



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
**Water and Soil
Resources Conservation**
(WSRCJ)

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

**Vol. 15
No. 2 (58)**

Received:
2025-07-30

Accepted:
2025-10-25

Pages: 104-120

Scenario Analysis of Water and Energy Productivity for Crops in Minab Region under Climate Change

Mahadi Amani¹, Maryam Omid Najafabadi², Seyyed Mehdi Mirdamadi³
and Ali Mohammadi Torkashvand⁴

- 1) PhD student, Department of Agricultural Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 2) Professor, Department of Agricultural Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 3) Associate Professor, Department of Agricultural Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 4) Professor, Department of Agricultural Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*Corresponding author emails: ma.omidi@iau.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: The agricultural sector, as a main pillar of the economy, is highly affected by climate change. These fluctuations have destabilized crop yields and water resources, reducing productivity. Minab County, one of the agricultural hubs in southern Iran, plays a key role in the production of field and horticultural crops. The aim of this study is to analyze agricultural indicators and water productivity of selected crops in the county during the period 2007–2022 (1386–1401 in the Iranian calendar) and to examine the effects of climatic parameters such as precipitation, temperature, and sunshine hours. Furthermore, assessing the impacts of future climate change on the region's agriculture under different climate scenarios (SSP126, SSP245, SSP585) is another objective of this research.

Method: In this study, the impact of climate change on the yield and water and energy productivity of four major agricultural crops—wheat, tomato, onion, and watermelon—was investigated. For this purpose, meteorological data (including minimum and maximum temperature, precipitation, and sunshine hours) and agricultural data related to yield and water and energy consumption were used. The raw data, after cleaning and normalization, were simulated for the future period using the LARS-WG model under three different climate change scenarios (SSP126, SSP245, and SSP585). The model's accuracy was evaluated and confirmed using the Pearson correlation coefficient (R). To analyze the relationships between climatic and agricultural variables, the Pearson correlation method was applied in Python, and the results were presented as heatmaps. Furthermore, to enhance the reliability of the results, modeling uncertainty was reported by calculating a 95% confidence interval. Additionally, two key indices, RMSE and NSE, were computed to assess the accuracy of the models.

Findings: Tomato, with a physical water productivity of 17.8 kg m⁻³ and an economic water productivity of 1141.56 Rials m⁻³, demonstrated the highest water use efficiency and economic value. Watermelon also showed the highest energy yield, with 0.88 MJ ha⁻¹. In contrast, wheat exhibited the lowest water productivity (1.03 kg m⁻³) and energy productivity (0.12 MJ ha⁻¹). Under the pessimistic SSP585 scenario, increased temperature and decreased precipitation led to higher water requirements and reduced crop yield. Moreover, tomato and watermelon were more sensitive to temperature, while wheat and onion were more sensitive to precipitation. Model evaluation results indicated that selecting a nonlinear (second-degree) model significantly improved prediction accuracy for most climatic variables.

Conclusion: Climate change has a direct impact on the yield and productivity of agricultural crops in Minab County. While water productivity is relatively high for some crops such as watermelon, strategic crops like wheat are more vulnerable to climate change. Given the limitations of water resources and the increasing pressure from global population growth, it is essential to adopt effective management strategies to enhance water and energy productivity in agriculture. Integrating technical, economic, and environmental approaches can play a vital role in improving water resource management and ensuring agricultural sustainability.

Keywords: Climate change, Energy productivity, SSP scenarios, Sustainable agriculture, Water productivity



شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:

<https://wsrj.srbiau.ac.ir>

پست الکترونیک:

iauwsrj@srbiau.ac.ir
iauwsrj@gmail.com

سال پانزدهم

شماره ۲ (۵۸)

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۰۳

صفحات: ۱۲۰-۱۰۴

تحلیل سناریویی بهره‌وری آب و انرژی محصولات زراعی در منطقه میناب تحت تغییرات اقلیمی

مهديه امانی^۱، مریم امیدي نجف‌آبادی^{۲*}، سيد مهدي ميردامادی^۳ و علی محمدی ترکاشوند^۴

(۱) دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) استاد، گروه علوم و مهندسی کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۳) دانشیار، گروه علوم و مهندسی کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۴) استاد، گروه علوم و مهندسی کشاورزی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: ma.omidi@iau.ac.ir

چکیده:

سابقه و هدف: بخش کشاورزی به عنوان رکن اصلی اقتصاد، به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد. این نوسانات، عملکرد محصولات و منابع آب را ناپایدار کرده و بهره‌وری را کاهش می‌دهد. شهرستان میناب، یکی از قطب‌های کشاورزی جنوب ایران، نقش کلیدی در تولید محصولات زراعی و باغی دارد. هدف این پژوهش، تحلیل شاخص‌های کشاورزی و بهره‌وری آب در محصولات منتخب شهرستان طی دوره ۱۴۰۱-۱۳۸۶ و بررسی تأثیر پارامترهای اقلیمی مانند بارش، دما و ساعات آفتابی است. همچنین، ارزیابی اثرات تغییرات آب‌وهوایی آینده بر کشاورزی منطقه با استفاده از سناریوهای اقلیمی مختلف (SSP126، SSP245، SSP585)، از دیگر اهداف این مطالعه می‌باشد.

روش پژوهش: در این مطالعه، تأثیر تغییرات اقلیمی بر عملکرد و بهره‌وری آب و انرژی چهار محصول کشاورزی مهم شامل گندم، گوجه‌فرنگی، پیاز و هندوانه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، از داده‌های هواشناسی (شامل دمای حداقل و حداکثر، بارش و ساعات آفتابی) و داده‌های کشاورزی مرتبط با عملکرد و مصرف آب و انرژی استفاده شد. داده‌های خام پس از مرحله پالایش و نرمال سازی، با استفاده از مدل LARS-WG تحت سه سناریوی مختلف تغییر اقلیم (SSP126، SSP245 و SSP585) برای دوره آینده شبیه سازی شدند. دقت مدل به کمک شاخص ضریب همبستگی پیرسون (R) ارزیابی و تأیید گردید. برای تحلیل روابط بین متغیرهای اقلیمی و کشاورزی، از روش همبستگی پیرسون در محیط پایتون استفاده شد و نتایج به صورت نقشه‌های حرارتی (Heatmap) ارائه و به منظور افزایش قابلیت اطمینان نتایج، عدم قطعیت مدل‌سازی با محاسبه بازه اطمینان ۹۵ درصدی گزارش گردید. همچنین برای سنجش دقت مدل‌ها، دو شاخص اصلی RMSE و NSE محاسبه شد.

یافته‌ها: گوجه‌فرنگی با بهره‌وری فیزیکی آب ۸/۱۷ کیلوگرم و اقتصادی ۱۱۴۱/۵۶ ریال بر مترمکعب، بالاترین کارایی مصرف آب و ارزش اقتصادی را نشان داد. هندوانه نیز با ۰/۸۸ مگاژول در هکتار، بیشترین بازده انرژی را نشان می‌دهد. در مقابل، گندم کم‌ترین بهره‌وری آب (۱/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب) و انرژی (۰/۱۲ مگاژول در هکتار) را دارد. در سناریوی بدبینانه SSP585، افزایش دما و کاهش بارندگی موجب افزایش نیاز آبی و کاهش عملکرد می‌شود. همچنین، گوجه‌فرنگی و هندوانه به دما، و گندم و پیاز به بارندگی حساس‌تر هستند. نتایج ارزیابی مدل‌ها نشان دادند که انتخاب مدل غیرخطی (درجه ۲) منجر به بهبود چشمگیر دقت پیش‌بینی برای اکثر متغیرهای آب‌وهوایی شده است.

نتیجه‌گیری: تغییرات اقلیمی تأثیر مستقیمی بر عملکرد و بهره‌وری محصولات کشاورزی شهرستان میناب دارد. بهره‌وری آب در برخی محصولات مانند هندوانه بالاست، اما محصولات استراتژیک نظیر گندم در برابر تغییر اقلیم آسیب‌پذیرتر هستند. با توجه به محدودیت منابع آبی و افزایش فشار ناشی از رشد جمعیت جهانی، لازم است راهبردهای مدیریتی مؤثری برای افزایش بهره‌وری آب و انرژی در کشاورزی اتخاذ شود. ترکیب رویکردهای فنی، اقتصادی و زیست محیطی می‌تواند در بهبود مدیریت منابع آب و تضمین پایداری کشاورزی مؤثر باشد.

کلید واژه‌ها: بهره‌وری انرژی، بهره‌وری آب، تغییر اقلیم، سناریوهای SSP، کشاورزی پایدار

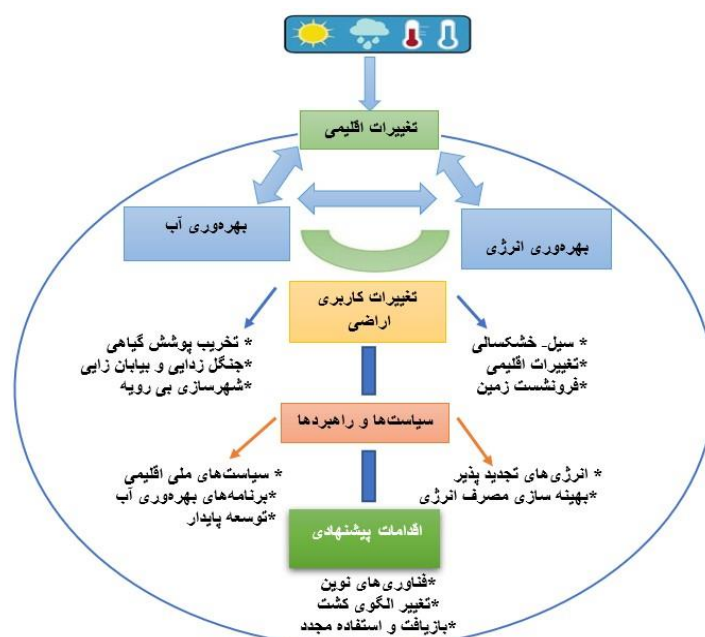
مقدمه

بهره‌وری آب و چالش‌های ناشی از کمبود منابع آبی به‌ویژه در بخش کشاورزی، از مسائل اساسی و تعیین‌کننده در عرصه جهانی به شمار می‌روند (Habibi, et al., 2024). عواملی همچون تغییرات اقلیمی، رشد سریع جمعیت، روش‌های ناپایدار آبیاری، آلودگی منابع آب و سیاست‌گذاری‌های ناکارآمد، فشار بی‌سابقه‌ای را بر سیستم‌های آبی جهان وارد کرده‌اند (Cacal, et al., 2023). تغییرات آب‌وهوایی با ایجاد نوسانات شدید اقلیمی، تغییر الگوهای بارش و افزایش تناوب و شدت خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها، آسیب‌پذیری منابع آب و امنیت غذایی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تشدید نموده است (A. S. L., et al., 2024; Mashala, et al., 2023; Sang, et al., 2023). با پیش‌بینی افزایش جمعیت جهان به ۱۰٫۳ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰، رقابت بر سر منابع آب محدود شدت خواهد یافت و به دنبال آن، ناامنی غذایی حدود ۱۲۰ میلیون نفر را در سراسر جهان تهدید خواهد کرد (Shahraki, et al., 2023; Lam, 2025). در این راستا، توسعه استراتژی‌های خلاقانه و انجام تحقیقات اساسی برای تضمین امنیت آب و دستیابی به توسعه پایدار، امری حیاتی است (Ahmad, et al., 2023).

ایران به عنوان کشوری واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، به طور ویژه‌ای از چالش‌های کمبود آب متأثر است. میانگین بارندگی سالانه کشور حدود ۲۵۰ میلی‌متر است که کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی است (Mazandaranizadeh et al., 2023). افزایش جمعیت، توسعه فعالیت‌های صنعتی و مهم‌تر از همه، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، تعادل آبخوان‌ها را به شدت بر هم زده و آینده منابع آب شیرین را در معرض تهدیدی جدی قرار داده است (Li, et al., 2024). پایین بودن بهره‌وری آب و انرژی در کنار افزایش انتشار گازهای

گلخانه‌ای، این چالش‌ها را پیچیده‌تر کرده و کشاورزی و امنیت غذایی کشور را با مخاطره روبرو ساخته است (Wang, et al., 2024). منطقه مورد مطالعه با چالش‌های مشابهی در زمینه بهره‌وری آب و انرژی دست‌وپنجه نرم می‌کند. این چالش‌ها به ویژه در قالب کمبود آب، برداشت‌های غیرپایدار از منابع زیرزمینی و ارتباط حیاتی آن با امنیت غذایی ظهور یافته‌اند. در این راستا مطالعه دقیق پارامترهای مدیریتی و اقلیمی خاص منطقه جهت تحقق و بهبود شاخص‌های بهره‌وری آب به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است (Ahmad, et al., 2023; Zang, et al., 2023).

پژوهش‌های متعددی به بررسی ابعاد مختلف این بحران پرداخته‌اند. (Habibi, et al., 2024) به تحلیل شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی در محصول جو در دو اقلیم متفاوت پرداختند و وابستگی این شاخص‌ها به پارامترهای مدیریتی و مصرف آب را نشان دادند. پژوهش‌های دیگری نیز بر تأثیر مدیریت بهینه آبیاری در افزایش بهره‌وری آب و همچنین تأثیر منفی افزایش دما بر عملکرد محصولات استراتژیک مانند گندم و جو تأکید کرده‌اند (Ghadami Firouzabadi et al., 2023; Sarwary et al., 2023). (Ahmad, et al., 2023) و (Sang, et al., 2023) نیز بر نقش اساسی مدیریت منابع آب در توسعه پایدار و تأثیر تغییرات اقلیمی بر چرخه‌های هیدرولوژیکی صحه گذاشته‌اند، از جمله (Rai, 2023) به‌طور مشخص اشاره می‌کند که بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع، نه تنها بر امنیت غذایی و آبی جهانی تأثیر می‌گذارد، بلکه بر انعطاف‌پذیری بخش انرژی و ثبات اقتصادی-اجتماعی نیز اثرات مستقیمی دارد. این آشفتگی‌ها به‌طور مستقیم با پدیده تغییر اقلیم مرتبط هستند.



شکل ۱. مدل مفهومی تحقیق

تاب‌آوری کشاورزی ارائه می‌دهد؛ و گامی در جهت پر کردن خلأ مطالعات کاربردی محلی و حمایت از سیاست‌گذاری در شرایط تغییر اقلیم محسوب می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

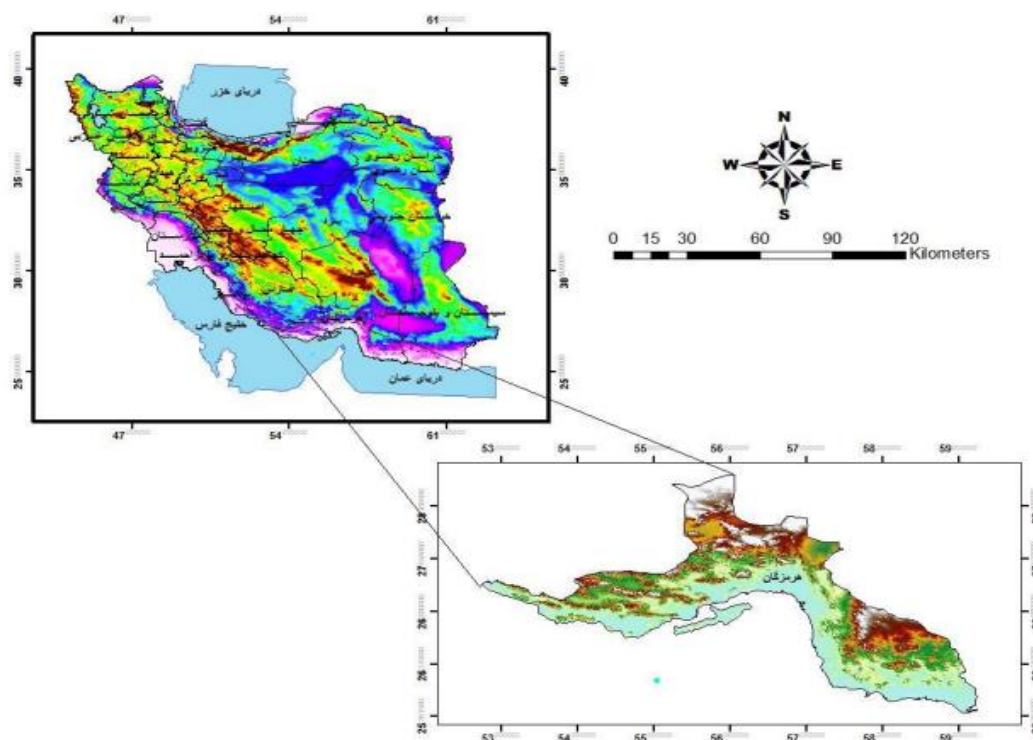
حوضه آبریز رودخانه میناب در جنوب شرقی ایران (استان هرمزگان) بین طول‌های جغرافیایی $56^{\circ}48'$ تا $57^{\circ}59'$ شرقی و عرض‌های 27° تا $28^{\circ}32'$ شمالی قرار دارد. وسعت این منطقه حدود $10/613$ کیلومتر مربع است. جریان آب اصلی از طریق یک رودخانه مهم تأمین می‌شود که نقش حیاتی در تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعتی دارد. در این محدوده، سد میناب با ظرفیت ذخیره 250 میلیون مترمکعب در سال 1362 احداث شده که نقش کلیدی در مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. مرکز این حوضه در مختصات $27^{\circ}14'$ شمالی و $57^{\circ}8'$ شرقی و ارتفاع 57 متر از سطح دریا قرار دارد. میانگین دمای سالانه منطقه 26 درجه سانتیگراد، رطوبت نسبی 68 درصد و بارش سالانه کمتر از 200 میلی‌متر است که عمدتاً به صورت بارش‌های شدید رخ می‌دهد (Mirzadeh Koozhshahi Hormozgan Province Agricultural Jihad Organization (2022)).

هدف از انجام این پژوهش، ارائه راهکارهای عملی برای بهبود بهره‌وری و استقرار نظام مدیریت پایدار آب در منطقه مورد مطالعه است تا با افزایش تاب‌آوری بخش کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی و کمبود منابع، سهم مهمی در تضمین امنیت آب و غذا ایفا نماید. (Tsakiris, et al., 2023).

شهرستان میناب به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی هرمزگان، با سطح زیر کشت $46,181$ هکتار و تولید بیش از یک میلیون تن محصولات، نقش مهمی در تولید محصولات خارج از فصل مانند هندوانه، گوجه‌فرنگی و پیاز دارد. کمبود منابع آبی در این منطقه ضرورت توجه به شاخص‌های بهره‌وری آب و تدوین راهبردهای مؤثر برای کاهش هدررفت منابع را دوچندان می‌سازد (Hormozgan Province Agricultural Jihad Organization, 2022).

اگرچه پژوهش‌های متعددی در حوزه کشاورزی و تغییرات اقلیم انجام شده است، اغلب آن‌ها مبتنی بر داده‌های تاریخی و رویکردهای ایستا هستند، در حالی که مطالعات پویا و سناریو محور برای بررسی آینده نیاز آبی، مصرف انرژی و عملکرد محصولات بسیار اندک‌اند (Mokhtar, et al., 2023).

این پژوهش با تمرکز بر منطقه‌ای گرم و خشک و با رویکرد سناریویی اثرات تغییرات اقلیمی، بهره‌وری آب و انرژی محصولات زراعی را بررسی کرده و راهکارهایی برای ارتقای



شکل ۲. نقشه موقعیت مکانی شهرستان میناب

ارزیابی‌های انجام شده بهره‌وری فیزیکی آب

بهره‌وری فیزیکی آب (Water Physical Productivity) که با نماد CPD نشان داده می‌شود، یک شاخص کمی و پرکاربرد برای سنجش کارایی تبدیل نهاده آب به ستانده محصول در بخش کشاورزی است. این شاخص از رابطه‌ی $CPD = Q / W$ محاسبه می‌گردد که در آن، Q مقدار محصول تولید شده بر حسب کیلوگرم در هکتار (kg/ha) و W بیانگر حجم کل آب مصرف شده بر حسب مترمکعب در هکتار (m^3/ha) است. واحد این شاخص کیلوگرم بر مترمکعب (kg/m^3) می‌باشد که به‌طور مستقیم نشان می‌دهد به ازای هر واحد حجم آب مصرف شده (یک مترمکعب)، چه مقدار محصول فیزیکی (کیلوگرم) تولید شده است. محاسبه و تحلیل این شاخص امکان مقایسه‌ی کارایی مصرف آب را در سطوح مختلف، از مزرعه تا مقیاس‌های ملی و بین‌المللی، فراهم می‌سازد. از این رو، از CPD به طور گسترده‌ای برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های مختلف آبیاری، مقایسه‌ی کشت‌های مختلف، اولویت‌بندی الگوی کشت و در نهایت، برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع آب محدود در راستای دستیابی به امنیت غذایی و پایداری زیست‌محیطی استفاده می‌شود (Abdollahzadeh, et al., 2023 & Akhavan Giglou, et al. 2023).

$$CPD = \frac{Q}{W} = \frac{\text{مقدار محصول تولید شده}}{\text{مقدار آب مصرف شده}} \quad (1)$$

بهره‌وری اقتصادی

بهره‌وری اقتصادی آب (BPD)، شاخصی برای ارزیابی کارایی اقتصادی مصرف آب است. در کنار ارزیابی فیزیکی، سنجش کارایی اقتصادی مصرف آب از منظر سیاست‌گذاری و مدیریت بهینه منابع دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. بهره‌وری اقتصادی آب که با نماد BPD نشان داده می‌شود، به عنوان یک شاخص کلیدی، تمرکز خود را بر جنبه‌های مالی و پولی بهره‌وری معطوف می‌کند. این شاخص از رابطه‌ی $BPD = GR / W$ محاسبه می‌گردد که در آن، GR بیانگر «ارزش ناخالص تولید» بر حسب واحد پولی (ریال یا دهریال) و W نشان‌دهنده «مقدار آب مصرف‌شده» بر حسب مترمکعب است. واحد این شاخص بر اساس واحد پولی انتخابی، به صورت‌هایی مانند ریال بر مترمکعب بیان می‌شود. بر خلاف شاخص بهره‌وری فیزیکی (CPD) که صرفاً به خروجی فیزیکی محصول می‌پردازد، شاخص BPD این قابلیت را فراهم می‌سازد تا سودآوری و ارزش اقتصادی حاصل از هر واحد آب مصرفی در فعالیت‌های مختلف زراعی، باغی و حتی بخش‌های صنعتی و شرب مورد مقایسه قرار گیرد. محاسبه این شاخص به برنامه‌ریزان و

کشاورزان کمک می‌کند تا با شناسایی محصولات و الگوهای کشتی که بالاترین بازده اقتصادی را به ازای هر واحد آب دارند، تخصیص این منبع محدود را به گونه‌ای بهینه کنند که حداکثر منافع اقتصادی را در کنار پایداری منابع به ارمغان آورد (Saeidi, 2023).

$$CPD = \frac{GR}{W} = \frac{\text{درآمد}}{\text{مقدار آب مصرف شده}} \quad (2)$$

بهره‌وری انرژی

در تحلیل پایداری و بهینه‌سازی سیستم‌های تولید کشاورزی، ارزیابی کارایی مصرف انرژی در کنار سایر نهاده‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است.

بهره‌وری انرژی به عنوان یک شاخص کمی مهم در ارزیابی سیستم‌های کشاورزی، رابطه مستقیم بین میزان انرژی مصرفی و عملکرد تولید شده را نشان می‌دهد. این شاخص که از تقسیم میزان عملکرد محصول (بر حسب کیلوگرم یا تن در هکتار) بر میزان انرژی ورودی (بر حسب مگاژول در هکتار) محاسبه می‌گردد، بیانگر کارایی تبدیل انرژی به محصول است (Eskandari, 2023).

در تحلیل جامع سیستم‌های کشاورزی، محاسبه بهره‌وری انرژی این امکان را فراهم می‌سازد تا

- کارایی انواع مختلف سیستم‌های کشت مقایسه شود
 - تأثیر روش‌های مدیریتی مختلف بر مصرف انرژی سنجیده شود
 - الگوهای کشت بهینه از نظر مصرف انرژی شناسایی گردد.
- لازم به ذکر است که انرژی ورودی در این رابطه شامل کلیه نهاده‌های انرژی‌بر در فرآیند تولید از جمله

- سوخت مصرفی در ماشین‌آلات کشاورزی
- انرژی مورد نیاز برای آبیاری
- انرژی نهفته در کودها و سموم شیمیایی
- نیروی کار انسانی می‌باشد.

این شاخص به ویژه در شرایط کنونی که بحران انرژی و پایداری سیستم‌های تولید غذایی از چالش‌های اساسی به شمار می‌روند، ابزار ارزشمندی برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع انرژی در بخش کشاورزی محسوب می‌شود. از طریق پایش و بهبود این شاخص می‌توان به اهداف توسعه پایدار در زمینه امنیت غذایی و حفظ منابع انرژی دست یافت (Niazmand, et al., 2023).

$$\text{انرژی ورودی} = \frac{\text{میزان عملکرد محصول}}{\text{انرژی ورودی}} = \text{بهره وری انرژی} \quad (3)$$

نتایج محاسبات

جدول (۱)، تحلیل مقایسه‌ای شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب و بهره‌وری انرژی در چهار محصول منتخب، الگوی واضح و قابل تأملی را در کارایی مصرف نهاده‌ها آشکار می‌سازد.

جدول ۱. میانگین بهره‌وری فیزیکی، اقتصادی و انرژی در محصولات منتخب (۱۴۰۱-۱۳۸۶)

نام محصول	میزان تولید (تن)	بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	بهره‌وری اقتصادی (ریال در هر متر مکعب)	بهره‌وری انرژی (مگاژول در هکتار)
گندم	۴۲۹۲/۳	۱/۰۳	۲۱۶۵/۶۸	۰/۱۲
گوجه فرنگی	۱۶۶۴۱۲/۴	۸/۱۷	۱۱۴۱۱/۵۶	۰/۴۹
پیاز	۱۲۶۳۳۲/۷	۳/۶	۳۴۳۹/۳۷	۰/۳۵
هندوانه	۱۱۱۲۱۳/۹	۸/۲۳	۷۷۲۹/۶۲	۰/۸۸

منبع: نتایج تحقیق

در پایتون، نقشه‌های حرارتی همبستگی بین متغیرهای اقلیمی و کشاورزی ترسیم شد. این نقشه‌ها بر اساس ضرایب همبستگی بین ۱- (همبستگی منفی قوی) تا ۱+ همبستگی مثبت قوی) بوده و از طیف رنگی آبی تا قرمز برای نمایش شدت رابطه استفاده کردند (Irawan, et al., 2023).

تفسیر ضرایب همبستگی

نزدیک به (۱+) رابطه مثبت قوی (افزایش یکی، افزایش دیگری) نزدیک به (۱-) رابطه منفی قوی (افزایش یکی، کاهش دیگری) نزدیک به (۰) نبود رابطه خطی معنادار

ارزیابی همبستگی بین متغیرهای هواشناسی بر میزان تولید در محصولات منتخب

بر اساس داده‌های جدول (۲)، ارزیابی همبستگی و تحلیل علی روابط به شرح زیر است.

- گندم: همبستگی منفی با بارش و مثبت با دمای حداقل دارد. گندم یک محصول فصل خنک است. افزایش ملایم دمای حداقل (شبهانه) در فصل رشد ممکن است از سرمازدگی جلوگیری کرده و رشد را تسهیل کند. رابطه منفی با بارش، به احتمال قوی، نشان‌دهنده خسارت بارندگی‌های دیر هنگام در دوره رسیدن یا برداشت محصول است که باعث گسترش بیماری‌های قارچی و کاهش کیفیت می‌شود.

- گوجه‌فرنگی: همبستگی قوی و مثبت با دمای حداقل و حداکثر دارد. گوجه‌فرنگی یک محصول فصل گرم است. رشد و رسیدن میوه آن به طور مستقیم و حیاتی به تامین گرمای پایدار در طول روز و شب وابسته است. بنابراین، افزایش هر دو شاخص دمایی در محدوده مطلوب، موجب افزایش عملکرد می‌شود.

- پیاز: همبستگی بسیار قوی با دمای حداکثر و قوی با دمای حداقل دارد. پیاز نیز مانند گوجه‌فرنگی از محصولات فصل گرم است. دمای بالا فرآیند غده‌بندی را تسریع و عملکرد را افزایش می‌دهد.

- هندوانه: همبستگی مثبت با بارش دارد. بارش‌های مناسب در دوره رشد می‌تواند نیاز آبی آن را به طور مستقیم تامین کرده و باعث افزایش حجم و عملکرد میوه شود. رابطه ضعیف با دما ممکن است نشان دهد که در محدوده داده‌های موجود، دما عامل محدودکننده‌ای نبوده است.

نتایج نشان می‌دهد که گندم با پایین‌ترین سطح بهره‌وری فیزیکی آب (۱۰۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب) و بهره‌وری اقتصادی آب (۲۱۶۵ ریال بر مترمکعب) در بین محصولات مورد مطالعه، علیرغم مصرف انرژی کم (۰/۱۲ مگاژول بر هکتار)، از نظر بهره‌وری وری نهاده آب در وضعیت نامطلوبی قرار دارد. در مقابل، گوجه‌فرنگی و هندوانه با دارا بودن بالاترین سطوح بهره‌وری فیزیکی آب (به ترتیب ۸/۱۷ و ۸/۲۳ کیلوگرم بر مترمکعب) و بهره‌وری اقتصادی آب (به ترتیب ۱۱۴۱۱ و ۷۷۲۹ ریال بر مترمکعب)، کارایی بالایی در استفاده از این نهاده حیاتی نشان می‌دهند.

پیاز با مقادیر میانی در همه شاخص‌ها (بهره‌وری فیزیکی آب ۳/۶ کیلوگرم بر مترمکعب، بهره‌وری اقتصادی آب ۳۴۳۹/۳۷ ریال بر مترمکعب و کارایی انرژی ۰/۳۵ مگاژول بر هکتار) موقعیت متوسطی را در بین محصولات مورد مطالعه به خود اختصاص داده است.

به طور کلی، گندم در بهره‌وری آب و اقتصادی عملکرد ضعیفی دارد، اما مصرف انرژی نسبتاً کم است. گوجه‌فرنگی بالاترین بهره‌وری آب و اقتصادی را نشان می‌دهد و مصرف انرژی آن نیز در حد متوسط-بالا است. پیاز دارای عملکرد متوسط در هر سه شاخص است و از نظر تعادل بین بهره‌وری آب و انرژی در موقعیت میانه قرار دارد. هندوانه از نظر بهره‌وری فیزیکی آب بهترین عملکرد را دارد، اما مصرف انرژی آن قابل توجه است و باید مدیریت شود.

تحلیل روند تغییر اقلیم (متغیرهای هواشناسی)

در این مطالعه، برای بررسی تأثیر عوامل هواشناسی (حداقل و حداکثر دما، بارندگی ۲۴ ساعته، ساعات آفتابی) بر تولید، بهره‌وری آب و انرژی محصولات کشاورزی (گندم، گوجه‌فرنگی، پیاز، هندوانه)، از تحلیل همبستگی آماری و نرم‌افزار پایتون استفاده شد. داده‌های بارش، شامل مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده، با استفاده از مدل LARS-WG برای ایستگاه میناب ارزیابی شدند. شاخص‌هایی مانند انحراف معیار، خطاهای نسبی و ضریب همبستگی برای سنجش دقت مدل به کار رفت. سپس با استفاده از داده‌های اقلیمی گذشته، اقلیم سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۵۱ شبیه‌سازی شد.

جدول ۲. همبستگی بین متغیرهای هواشناسی و میزان تولید محصولات منتخب

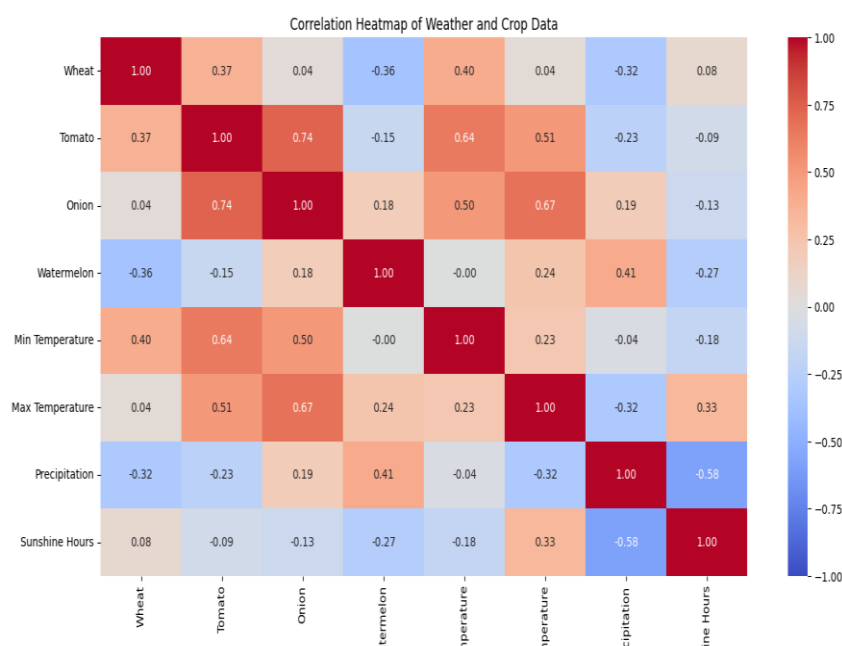
محصول	تولید (تن)	دمای حداقل	دمای حداکثر	بارش	ساعات آفتابی	میانگین همبستگی
گندم	۴۲۹۲/۳	۰/۴۰**	۰/۰۴	-۰/۳۲*	۰/۰۵	۰/۰۵
گوجه فرنگی	۱۶۶۴۱۲/۴	۰/۶۴**	۰/۵۱**	-۰/۲۳	-۰/۰۹	۰/۲۱
پیاز	۱۲۶۳۳۲/۷	۰/۵۰**	۰/۶۷**	۰/۱۹	-۰/۱۳	۰/۳۱
هندوانه	۱۱۱۲۱۳/۹	-۰/۰۰**	۰/۲۴	۰/۴۱*	-۰/۲۷	۰/۱۰

جمع‌بندی نهایی

الگوی کلی حاکی از آن است که محصولات فصل گرم (گوجه‌فرنگی و پیاز) به شدت تحت تأثیر مثبت دما قرار دارند، در حالی که محصولات فصل خنک (گندم) واکنش متفاوتی نشان می‌دهند. بارندگی بسته به زمان وقوع و نیاز آبی هر محصول، می‌تواند هم نقش مثبت (برای هندوانه) و هم نقش منفی (برای گندم) ایفا کند. این روابط به وضوح تفاوت‌های فیزیولوژیک و اکولوژیک بین محصولات را بازتاب می‌دهند.

تصویر (۳) یک نقشه حرارتی همبستگی برای جدول (۲) است که روابط بین هفت متغیر، شامل محصولات کشاورزی (گندم، گوجه‌فرنگی، پیاز، هندوانه) و عوامل آب‌وهوایی (دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی، ساعات آفتابی)، را نشان می‌دهد. الگوی همبستگی‌ها به وضوح انعکاس‌دهنده تفاوت در اکولوژی و فیزیولوژی محصولات است. همبستگی مثبت قوی بین گوجه‌فرنگی و پیاز (۰/۷۴) ناشی از اشتراک آن‌ها در گروه محصولات فصل گرم و وابستگی مشترک به دمای بالاتر، به‌ویژه دمای حداقل، است. در مقابل، همبستگی منفی گندم و هندوانه (۰/۳۶) بازتاب تضاد اکولوژیک آن‌هاست؛ گندم یک محصول فصل خنک و هندوانه یک محصول فصل گرم است.

تأثیر متغیرهای آب‌وهوایی نیز به‌طور مستقیم با نیازهای بیولوژیک مرتبط است. تأثیر چشمگیر دمای حداقل بر پیاز (۰/۵۰) در مقایسه با تأثیر ناچیز آن بر گندم (۰/۰۴)، مجدداً این تقسیم‌بندی اکولوژیک را تأیید می‌کند، چرا که رشد غده‌ی پیاز به‌طور حساسی به گرمای شب وابسته است. رابطه‌ی منفی بارندگی با گندم (۰/۳۲-) احتمالاً نشان‌دهنده‌ی اثرات مخرب بارندگی‌های دیر هنگام در دوره‌ی رسیدن و برداشت محصول است که می‌تواند باعث گسترش بیماری‌های قارچی و کاهش کیفیت دانه شود. همچنین، همبستگی منفی ساعات آفتابی با هندوانه (۰/۲۷-) را می‌توان با پدیده‌ی استرس توضیح داد. اگرچه هندوانه به نور نیاز دارد، اما روزهای بسیار آفتابی معمولاً با دمای بسیار بالا و افزایش تبخیر و تعرق همراه هستند که می‌تواند منجر به تنش آبی و حتی آفتاب‌سوختگی میوه شود. این اثر منفی بر گندم بسیار کم (۰/۰۸) است، که نشان می‌دهد اثرات مثبت فتوسنتزی و اثرات منفی تنش زایی تقریباً یکدیگر را خنثی می‌کنند. در مجموع، این تحلیل نشان می‌دهد که همبستگی‌های مشاهده‌شده تصادفی نیستند، بلکه بازتابی مستقیم از الزامات فیزیولوژیک و واکنش‌های اکولوژیک متمایز هر محصول به پارامترهای محیطی هستند.



شکل ۳. نقشه حرارتی همبستگی متغیرهای هواشناسی و میزان تولید محصولات منتخب

جدول ۳. همبستگی بین متغیرهای هواشناسی و بهره‌وری آب محصولات منتخب

محصول	بهره‌وری آب	دمای حداقل	دمای حداکثر	بارش	ساعات آفتابی	میانگین همبستگی
گندم	۱/۰۳	-۰/۲۱	۰/۰۲	-۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۰۵
گوجه‌فرنگی	۸/۱۷	۰/۶۴*	۰/۳۹	۰/۱۸	-۰/۳۸*	۰/۳۷
پیاز	۳/۵۹	۰/۴۷*	۰/۳۹	۰/۴۹*	-۰/۴۱*	۰/۴۱
هندوانه	۸/۲۳	۰/۴۰*	۰/۳۱	۰/۵۷**	-۰/۵۷**	۰/۴۲

تصویر (۴) نقشه حرارتی همبستگی نشان می‌دهد که بین هفت متغیر شامل چهار محصول کشاورزی (گندم، گوجه‌فرنگی، پیاز، هندوانه) و عوامل آب و هوایی روابط قابل توجهی وجود دارد. دمای حداقل و گوجه‌فرنگی و پیاز (همبستگی مثبت)، این محصولات در دمای نسبتاً گرم بهتر رشد می‌کنند و از سرما آسیب می‌بینند، بنابراین افزایش دمای حداقل باعث بهبود رشد آن‌ها می‌شود. دمای حداقل و گندم (همبستگی منفی)، گندم محصول فصل سرد است و دمای پایین‌تر برای رشد آن مناسب‌تر است؛ بنابراین افزایش دمای حداقل ممکن است رشد یا عملکرد آن را کاهش دهد. بارندگی و ساعات آفتابی (همبستگی منفی)، طبیعی است که در روزهای بارانی ساعات آفتابی کمتر باشد، لذا رابطه‌ای منفی بین این دو وجود دارد. دمای حداکثر با پیاز و هندوانه (همبستگی مثبت): این دو محصول گرماپسند هستند و در دمای بالاتر عملکرد بهتری دارند. دمای حداکثر و بارندگی (همبستگی منفی)، معمولاً افزایش بارندگی با کاهش دما همراه است، لذا رابطه منفی شکل می‌گیرد.

روابط میان محصولات نشان می‌دهد، گوجه‌فرنگی و پیاز (مثبت)، هر دو شرایط رشد مشابه (گرمای معتدل و آفتاب کافی) دارند.

هندوانه و گندم (منفی)، هندوانه محصول تابستانی و گندم زمستانی است، بنابراین شرایط رشدشان متضاد است. در مجموع، تفاوت‌های فصلی و نیازهای حرارتی و رطوبتی محصولات علت اصلی این الگوهای همبستگی هستند.

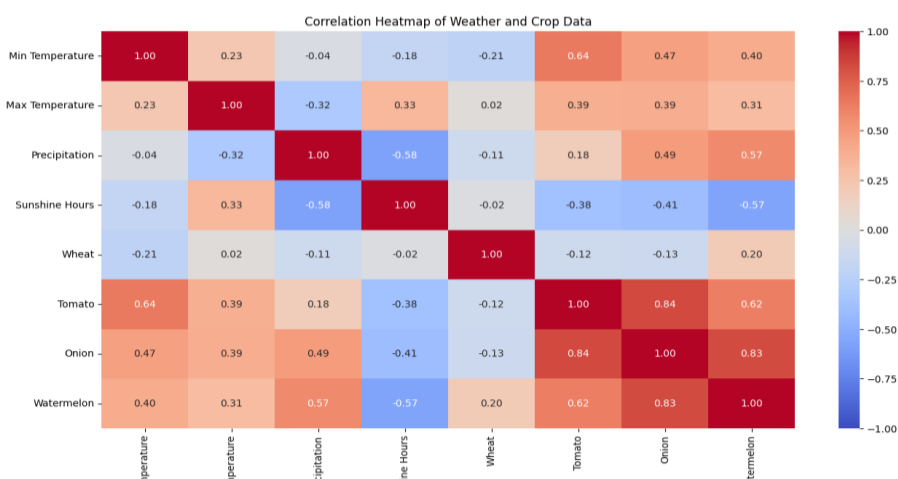
ارزیابی متغیرهای هواشناسی بر بهره‌وری منابع آب در محصولات منتخب

تحلیل علی روابط بین متغیرهای هواشناسی و بهره‌وری آب در محصولات منتخب را می‌توان به شرح جدول (۳) خلاصه نمود. -گندم: بهره‌وری آب در گندم ارتباط معناداری با عوامل هواشناسی ندارد. این موضوع منطبق با ویژگی‌های این محصول فصل خنک است که به شرایط پایدار و معتدل وابسته بوده و نسبت به نوسانات جوی کمتر حساس است.

-گوجه‌فرنگی و پیاز: همبستگی قوی و مثبت بهره‌وری این دو محصول با دمای حداقل، نشان‌دهنده وابستگی ذاتی آن‌ها به عنوان محصولات فصل گرم است. گرمای پایدار شبانه، فرآیندهای رشد را کارآمدتر کرده و در نتیجه، آب مصرفی را با بازده بالاتری به محصول نهایی تبدیل می‌کند.

-هندوانه: همبستگی بسیار قوی با بارش، تأثیر مستقیم و مثبت تأمین رطوبت کافی بر بازدهی مصرف آب این محصول پرمصرف را نشان می‌دهد. بارش، نیاز آبیاری را کاهش داده و در نتیجه بهره‌وری آب را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

-ساعات آفتابی: رابطه منفی عمومی این عامل با بهره‌وری آب (به جز گندم)، عمدتاً ناشی از همراهی آن با استرس گرمایی و افزایش تبخیر-تعرق است. روزهای بسیار آفتابی باعث می‌شوند گیاهان آب بیشتری صرف خنک‌کردن خود کنند، که این امر بازدهی تبدیل آب به ماده خشک (بهره‌وری آب) را کاهش می‌دهد.



شکل ۴. نقشه حرارتی همبستگی متغیرهای هواشناسی و بهره‌وری آب در محصولات منتخب

جدول ۴. میانگین همبستگی بین متغیرهای هواشناسی و میزان بهره‌وری انرژی محصولات منتخب

محصول	بهره‌وری انرژی	دمای حداقل	دمای حداکثر	بارش	ساعات آفتابی	میانگین همبستگی
گندم	۰/۱۲	۰/۳۵*	۰/۰۰	-۰/۲۰	-۰/۰۰	۰/۰۴
گوجه فرنگی	۰/۴۹	۰/۵۳**	۰/۵۲**	۰/۱۵	-۰/۳۰*	۰/۴۵
پیاز	۰/۳۵	۰/۵۶**	۰/۵۰**	۰/۳۹*	-۰/۳۰*	۰/۴۴
هندوانه	۰/۸۸	۰/۳۴*	۰/۴۰*	۰/۴۷**	-۰/۴۸**	۰/۱۸

تصویر (۵) یک نقشه حرارتی همبستگی برای جدول ۴ است که روابط بین چهار متغیر آب‌وهوایی (دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی، ساعات آفتابی) و چهار محصول کشاورزی (گندم، گوجه‌فرنگی، پیاز، هندوانه) را نشان می‌دهد.

دمای حداقل با گوجه‌فرنگی و پیاز همبستگی مثبت دارد، چون این محصولات در دمای نسبتاً گرم‌تر و شب‌های معتدل رشد بهتری دارند. دمای حداکثر با پیاز و هندوانه رابطه مثبت دارد، زیرا این محصولات گرمادوست‌اند و در شرایط گرم عملکرد بهتری دارند. بارندگی با ساعات آفتابی رابطه منفی دارد (۰/۵۸-)، که پدیده‌ای طبیعی است؛ بارش زیاد معمولاً آسمان ابری و کاهش تابش خورشید را به دنبال دارد. گوجه‌فرنگی و پیاز همبستگی مثبت دارند، زیرا هر دو به شرایط نسبتاً مشابه گرما و رطوبت نیاز دارند. هندوانه و گندم رابطه منفی دارند، چون گندم محصول فصل سرد و هندوانه محصول فصل گرم است؛ افزایش شرایط مطلوب یکی معمولاً به زیان دیگری تمام می‌شود. در مجموع، این روابط نشان می‌دهد که هر محصول نسبت به دما، بارندگی و تابش خورشید واکنش خاصی دارد و اختلاف در نیازهای اقلیمی باعث ایجاد الگوهای همبستگی مثبت یا منفی بین متغیرها شده است.

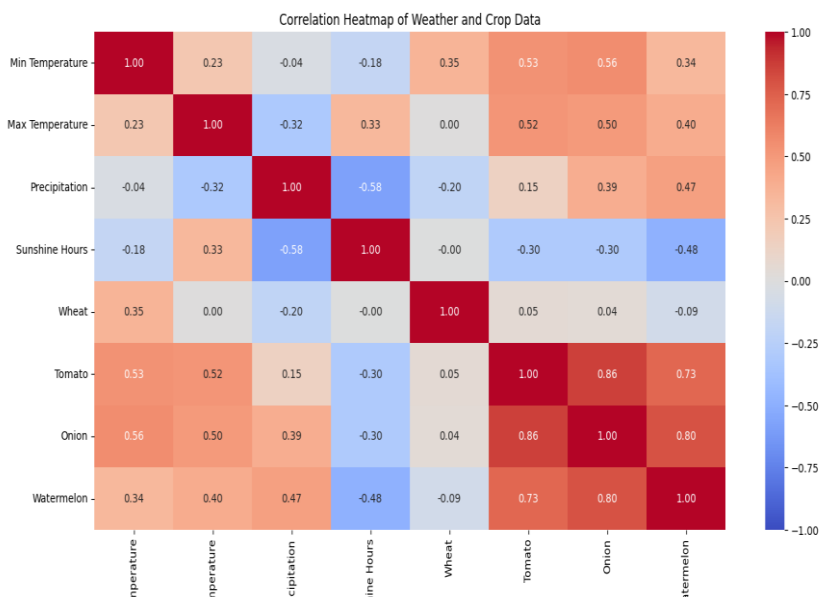
ارزیابی متغیرهای هواشناسی بر بهره‌وری انرژی در محصولات منتخب

جدول (۴) همبستگی بین متغیرهای هواشناسی و بهره‌وری انرژی در محصولات کشاورزی منتخب را نشان می‌دهد. پیاز و گوجه‌فرنگی، هر دو گیاهان گرمادوست هستند و افزایش دمای حداقل و حداکثر رشد و فعالیت‌های فیزیولوژیکی آن‌ها را بهبود می‌دهد؛ در نتیجه بهره‌وری انرژی افزایش می‌یابد. با این حال، نور زیاد با تنش گرمایی بیش از حد می‌تواند موجب تبخیر زیاد و کاهش رطوبت خاک شود که رشد را محدود می‌کند.

-پیاز برخلاف گندم، به رطوبت و بارندگی متعادل نیاز دارد؛ زیرا سیستم ریشه‌ای کم‌عمق‌تری دارد و در برابر خشکی حساس‌تر است. هندوانه به دلیل دارا بودن میوه‌های آبدار و نیاز بالا به رطوبت، از بارش بیشتر تأثیر مثبت می‌گیرد، اما ساعات آفتابی زیاد می‌تواند باعث تبخیر بالا و تنش آبی شود و بهره‌وری انرژی را کاهش دهد.

-گندم گیاهی سازگارتر است و به‌صورت عمومی در شرایط مختلف اقلیمی رشد می‌کند، بنابراین وابستگی کمتری به نوسانات هواشناسی دارد و همبستگی ضعیف‌تری با این متغیرها نشان می‌دهد.

به‌طور کلی، تفاوت در نیاز آبی، حساسیت به گرما و نوع رشد فیزیولوژیکی محصولات علت اصلی تفاوت میزان تأثیرپذیری آن‌ها از متغیرهای هواشناسی است.



شکل ۵. نقشه حرارتی همبستگی متغیرهای هواشناسی و بهره‌وری انرژی در محصولات منتخب

هستند، در حالی که بارش نوسانات قابل توجهی دارد و ساعت آفتابی تغییرات نسبتاً پایدار و کم‌دامنه‌ای را نشان می‌دهد. این روند بیانگر گرم‌تر شدن تدریجی اقلیم و بی‌نظمی بارش‌ها در دوره مورد بررسی است.

پیش‌بینی مقادیر سال‌های مختلف

مدل‌های آماری خطی و درجه دو برای پیش‌بینی مقادیر آینده به‌کار رفتند. نتایج نشان داد مدل چندجمله‌ای درجه ۲ به‌طور محسوسی بهتر از مدل خطی عمل کرده و توانسته است تغییرات واقعی داده‌ها را با دقت بالاتری بازسازی کند (کاهش RMSE و افزایش NSE). به‌ویژه در متغیرهای بارش و دما، مدل غیرخطی توانست نوسانات طبیعی و الگوهای غیرداخل خطی را بهتر دنبال کند.

اعتبارسنجی مدل

مقادیر RMSE پایین‌تر و NSE نزدیک‌تر به عدد ۱ برای مدل درجه‌دو، گویای عملکرد مناسب آن در تخمین داده‌های واقعی است. بنابراین می‌توان گفت که مدل درجه‌دو برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی با داده‌های محدود، قابل اعتمادتر و دقیق‌تر است.

همبستگی بین متغیرها

تحلیل همبستگی (ضریب پیرسون) نشان داد که - بین حداقل و حداکثر دما رابطه خطی معناداری وجود ندارد (۰/۲۳). یعنی هرگاه دمای حداکثر افزایش می‌یابد، دمای حداقل تغییری نمی‌کند. - بین بارش و دما همبستگی منفی مشاهده شد. یعنی با افزایش دما، بارش تمایل به کاهش دارد. این رابطه می‌تواند نشان‌دهنده اثرات تغییر اقلیم و خشکسالی‌های تدریجی باشد. - بین ساعت آفتابی و بارش نیز رابطه‌ای منفی دیده شد؛ هر چه ساعات آفتابی بیشتر است، میزان بارش کاهش می‌یابد که از نظر فیزیکی و اقلیمی منطقی است. - در مقابل، ارتباط بین ساعت آفتابی و دمای حداقل مثبت و دمای حداکثر منفی است. یعنی افزایش تابش منجر به افزایش دما و کاهش تابش منجر به کاهش دما می‌شود.

- ارزیابی و اعتبارسنجی بر اساس شاخص‌های RMSE و NSE

هدف این تحلیل، بررسی رفتار چهار متغیر اقلیمی شامل حداقل دما، حداکثر دما، بارش و ساعت آفتابی در طی سال‌های مورد ارزیابی در میزان تولید، بهره‌وری (فیزیکی آب و انرژی) و انجام پیش‌بینی مقادیر آن‌ها بر اساس داده‌های موجود است. در این تحلیل از دو نوع مدل آماری استفاده شد.

(۱) رگرسیون خطی ساده (Linear Regression) برای

مدل‌سازی روند کلی.

(۲) رگرسیون چندجمله‌ای درجه ۲ (Polynomial

Regression, degree 2) برای درک تغییرات غیرخطی و

بهبود دقت پیش‌بینی.

(۳) برای سنجش دقت مدل‌ها، دو شاخص اصلی محاسبه شد.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (Y_{pred} - Y_{obs})^2}$$

هرچه مقدار RMSE کمتر باشد، مدل دقت بالاتری دارد.

NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency)-

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{pred})^2}{\sum (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2}$$

مقدار NSE بین منفی بی‌نهایت تا ۱ است.

هرچه مقدار آن به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل عملکرد بهتری دارد.

مقدار نزدیک به صفر نشان می‌دهد مدل به اندازه‌ی میانگین

داده‌ها خوب پیش‌بینی کرده و مقدار منفی بیانگر عملکرد

ضعیف‌تر از میانگین است (Leggesse, et al., 2023).

بر اساس جدول ۵ متغیرهای اقلیمی (حداقل دما، حداکثر دما،

بارش)، مدل درجه ۲ عملکرد بهتری داشت و دقت پیش‌بینی آن با

افزایش NSE و کاهش RMSE مشخص گردید. بر اساس

تحلیل‌های انجام‌شده بر روی داده‌های اقلیمی شامل حداقل دما،

حداکثر دما، بارش و ساعت آفتابی، نتایج زیر به‌دست آمد.

روند تغییرات زمانی

بررسی داده‌ها در طول سال‌های مختلف نشان داد که

تغییرات دما (حداقل و حداکثر) دارای روند افزایشی ملایمی

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی داده‌های اقلیمی و میزان تولید و بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی

متغیر	RMSE (خطی)	NSE (خطی)	RMSE (درجه ۲)	NSE (درجه ۲)
حداقل دما	کمتر شد	افزایش یافت	دقت بهتر	مدل غیرخطی تغییرات واقعی تر را دنبال کرد
حداکثر دما	کاهش RMSE	NSE بهبود یافت	بهبود معنی دار	روند غیرخطی مشخص تر بود
بارش	تغییرات نوسانی	مدل درجه ۲ توانست افت و خیزها را بهتر بگیرد	پیش‌بینی دقیق تر نسبت به خطی	*
ساعت آفتابی	تغییرات نرم کم	تفاوت زیادی بین مدل‌ها مشاهده نشد	هر دو مدل نسبتاً مشابه عمل کردند	*

*در متغیر ساعت آفتابی، به دلیل روند یکنواخت‌تر داده‌ها، تفاوت معناداری بین دو مدل دیده نشد.

در بیشتر متغیرها، خط پیش‌بینی‌شده در مدل درجه ۲ تطابق بیشتری با روند واقعی داشته و انحرافات ناگهانی را نیز بهتر دنبال کرده است. این موضوع بیانگر انعطاف‌پذیری بالاتر مدل‌های غیرخطی در تحلیل رفتار اقلیمی است.

تحلیل آماری الگوهای هواشناسی در سناریوهای مختلف

در این مطالعه، با استفاده از داده‌های گزارش ششم (هیأت بین الدول بین المللی) ^۱ IPCC و خروجی‌های مدل اقلیمی HadGEM3-GC31، تغییرات اقلیمی ایستگاه میناب در افق ۲۰۲۲ تا ۲۰۵۱ تحت سه سناریوی جدید SSP بررسی و ریزمقیاس شد. گزارش‌های IPCC به صورت دوره‌ای وضعیت اقلیم، اثرات، سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری‌ها را در مقیاس جهانی و منطقه‌ای ارائه می‌دهند. در این گزارش‌ها، مدل‌های گردش عمومی جو (GCM^۲) تغییرات اقلیمی را در دوره تاریخی و آینده شبیه‌سازی می‌کنند. سناریوهای SSP نمایانگر مسیرهای مختلف اجتماعی-اقتصادی تا سال ۲۱۰۰ هستند که برای پیش‌بینی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت سیاست‌های مختلف اقلیمی به کار می‌روند. همچنین، نمودار حرارتی، ارتباط بین چهار متغیر اقلیمی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و ساعات آفتابی را نمایش می‌دهد که شدت و جهت روابط بین آن‌ها را با استفاده از ضرایب همبستگی (از -۱ تا +۱) و رنگ‌ها مشخص می‌کند.

سناریوی ۲-۱-۲ SSP (پایداری): انتشار کم گازهای گلخانه‌ای

بر اساس این سناریو، انتشار گاز CO₂ در حدود سال ۲۰۷۵ به صفر خالص می‌رسد. سناریوی خوش‌بینانه معمولاً به شرایطی اشاره دارد که

- انتشار گازهای گلخانه‌ای کنترل شده است.
- تغییرات اقلیمی شدید مهار شده‌اند.
- اقدامات اقلیمی مؤثر بوده‌اند.
- توسعه پایدار و فناوری‌های پاک به کار گرفته شده‌اند.

تحلیل روندها

جدول (۶) میانگین داده‌های آب و هوایی را برای یک مکان و دوره زمانی مشخص (۲۰۲۲-۲۰۵۱) در سناریوی خوش‌بینانه نشان می‌دهد.

منطقه دارای اقلیم گرم و خشک با دمای نسبتاً پایدار، بارش کم و نامنظم و آفتاب فراوان و مناسب برای کشت‌های مقاوم به گرما است. اما نیاز به مدیریت آب دارد. دما (گرم) با

میانگین حداقل ۲۲/۷۳ و حداکثر ۳۵/۴۵ درجه سانتیگراد، نشان دهنده تغییرات دمای روزانه کم (پایدار) می‌باشد. بارش با میانگین ۲۵۳ میلی‌متر، اما بسیار متغیر (۴۶ تا ۴۷۵ میلی‌متر) که احتمال بارش‌های رگباری یا فصل بارانی کوتاه را به همراه دارد. آفتاب، آفتابی زیاد (میانگین ۹/۳ ساعت در روز) با تغییرات ناچیز را نشان می‌دهد. پایداری نسبی دما (اختلاف کم بین حداقل و حداکثر) ناشی از اقلیم گرم و خشک و تابش مداوم خورشید است که باعث می‌شود نوسانات روزانه دما کاهش یابد. همچنین نوسان بارش (۲۵۳ میلی‌متر) و دامنه تغییر بالا به علت سامانه‌های بارشی گذرا، و ساعات آفتابی بالا به دلیل آسمان صاف و فشار زیاد جوی است. در نتیجه، منطقه برای کشت‌های مقاوم به گرما مناسب بوده ولی نیاز به مدیریت آب دارد.

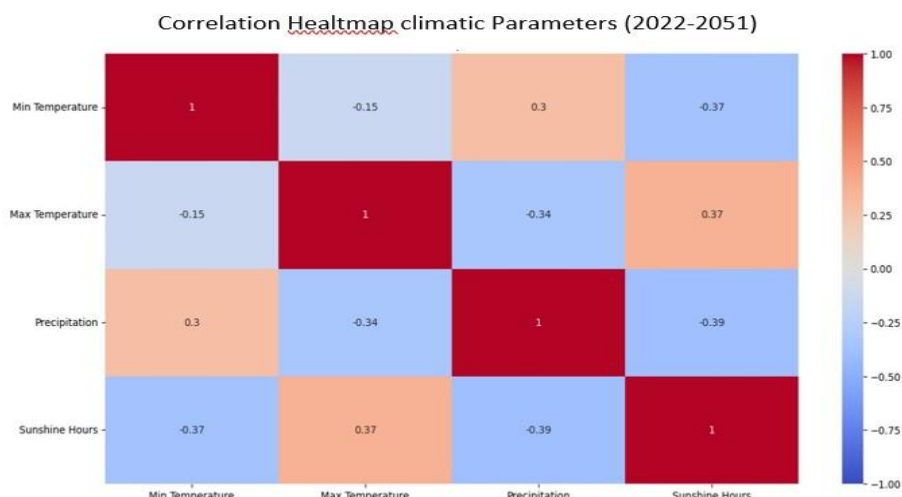
جدول ۶. میانگین داده‌های آب‌وهوایی در سناریوی خوش‌بینانه

شاخص	دمای حداقل (C°)	دمای حداکثر (C°)	بارش (mm)	ساعات آفتابی (ساعت)
میانگین	22/73	35/45	253/1	9/27
کمینه	22/4	۳۵	46/5	8/9
بیشینه	23/1	35/9	474/7	9/5

نمودار حرارتی (۶) همبستگی بین متغیرهای اقلیمی را در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۵۱ نشان می‌دهد.

رابطه منفی بین دمای حداقل و حداکثر، در روزهای گرم (دمای حداکثر بالا)، معمولاً آسمان صاف و تبادل حرارتی زیاد است، در نتیجه شب‌ها زمین سریع‌تر سرد می‌شود و دمای حداقل کاهش می‌یابد. رابطه منفی بین بارندگی و ساعات آفتابی، افزایش ابرناکی و بارش باعث کاهش تابش مستقیم خورشید و در نتیجه کاهش ساعات آفتابی می‌شود. دمای حداقل و بارندگی (رابطه مثبت)، ابرها در شب مانند عایق عمل کرده و از خروج گرما جلوگیری می‌کنند، بنابراین در شب‌های بارانی دمای حداقل معمولاً بالاتر است. دمای حداکثر و ساعات آفتابی (رابطه مثبت)، تابش خورشید بیشتر موجب گرم‌تر شدن روز و افزایش دمای حداکثر می‌شود. دمای حداقل و ساعات آفتابی (رابطه منفی)، در مناطق یا دوره‌هایی با ساعات آفتابی زیاد، آسمان معمولاً صاف است و در نتیجه شب‌ها اتلاف گرما بیشتر و دمای حداقل پایین‌تر می‌شود.

سناریوی ۲-۴-۵ SSP (میان‌راه): انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای بر اساس این سناریو انتشار گاز CO₂ تا سال ۲۰۵۰ در حد سطح فعلی (420ppm) باقی می‌ماند. و بعد از آن تا سال ۲۱۰۰ کاهش می‌یابد اما به صفر نمی‌رسد. مسیر انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز (انتشار CO₂) تا حدود سال ۲۰۴۵-۲۰۵۰ به اوج می‌رسد و سپس به تدریج کاهش می‌یابد.



شکل ۶. نقشه حرارتی همبستگی بین متغیرهای اقلیمی در سناریوی خوش بینانه

تحلیل روندها

جدول (۷) میانگین داده‌های آب‌وهوایی دوره ۲۰۵۱-۲۰۰ را در سناریوی متوسط نشان می‌دهد.

منطقه مورد نظر دارای آب و هوای گرم (اقلیم گرم و خشک) که به دلیل قرار گرفتن در عرض‌های پایین باعث کاهش تأثیر توده‌های مرطوب و افزایش تابش خورشیدی می‌شود در نتیجه دما بالا و رطوبت پایین است.

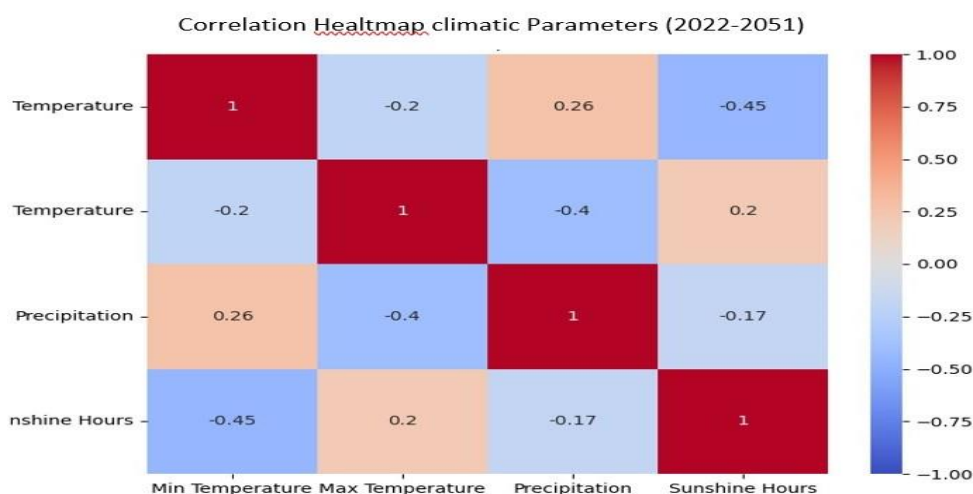
نوسان زیاد دمای روزانه (۱۲/۷۳ درجه)، خشکی هوا و نبود پوشش گیاهی متراکم موجب می‌شود گرما در روز به سرعت افزایش و در شب به سرعت کاهش یابد، بنابراین اختلاف دمای شب و روز زیاد است.

دماهای بسیار بالا (تا ۴۲/۵۵ درجه)، شدت تابش خورشید، آسمان صاف و کاهش تبخیر تعرق مؤثر در سطح زمین باعث افزایش دمای روزهای گرم می‌شود.

بارندگی کم و متغیر (میانگین ۲۷۴/۳۶ میلی‌متر)، فاصله زیاد از منابع رطوبتی (دریاها) و تسلط سامانه‌های پرفشار حاره‌ای موجب کاهش بارش و نوسانات زیاد فصلی آن می‌شود. ساعات آفتابی زیاد (۷/۳۸ تا ۱۱/۰۶ ساعت)، وجود آسمان صاف و کمبود ابر در بیشتر ایام سال باعث افزایش طول مدت تابش خورشید و روزهای آفتابی فراوان می‌گردد.

جدول ۷. میانگین داده‌های آب‌وهوایی در سناریوی متوسط

شاخص	دمای حداقل (C°)	دمای حداکثر (C°)	بارش (mm)	ساعات آفتابی (ساعت)
میانگین	۱۲/۷۳	۳۴/۵۶	۲۷۴/۳۶	۹/۲۲
کمینه	۱۸/۱۸	۲۸/۳۷	۲۱۹/۴۹	۷/۳۸
بیشینه	۲۷/۲۸	۴۲/۵۵	۳۳۹/۲۳	۱۱/۰۶



شکل ۷. نقشه حرارتی همبستگی بین متغیرهای اقلیمی در سناریوی متوسط

در تصویر (۸) روابط بین متغیرها نشان از همبستگی مثبت بین دمای حداقل و حداکثر دارد. افزایش دمای شبانه معمولاً با افزایش دمای روزانه مرتبط است، زیرا شرایط کلی جوی (مانند جریان هوا یا فصل) روی هر دو تأثیر می‌گذارد.

جدول ۸. میانگین داده‌های آب‌وهوایی در سناریوی بدبینانه				
شاخص	دمای حداقل (C°)	دمای حداکثر (C°)	بارش (mm)	ساعات آفتابی (ساعت)
میانگین	۲۲/۹۸	۳۵/۵۸	۳۰۰/۱۶	۹/۱۹
کمینه	۱۸	۳۰	۲۰۰	۷
بیشینه	۲۷/۹۶	۴۱/۱۶	۴۰۰/۳۲	۱۱/۳۸

از سویی عدم همبستگی دمای حداقل یا حداکثر با بارش، نشان می‌دهد که بارش بیشتر تحت تأثیر عوامل دیگری مثل رطوبت، فشار جوی و ابرناکی است و نه فقط دما، بنابراین رابطه خطی قوی با دما وجود ندارد.

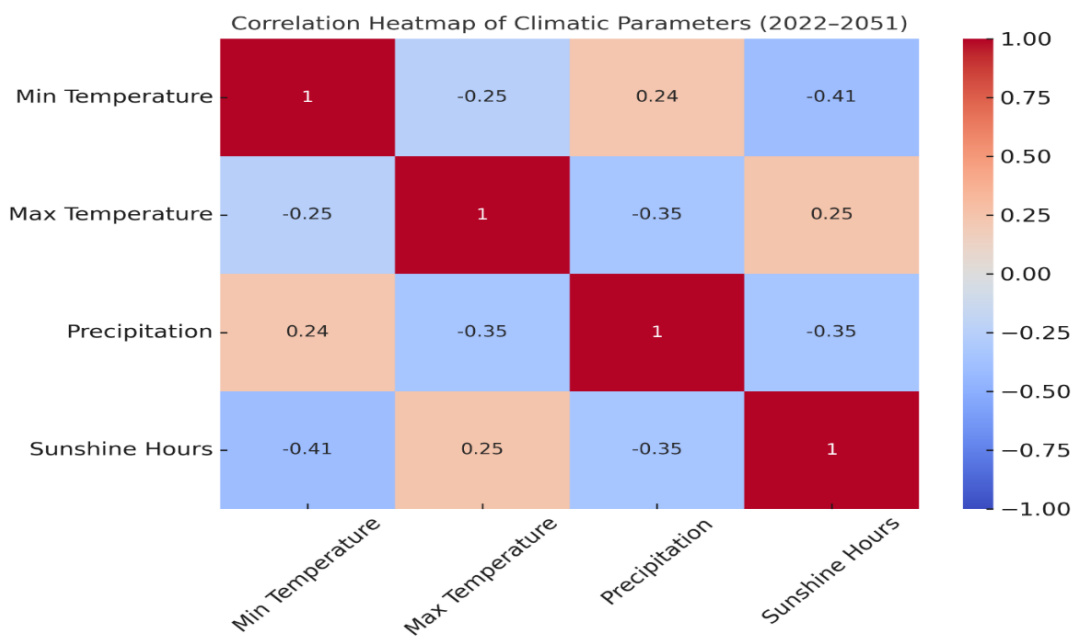
وجود همبستگی ضعیف دما با ساعات آفتابی نیز موید این موضوع است که افزایش ساعات آفتابی لزوماً باعث افزایش دما نمی‌شود، زیرا ابرها، رطوبت و باد می‌توانند دما را کاهش دهند یا مانع افزایش آن شوند.

همبستگی منفی ضعیف بارش با ساعات آفتابی نیز بیان می‌دارد، روزهایی که بارش بیشتری دارند معمولاً پوشش ابری بیشتری وجود دارد، بنابراین ساعات آفتابی کاهش می‌یابد.

روابط بین متغیرها در تصویر (۷) نشان می‌دهد، دما و بارندگی (همبستگی مثبت ضعیف) دارند. در دوره‌های گرم‌تر، تبخیر بیشتر است و در نتیجه رطوبت و احتمال بارندگی کمی افزایش می‌یابد. ساعات آفتابی با دما و بارندگی (رابطه منفی) دارد. افزایش ساعات آفتابی معمولاً با آسمان صاف و بدون ابر همراه است، بنابراین دمای حداقل (شب‌ها) پایین‌تر و بارندگی کمتر می‌شود. دمای حداکثر و بارندگی (رابطه منفی)، بنابراین در روزهای بارانی، پوشش ابری مانع گرم‌شدن شدید هوا می‌شود و دمای حداکثر کاهش می‌یابد. دمای حداقل و حداکثر (رابطه ضعیف)، در نتیجه تنوع شرایط جوی (ابرناکی، باد، رطوبت) باعث می‌شود ارتباط بین این دو نوع دما در همه روزها قوی نباشد.

سناریوی ۵-۸-۵ SSP سناریوی بدبینانه

جدول (۸) میانگین داده‌های آب‌وهوایی را برای یک مکان و دوره زمانی مشخص (۲۰۲۲-۲۰۵۱) در سناریوی بدبینانه نشان می‌دهد. دما و بارندگی (همبستگی مثبت ضعیف) دارند به گونه‌ای که هوای گرم تبخیر بیشتر ایجاد می‌کند، در نتیجه رطوبت افزایش و احتمال بارش کمی بیشتر می‌شود. ساعات آفتابی با دما و بارندگی (رابطه منفی) دارند. آسمان صاف و ابر کمتر باعث شب‌های سردتر و بارش کمتر می‌شود. دمای حداکثر و بارندگی (رابطه منفی) دارند. در روزهای بارانی و ابر زیاد، تابش کمتر، در نتیجه دمای روز کاهش می‌یابد. دمای حداقل و حداکثر (رابطه ضعیف) دارند. شرایط متغیر جوی (ابر، باد، رطوبت) باعث می‌شود دمای شب و روز همیشه با هم مرتبط نباشند.



شکل ۸. نقشه حرارتی همبستگی بین متغیرهای اقلیمی در سناریوی بدبینانه

نتیجه گیری و بحث

در مناطق گرم و خشک، محدودیت منابع آب و نوسانات دما تأثیر قابل توجهی بر تولید محصولات کشاورزی دارد. دمای حداقل بیشترین همبستگی مثبت را با تولید گندم ($0/40$)، گوجهفرنگی ($0/64$) و پیاز ($0/50$) نشان می‌دهد، در حالی که دمای حداکثر تأثیر قوی‌تری بر پیاز ($0/67$) و گوجهفرنگی ($0/51$) دارد. بارش معمولاً همبستگی منفی با تولید دارد، به‌ویژه برای هندوانه ($-0/41$). ساعات آفتابی نیز تأثیر متفاوتی بر محصولات مختلف می‌گذارد.

بهبود بهره‌وری آب نیازمند مدیریت بهینه منابع است و تفاوت‌های معنادار بین محصولات، لزوم سیاست‌گذاری اختصاصی را تأکید می‌کند. روابط پیچیده بین متغیرهای اقلیمی و عملکرد محصولات ناشی از عواملی مانند تفاوت دوره رشد، تعامل دما و بارش، و مدیریت آبیاری است. روش‌های سنتی آبیاری اغلب فاقد دقت لازم هستند، در حالی که آبیاری هوشمند با در نظر گرفتن عوامل متعدد مانند تغییرات اقلیمی، خاک و نیاز گیاه، می‌تواند به صرفه‌جویی آب و افزایش عملکرد کمک کند (Ahmed et al., 2023). مطالعات افزایش تولید گندم بهاره را نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای تغییر اقلیم مدل LARS-WG نشان می‌دهند (Borzoo et al., 2023).

بهره‌وری آب

نتایج نشان می‌دهد که بهبود بهره‌وری در تولید محصولات کشاورزی مستلزم مدیریت بهتر منابع است. تفاوت معنادار شاخص‌های بهره‌وری بین محصولات نیز بر لزوم سیاست‌گذاری اختصاصی برای هر محصول تأکید دارد.

همچنین، تحلیل نقشه‌های حرارتی همبستگی تولید و بهره‌وری آب بیانگر وجود روابط پیچیده بین متغیرهای اقلیمی و عملکرد محصولات است. این روابط ممکن است همسو یا متضاد باشند که ناشی از عوامل زیر است:

- تفاوت در دوره رشد محصولات (مثلاً گندم پاییزه وابسته به بارندگی زمستانه و هندوانه تابستانه وابسته به دمای بالا و آبیاری است).

- تعامل دما و بارندگی (مثلاً در اقلیم گرم و خشک، بارندگی همراه با کاهش دما برای گندم مفید و برای گوجهفرنگی مضر است).

- مدیریت آبیاری (در مناطق دارای آبیاری مکمل، بارندگی‌های نامنظم ممکن است اثر معکوس بر عملکرد محصول بگذارد).

محققان در بررسی روش‌های سنتی برنامه‌ریزی آبیاری (براساس شرایط آب و هوایی، گیاهی و رطوبت خاک) دریافتند که این روش‌ها معمولاً فاقد اطلاعات لازم برای آبیاری دقیق هستند که منجر به آبیاری بیش از حد یا کم‌تر از حد مزارع می‌شود. از سوی دیگر، با استفاده از عوامل متعددی از جمله تغییر اقلیم و خاک، خصوصیات خاک، پاسخ گیاه به کمبود آب

و تغییرات فاکتورهای آب و هوایی و آبیاری هوشمند می‌توان تصمیمات آبیاری بهتری اتخاذ کرد که می‌تواند به صرفه‌جویی در آب و افزایش عملکرد کمک نماید (Ahmed et al., 2023).

بهره‌وری انرژی

ساعات آفتابی مهم‌ترین عامل مؤثر بر بهره‌وری انرژی در کشاورزی است. هندوانه با بهره‌وری بالا ($0/88$) بیشترین استفاده را از نور خورشید می‌برد. مدیریت کشت بر اساس نور خورشید و کنترل بارش برای افزایش بهره‌وری توصیه می‌شود.

سناریوهای اقلیمی و الگوی کشت

- **سناریوی خوش‌بینانه:** دمای پایین، بارندگی مناسب و نور متوسط برای گندم، و دمای پایین اولیه، آفتاب زیاد و بارش کم برای پیاز مناسب است. گوجهفرنگی و هندوانه در هوای گرم و آفتابی رشد بهتری دارند اما از بارش زیاد آسیب می‌بینند. الگوی پیشنهادی کشت شامل گندم، پیاز، گوجهفرنگی و هندوانه (محصولات اصلی) + ذرت شیرین، نخود، ماش و سبزیجات برگی (محصولات مکمل). فصل طلایی کشت نیز آبان تا فروردین و کشت تابستانه فقط در گلخانه یا سایه‌بان.

- **سناریوی میانه:** منطقه گرم تا بسیار گرم، بارندگی کم تا متوسط که در این شرایط نیاز به آبیاری و ساعات آفتابی طولانی برای بیشتر گیاهان مناسب است.

- **سناریوی بدبینانه:** در این منطقه، شرایط اقلیمی سخت و متغیر بر کشاورزی تأثیر قابل توجهی دارد. دما در بازه ۲۳ تا ۴۱ درجه سانتی‌گراد، بارش سالانه نامنظم و کم ($200-400$ میلی‌متر) و تابش آفتاب شدید ($9-11$ ساعت در روز) موجب افزایش تبخیر، تنش گرمایی و خطر خشکسالی یا سیل می‌شود. این شرایط ضرورت مدیریت هوشمندانه منابع آب و زمان‌بندی مناسب کشت را افزایش می‌دهد. توصیه می‌شود که محصولات حساس به تابستان منتقل شده و کشت اصلی در فصل پاییز تا بهار انجام شود، با برداشت پیش از رسیدن گرمای شدید اردیبهشت به بعد. به‌کارگیری ارقام زودرس و مقاوم به گرما، از جمله گندم، گوجهفرنگی، هندوانه و پیاز، و استفاده از روش‌های آبیاری بهینه مانند قطره‌ای، مدیریت خاک و کنترل آفات از راهکارهای ضروری برای مقابله با خشکی و افزایش تاب‌آوری محصولات است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد کاهش منابع آب بیشتر ناشی از فعالیت‌های انسانی است تا تغییرات اقلیمی؛ حفاظت از آب و خاک و جلوگیری از تغییر کاربری زمین مسئول حدود ۷۶٪ کاهش رواناب هستند، در حالی که تغییرات اقلیمی تنها ۲۴٪ نقش دارند (Li et al., 2024). این یافته‌ها اهمیت مدیریت پایدار منابع آب و اجرای پروژه‌های حفاظتی را در تضمین امنیت غذایی و افزایش تاب‌آوری کشاورزی برجسته می‌کند.

نتیجه گیری نهایی

این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد محصولات زراعی و بهره‌وری آب و انرژی در شهرستان میناب دارد. تحلیل داده‌های اقلیمی و کشاورزی (۱۳۸۶-۱۴۰۱) و شبیه‌سازی سناریوهای SSP نشان می‌دهد که پایداری کشاورزی در این منطقه به مدیریت بهینه منابع و الگوی کشت سازگار با اقلیم وابسته است.

- گوجه‌فرنگی و هندوانه بهترین عملکرد را از نظر بهره‌وری آب و انرژی داشتند، در حالی که گندم کمترین بهره‌وری و بیشترین آسیب‌پذیری به تغییرات اقلیمی را نشان داد.

دماهای حداقل و حداکثر بیشترین تأثیر را بر محصولات گرمادوست داشتند، در حالی که بارش و ساعات آفتابی برای محصولات حساس به آب (مانند گندم و پیاز) تعیین‌کننده بودند.

- ارزیابی سناریوهای اقلیمی (SSP585، SSP245، SSP126) نشان داد که در صورت عدم کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، سناریوی بدبینانه (SSP585) منجر به افزایش دما، کاهش بارش و افزایش نیاز آبی می‌شود که تهدیدی برای کشاورزی منطقه است.

تحلیل، پیش‌بینی و همبستگی داده‌ها نشان می‌دهد که شرایط اقلیمی منطقه به سمت گرم‌تر و خشک‌تر شدن میل دارد. افزایش هم‌زمان حداقل و حداکثر دما، کاهش تدریجی بارش و افزایش ساعات آفتابی همگی مؤید این موضوع‌اند. همچنین ارتباط قوی بین متغیرها نشان می‌دهد که تغییر در یکی از عوامل (مثلاً افزایش دما) می‌تواند بر سایر مؤلفه‌ها (مثل بارش و تابش) اثر مستقیم یا غیرمستقیم داشته باشد.

توصیه‌های کلیدی

۱. سیاست‌های سازگاری اقلیمی
 - مدیریت تقاضای آب و توسعه آبیاری هوشمند.
 - بازنگری الگوی کشت منطقه‌ای بر اساس اقلیم آینده.
 ۲. حمایت از کشاورزان
 - تغییر به سمت محصولات کم‌مصرف و پربازده (اقتصادی و اکولوژیکی).
 ۳. فناوری‌های نوین
 - استفاده از مدل‌های پیش‌بینی اقلیم و پایش داده‌محور.
- دستیابی به کشاورزی پایدار در میناب نیازمند ترکیب راهبردهای علمی، فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی با نگاه بلندمدت است. این پژوهش می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری هوشمند منابع طبیعی و امنیت غذایی در مناطق خشک ایران باشد.

سیاسگزاری

بدین وسیله از همکاری سرکار خانم دکتر ام البنین بذرافشان عضو هیئت علمی دانشگاه هرمزگان و مدیر گروه دانشکده علوم و مهندسی آبخیزداری و همچنین همکاران اداره آمار و برنامه ریزی سازمان جهاد کشاورزی، شرکت آب منطقه‌ای، شرکت توزیع برق و اداره هواشناسی استان هرمزگان در خصوص ارائه آمار و اطلاعات مورد نیاز کمال تشکر را دارم.

Reference:

- Abdollahzadeh Kahrizi, R., Kokabinezhad Moghaddam, A., & Merufinia, E. (2023). Investigating virtual water and agricultural water productivity index in crops of Poldasht Plain. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(1), 54-68. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11090.1100> [In Persian]
- Ahmad, S., Jia, H., Ashraf, A., Yin, D., Chen, Z., Xu, C., Chenyang, W., Jia, Q., Xiaoyue, Z., Israr, M., & Ahmed, R. (2023). Water resources and their management in Pakistan: A critical analysis on challenges and implications. *Water-Energy Nexus*, 6, 137-150. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.10.001>
- Ahmed, Z., Gui, D., Murtaza, G., Yunfei, L., & Ali, S. (2023). An Overview of Smart Irrigation Management for Improving Water Productivity under Climate Change in Drylands. *Agronomy*, 13, 2113. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082113>
- Akhavan Giglou, K., Kheiry, M., Ahmadpari, H., Abbasi, S., & Kalateh, F. (2023). Investigating virtual water content and physical and economic water productivity indicators in crops (Case study: Moghan irrigation network, Ardabil province). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 277-295. <https://doi.org/10.22098/MMWS.2023.11899.1186>
- S. L. Lindawati & Meiryan. (2024). bibliometric analysis on the research trends of global climate change and future directions, *Cogent Business & Management*, 11:1, 2325112, DOI: 0.1080/23311975.2024.2325112. [In Persian]
- Borzoo, F., Ramezani etedali, H., & Kaviani, A. (2023). The Effects of Climate Change and Change of Planting Date on Spring Wheat Yield (Case Study: Qazvin Plain). *Water Management in Agriculture Vol. 11, No. 1, Spring and Summer 2024*, 63-80. [In Persian]
- Cacal, J. C., Taboada, E. B., & Mehboob, M. S. (2023). Strategic implementation of integrated water resource management in selected areas of Palawan: SWOT-AHP method. *Sustainability*, 15, 2922. <https://doi.org/10.3390/su15042922>
- Eskandari, H. (2023). Improving energy efficiency in agronomical systems. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, 14(3), 221-227. <https://doi.org/10.5829/ijee> [In Persian]

- Ghadami Firouzabadi, A., Abbasi, F., Jovzi, M., Aboulpor, B., Kohi, N., Eslami, A., Varjavand, P., & Nasser, A. (2023). Investigation of applied water, physical and economic productivity of water in fig orchards. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)*, 46(2), 103–118. <https://jise.scu.ac.ir>. doi: 10.22055/jise.2022.40502.2023. [In Persian]
- Habibi, S., Khoshravesh, M., & Nouri Khajebelagh, R. (2024). Analysis of the physical efficiency indices of water and energy in alfalfa and barley crops in two different climates. *Journal of Water and Soil*, 38(1), 23–36. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85576.1360> [In Persian]
- Hormozgan Province Agricultural Jihad Organization. (2022). Statistics of Planning and Economic Affairs, Vice President of Planning and Economic Affairs. <https://jahad-agri-hormozgan.ir> [In Persian]
- Irawan, A. N. R., Komori, D., & Hendrawan, V. S. A. (2023). Correlation analysis of agricultural drought risk on wet farming crop and meteorological drought index in the tropical-humid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 153(1), 227–240. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04461-w>
- Lam, D. (2025). The next 2 billion: Can the world support 10 billion people? *Population and Development Review*, 51(1), 63–102. <https://doi.org/10.1111/padr.12685>
- Leggesse, E. S., Zimale, F. A., Sultan, D., Enku, T., Srinivasan, R., & Tilahun, S. A. (2023). Predicting optical water quality indicators from remote sensing using machine learning algorithms in tropical highlands of Ethiopia. *Hydrology*, 10(5), 110. <https://doi.org/10.3390/hydrology10050110>
- Li, X., & Zhang, C. (2024). Impact of climate and socio-economic on irrigation water management and agricultural water productivity. *Water*, 16, 3149. <https://doi.org/10.3390/w16213149>
- Mashala, M. J., Dube, T., Mudheri, B. T., Ayisi, K. K., & Ramudzuli, M. R. (2023). A systematic review on advancements in remote sensing for assessing and monitoring land use and land cover changes impacts on surface water resources in semi-arid tropical environments. *Remote Sensing*, 15, 3926. <https://doi.org/10.3390/rs15163926> [In Persian]
- Mazandaranizadeh, H., & Shokouhifar, Y. (2023). The effectiveness of management strategies to preserve the groundwater resources of Marvdasht-Kharameh plain using system dynamics. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(3), 455–472. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.351412.669399> [In Persian]
- Mirzadeh Koohshahi, F., Akbarian, M., & Khoorani, A. (2023). Assessing climate change impact on soil erosion in Minab Watershed, Iran. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research (Extended Abstract)*. <http://magazine.hormozgan.ac.ir>. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1402.13.2.4.8> [In Persian]
- Mokhtar, A., Al-Ansari, N., El-Ssawy, W., Graf, R., Aghelpour, P., He, H., & Abuarab, M. (2023). Prediction of irrigation water requirements for green beans-based machine learning algorithm models in arid region. *Water Resources Management*, 37(4), 1557–1580. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03443-x>
- Niazmand, R., Moghadamnia, A., Tahmasebi, P., Nikmehr, S., & Maroufpoor, E. (2023). Productivity of water and energy use of potato in sprinkler irrigation systems (Case study: Dehgholan Plain, Kurdistan Province), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 3(4), 116–137. DOI:10.22126/ATWE.2024.10298.1106 [In Persian]
- Saeidi, R. (2023). Determination of the relationship between physical and economic productivity of water in the cultivation of bread wheat cultivars (Case study: Qazvin Province). *Applied Researches in Water Engineering*, 1(2), 15–31. <https://doi.org/10.22034/arwe.2024.709855> [In Persian]
- Sang, J., Hon, B., Wang, H., & Ding, X. (2023). Prediction of water resources change trend in the Three Gorges Reservoir Area under future climate change. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.1288>
- Sarwary, M., Samiappan, S., Khan, G. D., & Moahid, M. (2023). Climate change and cereal crops productivity in Afghanistan: Evidence based on panel regression model. *Sustainability*, 15, 10963. <https://doi.org/10.3390/su151410963>
- Shahraki, A. S., Panagopoulos, T., Ashari, H. E., & Bazrafshan, O. (2023). Relationship between indigenous knowledge development in agriculture and the sustainability of water resources. *Sustainability*, 15, 5665. <https://doi.org/10.3390/su15075665> [In Persian]
- Tsakiris, G. P., & Loucks, D. P. (2023). Adaptive water resources management under climate change: An introduction. *Water Resources Management*, 37(6), 2221–2233. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03518-9>
- Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience Frontiers*, 15(2), 101757. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757>
- Zhang, Q., Qian, H., Xu, P., Liu, R., Ke, X., Furman, A., & Shang, J. (2023). A numerical assessment and prediction for meeting the demand for agricultural water and sustainable development in irrigation area. *Remote Sensing*, 15, 571. <https://doi.org/10.3390/rs15030571>
- Rai, P. K. (2023). Role of water-energy-food nexus in environmental management and climate action. *Energy Nexus*, 11, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100230>

یادداشت ها

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change² General Circulation Model یا Global Climate Model