مقایسه دو وضعیت با گلرنگ و بدون گلرنگ بیانگر آن است که توسعه کشت گلرنگ نه تنها می‌تواند اثرهای منفی تغییر اقلیم بر بازده اقتصادی را جبران کند، بلکه در سناریوهای گرم‌تر و خشک‌تر، به عاملی مؤثر در افزایش پایداری درآمد کشاورزی منطقه تبدیل می‌شود. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های پیشین از جمله Mosavi et al., 2020، Moazzezi et al., 2021، Soltani et al., 2023، Farh Enshad et al., 2023 و Kalantar et al., 2025 هم‌راستا است و بر اهمیت توسعه گیاهان متحمل به خشکی به‌عنوان راهبردی کارآمد در سازگاری با تغییر اقلیم و ارتقای تاب‌آوری اقتصادی نظام کشاورزی تأکید دارد.

جدول ۶. پیش‌نگری میزان تغییر سود خالص کشاورزی دشت در سناریوهای اقلیمی (میلیارد تومان)

Table 6. Forecasting the changes in gross agricultural profit in climate scenarios (billion Tomans)

سناریو Scenario	سود پایه Base profit	دوره آتی ۲۰۲۶-۲۰۷۵ Future period 2026-2075		مقدار تغییرات The amount of changes	
		بدون گلرنگ No Safflower			با گلرنگ With Safflower

SSP1-2.6	864.15	863.85	870.09	6.24
SSP2-4.5	864.15	860.82	869.68	8.86
SSP3-7.0	864.15	856.04	868.02	11.98

Source: Research findings

## نتیجه‌گیری

گزارش‌های معتبر بین‌المللی تغییر اقلیم نشان می‌دهد که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، گرمایش جهانی و ناپایداری الگوی بارش، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و مدیریت منابع آب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند دشت همدان-بهار است. وابستگی بالای کشاورزی این مناطق به بارش و محدودیت آب زیرزمینی، حساسیت سامانه تولید را در برابر تنش‌های اقلیمی تشدید می‌کند. در این مطالعه، با استفاده از سناریوهای اقلیمی SSP و مدل فرآیندی DSSAT، اثر تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات منتخب و به‌طور ویژه گیاه گلرنگ ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد افزایش دما و کاهش بارش در اغلب سناریوها، کاهش عملکرد محصولات رایج دیم را در پی دارد و این موضوع موجب کاهش سطح زیرکشت، افت پایداری تولید و افزایش نوسانات اقتصادی می‌شود. این کاهش، معیشت بهره‌برداران را تهدید کرده و تاب‌آوری اقتصادی منطقه را محدود می‌سازد. در مقابل، گلرنگ به دلیل تحمل حرارتی، کارایی مصرف آب و سازگاری مناسب با خاک‌های کم‌بازده، عملکرد پایدارتری نسبت به دوره پایه نشان داد و در برخی سناریوها حتی افزایش عملکرد نیز مشاهده شد. به همین دلیل، این گیاه یکی از گزینه‌های قابل اتکا برای حفظ تولید در شرایط محدودیت منابع آب به شمار می‌آید. تحلیل اقتصادی نیز تأیید کرد که توسعه کشت گلرنگ با کاهش وابستگی به محصولات پرآبر و آسیب‌پذیر، می‌تواند خطر تولید را کاهش داده و پایداری اقتصادی را بهبود دهد. در دشت همدان-بهار که با افت شدید آبخوان و محدودیت روزافزون منابع آب روبه‌رو است، افزایش سطح زیرکشت گلرنگ می‌تواند بخشی از آسیب‌پذیری اقتصادی ناشی از تغییر اقلیم را جبران کند و به تقویت تاب‌آوری تولید کمک نماید. در مقابل، بررسی تغییرات سطح زیر کشت سایر محصولات در این مطالعه نشان داد که برای حفظ امنیت غذایی در مواجهه با تغییر اقلیم، باید به تنوع کشت و مدیریت بهینه منابع آب توجه شود. در مناطقی که کاهش منابع آب و تغییرات دما به‌طور قابل توجهی اثرگذار است، توجه به کشت محصولات متحمل به خشکی و همچنین محصولات کم‌آبر می‌تواند به جبران کاهش تولید محصولات سنتی کمک کند. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که ادغام تحلیل‌های آینده‌نگر اقلیمی با راهبردهای سازگاری، چارچوبی مؤثر برای تصمیم‌گیری در سطح مزرعه و منطقه فراهم می‌کند و امکان تنظیم الگوی کشت باهدف پیشینه‌سازی سود و کاهش خطر را فراهم می‌سازد. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد که توسعه کشت گیاهان متحمل به خشکی مانند گلرنگ می‌تواند راهبردی مؤثر برای افزایش سود خالص بخش کشاورزی و کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم باشد و در کنار سایر رویکردهای سازگاری، مسیر پایدارتری برای مدیریت کشاورزی دشت همدان-بهار ایجاد کند.

## منابع

- Afruzi, A., Zare Abyaneh, H., & Abdolabadi, H. (2021). Local strategies to manage groundwater depletion under climate change scenarios—a case study: Hamedan-Bahar Plain (Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(15), 1548. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07773-1>
- Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024). A CMIP6 multi-model analysis of the impact of climate change on severe meteorological droughts through multiple drought indices—case study of Iran's metropolises. *Water*, 16(5), 711. <https://doi.org/10.3390/w16050711>
- Ahmad, Q. U. A., Moors, E., Biemans, H., Shaheen, N., Masih, I., & ur Rahman Hashmi, M. Z. (2023). Climate-induced shifts in irrigation water demand and supply during sensitive crop growth phases in South Asia. *Climatic Change*, 176(11), 150. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03629-7>
- Balali, H., & Kasbian Lal, F. (2022). Economic valuation of groundwater in the agriculture sector (Case Study: Hamedan-Bahar Plain). *Journal of Agricultural Economics & Development*, 36(1), 37-48.
- Banerjee, K., Dutta, S., Das, S., & Sadhukhan, R. (2024). Crop simulation models as decision tools to enhance agricultural system productivity and sustainability—a critical review. *Technology in Agronomy*, 5(1).
- Beyyavas, V., Ramazanoglu, E., Sakin, E., Cevheri, C. İ., & Dogan, L. (2024). Variations in physiological and yield-related attributes of safflower (*carthamus tinctorius* L.) varieties grown under irrigated and rainfed environments. *Journal of Plant Nutrition*, 47(19), 3514-3525. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2380487>

Brunner, M., Keller, L., Stallasch, S. E., Kretschmann, J., Hasl, A., Preckel, F., ... & Hedges, L. V. (2023). Meta-analyzing individual participant data from studies with complex survey designs: A tutorial on using the two-stage approach for data from educational large-scale assessments. *Research Synthesis Methods*, 14(1), 5-35.

Cançelik, M. (2021). A Research On Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) The Vegetable Oil Market and The Future of Safflower in Turkey. *Current marketing studies and digital developments*, 135-149.

Eghbalishahabad, S., Nasiri Mahalati, M., Jahan, M. & Fallah, M. H. (2024). Simulating the Growth and Development of Quinoa Using the DSSAT 4.7 Software Model in Field Conditions. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(1), 107-124. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6801.1045>

Farh Enshad, F., Shah Nazari, A., Ra'ini Sarjaz, M., & Olsson, J. E. (2023). Combining bias correction methods for temperature and precipitation outputs of CMIP6 climate models in the Hamadan Bahar plain. *Journal of Watershed Management Research*, 14(27), 75–85. [In Persian]

Farzi Aminabad, R., Nasrallahzadeh, S., & Ghasemi Golghazani, K. (2021). Response of safflower to water deficit and foliar application of putrescine and 24-epibrassinolide. *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 31(2), 289–302. [In Persian]

Ghaffari, A., Nasser, M., & Someeh, A. P. (2022). Assessing the economic effects of drought using the Positive Mathematical Planning model under climate change scenarios. *Heliyon*, 8(12). <https://doi.org/10.22034/SAPS.2021.13110>

Golmohammadi, F. (2022). Agriculture and Rural Development Plans in Iran: Situations and Problems. *Black Sea Journal of Agriculture*, 5(1), 27-39. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.984780>

Gunawat, A., Sharma, D., Sharma, A., & Dubey, S. K. (2022). Assessment of climate change impact and potential adaptation measures on wheat yield using the DSSAT model in the semi-arid environment. *Natural Hazards*, 111(2), 2077-2096. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05130-9>

Houshmand, P., Shirani, M., & Ehsanzadeh, P. (2022). Insights into temperature and soil moisture-induced alterations in safflower physiological, seed filling, quality, and yield attributes. *International Journal of Plant Production*, 16(1), 181–193. <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00168-y>

HPMO. (2024). Iran Meteorological Organization. Annual climate summary report 2024. Tehran, Iran: Iran Meteorological Organization. Retrieved from <https://www.weather.ir/>

Kalantar, V., Mosavi, S. H., and Najafi Alamdarlo, H. (2025). A Strategic Approach to Water Resource Efficiency and Sustainable Agriculture in Arid Regions: The Role of Oleaster. *Agricultural Economics and Development*, 33(2), 197-238. <https://doi.org/10.30490/aead.2025.367411.1667>

Kheyruri, Y., Neshat, A., Sharafati, A., & Hameed, A. S. (2024). Spatial downscaling of the GCMs precipitation product over various regions of Iran: Application of the Long Short-Term Memory model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 136, 103768. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103768>

Li, L., Zhang, S., Fan, J., Cao, Y., Li, T., Lang, J., ... & Zhu, L. (2024). Impact of the COVID-19 pandemic on teaching and research activities in obstetrics and gynecology: a national two-stage, stratified, cluster sampling survey in China. *BMC Medical Education*, 24(1), 1128. <https://doi.org/10.1186/s12909-024-06008-7>

MAJH. (2024). Jihad-Agriculture Organization of Hamedan Province. Annual performance report 2024. Hamedan, Iran: Jihad-Agriculture Organization of Hamedan Province. Retrieved from <https://hamedan.maj.ir/>

Mikhak, H., Rahimian, M., & Gholamrezai, S. (2022). Implications of changing cropping patterns to low water demand plants due to climate change: evidence from Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 24(8), 9833-9850.

Moazzezi, F., Mosavi, S. H., Yavari, Gh. & Bagheri, M. (2021). Assessing The Impact Of Climate Change On Food Security & Economic Welfare: Case Study Hamedan-Bahar Plain. *Eqtesad-E Keshavarzi Va Towse'e*, 29(114), 249-284. [In Persian]

Mosavi, S. H., Soltani, S., & Khalilian, S. (2020). Coping with climate change in agriculture: Evidence from Hamadan-Bahar plain in Iran. *Agricultural Water Management*, 241, 106332. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106332>

Moulogianni, C. (2022). Comparison of selected mathematical programming models used for sustainable land and farm management. *Land*, 11(8), 1293. <https://doi.org/10.3390/land11081293>

Mousavi Moayyed, S. A., Nooripoor, M., Sharifzadeh, M., and Afereydouni, M. (2025). Feasibility Study of the Cultivation Change from Agronomy to Medicinal Plants in Drought Conditions: the Case of Margoon Region. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(1), 63-82. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8474.1086>

Mubeen, M., Ahmad, A., Hammad, H. M., Awais, M., Farid, H. U., Saleem, M., ... & Nasim, W. (2020). Evaluating the climate change impact on water use efficiency of cotton-wheat in semi-arid conditions using the DSSAT model. *Journal of Water and Climate Change*, 11(4), 1661-1675. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.179>

Muratoglu, A., Sungur Demir, M., & Kartal, V. (2025, April). Water Footprint Dynamics in Turkish Agriculture: Linking Climate Change and Crop Yields. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU25-2695). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-2695>

Muzammal, H., Zaman, M., Safdar, M., Adnan Shahid, M., Sabir, M. K., Khil, A., ... & Zaib, A. (2024). Climate change impacts on water resources and implications for agricultural management. In Transforming agricultural management for a sustainable future: Climate change and machine learning perspectives (pp. 21-45). Cham: Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-63430-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-63430-7_2)

Nemati Shishehgaran, N., Babaeian, F., & Mianabadi, H. (2025). Evaluation and comparison of CMIP5 and CMIP6 models in estimating precipitation in Iran. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 0-0. [In Persian] <https://doi.org/20.1001.1.24235970.1404.13.1.6.6>

Ojaq, S. M. M., Mozafari, H., Jabbari, H., & Sani, B. (2020). Evaluation of the yield of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes under semi-arid conditions. *Plant Genetic Resources*, 18(4), 270-277. <https://doi.org/10.1017/S1479262120000301>

Pasban Eslam, B. (2022). Eco-physiological and agronomic responses of autumn safflower genotypes under drought stress during seedling establishment and grain filling stages. *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 32(2), 19-30. [In Persian]

Petsakos, A., & Rozakis, S. (2022). Models and muddles: comment on 'Calibration of agricultural risk programming models using positive mathematical programming'. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 66(3), 713-728. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12407>

Ramezani Etedali, H. & Koochi, S. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on the Aridity in Iran with the Population Exposure Approach. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(1), 17-38. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>

Rastegaripour, F., Tavassoli, A., Babaeian, M., Fernández-Gálvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Assessing the impacts of climate change on water resource management and crop patterns in Eastern Iran. *Agricultural Water Management*, 295, 108774. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108774>

Sabbaghi, M. A., Nazari, M., Araghinejad, S., & Soufizadeh, S. (2020). Economic impacts of climate change on water resources and agriculture in the Zayandehroud River basin in Iran. *Agricultural Water Management*, 241, 106323. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106323>

Sajid, M., Munir, H., Rauf, S., Ibtahaj, I., Paray, B. A., Kiełtyka-Dadasiewicz, A., ... & Ahmed, M. A. (2024). How climate variability affects safflower (*Carthamus tinctorius* L.) yield, oil, and fatty acids in response to sowing dates. *Horticulturae*, 10(6), 539. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10060539>

Sarvestan, R., & Zarei, M. (2026). Identification of rainfall forecast models for effective planning and sustainable water resource management under climate change conditions. In *Planning and Management for Sustainable Water Resources and Infrastructure under Climate Change*, 91-112. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-33687-4.00011-3>

Shaabani, M. K., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S. S., & Gohari, S. A. R. (2024). Simulation of the effects of climate change, crop pattern change, and developing irrigation systems on the groundwater resources by SWAT, WEAP, and MODFLOW models: a case study of Fars province, Iran: MK Shaabani et al., *Environment, Development and Sustainability*, 26(4), 10485-10511. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03157-5>

Sharma, S., & Neupane, S. (2025). Exploring Farmers' Resilience: Climate Change and Sustainable Adaptation Strategies in the Agricultural Sector of Nepal. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 13(2), 504-513. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v13i2.504-513.7115>

Soltani, S., Mosavi, S. H., Saghalian, S. H., Azhdari, S., Alamdarlo, H. N., & Khalilian, S. (2023). Climate change and energy use efficiency in arid and semiarid agricultural areas: A case study of Hamadan-Bahar plain in Iran. *Energy*, 268, 126553. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126553>

Talebmorad, H., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S., Mousavi, S. F., Akhavan, S., Ostad-Ali-Askari, K., & Singh, V. P. (2021). Evaluation of the impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Hamedan-Bahar plain. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 11(3), 333-347. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2021.114554>

Tooley, B. E., Mallory, E. B., Porter, G. A., & Hoogenboom, G. (2021). Predicting the response of a potato-grain production system to climate change for a humid continental climate using DSSAT. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108452. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108452>

Wilke, D. N. (2024). Check for Robust Optimization of Discontinuous Loss Functions Daniel N. Wilke. *Handbook of Formal Optimization*, 3.

Yao, J., Berbel, J., Yang, Z., Wang, H., & Martínez-Dalmau, J. (2025). Application of positive mathematical programming (PMP) in sustainable water resource management: A case study of Hetao Irrigation District, China. *Water*, 17(17), 2598. <https://doi.org/10.3390/w17172598>

Zeydalienejad, N., & Nassery, H. R. (2023). A review of the climate-induced depletion of Iran's aquifers. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(2), 467-490. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02278-z>