



The University of Tehran Press

Natural Resources Governance

Vol. 2, No. 2, Summer 2025

Online ISSN: 3060-7183

Home Page: <https://jnrg.ut.ac.ir/>

Analysis of Climate Change and Its Implications for Natural Resource Governance: An Integrated Approach Using LARS-WG and SWOT

Reza Dastranj¹ | Ahmad Nohegar^{*2}

- 1) Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: reza.dastranj@ut.ac.ir
- 2) Corresponding Author, Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: nohegar@ut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received 27 April, 2025

Revised 12 June, 2025

Accepted 20 June, 2025

Published online 26 June, 2025

Keywords:

*Climate Change,
LARS-WG Model,
Natural Resource Governance,
Resilience,
SWOT Analysis.*

ABSTRACT

Climate change is a paramount challenge confronting socio-ecological systems in Iran, exerting both direct and indirect impacts on natural resource governance, particularly concerning water and agricultural resources. This research aimed to investigate climate change and its ramifications for natural resource management by collecting daily temperature (minimum and maximum), precipitation, and sunshine hours data from the Mahabad meteorological station for the historical period of 1986 to 2014 from the National Meteorological Organization. Subsequently, the LARS-WG downscaling model was employed, utilizing outputs from five general circulation models (ACCESS-ESM1-5, CNRM-CM6-1, HadGEM3-GC31-LL, MPI-ESM1-2-LR, and MRI-ESM2-0) under three emission scenarios (SSP126, SSP245, and SSP585) to simulate climatic conditions for the future period of 2021 to 2040. To enhance prediction accuracy, model weighting was conducted based on the deviation of simulated data from observed values during the baseline period. The results indicate an approximate 8% increase in average maximum temperature and about a 20% increase in average minimum temperature, while the average annual precipitation is projected to decrease by approximately 13%. These changes, particularly with reduced summer precipitation and significant winter fluctuations, pose serious implications for natural resource governance, including increased pressure on surface and groundwater resources, diminished sustainability of rain-fed agriculture, threats to food security, and an elevated risk of winter floods. A SWOT analysis revealed that alongside these substantial threats, opportunities exist, such as developing modern irrigation systems, modifying cultivation patterns, and leveraging the capacity of Mahabad Dam for water storage. The findings of this research can thus provide a scientific foundation for adaptive policymaking and strengthening socio-ecological resilience in the sustainable management of the region's natural resources.

Cite this article: Dastranj, R., Nohegar, A. (2025). Analysis of Climate Change and Its Implications for Natural Resource Governance: An Integrated Approach Using LARS-WG and SWOT. *Journal of Natural Resources Governance*, 2 (2), 158-173. <https://doi.org/10.22059/jnrg.2025.401978.1053>



© Reza Dastranj, Ahmad Nohegar
Publisher: University of Tehran Press.

<https://doi.org/10.22059/jnrg.2025.401978.1053>



انتشارات دانشگاه تهران

نشریه حکمرانی منابع طبیعی

دوره ۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

سایت نشریه: <https://jnrg.ut.ac.ir/>

شاپا الکترونیکی: ۷۱۸۳-۳۰۶۰

تحلیل تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر حکمرانی منابع طبیعی:

رویکردی تلفیقی با استفاده از LARS-WG و SWOT

رضا دسترنج^۱ | احمد نوحه گر^{۲*}

- (۱) گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیطی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: reza.dastranj@ut.ac.ir
(۲) نویسنده مسئول، گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیطی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: nohegar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: علمی - پژوهشی	تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی نظام‌های اجتماعی - اکولوژیک در ایران به‌شمار می‌رود و اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر حکمرانی منابع طبیعی، به‌ویژه منابع آب و کشاورزی دارد. در این پژوهش با هدف بررسی تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر مدیریت منابع طبیعی، داده‌های روزانه دما (حداقل و حداکثر)، بارش و ساعات آفتابی ایستگاه هواشناسی مهاباد طی دوره تاریخی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۴ از سازمان هواشناسی کشور گردآوری شد. سپس با استفاده از مدل ریزمقیاس‌سازی LARS-WG و خروجی پنج مدل گردش عمومی جو شامل ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1، MPI-ESM1-2، HadGEM3-GC31-LL و MRI-ESM2-0 تحت سه سناریوی انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 شرایط اقلیمی دوره آتی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ شبیه‌سازی شد. به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی، وزن‌دهی مدل‌ها بر اساس انحراف داده‌های شبیه‌سازی‌شده از مقادیر مشاهداتی در دوره پایه انجام گرفت. نتایج نشان داد میانگین دمای حداکثر حدود ۸ درصد و میانگین دمای حداقل حدود ۲۰ درصد افزایش یافته و میانگین بارش سالانه حدود ۱۳ درصد کاهش خواهد یافت. این تغییرات به‌ویژه با کاهش بارش تابستانه و نوسان‌های شدید زمستانه، پیامدهای جدی برای حکمرانی منابع طبیعی دارند، ازجمله فشار مضاعف بر منابع آب سطحی و زیرزمینی، کاهش پایداری کشاورزی دیم، تهدید امنیت غذایی و افزایش ریسک سیلاب‌های زمستانی. تحلیل نتایج در چارچوب SWOT نشان داد در کنار تهدیدهای جدی، فرصت‌هایی همچون توسعه سامانه‌های نوین آبیاری، اصلاح الگوی کشت و استفاده از ظرفیت سد مهاباد برای ذخیره‌سازی آب وجود دارد. بر این اساس، یافته‌های پژوهش می‌تواند مبنای علمی برای سیاست‌گذاری‌های انطباقی و تقویت تاب‌آوری اجتماعی - اکولوژیک در مدیریت پایدار منابع طبیعی منطقه فراهم آورد.
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵	
کلیدواژه: تاب‌آوری، تغییر اقلیم، حکمرانی منابع طبیعی، مدل LARS-WG، تحلیل SWOT.	

استناد: دسترنج، رضا، نوحه گر، احمد (۱۴۰۴). تحلیل تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر حکمرانی منابع طبیعی: رویکردی تلفیقی با استفاده از LARS-WG و SWOT.

حکمرانی منابع طبیعی، ۲ (۲)، ۱۷۳-۱۵۸. <https://doi.org/10.22059/jnrg.2025.401978.1053>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© رضا دسترنج، احمد نوحه گر

<https://doi.org/10.22059/jnrg.2025.401978.1053>



۱. مقدمه

تغییر اقلیم به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در قرن بیست و یکم، آثار گسترده‌ای بر نظام‌های اجتماعی - اکولوژیک و حکمرانی منابع طبیعی در سراسر جهان بر جای گذاشته است (IPCC, 2021). افزایش میانگین دما، تغییر در الگوهای بارش و شدت یافتن رخدادهای حدی آب‌وهوایی از جمله پیامدهای اصلی تغییر اقلیم هستند که می‌توانند منابع آب، کشاورزی و امنیت غذایی را در مقیاس‌های ملی و محلی تحت تأثیر قرار دهند (Diffenbaugh & Burke, 2019). در این میان، کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر تغییر اقلیم دارند، زیرا اقتصاد، معیشت و تاب‌آوری اجتماعی به شدت به منابع طبیعی تجدیدپذیر وابسته است (Tabari, 2020).

در ایران، منابع آب سطحی و زیرزمینی پایه توسعه کشاورزی و امنیت غذایی محسوب می‌شوند، اما هم‌اکنون به دلیل افزایش دما، کاهش بارش و خشکسالی‌های مکرر با تهدیدهای جدی روبه‌رو هستند (Madani et al., 2016). این شرایط نه تنها به بروز بحران‌های زیست‌محیطی منجر می‌شود، بلکه پیامدهای اجتماعی و اقتصادی نظیر مهاجرت روستایی، تعارضات بر سر منابع و کاهش تاب‌آوری جوامع محلی را نیز به همراه دارد. از این رو بررسی دقیق تغییرات اقلیمی و تحلیل پیامدهای آن بر حکمرانی پایدار منابع طبیعی در ایران ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است (Nouri, 2023).

در سطح روش‌شناسی استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌سازی آماری مانند LARS-WG¹ به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در مقیاس محلی رواج یافته است (Semenov & Stratonovitch, 2010). این مدل‌ها با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی ایستگاه‌های هواشناسی و خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs²) امکان ارائه برآوردهای دقیق‌تر از شرایط اقلیمی آینده را فراهم می‌سازند. مطالعات مختلف در ایران و کشورهای همسایه با بهره‌گیری از این مدل نشان داده‌اند روند افزایش دما در دوره‌های آتی قطعی است و تغییرات بارش به‌طور عمده با نوسانات فصلی و کاهش میانگین سالانه همراه خواهد بود (Azari et al., 2021; Jahangir et al., 2022; Abdulsahib et al., 2024).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این حوزه، بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در ایران بر جنبه‌های فنی و اقلیمی مدل‌سازی متمرکز بوده و کمتر به پیامدهای حکمرانی و سیاستی تغییر اقلیم پرداخته‌اند. این در حالی است که چنین نتایجی می‌تواند ابزار مهمی برای تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی کشاورزی و طراحی سیاست‌های انطباقی باشند (Adger et al., 2009; Ostrom, 2009; Safavi Gerdini et al., 2022).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در دوره آتی و تحلیل پیامدهای آن بر حکمرانی منابع طبیعی طراحی شده است. این مطالعه می‌کوشد با ترکیب توانمندی‌های مدل LARS-WG و چارچوب تحلیلی SWOT، تصویری روشن از آینده اقلیمی ارائه دهد و زمینه را برای تدوین سیاست‌های پایدار در مدیریت منابع طبیعی فراهم سازد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

شهرستان مهاباد در جنوب استان آذربایجان غربی و در شمال غرب ایران واقع شده است. این شهرستان بخشی از حوزه آبریز دریاچه ارومیه و زیرحوزه زرينه‌رود است و از نظر منابع طبیعی و کشاورزی اهمیت ویژه‌ای دارد. مختصات جغرافیایی آن حدود ۳۶ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی بوده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا حدود ۱۳۸۵ متر است. موقعیت جغرافیایی و شرایط توپوگرافی، این منطقه را در زمره نواحی نیمه‌خشک سرد قرار داده است که زمستان‌های سرد و پربرف و تابستان‌های گرم و خشک از ویژگی‌های بارز آن محسوب می‌شوند.

بر اساس داده‌های اقلیمی، میانگین بارش سالانه در حوزه سد مهاباد طی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۲ حدود ۳۵۰ میلی‌متر گزارش شده است (Nazari-Sharabian et al., 2019). الگوی بارش منطقه به‌طور عمده زمستانه است و در نیمه گرم سال بارندگی به

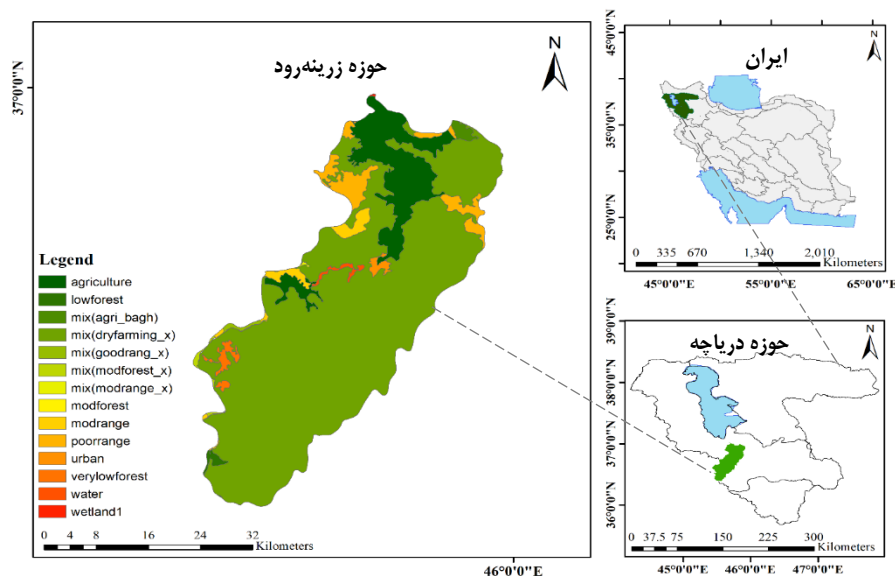
1. Long Ashton Research Station Weather Generator

2. Global Climate Models

حداقل می‌رسد. این شرایط موجب وابستگی بالای کشاورزی و معیشت روستاییان به بارش‌های فصلی و منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. کشاورزی اصلی‌ترین فعالیت اقتصادی منطقه است و ترکیبی از کشت دیم (به‌ویژه گندم و جو) و کشت آبی را شامل می‌شود. علاوه بر این، باغداری (انگور، سیب و سایر محصولات باغی) و دامداری سنتی از دیگر ارکان معیشتی مردم به‌شمار می‌روند.

سد مهاباد به‌عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های مدیریت منابع آب، نقش کلیدی در تأمین آب کشاورزی و تنظیم الگوی مصرف دارد. این سد افزون بر تأمین آب اراضی زراعی، منبعی حیاتی برای کاهش نوسانات آبی ناشی از خشکسالی محسوب می‌شود (Nazari-Sharabian et al., 2019). با وجود این، فشارهای ناشی از تغییرات اقلیمی و رشد تقاضا، توانایی این زیرساخت را برای پاسخگویی پایدار به نیازها با محدودیت‌هایی مواجه کرده است.

در سال‌های اخیر، مهاباد با چالش‌های اقلیمی و محیط‌زیستی متعددی مواجه شده است. کاهش بارش و افزایش میانگین دما، موجب بروز خشکسالی‌های مکرر، افت سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش سطح زیر کشت محصولات دیم شده است (Sheikha-BagemGhaleh et al., 2023). نتایج مطالعات هیدرولوژیک نیز نشان می‌دهد تغییرات اقلیمی و فشار ناشی از فعالیت‌های انسانی، به افت جریان‌های سطحی و کاهش تغذیه آبخوان‌ها در دشت مهاباد منجر شده است (Nouri, 2019). این روندها علاوه بر تهدید امنیت غذایی و کاهش درآمد کشاورزان، پیامدهای اجتماعی گسترده‌ای نیز به همراه دارند، از جمله تشدید مهاجرت روستایی، افزایش تعارض‌ها بر سر منابع آب و خاک و کاهش تاب‌آوری جوامع محلی در برابر شوک‌های محیطی. چنین شرایطی بیانگر آن است که مسئله مهاباد صرفاً یک چالش فنی یا اقلیمی نیست، بلکه به‌طور مستقیم به حوزه حکمرانی منابع طبیعی گره خورده است، بنابراین تحلیل دقیق تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن در این منطقه می‌تواند مبنای مهمی برای تدوین سیاست‌های یکپارچه، مدیریت تقاضا و تقویت تاب‌آوری اجتماعی - اکولوژیک در چارچوب حکمرانی پایدار منابع طبیعی است. شکل ۱ شماتیکی از شهرستان مهاباد را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه شهرستان مهاباد

۲-۲. روش تحقیق

با توجه به وقوع تغییرات اقلیمی در آینده، نیاز است مدل‌سازی اقلیم آتی بر اساس سناریوهای مختلف صورت گیرد. در این تحقیق از نرم‌افزار LARS-WG به‌عنوان یکی از مدل‌های ریزمقیاس‌سازی آماری استفاده شد تا با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی

و خروجی مدل‌های GCM، روند دما و بارش در شهرستان مهاباد برای دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ شبیه‌سازی شود. استفاده از این مدل علاوه بر فراهم کردن برآوردهای محلی دقیق‌تر، امکان ادغام نتایج در تحلیل‌های حکمرانی منابع طبیعی را فراهم می‌سازد.

۲-۲-۱. داده‌های مورد استفاده

پژوهش حاضر بر پایه داده‌های روزانه متغیرهای اقلیمی شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعات آفتابی ایستگاه هواشناسی مهاباد انجام شد. دوره مرجع آماری سال‌های ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۴ را در بر می‌گیرد که اطلاعات مربوطه از پایگاه داده‌های سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. پس از انجام کنترل کیفیت و رفع نواقص موجود در داده‌ها، این مجموعه به‌عنوان مبنای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل انتخاب شد.

۲-۲-۲. مدل LARS-WG

مدل LARS-WG به‌عنوان یک مولد داده‌های آب‌وهوایی تصادفی، قابلیت تولید داده‌های اقلیمی روزانه در مقیاس محلی را دارد. این مدل ابتدا بر اساس داده‌های تاریخی مشاهداتی واسنجی می‌شود و در ادامه، با استفاده از خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو امکان شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی آینده را فراهم می‌آورد. در این مطالعه از نسخه ۸ مدل LARS-WG جهت ریزمقیاس‌سازی پارامترهای اقلیمی برای دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ استفاده شده است.

۲-۲-۳. مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای انتشار

به‌منظور برآورد تغییرات اقلیمی دوره‌های آتی، از خروجی پنج مدل گردش عمومی شامل CNRM-ACCESS-ESM1-5، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-LR، HadGEM3-GC31-LL، CM6-1 و IPCC گزارش ششم معرفی شده‌اند، تحت سه سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP126، SSP245 و SSP585 مورد تحلیل قرار گرفتند. این سناریوها طیف وسیعی از مسیرهای انتشار از کم‌ریسک تا پرریسک را پوشش می‌دهند.

۲-۲-۴. وزن‌دهی مدل‌های GCM

به‌منظور بررسی تطابق خروجی مدل‌های GCM با داده‌های مشاهده‌شده در ایستگاه هواشناسی مهاباد، مقایسه ماهانه‌ای بین این دو مجموعه داده در دوره تاریخی انجام شده است. مقادیر حداقل دما، حداکثر دما و بارش توسط هریک از پنج مدل GCM برای دوره پایه پیش‌بینی شده است. این فرایند به صورت جداگانه برای هر ماه تکرار شده است. برای محاسبه تفاوت بین داده‌های مشاهداتی در ایستگاه هواشناسی مهاباد و داده‌های خروجی مدل‌های GCM در دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۳ از رابطه ۱ استفاده شده است.

$$XE_m^G = |\bar{X}_m^G - \bar{X}_m^O| \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه بالا، m ماه مورد نظر، G مدل GCM مورد نظر، XE_m^G خطای مطلق هر مدل GCM در برآورد پارامتر X (دما یا بارش) در ماه m میانگین پارامتر X برای مدل GCM در ماه m میانگین پارامتر X مشاهده‌شده در ایستگاه هواشناسی در ماه m است. همان‌طور که مشخص است این شاخص در واقع میانگین قدر مطلق خطا (MAE) محسوب می‌شود که یکی از معیارهای استاندارد برای ارزیابی دقت مدل‌ها در مطالعات اقلیمی است. وزن هریک از مدل‌های GCM در محاسبه هر متغیر به‌صورت ماهانه با استفاده از معادله ۲ محاسبه شده است (Ostad-Ali-Askari et al., 2020; Zareian et al., 2015).

$$WX_m^G = \frac{\frac{1}{XE_m^{G_i}}}{\sum_{i=1}^5 \frac{1}{XE_m^{G_i}}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه بالا، WX_m^G وزن هر مدل GCM برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی به صورت ماهانه است. بر اساس این محاسبات، برای هر پارامتر (دما، حداقل، دمای حداکثر و بارش) و در هر ماه، وزنی متناسب با معکوس خطا به مدل‌ها اختصاص داده شد. به

این ترتیب مدل‌هایی که دقت بیشتری در بازتولید شرایط اقلیمی داشتند، وزن بیشتری را دریافت کردند. این رویکرد سبب شد نتایج شبیه‌سازی به داده‌های واقعی نزدیک‌تر باشد و عدم قطعیت کاهش یابد؛ موضوعی که برای تصمیم‌گیری‌های حکمرانی منابع طبیعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

۲-۳. چارچوب تحلیل حکمرانی منابع طبیعی

به‌منظور تحلیل پیوند میان تغییرات اقلیمی شبیه‌سازی‌شده و ابعاد حکمرانی منابع طبیعی در شهرستان مهاباد، از چارچوب تحلیلی SWOT^۱ استفاده شد. این چارچوب که نخستین بار توسط وایریش^۲ (۱۹۸۲) معرفی شد، با شناسایی نقاط قوت، ضعف، فرصت‌ها و تهدیدها، امکان استخراج پیامدهای حکمرانی از تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کند. استفاده از SWOT در پژوهش حاضر امکان ادغام داده‌های فنی مدل LARS-WG با ملاحظات حکمرانی و سیاستگذاری را فراهم ساخت. به این ترتیب نتایج اقلیمی در بستری نهادی و سیاستی تفسیر شدند تا راهبردهای انطباقی کارآمد برای مدیریت پایدار منابع طبیعی در منطقه پیشنهاد شود.

۲-۳-۱. نقاط قوت

در چارچوب SWOT، نقاط قوت به‌عنوان ظرفیت‌ها و مزیت‌های درونی نظام حکمرانی منابع طبیعی در نظر گرفته شدند. در این مطالعه، وجود زیرساخت‌های آبی مانند سدها و تجربه تاریخی جوامع محلی در سازگاری با شرایط خشکسالی، به‌عنوان مزیت‌های بنیادین شناسایی شدند. تحلیل SWOT قبلی در حوزه کشاورزی در شمال ایران نشان داده است که وجود زیرساخت‌های مناسب و بهبود بهره‌وری آب از جمله مهم‌ترین نقاط قوت در حکمرانی منابع طبیعی محسوب می‌شوند (Goli et al., 2021).

۲-۳-۲. نقاط ضعف

نقاط ضعف به‌عنوان محدودیت‌ها و کاستی‌های درونی حکمرانی منابع طبیعی دسته‌بندی شدند. در این راستا، وابستگی معیشت به بارش‌های فصلی و منابع زیرزمینی، ضعف در هماهنگی نهادی و نبود چارچوب حکمرانی یکپارچه از مهم‌ترین نقاط ضعف محسوب می‌شوند. این ضعف‌ها توانایی سیستم برای مقابله با تغییرات اقلیمی را محدود می‌کنند. مطالعات مشابه در بخش کشاورزی ایران از فقدان مشارکت ذی‌نفعان و تمرکز بر توسعه فیزیکی شبکه‌های آبیاری به‌عنوان نقطه ضعف در مدیریت منابع انتقاد کرده است (Goli et al., 2021).

۲-۳-۳. فرصت‌ها

فرصت‌ها در چارچوب SWOT شرایط بیرونی و مساعدی هستند که می‌توانند مسیر حکمرانی را در جهت سازگاری تقویت کنند. در این مطالعه، ظرفیت استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی برای پیش‌بینی سناریوهای آینده و تطبیق سیاست‌ها در سطح منطقه‌ای، ارتقای بهره‌وری آب در کشاورزی از طریق فناوری‌های نوین آبیاری و اصلاح الگوی کشت به‌عنوان فرصت‌های اصلی شناسایی شدند. تحقیقی مشابه نیز بر اهمیت ایجاد چارچوب نهادی مناسب برای توسعه پایدار و سازگاری در بخش کشاورزی تأکید کرده است (Firoozzare et al., 2023).

۲-۳-۴. تهدیدها

تهدیدها در چارچوب SWOT به عوامل بیرونی نامطلوب اشاره دارند که می‌توانند حکمرانی منابع طبیعی را تضعیف کنند. در این دسته، روندهای بلندمدت افزایش دما، کاهش بارش و بروز خشکسالی‌های متعدد به‌عنوان تهدیدهای جدی شناسایی شدند که پیامدهایی همچون ناامنی آبی و غذایی، کاهش تولید کشاورزی و افزایش مهاجرت‌های روستایی می‌توانند به دنبال داشته باشند.

1. Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats

2. Weihrich

این تهدیدها بدون در نظر گرفتن سیاست‌های انطباقی و انطباق‌های نهادی مناسب می‌توانند پایداری نظام منابع طبیعی را به شدت به خطر اندازند.

۲-۴. ادغام اقلیم و حکمرانی

در این پژوهش، یافته‌های فنی حاصل از مدل‌سازی تغییرات اقلیمی در قالب چارچوب تحلیلی SWOT قرار گرفت تا زمینه‌ای برای استخراج پیامدهای نهادی و سیاستی فراهم شود. این رویکرد تلفیقی، پیوند میان نتایج اقلیمی و ابعاد حکمرانی منابع طبیعی را برقرار ساخته و بدین ترتیب نوآوری اصلی پژوهش را نمایان می‌سازد. ادغام داده‌های فنی با ملاحظات نهادی امکان طراحی راهبردهای حکمرانی منطبق با تغییرات اقلیمی را فراهم و زمینه‌ای برای ارائه پیشنهادها و سیاستی کارآمد در سطح منطقه‌ای ایجاد می‌کند.

۳. یافته‌های پژوهش

پس از آماده‌سازی داده‌های اقلیمی و کالیبراسیون مدل LARS-WG با داده‌های ایستگاه مهاباد، وزن‌دهی مدل‌های GCM برای هر ماه و هر متغیر اقلیمی (حداقل دما، حداکثر دما و بارش) محاسبه شد. جداول ۱ تا ۳ سهم نسبی مدل‌ها در بازتولید شرایط اقلیمی دوره پایه را نشان می‌دهند. نتایج این مرحله بیانگر آن است که میزان انطباق مدل‌ها در متغیرهای مختلف متفاوت بوده و در برخی ماه‌ها مدل‌های خاص عملکرد بهتری داشته‌اند. در جدول ۱، وزن هر مدل GCM در ماه‌های مختلف سال برای پیش‌بینی حداکثر دما ارائه شده است. در جدول ۲ وزن هر مدل GCM در ماه‌های مختلف سال برای پیش‌بینی بارش ارائه شده است.

جدول ۱. وزن هر مدل GCM در ماه‌های مختلف سال برای پیش‌بینی حداقل دما در ایستگاه مهاباد

مدل	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ACCESS-ESM1-5	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۲	۰/۲۳	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۷
CNRM-CM6-1	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲	۰/۲۱	۰/۲	۰/۱۸	۰/۱۲
HadGEM3-GC31-LL	۰/۶۳	۰/۵۴	۰/۳۴	۰/۲۴	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۳۹
MPI-ESM1-2-LR	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲	۰/۱۵
MRI-ESM2-0	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۲	۰/۱۷

جدول ۲. وزن هر مدل GCM در ماه‌های مختلف سال برای پیش‌بینی حداکثر دما در ایستگاه مهاباد

مدل	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ACCESS-ESM1-5	۰/۴۳	۰/۳۹	۰/۵۶	۰/۸۶	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱۳	۰/۲	۰/۲۷	۱	۰/۶۶
CNRM-CM6-1	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۸۱	۰/۶۴	۰/۴۱	۰/۴۵	۰	۰/۰۸
HadGEM3-GC31-LL	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۰۱	۰/۰۶	۰	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۰۶	۰	۰/۰۱
MPI-ESM1-2-LR	۰/۳	۰/۲۷	۰/۱۲	۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۸	۰/۱	۰/۰۵	۰	۰/۲
MRI-ESM2-0	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۰۴	۰/۳۵	۰/۹۶	۰/۰۷	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۸	۰	۰/۰۶

جدول ۳. وزن هر مدل GCM در ماه‌های مختلف سال برای پیش‌بینی بارش در ایستگاه مهاباد

مدل	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ACCESS-ESM1-5	۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۱۶
CNRM-CM6-1	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۱۴
HadGEM3-GC31-LL	۰/۲۱	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۹	۰/۴۹	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱۲	۰/۲۱
MPI-ESM1-2-LR	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۸	۰/۴۳	۰/۹	۰/۰۶	۰/۳۷	۰/۸۲	۰/۷۵	۰/۰۹	۰/۱۷
MRI-ESM2-0	۰/۴۴	۰/۸۴	۰/۲۹	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۹۱	۰/۵	۰/۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۳۲

پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی و اطمینان از همگن بودن داده‌ها، مدل LARS_WG اجرا شد. در مرحله ابتدایی اجرای مدل، دو فایل تولید می‌شود. فایل اول شامل توزیع‌های تجربی مربوط به دوره‌های تر و خشک است. دومین فایل به‌دست آمده حاوی خصوصیات آماری است که برای شبیه‌سازی داده‌های روزانه در مدل به‌کار می‌رود (گودرزی و همکاران، ۲۰۱۹). نتایج آزمون آماری کای‌اسکور و مقادیر P-value برای هریک از متغیرهای اقلیمی شامل بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تعداد ساعات آفتابی در دوره مشاهده‌شده در جداول ۴ تا ۶ ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج آزمون کای - اسکور برای توزیع‌های احتمال دمای مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه مهاباد در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴

مدل	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
K-S	۰/۱۰۵	۰/۱۰۶	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۰۳۳	۰/۰۵۳	۰/۱۰۵	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۱۰۶	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳
P-Value	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۱	۰/۹۹۹	۱	۱	۰/۹۹۹	۱	۱

جدول ۵. نتایج آزمون کای - اسکور برای توزیع‌های احتمال حداکثر دمای مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه مهاباد در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴

مدل	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
K-S	۰/۱۰۶	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۱۰۶	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳	۰/۱۰۶	۰/۰۵۳	۰/۰۵۳
P-Value	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۱	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۰/۹۹۹	۱	۱

جدول ۶. نتایج آزمون کای - اسکور برای توزیع‌های احتمال بارش مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه مهاباد در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴

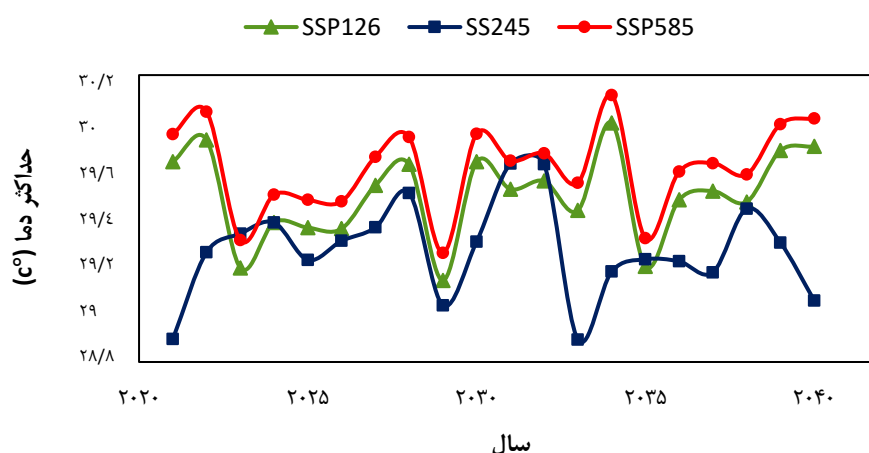
مدل	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
K-S	۰/۰۳۷	۰/۱۰۶	۰/۰۵۳	۰/۰۷۶	۰/۰۴۵	۰/۱۵۲	۰/۰۳	۰/۰۹۷	۰/۱۷۳	۰/۰۹۷	۰/۰۸۴	۰/۰۶۷
P-Value	۱	۰/۹۹۹	۱	۱	۱	۰/۹۳۴	۱	۱	۰/۸۴۷	۱	۱	۱

پس از واسنجی مدل LARS-WG با استفاده از داده‌های اقلیمی ایستگاه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴، شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی برای دوره آینده (۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰) انجام گرفت. خروجی مدل شامل داده‌های روزانه برای دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش است. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر تغییرات فصلی، داده‌ها به دو بازه زمانی گرم (فروردین تا شهریور) و سرد (مهر تا

اسفند) تقسیم شده و سپس میانگین سالانه پارامترهای مورد نظر برای هر نیم سال استخراج شد. نتایج حاصل در قالب شش نمودار ارائه شده است.

۳-۱. تغییرات حداکثر دما و پیامدهای حکمرانی

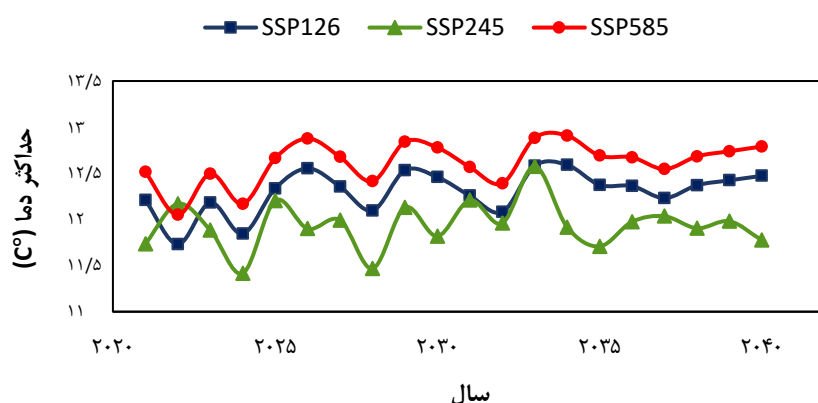
نتایج شبیه سازی مدل LARS-WG نشان داد در نیمه گرم سال، میانگین دمای حداکثر طی دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ بین ۲۸/۹ تا ۳۰/۱ درجه سانتی گراد قرار دارد. در سناریوی SSP585 افزایش محسوس تری مشاهده شد و میانگین دما تا حدود ۲۹/۹ درجه رسید. این روند افزایشی با یافته های آذری و همکاران^۱ (۲۰۲۱) و اسلامیان و همکاران^۲ (۲۰۲۰) همخوانی دارد که در مطالعات خود نیز بر افزایش مداوم دما در مناطق نیمه خشک ایران تأکید کرده اند. افزایش دمای حداکثر در این بازه به معنای تشدید فشار بر منابع آبی و افزایش نیاز آبی محصولات کشاورزی است. این موضوع یکی از نقاط ضعف مهم حکمرانی منابع طبیعی را نمایان می سازد، یعنی وابستگی شدید بخش کشاورزی به بارش های محدود و منابع آب زیرزمینی. در مقابل، وجود سد مهاباد که توان تأمین بیش از ۷۰ درصد نیاز آبی کشاورزی را دارد، می تواند به عنوان نقطه قوت در برابر افزایش دما عمل کند. در نیمه سرد سال نیز میانگین دمای حداکثر بین ۱۱/۴ تا ۱۲/۹ درجه در نوسان بوده و روندی ملایم از افزایش را نشان می دهد. کاهش تعداد روزهای یخبندان، احتمال تغییر در الگوی بارش برف و رواناب را به همراه دارد؛ تغییری که تهدید جدی برای مدیریت سدها و تغذیه سفره های زیرزمینی محسوب می شود. این شرایط در چارچوب SWOT به عنوان یک تهدید بیرونی تبیین می شود، زیرا می تواند تعادل طبیعی چرخه آب را بر هم زده و امنیت تأمین آب را کاهش دهد. علاوه بر این، مقایسه آماری دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و دوره شبیه سازی شده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نشان داد میانگین سالانه حداکثر دما از ۱۹/۵ درجه به ۱۲/۲ درجه افزایش یافته است. به عبارت دیگر، پیش بینی ها حکایت از افزایش حدود ۸ درصدی میانگین حداکثر دما در دوره آینده دارند. این روند افزایشی یک تهدید جدی برای امنیت غذایی و منابع آبی منطقه محسوب می شود، زیرا نیاز آبی محصولات و تبخیر منابع سطحی را افزایش می دهد. با این حال کاهش نوسانات می تواند به عنوان فرصتی برای اصلاح الگوی کشت و سازگاری تدریجی با شرایط جدید در چارچوب حکمرانی منابع طبیعی مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۲ روند تغییرات میانگین حداکثر دمای روزانه در شش ماهه گرم سال (فروردین تا شهریور) و در شکل ۳ روند تغییرات آن در شش ماهه سرد سال (مهر تا اسفند) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ ارائه شده است.



شکل ۲. روند تغییرات متوسط حداکثر دمای روزانه در ۶ ماه گرم سال (فروردین - شهریور) برای سناریوهای اقلیمی مختلف طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰

1. Azari

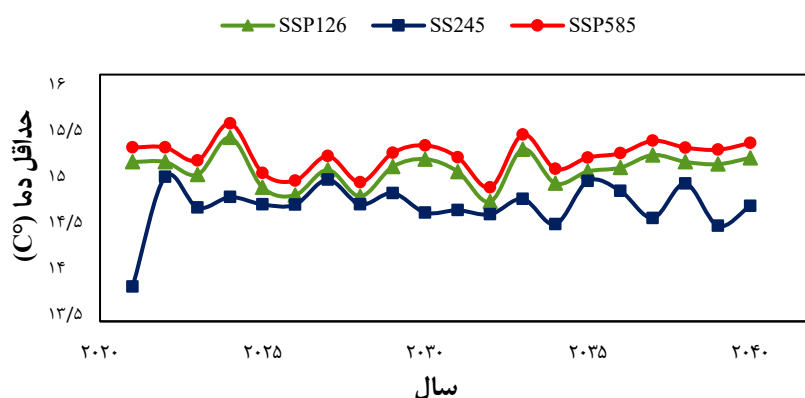
2. Eslamian



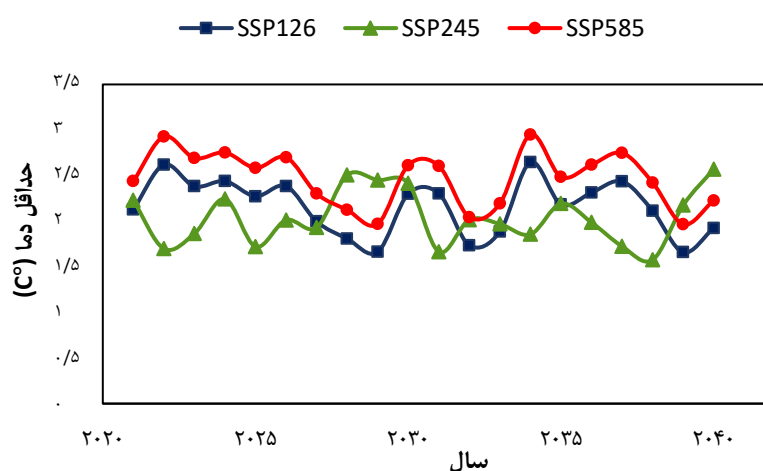
شکل ۳. روند تغییرات متوسط حداکثر دمای روزانه در ۶ ماه سرد سال (مهر - اسفند) برای سناریوهای اقلیمی مختلف طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰

۲-۳. تغییرات حداقل دما و پیامدهای حکمرانی

نتایج شبیه‌سازی مدل LARS-WG نشان داد در نیمه گرم سال، میانگین حداقل دما در بازه ۱۳/۹ تا ۱۵/۵ درجه سلسیوس قرار دارد. افزایش دمای شبانه می‌تواند کارایی آبیاری را کاهش دهد و فشار زیادی بر شبکه‌های تأمین انرژی به‌ویژه در حوزه سرمایه‌گذاری ایجاد کند. از منظر حکمرانی منابع طبیعی، این وضعیت یک ضعف ساختاری در مدیریت تقاضای همزمان انرژی و آب محسوب می‌شود. با این حال توسعه سامانه‌های نوین آبیاری و افزایش بهره‌وری آب می‌تواند فرصتی برای کاهش فشار ناشی از این تغییرات فراهم آورد. مطالعات مشابه در ایران نیز روند افزایش دمای حداقل و پیامدهای آن بر کارایی آبیاری و مدیریت منابع انرژی را تأیید کرده‌اند (Jahangir et al., 2022). در نیمه سرد سال نیز میانگین حداقل دما به‌طور متوسط بین ۱/۶ تا ۲/۹ درجه سلسیوس است. این افزایش موجب کاهش تعداد شب‌های بسیار سرد و تغییر الگوی کاشت محصولات زمستانه می‌شود. برای حکمرانی منابع طبیعی، چنین روندی دو پیامد هم‌زمان دارد: از یک سو فرصتی برای معرفی و ترویج کشت‌های جایگزین مقاوم به شرایط جدید را فراهم می‌سازد، اما از سوی دیگر تهدیدی برای تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی محسوب می‌شود، زیرا کاهش برف و یخ می‌تواند ورودی آبخیزها را محدود کند. افزون بر این، مقایسه آماری حداقل دما در دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و شبیه‌سازی شده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نشان داد میانگین سالانه از ۷/۳ درجه به ۸/۸ درجه افزایش یافته است. به عبارت دیگر، پیش‌بینی‌ها حکایت از افزایش حدود ۲۰ درصدی میانگین حداقل دما در دوره آینده دارد، همچنین انحراف معیار از ۰/۸۲ به ۰/۱۸ کاهش یافته که بیان‌کننده کاهش نوسانات و افزایش یکنواختی دما در سال‌های آینده است. این تغییرات پیامدهای متعددی برای حکمرانی منابع طبیعی دارد: از یک سو افزایش دما به‌ویژه در شب‌ها، مصرف انرژی برای سرمایه‌گذاری و فشار بر شبکه‌های آبیاری را تشدید می‌کند (ضعف) و از سوی دیگر فرصت‌هایی برای تغییر الگوی کشت و افزایش پیش‌بینی‌پذیری اقلیمی فراهم می‌سازد (فرصت). با این حال کاهش سرمای زمستانه می‌تواند تهدیدی برای تغذیه سفره‌های زیرزمینی و پایداری منابع آب به‌شمار آید (تهدید). در شکل ۴ روند تغییرات میانگین حداقل دمای روزانه در شش ماهه گرم سال (فروردین تا شهریور) و در شکل ۵ روند تغییرات آن در شش ماهه سرد سال (مهر تا اسفند) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ ارائه شده است.



شکل ۴. روند تغییرات متوسط حداقل دمای روزانه در ۶ ماه گرم سال (فروردین - شهریور) برای سناریوهای اقلیمی مختلف طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰



شکل ۵. روند تغییرات متوسط حداقل دمای روزانه در ۶ ماه سرد سال (مهر - اسفند) برای سناریوهای اقلیمی مختلف طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰

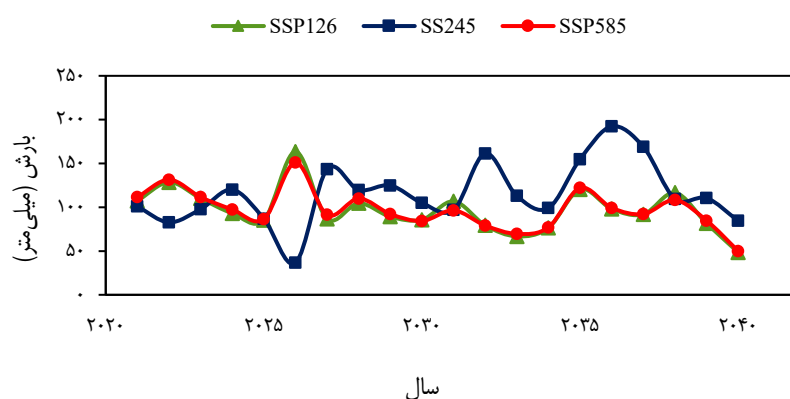
۳-۳. تغییرات مجموع بارش و پیامدهای حکمرانی

نتایج شبیه‌سازی مدل LARS-WG نشان داد بارش در نیمه گرم سال کاهش قابل توجهی خواهد داشت و در برخی سناریوها به کمتر از ۵۰ میلی‌متر می‌رسد. این یافته بیان‌کننده افزایش احتمال خشکسالی‌های تابستانه و آسیب‌پذیری شدید کشاورزی دیم است. از منظر حکمرانی منابع طبیعی، این وضعیت دو پیامد همزمان دارد: از یک سو به‌عنوان یک ضعف ساختاری، وابستگی شدید معیشت به بارش‌های محدود را آشکار می‌سازد و از سوی دیگر به‌عنوان یک تهدید بیرونی، خطر ناپایداری امنیت غذایی را افزایش می‌دهد. یافته‌های این پژوهش با نتایج نوری^۱ (۲۰۱۹) و همچنین گزارش IPCC (2021) همخوان است که کاهش بارش‌های فصلی و تشدید خشکسالی‌ها در ایران را پیش‌بینی کرده‌اند. در نیمه سرد سال، بارش دارای نوسانات شدیدی است و در برخی سال‌ها به بیش از ۳۹۰ میلی‌متر می‌رسد. این تغییرپذیری بالا از یک سو تهدیدی برای وقوع سیلاب‌های ناگهانی است، اما از سوی دیگر در صورت وجود حکمرانی کارآمد و توسعه زیرساخت‌های ذخیره و انتقال آب، می‌تواند به فرصتی برای جبران کمبودهای

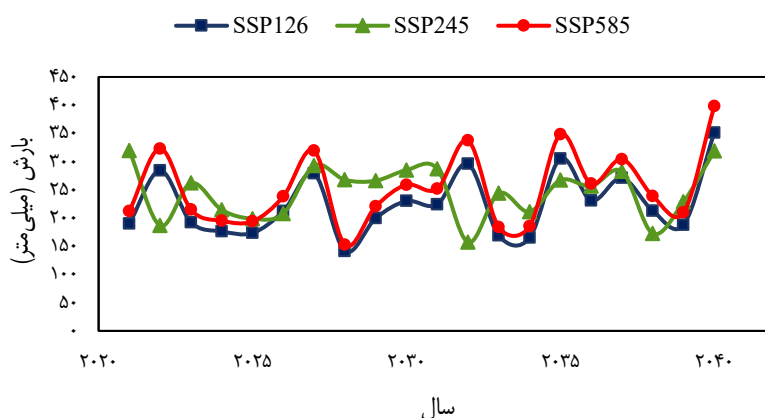
¹. Nouri

تابستانه تبدیل شود. چنین برداشتی با مطالعات جهانگیر و همکاران^۱ (۲۰۲۲) نیز همسو است که بر نقش مدیریت سیلاب‌ها در تأمین منابع آبی و کاهش ریسک خشکسالی تأکید کرده‌اند.

علاوه بر این، مقایسه آماری بارش در دو دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و شبیه‌سازی شده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نشان داد میانگین بارش سالانه از ۴۰۱ به ۳۵۰ میلی‌متر کاهش یافته است. به عبارت دیگر پیش‌بینی‌ها حکایت از کاهش حدود ۱۳ درصدی بارش در دوره آینده دارد، همچنین انحراف معیار بارش سالانه از ۹۶/۸ به ۶۷ میلی‌متر کاهش یافته که بیانگر کاهش دامنه تغییرات است، هرچند وقوع سال‌های خشک و مرطوب همچنان مشهود خواهد بود. در چارچوب SWOT این نتایج نشان می‌دهد کاهش کلی بارش، یک تهدید بیرونی برای امنیت غذایی و کشاورزی دیم محسوب می‌شود، در حالی که کاهش نسبی نوسانات می‌تواند فرصتی برای بهبود برنامه‌ریزی منابع آب باشد. با این حال تغییر الگوی فصلی بارش، به‌ویژه کاهش تابستانه و افزایش نوسانات زمستانی، همچنان تهدیدی جدی برای مدیریت سدها، تغذیه سفره‌های زیرزمینی و پایداری حکمرانی منابع طبیعی باقی خواهد ماند. در شکل ۶ متوسط مجموع بارش سالانه در شش ماهه گرم سال (فروردین تا شهریور) و در شکل ۷ متوسط مجموع بارش سالانه در شش ماهه سرد سال (مهر تا اسفند) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ ارائه شده است.



شکل ۶. روند تغییرات متوسط مجموع بارش سالانه در ۶ ماه گرم سال (فروردین - شهریور) برای سناریوهای اقلیمی مختلف طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰



شکل ۷. روند تغییرات متوسط مجموع بارش سالانه در ۶ ماه سرد سال (مهر - اسفند) برای سناریوهای اقلیمی مختلف طی بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰

¹. Jahangir

۳-۴. چارچوب SWOT بر مبنای نتایج شبیه‌سازی لارس

ادغام نتایج شبیه‌سازی مدل LARS-WG با چارچوب SWOT تصویر جامعی از ظرفیت‌ها و چالش‌های حکمرانی منابع طبیعی در شهرستان مهاباد ارائه می‌دهد.

از منظر نقاط قوت، وجود زیرساخت‌هایی نظیر سد مهاباد و دانش بومی کشاورزان در کشت دیم از مهم‌ترین دارایی‌های منطقه محسوب می‌شوند. سد مهاباد می‌تواند بخشی از نوسانات بارش و فشار ناشی از افزایش دما را تعدیل کند و تجربه تاریخی کشاورزان در سازگاری با خشکسالی‌ها نیز نوعی سرمایه اجتماعی ارزشمند به‌شمار می‌رود.

در مقابل نقاط ضعف اساسی نیز وجود دارد. وابستگی شدید کشاورزی منطقه به بارش‌های فصلی و منابع آب زیرزمینی، در شرایط کاهش بارش تابستانی و افزایش دما (طبق خروجی مدل LARS-WG) شکنندگی سیستم تولید را آشکار می‌سازد، همچنین ضعف هماهنگی نهادی و فقدان حکمرانی یکپارچه منابع آب، مدیریت پایدار را دشوار کرده است.

از سوی دیگر، فرصت‌هایی نیز برای ارتقای حکمرانی وجود دارد. توسعه سامانه‌های نوین آبیاری، افزایش بهره‌وری مصرف آب و اصلاح الگوی کشت به سمت محصولات مقاوم به خشکی همچون جو و عدس می‌تواند نقش مهمی در کاهش ریسک تولید ایفا کند. تغییر اقلیم و بهره‌گیری از داده‌های مدل‌سازی در سیاستگذاری انطباقی، فرصت‌های کلیدی برای حکمرانی پایدار محسوب می‌شوند.

با این حال تهدیدهای اقلیمی و نهادی همچنان جدی هستند. بر اساس سناریوی SSP585، افزایش بارش‌های حدی زمستانی خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی را افزایش می‌دهد و کاهش بارش تابستانی تهدیدی جدی برای تداوم کشاورزی دیم و امنیت غذایی منطقه است، همچنین کاهش بارش موجب تضعیف تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شده و خطر ناپایداری منابع آبی را تشدید می‌کند. در سطح نهادی نیز ضعف در اجرای قوانین و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع موجود تهدیدی برای حکمرانی پایدار به‌شمار می‌رود. این نتایج با گزارش IPCC (2021) همخوان است که بر افزایش ریسک خشکسالی و سیلاب هم‌زمان در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید کرده است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد منطقه مهاباد طی دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ با روند افزایش میانگین دما (حدود ۸ درصد در میانگین حداکثر دما و ۲۰ درصد در میانگین حداقل دما) و کاهش بارش سالانه (حدود ۱۳ درصد)، به‌ویژه در فصل‌های گرم مواجه خواهد شد. این الگو همسو با یافته‌های آذری و همکاران^۱ (۲۰۲۱)، اسلامیان و همکاران^۲ (۲۰۲۰) و گزارش IPCC (2021) است که بر تشدید گرمایش و کاهش بارش در مناطق نیمه‌خشک ایران تأکید دارند. چنین شرایطی پیامدهای قابل‌توجهی برای منابع طبیعی، کشاورزی و حکمرانی محلی به همراه دارند.

از منظر مدیریت منابع آب، کاهش بارش تابستانه همراه با افزایش دما، فشار مضاعفی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی وارد خواهد کرد و خطر تشدید خشکسالی‌های کشاورزی را افزایش می‌دهد. چنین شرایطی ضرورت اصلاح الگوی کشت، بهبود بهره‌وری آب و بهره‌گیری از سازوکارهای ذخیره‌سازی آب زمستانی برای استفاده در دوره‌های خشک را برجسته می‌کند.

در ارتباط با امنیت غذایی و معیشت روستایی، افزایش دما و کاهش رطوبت خاک، تولید محصولات دیم مانند گندم و جو را کاهش داده و سبب کاهش درآمد خانوارهای روستایی می‌شود. این مسئله با توجه به وابستگی ساختاری اقتصاد محلی به کشاورزی،

^۱. Azari

^۲. Eslamian

یک ضعف اساسی در حکمرانی محسوب می‌شود. مقایسه با مطالعه فیروز زارع و همکاران^۱ (۲۰۲۳) نیز مؤید آن است که در نبود چارچوب نهادی مؤثر، وابستگی معیشت به کشاورزی دیم می‌تواند ریسک آسیب‌پذیری اجتماعی را افزایش دهد. از دیدگاه حکمرانی منابع طبیعی، تحلیل SWOT نشان داد نقاط قوتی مانند وجود سد مهاباد و تجربه محلی کشاورزان می‌توانند بخشی از ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیمی را کاهش دهند. در عین حال ضعف‌هایی همچون وابستگی شدید به بارش‌های فصلی و ناکارآمدی در مدیریت تقاضای آب و انرژی همچنان پابرجاست. در این میان فرصت‌هایی مانند استفاده از بارش‌های زمستانی برای ذخیره و انتقال آب، توسعه سامانه‌های نوین آبیاری نظیر آبیاری قطره‌ای، نواری، بارانی کم‌فشار، سامانه‌های هوشمند مبتنی بر حسگر رطوبت خاک و تغییر الگوی کشت به سوی گونه‌های مقاوم به خشکی مانند عدس، نخود و زعفران می‌توانند به‌عنوان محورهای کلیدی سیاست‌گذاری در سطح محلی و ملی مطرح شوند. در مقابل تهدیدهایی چون تشدید خشکسالی‌های تابستانه، افزایش احتمال سیلاب‌های زمستانی و کاهش تغذیه سفره‌های زیرزمینی ضرورت اقدام‌های انطباقی فوری را آشکار می‌سازد.

از منظر تاب‌آوری اجتماعی - اکولوژیک، نتایج تأکید می‌کنند جوامع محلی باید در کانون سیاست‌گذاری‌های انطباقی قرار گیرند. آموزش کشاورزان، تقویت نهادهای محلی و مشارکت فعال ذی‌نفعان، حمایت‌های دولتی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین آبیاری از جمله اقدام‌هایی هستند که می‌توانند تاب‌آوری منطقه را افزایش و ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم را کاهش دهند. در نهایت باید به محدودیت این پژوهش نیز اشاره کرد. دوره شبیه‌سازی (۲۰۲۱-۲۰۴۰) کوتاه‌مدت است و بیشتر تصویری از آینده نزدیک ارائه می‌دهد. بررسی دوره‌های بلندمدت‌تر (مانند ۲۰۴۰-۲۰۶۰) می‌تواند روندهای شدیدتر تغییر اقلیم را آشکار کند. با وجود این، نوآوری این پژوهش در ادغام شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل LARS-WG نه تنها تصویر روشنی از آینده دما و بارش ارائه می‌دهد، بلکه با ادغام نتایج در چارچوب تحلیلی SWOT، امکان طراحی راهبردهای حکمرانی پایدار و مبتنی بر شواهد فراهم می‌شود. تنها از رهگذر چنین رویکرد یکپارچه‌ای است که می‌توان به مدیریت پایدار منابع آب و کشاورزی در مهاباد دست یافت و از پیامدهای اجتماعی - اقتصادی تغییر اقلیم کاست.

^۱. Firoozzare

References

- Abdulsahib, M. A., Ali, M. H., Al-Ansari, N., Laue, J., & Knutsson, S. (2024). Stochastic downscaling of daily precipitation and temperature under CMIP6 climate change scenarios using LARS-WG model for northern Iraq. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(1–2), 237–252. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04649-2>
- Adger, W. N., Dessai, S., Goulden, M., Hulme, M., Lorenzoni, I., Nelson, D. R., ... & Wreford, A. (2009). Are there social limits to adaptation to climate change? *Climatic Change*, 93(3–4), 335–354. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9520-z>
- Azari, M., Dinpashoh, Y., & Mirabbasi, R. (2021). Assessment of precipitation erosivity factor under climate change in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(3–4), 1281–1295. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03598-1>
- Diffenbaugh, N. S., & Burke, M. (2019). Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(20), 9808–9813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1816020116>
- Firoozzare, A., Mahdavi-Mazdeh, M., Ghasemi, A., & Rahmani, M. (2023). An integrated SWOT-BWM-WASPAS approach to enhance sustainable rain-fed agriculture: A case study in Mashhad, Iran. *Agriculture*, 13(6), 1215. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061215>
- Goli, I., Alizadeh, H., Karami, E., & Shiri, J. (2021). Evaluating the productivity of paddy water resources in northern Iran using SWOT analysis. *Water*, 13(21), 2964. <https://doi.org/10.3390/w13212964>
- Goudarzi, M., Mo'tamed-Vaziri, B., & Mirhosseini, M. R. (2019). [Evaluation of meteorological parameters changes due to climate change using LARS weather generator: A case study of Kan watershed]. *Environmental Sciences, University of Tehran*. (In Persian) <https://doi.org/>
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jahangir, M. H., Abbasi, F., & Toomanian, N. (2022). Climate change impact assessment on precipitation and temperature using LARS-WG and CMIP6 models in southern Iran. *Meteorological Applications*, 29(5), e2084. <https://doi.org/10.1002/met.2084>
- Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: Challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997–1016. <https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1259286>
- Nazari-Sharabian, M., Taheriyoun, M., Ahmad, S., Karakouzian, M., & Ahmadi, A. (2019). Water quality modeling of Mahabad Dam watershed-reservoir system under climate change conditions, using SWAT and system dynamics. *Water*, 11(2), 394. <https://doi.org/10.3390/w11020394>
- Nouri, M. (2019). Impact of climate variation and human activities on water resources in Mahabad aquifer, northwestern Iran. *AQUA*, 68(2), 121–130. <https://doi.org/10.2166/aqua.2019.079>
- Nouri, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran. *Environmental Science & Policy*, 135, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.12.003>
- Ostad-Ali-Askari, K., Ghorbanizadeh Kharazi, H., Shayannejad, M., & Zareian, M. J. (2020). Effect of climate change on precipitation patterns in an arid region using GCM models: Case study of Isfahan-Borkhar Plain. *Natural Hazards Review*, 21(3), 04020006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000378](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000378)
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 325(5939), 419–422. <https://doi.org/10.1126/science.1172133>
- Safavi Gerdini, M., Ebrahimi, M., Gheitasi, M., & Ahmadpari, H. (2022). Strategic assessment of urban water resource management in Iran using SWOT-AHP method. *Environment, Development and Sustainability*, 24(12), 14071–14095. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02001-7>
- Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change impact assessments. *Climatic Change*, 89(3–4), 279–301. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9613-8>
- Sheikha-BagemGhaleh, S., Babazadeh, H., Rezaie, H., & Sarai-Tabrizi, M. (2023). The effect of climate change on surface and groundwater resources using WEAP-MODFLOW models: A case study of Mahabad, northwest of Iran. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01923-4>

- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10, 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- Weihrich, H. (1982). The SWOT analysis using a multifunctional tool. *Journal of Long Range Planning*, 15(3), 47–66.
- Zareian, M. J., Eslamian, S., & Safavi, H. R. (2015). A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3–4), 497–516. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1307-8>