Journal of Iranian Water Engineering Research

Research Article, P. 91-120

https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.587836.1137

Climate Change and Agriculture: An Analysis of Its Links to Water Resources, Water Productivity, and Environmental Sustainability, with a Review of Adaptation Strategies and Emerging Technologies

Iman Hajirad[1*], Parmis Siami[2], Paria Pourmohammad[3]

[1]Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

[2]Master's graduate in Rangeland Management, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

[3]Ph.D. Candidate. Department of reclamation of arid and mountainous regions, Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Corresponding Author's E-mail: i.hajirad@ut.ac.ir

Received: **20 June 2026** Accepted: **21 Sep. 2026**
Revised: **04 Sep. 2026** Published: **21 Dec. 2024**

Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Climate change is a major challenge for agriculture and natural resource management, affecting water availability and agricultural water productivity through rising temperatures, altered precipitation, drought, and hydrological changes. This review-analytical study examines the links among climate change, water resources, agricultural water productivity, environmental sustainability, and adaptation strategies. The reviewed studies show that increased evapotranspiration and crop water requirements, together with declining reliability of surface and groundwater resources, reduce water productivity and increase agricultural vulnerability. These trends may accelerate groundwater depletion, salinity, reduced environmental flows, ecosystem degradation, and biodiversity loss. Key adaptation strategies include sustainable water and soil management, modern irrigation, crop-pattern adjustment, drought- and heat-tolerant cultivars, climate-smart agriculture, watershed management, and ecosystem restoration. Emerging technologies, decision-support systems, and haloculture can further improve water productivity and reduce pressure on natural resources. Sustainable agriculture therefore requires integrated managerial, technological, environmental, and policy measures.

Keywords: Climate change, Water productivity, Food security, Environmental management, Climate-smart agriculture

Introduction: Climate change has become a major environmental and socio-economic challenge worldwide. Rising temperatures, changing precipitation patterns, frequent droughts, and extreme climatic events have significantly affected water resources, agricultural production, and ecosystem stability (IPCC, 2023). These impacts are particularly severe in arid and semi-arid regions where agricultural productivity strongly depends on water availability. Previous studies have shown that climate change influences crop water requirements, evapotranspiration, groundwater recharge, river flows, and soil moisture dynamics (Challinor et al., 2012; Makuvaro et al., 2018). Agriculture is both affected by and contributes to climate change through greenhouse-gas emissions, land-use changes, and resource exploitation (Garg et al., 2024). According to FAO (2020), agriculture consumes approximately 70% of global freshwater withdrawals, making efficient water management essential for future food security. Consequently, improving water productivity and water-use efficiency has become a central adaptation strategy (Molden et al., 2007; Blum, 2009). Recent studies have emphasized climate-smart agriculture, sustainable irrigation systems, and ecosystem-based adaptation as effective approaches for reducing climate vulnerability (Jagermeyr et al., 2025; Yu et al., 2021). Despite extensive research on climate change, water management, and agricultural sustainability, integrated assessments linking these components remain limited.

Therefore, this study evaluates the impacts of climate change on agricultural water productivity and examines their implications for environmental management. The geographical distribution of relevant studies is presented in Fig. 1 and Table 1, while the principal climate-related impacts on agricultural systems are summarized in Table 2.

Methodology: This study employed a descriptive–analytical review approach to investigate the relationships among climate change, agricultural water productivity, and environmental management. Relevant scientific studies, international reports, and recent research findings addressing climate impacts on water resources, agricultural systems, ecosystem sustainability, and adaptation strategies were reviewed and synthesized. The analysis focused on identifying the principal climatic drivers affecting agricultural water productivity, including temperature increase, precipitation variability, drought occurrence, groundwater depletion, and hydrological changes. In addition, adaptation measures proposed by international organizations, particularly the Food and Agriculture Organization (FAO) and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), were examined and compared with practical experiences reported in different countries. The geographical distribution of studies and major research themes were analyzed using the information presented in Fig. 1 and Table 1. Furthermore, the impacts of climate change on agricultural systems and water resources were categorized according to the framework summarized in Table 2. Adaptation strategies developed by FAO and the experiences of European countries were comparatively evaluated using Tables 3 and 4. In addition, climate-related software, modeling tools, and decision-support systems presented in Table 5 were assessed regarding their contributions to climate adaptation, water-resource management, and environmental sustainability. Through the integration and comparison of these findings, a conceptual framework was developed to explain the interactions among climate change, agricultural water productivity, adaptation strategies, and environmental management and to identify effective pathways for sustainable agricultural development under future climate conditions.

Results and Discussion: The findings indicate that climate change affects agricultural water productivity through interconnected mechanisms. Rising temperatures increase evapotranspiration, crop water requirements, and irrigation demand while reducing the availability and reliability of water resources. Consequently, agricultural water productivity declines and pressure on surface and groundwater systems increases. These findings are consistent with IPCC (2023), Challinor et al. (2012), and Makuvaro et al. (2018), who emphasized the effects of increasing temperature, hydrological variability, and climate uncertainty on crop performance, water demand, and agricultural vulnerability.

Changes in precipitation patterns, prolonged droughts, and irregular rainfall distribution reduce soil moisture availability, increase dependence on groundwater resources, and intensify environmental problems such as aquifer depletion, soil salinization, ecosystem degradation, and reduced environmental flows. These findings are consistent with FAO (2020), which emphasized the importance of sustainable water management for ensuring food security under changing climatic conditions. Likewise, Rockström et al. (2017) highlighted that improving water productivity is essential for reducing pressure on freshwater ecosystems while maintaining agricultural production. The geographical distribution of studies presented in Fig. 1 and Table 1 demonstrates that the United States, China, India, Australia, and several European countries are among the leading contributors to research on climate change and agricultural water management. Although research priorities vary among regions, a common conclusion is that climate adaptation requires the integration of scientific knowledge, technological innovation, and effective resource management.

The FAO adaptation framework summarized in Table 3 highlights sustainable water and soil management, climate-resilient crop varieties, watershed management, conservation agriculture, ecosystem restoration, and biodiversity protection as key adaptation measures. These findings are consistent with Molden et al. (2007) and Blum (2009), who emphasized the importance of improving water productivity and water-use efficiency at different agricultural and environmental scales. The experiences of European countries summarized in Table 4 further demonstrate that successful adaptation depends on a combination of technological, economic, institutional, and policy-based measures. Approaches such as advanced irrigation systems, water-allocation reforms, crop insurance, watershed restoration, and climate-responsive planning have contributed to reducing agricultural vulnerability and improving environmental sustainability. Compared with traditional approaches that primarily focus on increasing water supply, these strategies emphasize efficient resource utilization and long-term resilience. This finding is consistent with Garg et al. (2024).

The climate-related tools and decision-support systems summarized in Table 5 facilitate climate-data analysis, resource management, adaptation planning, and environmental assessment. These technologies enhance the ability

of decision-makers to evaluate climate risks and implement evidence-based adaptation strategies. The study also identifies haloculture as a promising adaptation approach for regions affected by water scarcity and salinity. By utilizing saline water resources and salt-tolerant plant species, haloculture can reduce dependence on freshwater resources while supporting agricultural production and environmental management. This approach provides an alternative pathway for improving resilience in arid and semi-arid regions facing increasing climatic pressures. The principal contribution of this study is the integration of climate change impacts, agricultural water productivity, environmental management, adaptation strategies, and emerging technologies within a single analytical framework. Unlike many previous studies that examined these issues separately, the present review highlights their interdependence and demonstrates that sustainable adaptation requires coordinated action across agricultural, environmental, technological, and institutional dimensions.

Conclusion: Climate change poses significant challenges to agricultural water productivity, environmental sustainability, and food security. The findings demonstrate that rising temperatures, altered precipitation patterns, drought intensification, and water-resource degradation reduce agricultural resilience and increase environmental vulnerability. Sustainable water management, climate-smart agriculture, advanced irrigation technologies, watershed management, ecosystem conservation, and institutional support were identified as key adaptation strategies. International experiences further indicate that successful adaptation requires the integration of technological innovation, environmental protection, and effective governance. In addition, emerging approaches such as haloculture and climate-support decision systems offer promising opportunities for enhancing water productivity and strengthening resilience under future climate conditions. Therefore, integrated management of water resources, agricultural systems, and environmental assets is essential for achieving long-term sustainability and effective adaptation to climate change.

© 2024 University of Zabol, Zabol, Iran.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

نشریه علمی
پژوهش‌های مهندسی آب ایران

مقاله پژوهشی، ص ۱۲۰-۹۰
https://doi.org/10.22034/ijwer.2026.587836.1137

تغییر اقلیم و کشاورزی: تحلیل پیوند آن با منابع آب، بهره‌وری آب و پایداری محیط‌زیست و بررسی راهکارهای سازگاری و فناوری‌های نوین

ایمان حاجی‌راد[۱*]، پارمیس صیامی[۲]، پریا پورمحمد[۳]

[۱]دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

[۲]دانش آموخته ی کارشناسی ارشد مرتعداری، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

[۳]دانشجوی دکتری، گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده مناطق طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: i.hajirad@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۳ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱
وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir

چکیده: تغییر اقلیم از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی است که از طریق افزایش دما، تغییر الگوی بارش، تشدید خشکسالی و تغییر شرایط هیدرولوژیکی، دسترسی به منابع آب و بهره‌وری آب کشاورزی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. پژوهش حاضر با رویکرد مروری ـ تحلیلی، به بررسی پیوند میان تغییر اقلیم، منابع آب، بهره‌وری آب کشاورزی و پایداری محیط‌زیست و نیز شناسایی راهکارهای سازگاری پرداخته است. نتایج مرور مطالعات نشان می‌دهد که افزایش تبخیر و تعرق و نیاز آبی محصولات، همزمان با کاهش قابلیت اطمینان منابع آب سطحی و زیرزمینی، موجب کاهش بهره‌وری آب و افزایش آسیب‌پذیری نظام‌های کشاورزی می‌شود. تداوم این روند می‌تواند پیامدهایی همچون افت آبخوان‌ها، افزایش شوری خاک و آب، کاهش جریان‌های زیست‌محیطی، تخریب اکوسیستم‌ها و کاهش تنوع زیستی را به دنبال داشته باشد. یافته‌ها همچنین نشان می‌دهد که مدیریت پایدار آب و خاک، توسعه سامانه‌های نوین آبیاری، اصلاح الگوی کشت، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و گرما، کشاورزی هوشمند اقلیم، مدیریت حوزه‌های آبخیز و حفاظت و احیای اکوسیستم‌ها از مهم‌ترین راهکارهای سازگاری هستند. همچنین فناوری‌های نوین، سامانه‌های تصمیم‌یار و رویکردهایی مانند هالوکالچر می‌توانند در افزایش بهره‌وری آب و کاهش فشار بر منابع طبیعی موثر باشند. در مجموع، دستیابی به کشاورزی پایدار در شرایط تغییر اقلیم مستلزم تلفیق راهکارهای مدیریتی، فناورانه، محیط‌زیستی و سیاستی و حرکت به سوی مدیریت یکپارچه منابع آب و نظام‌های کشاورزی است.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، بهره‌وری آب، امنیت غذایی، مدیریت محیط‌زیست، کشاورزی هوشمند.

۱- مقدمه

امروزه تغییر اقلیم به عنوان یک چالش اساسی، دغدغه تمامی کشورهای جهان شناخته شده است (حیدری، ۱۳۹۸)، که به طور گسترده‌ای می‌تواند فرایندهای هیدرولوژیک و اکولوژیک را تحت تاثیر خود قرار دهد (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۹). در سال‌های اخیر، افزایش دمای هوا، تغییر الگوهای بارش همین‌طور تغییر در شدت و توزیع بارش‌ها یکی از علت‌های اصلی ناپایداری منابع آب به حساب می‌آید که این موارد در مناطق خشک و نیمه-خشک می‌تواند اثرات عمیق‌تری بر جای بگذارد (Ramirez and ; ;Challinor, 2012 Makuvaro et al, 2018)

رابطه تغییر اقلیم و انسان‌ها یک رابطه متقابل به حساب می‌آید چرا که از یک سو تغییر اقلیم می‌تواند بر روی زندگی انسان‌ها از جمله منابع آب، کشاورزی و محیطزیست تاثیر بگذارد و از سوی دیگر فعالیت‌های انسانی نظیر تولید گاز-های گلخانهای، عدم بهرهبرداری صحیح از محیطزیست و منابع آب، تخریب مراتع، استفاده بیش از حد از سموم کشاورزی خود، دلیلی بر تغییر اقلیم میباشد (علوی نیا و همکاران، ۱۴۰۵). تغییراتی که در ماهیت بارش‌ها رخ می‌دهد در نهایت موجب کاهش نفوذ آب در خاک و در پی آن، افزایش رواناب می‌شود که این روند، میتواند فشار بیش-تری بر منابع آب شیرین وارد کند. در میان بخش‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی، کشاورزی به دلیل وابستگی مستقیم به منابع آب و شرایط اقلیمی، از جمله بخش‌هایی است که بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر این تغییرات دارد.

هر چند موضوع تغییر اقلیم در قرن حاضر بیشتر مورد توجه قرار گرفته و به یک بحران تبدیل شده است، اما این موضوع از دیرباز مطرح بوده و نظریه‌های اولیه‌ای ارائه شده بود. به طوری که در قرن ۱۹ میلادی ریشه های نظریه اولیه در این خصوص موجود می باشد. Joseph Fourier ریاضیدان و فیزیکدان فرانسوی برای اولین بار مقالهای مرتبط با اثر گلخانهای را در سال ۱۸۲۴ و ۱۸۲۷ به چاپ رساند که در آن به مسئله گرمای اضافی مشاهده شده پرداخته بود. جوزف در سال ۱۸۲۰ به این نتیجه رسیده بود که اگر گرمای کره زمین صرفا از سمت نور مستقیم خورشید تامین شود. دما کره زمین باید کمتر از آن چیزی باشد که هست. بر این اساس به وجود منبع گرمایشی دیگری پی برد. در نهایت در سال ۱۸۲۷ بیان کرد که جو زمین همچون عایقی عمل کرده و باعث افزایش دما زمین می‌شود. این امر باعث جلوگیری از خروج انرژی شده که این فرایند امروزه به عنوان اثر گلخانه ای شناخته می شود. پس از جوزف فوریر، سوانت آرنیوس شیمیدان و فیزیکدان سوئدی به پژوهش در مورد دمای کره زمین پرداخت و اولین کسی بود که مدل اقلیمی از اثر کربن دیاکسید جو را ارائه داد. او اولین بار مدل خود را در سال ۱۸۹۶ در مجله The Philosophical Magazine ارائه کرد.

آرنیوس همچنین در خصوص تاثیر فعالیت های صنعتی بر روی دمای زمین بررسیهای متعددی انجام داد. پس از این دوره، در بازه زمانی میان ۱۹۵۰ تا ۱۹۸۰ بررسیها گسترده-تر شده و به سوی توسعه و مدلسازی سوق یافتند. در این پژوهش‌ها مدل‌های اقلیمی عددی توسعه یافته و گرمایش جهانی ناشی از فعالیت‌های انسانی بررسی شدهاند هرچند مقالات مرتبط با این حوزه به طور منظم منتشر شدند ولی به صورت محدود دیده می‌شدند. از دهه ۱۹۸۰ به بعد جهشی بزرگ در بحث تغییر اقلیم رخ داد به گونه‌ای که توجه جهانی به این امر گسترش یافت و تعداد پژوهش‌ها و مقالات بیش از پیش صورت گرفت و بحث تغییر اقلیم به یک حوزه مستقل پژوهشی تبدیل شد. از سال ۲۰۰۰ تا به امروز تحقیقات، با یک انفجار علمی رو به رو شد و مباحث میان رشتهای مانند منابع آب، کشاورزی و امنیت غذایی نیز به مباحث تغییر اقلیم افزوده شد.

گسترش این مطالعات و ورود تغییر اقلیم به حوزه منابع آب و کشاورزی، ضرورت بررسی آثار آن بر میزان دسترسی به آب، نیاز آبی محصولات و در نهایت بهره‌وری آب کشاورزی را بیش از پیش آشکار ساخته است. تغییرات اقلیمی با کاهش دسترسی به منابع آب و افزایش نیاز آبی گیاهان، آسیب‌پذیری بخش کشاورزی را در برابر کمبود آب تشدید می‌کند. از این منظر، تاب‌آوری منابع آب در برابر تغییر اقلیم به یکی از محورهای اساسی مدیریت پایدار منابع تبدیل شده است. روندهای پژوهشی موجود نشان می‌دهند که افزایش تاب‌آوری منابع آب مستلزم توجه همزمان به

تغییرپذیری اقلیمی، فشار تقاضا، ظرفیت سازگاری نظام‌های آبی و اصلاح شیوه‌های مدیریت منابع است (Hajirad & Pourmohammad, 2025). ازاین‌رو، بهبود بهره‌وری آب و اصلاح الگوهای آبیاری و مصرف آب می‌تواند نقش مهمی در کاهش فشار بر منابع آب و افزایش سازگاری نظام‌های کشاورزی با شرایط اقلیمی جدید داشته باشد (Pourgholam-Amiji et al., 2024).

در مطالعات اخیر، استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین نیز به‌عنوان ابزاری نوین برای بهبود بهره‌وری آب و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب تحت شرایط تغییر اقلیم مورد توجه قرار گرفته است (Hajirad et al., 2026). هر تغییری که در شرایط اقلیمی به وجود آید و منجر به کاهش منابع آب یا افزایش نیاز آبی گیاهان شود، به‌طور مستقیم بر بهره‌وری آب در بخش کشاورزی تاثیرگذار خواهد بود. در چنین شرایطی، مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی به یکی از مهم‌ترین راهبردها برای سازگاری با شرایط اقلیمی تبدیل خواهد شد. بر اساس تحقیقات انجام شده، از مهمترین عوامل اثرگذار بر بهبود بهرهوری آب در بخش کشاورزی میتوان به روش مصرف منابع آب، سیستم آبیاری، نوع محصول، بذر گیاه و واریته گیاه اشاره کرد (علی و تالوسکر، ۲۰۰۸). در این میان، روش‌ها و ابزارهای مدیریت هوشمند آبیاری می‌توانند با بهبود زمان‌بندی و مدیریت مصرف آب، زمینه کاهش مصرف غیرضروری و ارتقای بهره‌وری آب در سامانه‌های کشاورزی را فراهم کنند (Hajirad, 2025).

همچنین، مرسلی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند که اصلاح و بهبود روش‌های مدیریتی در تخصیص، انتقال و توزیع آب کشاورزی، همراه با کاهش تلفات و مصارف غیرضروری آب و بهبود فرایند تامین و عرضه آب، می‌تواند نقش مهمی در ارتقای بهره‌وری آب داشته باشد. این موضوع در مطالعات موردی مربوط به مدیریت آبیاری و بهبود بهره‌وری آب در تولید گندم در ایران نیز مورد توجه قرار گرفته است (Pourgholam-Amiji et al., 2024). با این حال، افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی تنها به حفظ تولید و کاهش مصرف آب محدود نمی‌شود، بلکه نحوه استفاده از منابع آب می‌تواند پیامدهای مستقیمی بر کیفیت منابع طبیعی، پایداری اکوسیستم‌ها و سلامت محیط‌زیست داشته باشد. با وجود نقش پررنگ بخش کشاورزی در تامین امنیت غذایی، فعالیتهای این بخش و الگوهای نامناسب مصرفی آب نیز میتواند پیامدهای قابل توجهی برای محیطزیست به همراه داشته باشد. در این میان از پیامدهای الگوی ناپایدار مصرف آب، مواردی نظیر، برداشت بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی، کاهش جریان رودخانه‌ها، افت سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش شوری خاک به چشم میخورند. علاوه بر این، استفاده نامناسب از منابع آب می‌تواند منجر به تخریب اکوسیستم‌های طبیعی، کاهش تنوع زیستی و تغییر در تعادل اکولوژیک شود. همین طور استفاده از سموم و کودهای کشاورزی به جهت افزایش بهرهوری محصولات کشاورزی، به جای بهرهوری آب، اثرات منفی محیطزیستی را در پی دارد (همایییان و صباغی، ۱۳۹۷).

تغییر اقلیم در دههای اخیر به یکی از اساسیترین چالش های بخش کشاورزی تبدیل شده است. زیرا این بخش به شدت تحت تاثیر عوامل اقلیمی و محیطی نظیر دما، رطوبت، نوع خاک و از همه مهمتر منبع آب میباشد. پیچیدگی و ماهیت چندبعدی این ارتباط موجب شده است که پژوهشگران، آثار تغییر اقلیم بر کشاورزی، منابع آب، محیطزیست و همچنین راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری این بخش را از ابعاد مختلف مورد بررسی قرار دهند. در همین راستا پژوهشهای متعددی اقدام به بررسی جوانب گوناگون این پدیده داشته اند. به عنوان مثال در مطالعهای Garg و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی نقش دو طرفه کشاورزی در تغییر اقلیم پرداختهاند. این مطالعه نشان می‌دهد که کشاورزی هم در انتشار گازهای گلخانهای و تشدید تغییر اقلیم ایفای نقش میکند و هم با اتخاذ راهبردهای بهینه و نوین در کاهش این اثرات میتواند سهیم باشد. نتایج بیانگر این است که اتخاذ رویکردهای کشاورزی پایدار بسیار ضروری است. اروندی (۱۴۰۴) طی پژوهشی به بررسی فناوریهای نوین و آیندهپژوهی برای مقابله با چالشهای تغییر اقلیم پرداخته است. این مطالعه بیان میکند که استفاده از فناوریهای نوین نظیر هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء، نانو تکنولوژی، ذخیرهسازی انرژی و سیستمهای هوشمند انرژی میتواند در روند کاهش اثرات منفی تغییر

اقلیم، کاهش سوختهای فسیلی و انتشار گازهای گلخانهای اثرگذار باشد. راهکارهای ارائه شده شامل استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، مدیریت منابع آب، افزایش آگاهی و آموزش و حفظ و توسعه گونههای محافظت شده میباشد.

از آنجا که کاهش هدررفت و بهبود بهرهوری مصرف آب علاوه بر عوامل فنی، تحت تاثیر عوامل اجتماعی، اقتصادی و رفتاری مصرفکنندگان نیز قرار دارد، بررسی این ابعاد میتواند در تبیین ضرورت مدیریت و حفاظت از منابع آب مفید باشد. با توجه به اینکه کاهش هدررفت و بهبود بهرهوری مصرف آب، علاوه بر بخش کشاورزی، به عوامل اجتماعی، اقتصادی و میزان آگاهی مصرفکنندگان در سایر بخشهای مصرف آب نیز وابسته است، بررسی این عوامل میتواند در تبیین ضرورت مدیریت و حفاظت از منابع آب مفید باشد. در این راستا، عابدی (۱۴۰۱) در پژوهش خود در شهر تهران با بهرهگیری از روش پیمایشی و دو الگوی لاجیت، عوامل موثر بر پذیرش فناوریهای نوین کاهش هدررفت آب در فضاهای داخلی و خارجی منازل را با نمونه ۲۵۶ نفر بررسی کرده است. نتایج این پژوهش نشان داد که نگرش مثبت نسبت به فناوریهای نوین و کارآمد آبی و سطح تحصیلات، مهمترین عوامل موثر در پذیرش تجهیزات کاهنده مصرف در داخل ساختمان بودند. همچنین، افزایش نگرانیهای مردم در خصوص مسائل محیطزیستی و تحصیلات، تاثیر معناداری بر تمایل به استفاده و سرمایهگذاری در تجهیزات کارآمد آبی در فضای بیرونی منازل داشته است. بر اساس نتایج بهدستامده، مهمترین انگیزههای حفاظت از آب در بخش خانگی شامل نگرانی از کمآبی خانوادهها، ملاحظات محیطزیستی، تاثیرات اجتماعی و عوامل مالی بوده است. در مقابل، دلایل اصلی عدم استفاده از تجهیزات کارآمد آبی شامل تصور استفاده صحیح از آب، نبود آگاهی کافی درباره کارایی تجهیزات و هزینههای مربوطه گزارش شده است. این یافتهها نشان میدهد که مدیریت تقاضای آب و کاهش هدررفت آن، علاوه بر راهکارهای فنی، تحت تاثیر عوامل اجتماعی، اقتصادی و رفتاری نیز قرار دارد؛ موضوعی که در مدیریت پایدار منابع آب و کاهش فشار بر منابع مورد استفاده در بخش کشاورزی نیز اهمیت دارد.

وزیری نسب و همکاران (۱۴۰۴) مطالعهای با هدف بررسی تاثیر فناوریهای سبز و بهرهوری انرژی بر تغییرات اقلیم در کشورهای منتخب عضو BRICS انجام دادند. در این پژوهش از دادههای پانلی طی دوره زمانی ۱۳۷۲ تا ۱۴۰۰ و روش اقتصادسنجی گشتاورهای تعمیمیافته (GMM) استفاده شد. نتایج نشان داد که رشد اقتصادی، تجارت و رانت منابع طبیعی تاثیر مثبت و معناداری بر انتشار گازهای گلخانهای دارند و موجب تشدید و افزایش روزافزون تغییرات اقلیمی میشوند. ولی در مقابل، فناوریهای سبز، انرژیهای تجدیدپذیر و افزایش بهرهوری انرژی تاثیر منفی و معناداری بر انتشار گازهای گلخانهای داشته و میتوانند به کاهش تغییرات اقلیمی کمک کنند. همچنین نتایج بیانگر آن است که سرمایهگذاری مستقیم خارجی تاثیر معناداری بر انتشار گازهای گلخانهای ندارد. بر این اساس، توسعه فناوریهای سازگار با محیط زیست، گسترش استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر و ارتقای بهرهوری انرژی بهعنوان راهکارهای موثر برای کاهش انتشار گازهای گلخانهای و دستیابی به توسعه پایدار در کشورهای BRICS پیشنهاد شده است. مجموع این یافتهها نشان میدهد که مواجهه با تغییر اقلیم نیازمند رویکردی فراتر از افزایش صرف منابع آب بوده و مستلزم بهرهگیری همزمان از فناوریهای نوین، مدیریت کارآمد منابع و راهکارهای سازگار با محیطزیست است. لذا در این شرایط که به ناچار لزوم سازگاری با تغییرات اقلیمی به طور واضح روشن است، بکارگیری سیستمهای نوین در آبیاری، مدیریت، کاهش گازهای گلخانه ای و استفاده از روشهای نوین انرژی به عنوان یکی از راهکارهای مناسب در افزایش بهرهوری آب و کاهش فشار منابع آب سطحی و زیرزمینی توام با حفاظت محیطزیست از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

با وجود گسترش مطالعات انجامشده در زمینه تغییر اقلیم و پیامدهای آن بر بخش کشاورزی، منابع آب و بهرهوری آب، این مطالعات عمدتا بر جنبههای مختلف و مجزایی از این موضوع تمرکز داشتهاند. ازاینرو، هدف اصلی این مقاله، مرور و جمعبندی مهمترین آثار و پیامدهای تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی، با تاکید بر منابع و بهرهوری آب، و بررسی راهکارها و فناوریهای نوین سازگاری با شرایط اقلیمی

جدید است. در این راستا، پژوهش حاضر با مرور یافته‌های مطالعات انجام‌شده، تلاش دارد تصویری یکپارچه از چالش‌های ناشی از تغییر اقلیم برای بخش کشاورزی و منابع آب ارائه کرده و مهم‌ترین رویکردها و راهکارهای مطرح‌شده برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش سازگاری این بخش را مورد بررسی قرار دهد. همچنین، با توجه به اهمیت بهره‌وری آب در تداوم و پایداری تولید کشاورزی، نقش مدیریت منابع آب و فناوری‌های نوین در کاهش فشار بر منابع آبی و افزایش تاب‌آوری نظام‌های کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی مورد توجه قرار می‌گیرد. در نهایت، این مقاله در پی پاسخ به این پرسش است که تغییر اقلیم چه پیامدهایی برای بخش کشاورزی و بهره‌وری آب به همراه دارد و چه راهکارها و فناوری‌هایی می‌توانند در سازگاری این بخش با شرایط اقلیمی جدید و دستیابی به تولید پایدار موثر باشند؟

۱-۱- مبانی نظری، مفاهیم کلیدی و چارچوب مفهومی ارتباط تغییر اقلیم با کشاورزی و بهره‌وری آب

موضوع تغییر اقلیم در سالهای اخیر به یکی از مشکلات جهانی تبدیل شده است و میتواند کشورهای بسیاری را با بحرانهای جدی مواجه کند. هرچند اصطلاح گرمایش جهانی در برخی پژوهشها به جای تغییر اقلیم مورد استفاده قرار میگیرد، ولی با توجه به گستردگی مفهوم تغییر اقلیم و دربرگرفتن طیف وسیعتری از تغییرات بلندمدت در سامانه اقلیمی، اصطلاح تغییر اقلیم رایجتر است (دهقانی و باشی، ۱۴۰۴). در یک تعریف کلی، تغییر اقلیم به تغییراتی اطلاق میشود که در بلندمدت صورت گرفته و تاثیر زیادی بر الگوهای آب و هوایی کره زمین میگذارد. در همین راستا، تغییرات اقلیمی با دارا بودن عدم قطعیتهای بسیار، پژوهشگران را در پیشبینی وضعیت منابع آبی و مدیریت محیطزیست با مشکل مواجه کرده و اتخاذ رویکردهای سازگارانه را برای کنترل منابع آب و اکوسیستمهای طبیعی را ضروری میسازد (Oki & Kanae, 2006).

این بحران به عنوان تهدید بزرگ برای پایداری اکولوژیک و امنیت منابع آب شناخته میشود (IPCC, 2023). در همین راستا، افزایش تاب‌آوری منابع آب در برابر تغییر اقلیم به یکی از محورهای مهم مدیریت پایدار منابع آب تبدیل شده است و مستلزم توجه همزمان به چالش‌های اقلیمی، ظرفیت‌های مدیریتی، سیاست‌های سازگاری و استفاده از ابزارهای نوین برای کاهش آسیب‌پذیری منابع آب است (Hajirad & Pourmohammad, 2025).

بحث تغییر اقلیم را میتوان از دو دیدگاه توسط IPCC و NIPCC بررسی کرد. دیدگاه IPCC بر این باور است که تغییرات اقلیم به دلیل فعالیتهای انسانی رخ داده و کاهش گازهای گلخانهای را ضروری دانسته و بر سیاستهای محیط-زیستی و بکارگیری فناوریهای نوین تاکید دارد. در مقابل این دیدگاه، دیدگاه NIPCC اعتقاد دارد که در بحث تغییر اقلیم نه تنها فعالیتهای انسانی، بلکه عوامل طبیعی نیز سهیم هستند و پژوهشهای تغییر اقلیم به جهت شناخت بهتر آن نیازمند بررسیهای بلندمدت میباشد (دهقانی و باشی، ۱۴۰۴). در دیدگاه NIPCC اشاره شده است که اثرگذاری متان در مقایسه با دیاکسید کربن بیشتر بوده (singer, 2008)،

در صورتی که IPCC به پایداری بلندمدت دیاکسید کربن بر خلاف پایداری کوتاهمدت متان در جو اشاره کرده است. بر اساس یافتههای دهقانی و باشی (۱۴۰۴) یکی از ابعاد مهم در بحث اقلیم، تفاوتهای منطقهای و جغرافیایی میباشد که در پژوهشها کمتر مورد توجه قرار گرفته است و لذا تغییر اقلیم میتواند اثرات متفاوتی بر مناطق مختلف داشته باشد. بر این اساس، بابائیان و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود به این موضوع اشاره کردهاند که در ایران و کشورهای خاورمیانه با افزایش دما همراه با کاهش بارشها، مواردی نظیر تشدید خشکسالی، افت منابع آب زیرزمینی و کاهش توان کشاورزی به چشم میخورد. از آنجایی که بخش کشاورزی بیش از هر بخش دیگری نیازمند منابع آب می-باشد، لزوم مدیریت این بخش به جهت حل مشکلات کمبود آب نیز از اهمیت بالایی برخوردار میباشد (Yu et al, 2021).

با توجه به گزارشهای FAO (۲۰۲۰) حدود ۷۰ درصد مصرف آب شیرین در جهان سهم بخش کشاورزی است. بنابراین اتخاذ راهکارهای مناسب مدیریتی در این حوزه

اهمیت زیادی دارد. در این میان موضوع بهرهوری آب بیش از هر مورد دیگری اهمیت دارد چرا که بهبود بهرهوری آب منجر به حفظ عملکرد محصولات کشاورزی همراه با کاهش مصرف بی رویه منابع آب زیرزمینی شده که در نهایت می‌توان به حفظ محیطزیست منجر گردد (Rockström et al., 2017). بهرهوری آب بیانگر مقدار محصول تولیدی یا درآمد حاصله به ازای هر واحد آب مصرفی است (حیدری ۱۳۹۳). از منظر قانونی نیز به استناد ماده (۲۵) قانون افزایش بهره‌وری بخش کشاورزی و منابع طبیعی مصوب مجلس شورای اسلامی در سال ۱۳۸۹، تاکید شده است که اقداماتی برای تعیین شاخص های بهرهوری آب کشاورزی و اقدامات اجرایی برای بهبود آن صورت گیرد. کلمه بهرهوری از دیرباز مورد توجه قرار گرفته و برای اولین بار توسط کوئیزنی در سال ۱۷۶۶ در یک مجله مرتبط با کشاورزی استفاده شده است (عالم تبریز، ۱۳۹۲).

تعاریف متعددی برای کلمه بهرهوری توسط دانشمندان و پژوهشگران ارائه شده است که از جمله تعاریف رایج بهره‌وری میتوان به نسبت ستاده و داده اشاره کرد (سعید، ۲۰۱۴). با توجه به تعریف کلی بهرهوری این موضوع برای اولین بار توسط ویتز (۱۹۶۲) به بخش کشاورزی وارد شده و موضوع بهرهوری آب کشاورزی مطرح شده است (مرسلی و همکاران، ۱۳۹۶). اگرچه بهرهوری آب در کشاورزی یک مفهوم کلی است ولی تعریف آن آب در مقیاسهای ملی، مزرعه و گیاه نیز ارائه شده است (مولدن، ۲۰۰۳).

در میان اصطلاحات مدیریت آب در کشاورزی دو مفهوم کلیدی کارایی مصرف آب[1] (WUE) و بهرهوری آب[2] (WP) وجود دارند که اغلب توسط پژوهشگران به جای یکدیگر استفاده میشوند، در صورتی که تفاوتهای مشهودی میان این دو وجود دارد (Molden, et al., 2007). اصطلاح کارایی مصرف آب اغلب در سطح فیزیولوژیک یا مزرعه‌ای استفاده می‌شود و به نسبت زیست‌توده (عملکرد تولیدی گیاه) به میزان آبی که توسط گیاه مصرف شده است اشاره دارد. به‌عبارت دیگر، کارایی مصرف آب نشان می‌دهد که گیاه تا چه اندازه می‌تواند آب مصرف‌شده را به ماده خشک یا عملکرد اقتصادی تبدیل کند (Blum, 2009). این شاخص بیشتر در مقیاس گیاهی و فرآیندهای درون‌مزرعه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصطلاح بهره‌وری آب اصطلاحی وسیعتر است که نسبت خروجی نظیر عملکرد محصول و یا ارزش اقتصادی محصول به حجم کل آب مصرف‌شده یا بهره‌برداری‌شده را در مقیاس‌های مختلف از مزرعه تا حوزه آبخیز در بر می‌گیرد (Molden et al, 2007). بدین ترتیب، بهرهوری آب می‌تواند هم مصرف واقعی آب و هم آب برداشت‌شده از منابع آب را شامل شود. امروزه در سطح جهانی شاهد افزایش رشد جمعیت و فعالیتهای انسانی هستیم، به طوری که انسان برای رفع نیاز هایش اقدام به تخریب محیطزیست کرده است. با وجود این که اغلب انسانها از آسیبهای وارده به محیطزیست آگاه هستند، اما کمتر کسی اقدام به کنترل و مدیریت این فعالیتها میکند. تا جایی که این تغییرات جمعیت کشورها را با مشکلات اقتصادی، اجتماعی و محیطزیستی مواجه کرده و نیازمند تدوین راهکاری برای مدیریت منابع، مخصوصا منابع آب و تابآوری شهری و محیطزیستی خواهد بود (قهرمانی و نوری، ۱۴۰۴).

از آنجایی که اقلیم خود بخشی از سیستم منابع طبیعی است، لذا در برخورد با تغییرات اقلیم و ایجاد سازگاری با آن میتوان از محیطزیست یاری جست. به منظور جلوگیری از چالشهای تغییرات اقلیم اقداماتی نظیر، ایجاد فضای سبز، توسعه پوشش گیاهی (Herrera-Gomez et al, 2017)، سیستمهای مدرن آبیاری فضای سبز و همینطور ارتقای بهرهوری آب کشاورزی میتواند به کاهش دمای شهری، کاهش جذب آلایندهها و بهبود مدیریت پسماندها کمک کند (حسینی و همکاران، ۲۰۲۰) که همین اقدامات میتواند مجدد بر روی محیطزیست تاثیر بگذارد. در شرایط کنونی کره زمین که اغلب کشورها با تغییر اقلیم مواجه شدهاند و منابع آب دارای محدودیت میباشند، استفاده از روشهای سنتی آبیاری نامناسب بوده و با بازده کمی که دارا هستند باعث هدر رفت حجم قابلتوجهی از منابع آب و تشدید تخریب محیطزیست میشوند. بنابراین روشهای مزبور نه تنها بهرهوری آب را کاهش داده بلکه با نشتی کانالها و ایجاد

[1] Water Use Efficiency

[2] Water Productivity

روانابهای آلوده به سموم و کودهای کشاورزی باعث آلوده شدن آبهای سطحی و زیرزمینی شده و پیامدهای آن مستقیم بر محیطزیست اثر میگذارد.

پژوهشهای متعددی نشان میدهند که استفاده از روشهای مدرن آبیاری کشاورزی میتواند بهرهوری آب را افزایش دهد. مطالعات اخیر همچنین نشان دادهاند که روش‌های نوین و نوآورانه آبیاری، علاوه بر بهبود مدیریت مصرف آب، می‌توانند از طریق کاهش تلفات و بهبود کارایی کاربرد آب، به پایداری زیست‌محیطی کشاورزی کمک کنند (Pourmohammad & Hajirad, 2025). یکی از این پژوهشها توسط Jagermeyr و همکاران (۲۰۲۵) انجام شد که نتایج مدلسازی جهانی نشان داد، با مجهز کردن ۴۰ درصد از اراضی آبی جهانی میتوان مصرف آب در بخش کشاورزی را ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش داد. این امر موجب افزایش بهرهوری آب از طریق کاهش مصرف آب و همچنین بهبود عملکرد محصول به دلیل کنترل بهینه رطوبت خاک میشود. همچنین، مطالعات اخیر بر نقش رویکردهای یادگیری ماشین در بهینه‌سازی بهره‌وری آب در شرایط تغییر اقلیم تاکید کرده‌اند و نشان داده‌اند که تلفیق داده‌های اقلیمی، کشاورزی و منابع آب می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری و افزایش بهره‌وری آب منجر شود (Hajirad et al., 2026).

۲- روش‌شناسی مرور و تحلیل مطالعات

پژوهش حاضر با رویکرد مروری ـ تحلیلی و تلفیقی انجام شد و هدف آن بررسی و تفسیر یافته‌های مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم، کشاورزی، منابع آب، بهره‌وری آب، مدیریت محیط‌زیست و راهکارهای سازگاری با شرایط اقلیمی جدید بود. با توجه به ماهیت میان‌رشته‌ای موضوع، منابع مورد بررسی صرفا بر اساس ارتباط مستقیم با تغییر اقلیم انتخاب نشدند، بلکه ارتباط آنها با تولیدات کشاورزی، منابع آب، بهره‌وری آب، پایداری محیط‌زیست، سازگاری و فناوری‌های نوین نیز مورد توجه قرار گرفت. به‌منظور افزایش شفافیت، قابلیت بازتولید و انسجام فرایند شناسایی و انتخاب مطالعات، مراحل جست‌وجو، غربالگری، ارزیابی و انتخاب منابع با استفاده از منطق و اصول گزارش‌دهی بیانیه PRISMA 2020 سازمان‌دهی شد.

در مرحله نخست، راهبرد جست‌وجوی منابع علمی در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی و داخلی تدوین و اجرا شد. پایگاه‌های بین‌المللی مورد استفاده شامل Scopus، Web of Science، ScienceDirect، SpringerLink، PubMed، IEEE Xplore و Google Scholar و پایگاه‌های داخلی شامل SID، Magiran، ISC و Civilica بودند. جست‌وجوی منابع بر اساس ترکیبی از کلیدواژه‌های مرتبط با موضوع پژوهش انجام گرفت. مهم‌ترین گروه‌های کلیدواژه شامل climate change، agriculture، agricultural water productivity، water resources، irrigation، water-use efficiency، environmental sustainability، adaptation strategies، climate-smart agriculture، precision agriculture، artificial intelligence، Internet of Things، machine learning و decision support systems بود. در جست‌وجوی منابع فارسی نیز معادل‌های فارسی این مفاهیم مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر جست‌وجوی مستقیم در پایگاه‌های اطلاعاتی، فهرست منابع مطالعات شناسایی‌شده و منتخب نیز به‌منظور یافتن مطالعات مرتبط تکمیلی بررسی شد.

در مرحله نخست، منابع علمی و مطالعات موجود در فهرست منابع مقاله شناسایی و بر اساس میزان ارتباط با اهداف پژوهش، سال انتشار، اهمیت علمی، نقش مطالعه در شکل‌گیری مفاهیم اصلی و میزان ارتباط آن با پرسش‌های پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. در این فرایند، مطالعات بنیادی و مرجع در کنار مطالعات جدیدتر مورد استفاده قرار گرفتند تا ضمن پوشش روند شکل‌گیری دانش، تحولات اخیر در زمینه تغییر اقلیم و سازگاری کشاورزی نیز در تحلیل لحاظ شود. همچنین مطالعات داخلی و خارجی به‌صورت جداگانه طبقه‌بندی شدند تا امکان مقایسه روند پژوهش در داخل کشور با مطالعات بین‌المللی فراهم شود. دامنه زمانی جست‌وجو مطابق با بازه زمانی تعیین‌شده در پژوهش در نظر گرفته شد و در کنار مطالعات منتشرشده در این دوره، مطالعات بنیادی، مرجع و اثرگذار که نقش مهمی در شکل‌گیری مفاهیم و چارچوب نظری پژوهش

داشتند نیز در صورت ارتباط مستقیم با اهداف مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند.

پس از شناسایی اولیه منابع، فرایند انتخاب مطالعات در چهار مرحله اصلی شامل شناسایی[1]، غربالگری[2]، ارزیابی واجد شرایط بودن متن کامل[3] و ورود مطالعات نهایی به مرور[4] سازمان‌دهی شد. در مرحله شناسایی، رکوردهای به‌دستامده از پایگاه‌های اطلاعاتی و جست‌وجوی منابع تکمیلی گردآوری شدند و موارد تکراری حذف گردیدند. در مرحله غربالگری، عنوان و چکیده مطالعات بر اساس معیارهای ورود و خروج بررسی شد. سپس متن کامل مطالعات بالقوه مرتبط مورد ارزیابی قرار گرفت و مطالعاتی که فاقد ارتباط کافی با اهداف پژوهش یا معیارهای تعیین‌شده بودند حذف شدند. در نهایت، مطالعات واجد شرایط برای استخراج اطلاعات و سنتز کیفی وارد مرحله تحلیل شدند. تعداد رکوردهای شناسایی‌شده، موارد تکراری، مطالعات حذف‌شده در مرحله غربالگری، مطالعات بررسی‌شده در مرحله متن کامل و مطالعات نهایی واردشده به مرور، در نمودار جریان PRISMA ارائه شده است.

معیارهای ورود مطالعات بر اساس ارتباط آنها با حداقل یکی از محورهای اصلی پژوهش تعیین شد. بر این اساس، مطالعاتی وارد فرایند بررسی شدند که به آثار تغییر اقلیم بر کشاورزی و منابع آب، ارتباط تغییر اقلیم با بهره‌وری آب کشاورزی، پیامدهای تغییر اقلیم بر محیط‌زیست و منابع طبیعی، راهکارها و رویکردهای سازگاری بخش کشاورزی، یا فناوری‌ها، مدل‌ها و ابزارهای نوین ارزیابی و مدیریت تغییر اقلیم پرداخته بودند. در مقابل، مطالعات تکراری، منابع فاقد اطلاعات علمی قابل ارزیابی، مطالعاتی که ارتباط موضوعی کافی با اهداف پژوهش نداشتند و مطالعاتی که صرفا به موضوعات خارج از دامنه پژوهش می‌پرداختند، از فرایند نهایی بررسی حذف شدند.

به‌منظور جلوگیری از تبدیل مرور مطالعات به یک گردآوری ساده، منابع بر اساس محتوای اصلی آنها در پنج محور موضوعی طبقه‌بندی شدند:

۱. آثار تغییر اقلیم بر کشاورزی و منابع آب؛
۲. ارتباط تغییر اقلیم با بهره‌وری آب کشاورزی؛
۳. پیامدهای تغییر اقلیم بر محیط‌زیست و پایداری منابع طبیعی؛
٤. راهکارها و رویکردهای سازگاری بخش کشاورزی با تغییر اقلیم؛
۵. نقش فناوری‌ها، مدل‌ها و ابزارهای نوین در مدیریت و سازگاری با تغییر اقلیم.

در محور نخست، مطالعات مربوط به افزایش دما، تغییر الگوی زمانی و مکانی بارش، تشدید خشکسالی، تغییر تبخیر و تعرق، کاهش رطوبت خاک، تغییرات هیدرولوژیکی، منابع آب سطحی و زیرزمینی، نیاز آبی محصولات و پیامدهای آن بر تولید کشاورزی بررسی شدند. هدف از این محور، شناسایی مسیرهایی بود که از طریق آنها تغییر اقلیم موجب تغییر در عرضه و تقاضای آب، افزایش نیاز آبیاری و افزایش آسیب‌پذیری نظام‌های کشاورزی می‌شود.

در محور دوم، ارتباط میان تغییر اقلیم و بهره‌وری آب کشاورزی مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش، مفاهیمی نظیر بهره‌وری آب، کارایی مصرف آب، روش‌های آبیاری، مدیریت آب و خاک، عملکرد محصول، نیاز آبی و کاهش تلفات آب مورد مقایسه قرار گرفتند. در این محور تلاش شد مشخص شود که تغییر اقلیم چگونه از طریق تغییر در شرایط منابع آب و نیاز آبی محصولات بر بهره‌وری آب اثر می‌گذارد و چه اقدامات مدیریتی و فنی می‌تواند این آثار را کاهش دهد.

محور سوم به پیامدهای تغییر اقلیم بر محیط‌زیست و پایداری منابع طبیعی اختصاص یافت. در این بخش، افت آبخوان‌ها، افزایش شوری آب و خاک، کاهش جریان‌های زیست‌محیطی، تخریب اکوسیستم‌ها، کاهش تنوع زیستی و فشار بر منابع طبیعی مورد توجه قرار گرفت. در این محور، بهره‌وری آب صرفا از منظر افزایش تولید به ازای واحد آب بررسی نشد، بلکه پیامدهای آن برای پایداری منابع طبیعی و محیط‌زیست نیز در نظر گرفته شد.

[1] Identification
[2] Screening
[3] Eligibility
[4] Included

در محور چهارم، راهکارها و رویکردهای سازگاری بخش کشاورزی بررسی شدند. مدیریت پایدار آب و خاک، توسعه سامانه‌های نوین آبیاری، اصلاح الگوی کشت، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و گرما، کشاورزی حفاظتی، مدیریت حوزه‌های آبخیز، حفاظت و احیای اکوسیستم‌ها، سازوکارهای اقتصادی و سیاستی و فناوری‌های نوین در این محور طبقه‌بندی شدند. همچنین میان سازگاری خودجوش و سازگاری برنامه‌ریزی‌شده تفکیک انجام شد.

در محور پنجم، مطالعات مرتبط با فناوری‌ها، مدل‌های اقلیمی، سامانه‌های تصمیم‌یار، ابزارهای تحلیل داده و نرم‌افزارهای مرتبط با مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییر اقلیم بررسی شدند. در سال‌های اخیر، کشاورزی دقیق و هوشمند و به‌ویژه فناوری اینترنت اشیا (IoT) نیز به‌عنوان یکی از مسیرهای توسعه مدیریت داده‌محور، پایش شرایط مزرعه و ارتقای بهره‌وری منابع در سامانه‌های کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است (Hajirad, 2026).

در این بخش، ابزارها صرفا بر اساس وجود آنها معرفی نشدند، بلکه نقش آنها در تحلیل داده‌های اقلیمی، ارزیابی ریسک، مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی سازگاری و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مطالعات واردشده به مرحله نهایی، اطلاعات اصلی شامل سال انتشار، محدوده جغرافیایی، داخلی یا خارجی بودن مطالعه، موضوع اصلی، رویکرد یا روش پژوهش، مهم‌ترین یافته‌ها، راهکارهای سازگاری و ارتباط مطالعه با منابع آب، بهره‌وری آب، محیط‌زیست و فناوری‌های نوین استخراج و طبقه‌بندی شد. این اطلاعات به‌عنوان مبنای مقایسه و سنتز کیفی مطالعات مورد استفاده قرار گرفت.

پس از طبقه‌بندی مطالعات، برای هر محور، مطالعات داخلی و خارجی از نظر سال انتشار، موضوع مطالعه، رویکرد یا روش پژوهش، مهم‌ترین یافته و ارتباط با موضوع پژوهش مقایسه شدند. مطالعات هر محور ابتدا بر اساس توالی زمانی مرتب شدند تا روند تحول دانش مشخص شود و سپس اهمیت علمی و میزان ارتباط آنها با موضوع پژوهش در تفسیر یافته‌ها مورد توجه قرار گرفت. تعداد مطالعات داخلی و خارجی هر محور نیز به‌صورت جداگانه استخراج و در قالب جداول ارائه شد. بدین ترتیب، فرایند استخراج داده‌ها صرفا به شمارش منابع محدود نبوده و اطلاعات محتوایی و روش‌شناختی مطالعات نیز برای انجام تحلیل تطبیقی و تلفیقی مورد استفاده قرار گرفت.

در مرحله بعد، یافته‌های مطالعات هر محور به‌صورت تلفیقی تحلیل شدند. در این مرحله، صرفا به گزارش نتایج تک‌تک مطالعات اکتفا نشد، بلکه یافته‌های مشابه و متفاوت، روندهای غالب، نقاط توافق و تفاوت و ارتباط میان متغیرهای اصلی شناسایی شد. سپس برای هر محور یک نتیجه تحلیلی مستقل استخراج گردید. در این سنتز کیفی، مطالعات بر اساس شباهت موضوعی و مفهومی، جهت و ماهیت یافته‌ها، رویکردهای مدیریتی و فناوری‌های مورد استفاده مقایسه شدند و از ترکیب صرف نتایج مطالعات بدون توجه به تفاوت در زمینه، روش و مقیاس مطالعه اجتناب شد.

در مرحله نهایی، نتایج پنج محور با یکدیگر تلفیق شدند تا زنجیره ارتباطی میان تغییر اقلیم، منابع آب، تولید و بهره‌وری کشاورزی، محیط‌زیست و راهکارهای سازگاری مشخص شود. بر اساس این چارچوب، تغییرات دما، بارش، خشکسالی و سایر مولفه‌های اقلیمی بر وضعیت منابع آب و نیاز آبی کشاورزی اثر گذاشته و این تغییرات از طریق اثرگذاری بر تولید و بهره‌وری آب، پیامدهایی برای پایداری منابع طبیعی و محیط‌زیست ایجاد می‌کنند. در ادامه، مدیریت پایدار آب و خاک، بهبود بهره‌وری آب، اصلاح نظام‌های تولید و آبیاری، راهکارهای سازگاری و استفاده هدفمند از فناوری‌های نوین به‌عنوان اجزای مکمل یک نظام سازگاری مورد تحلیل قرار گرفتند.

به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مدیریت پایدار آب آبیاری در محصولات باغی نیازمند تلفیق راهکارهای بهبود بهره‌وری آب، مدیریت مناسب منابع آب و سازگاری روش‌های آبیاری با محدودیت‌های اقلیمی و محیط‌زیستی است (Jabari et al., 2026). در این میان، به‌کارگیری شیوه‌های نوین آبیاری علاوه بر بهبود بهره‌وری مصرف آب، می‌تواند از طریق کاهش تلفات آب و بهبود شرایط مدیریت مزرعه، مزایای محیط‌زیستی نیز به همراه داشته باشد

(Pourmohammad & Hajirad, 2025). در سطح مزرعه نیز، بهبود بهره‌وری آبیاری تنها به سامانه انتقال و توزیع آب محدود نمی‌شود و مدیریت مزرعه و استفاده مناسب از ظرفیت‌های مکانیزاسیون می‌تواند در ارتقای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نقش داشته باشد (Nayebi et al., 2024)؛ بنابراین، روش مرور حاضر از توصیف جداگانه مطالعات فراتر رفته و با استفاده از طبقه‌بندی موضوعی، تفکیک داخلی و خارجی، تحلیل زمانی، مقایسه یافته‌ها و استخراج نتیجه مستقل برای هر محور، در نهایت به یک جمع‌بندی تلفیقی از وضعیت دانش موجود و خلأهای پژوهشی منجر شده است. به‌کارگیری چارچوب PRISMA 2020 در مراحل شناسایی، غربالگری، ارزیابی واجد شرایط بودن و انتخاب مطالعات نیز موجب شد فرایند مرور از نظر نحوه انتخاب منابع شفاف‌تر و قابل پیگیری باشد. با این حال، با توجه به ماهیت مروری ـ تحلیلی و میان‌رشته‌ای پژوهش، سنتز نهایی به‌صورت کیفی انجام شد و هدف، تجمیع آماری اثرات مطالعات یا انجام فراتحلیل نبود.

به‌منظور نشان دادن ساختار مطالعات مورد بررسی و جلوگیری از ارائه صرفا توصیفی منابع، مطالعات استفاده‌شده در این پژوهش بر اساس محور اصلی موضوعی آنها طبقه‌بندی شدند. همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین تمرکز مطالعات بر ارتباط تغییر اقلیم با بهره‌وری آب و راهکارهای سازگاری بوده است، در حالی که محور فناوری‌های نوین سهم بیشتری از مطالعات خارجی را به خود اختصاص داده است. این طبقه‌بندی مبنای تحلیل تفصیلی هر محور در ادامه مقاله قرار گرفته است. همچنین، نمودار جریان PRISMA در شکل ۱ مسیر کلی شناسایی، حذف موارد تکراری، غربالگری، ارزیابی متن کامل و انتخاب مطالعات نهایی را نشان می‌دهد و جداول ارائه‌شده در ادامه، جزئیات مطالعات منتخب و نحوه توزیع آنها در محورهای پنج‌گانه پژوهش را ارائه می‌کنند.

۳- نتایج و بحث

علیرغم اینکه تغییر اقلیم، موضوعی جهانی است اما علت پیشرو بودن بعضی کشورها در این امر را میتوان به گستردگی فعالیتهای کشاورزی، چالشهای موجود در مدیریت منابع اب همچنین زیرساختهای پژوهشی قوی اشاره کرد. این پژوهشها علاوه بر سازگار کردن کشورها با تغییرات اقلیمی می تواند راهنمای مناسبی برای کشورهای دیگر در زمینه حل مشکلات مدیریت آب، بهرهوری و چالشهای محیطزیستی ناشی از تغییرات اقلیم به حساب آیند. بر اساس تحلیلهای کتابسنجی، مطالعات انجام شده در زمینه تغییر اقلیم گسترده بوده و در این میان ۳ کشور ایالات متحده آمریکا، چین و هند جز سه کشور برتر در این حوزه شناخته شدهاند. استرالیا و برخی کشورهای اروپایی نیز به ترتیب در رتبه چهارم و پنجم قرار گرفته اند. افزون بر این، دانشگاههای China Agricultural University و Wageningen University نیز نقش عمدهای در این فعالیتها داشتهاند (Sahar et al, 2025).

جدول ۱ توزیع مطالعات بررسی‌شده بر اساس محورهای اصلی ارتباط تغییر اقلیم با کشاورزی، منابع آب و بهره‌وری آب

Table 1 Distribution of Reviewed Studies According to the Main Thematic Axes of Climate Change, Agriculture, Water Resources, and Water Productivity

Study Area	Domestic Studies	International Studies	Total
Impacts of Climate Change on Agriculture and Water Resources	3	5	8
Relationship Between Climate Change and Agricultural Water Productivity	5	10	15
Impacts of Climate Change on the Environment and Natural Resources	3	4	7
Adaptation Strategies and Approaches	7	8	15
Emerging Technologies, Models, and Tools	2	7	9
Total	**20**	**34**	**54**

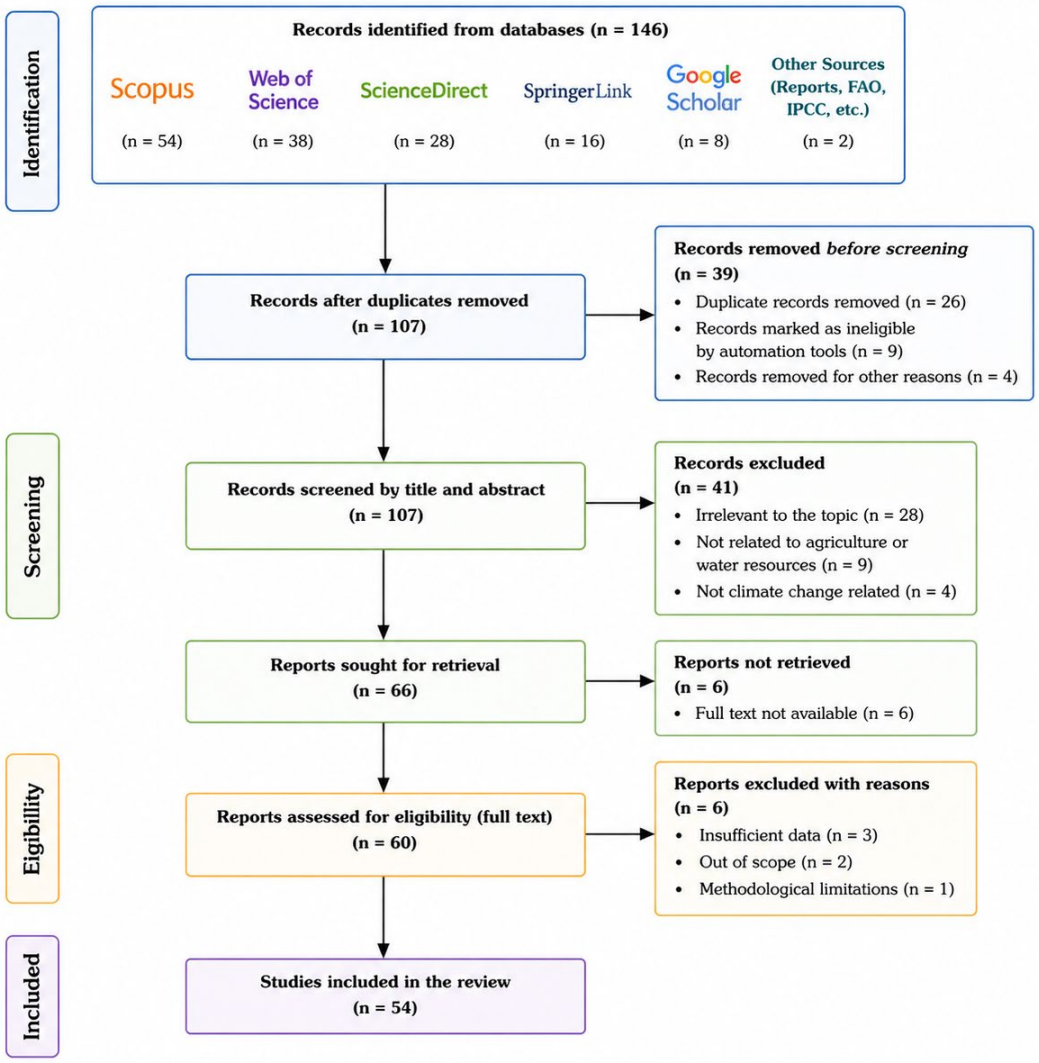


Fig. 1 PRISMA 2020 flow diagram illustrating the identification, screening, eligibility assessment, and selection of studies included in the systematic review

شکل ۱ نمودار جریان فرایند شناسایی، غربالگری، ارزیابی واجد شرایط بودن و انتخاب مطالعات بر اساس چارچوب

بر این اساس، جدول ۲ و شکل ۲ توزیع جغرافیایی پژوهش‌های مرتبط با تغییر اقلیم و نقش آن بر بهرهوری آب کشاورزی و محیط زیست را نشان میدهد.

برآیند مطالعات بررسی‌شده نشان می‌دهد که بهره‌وری آب یکی از مهم‌ترین حلقه‌های ارتباطی میان تغییر اقلیم، مدیریت منابع آب و تولید کشاورزی است. در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های یادگیری ماشین نیز به‌عنوان یکی از رویکردهای نوین برای بهبود بهره‌وری آب در شرایط تغییر اقلیم مورد توجه قرار گرفته است. این رویکردها با استفاده از داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و کشاورزی می‌توانند در پیش‌بینی نیاز آبی، بهینه‌سازی مصرف آب و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب نقش موثری داشته باشند (Hajirad et al., 2026).

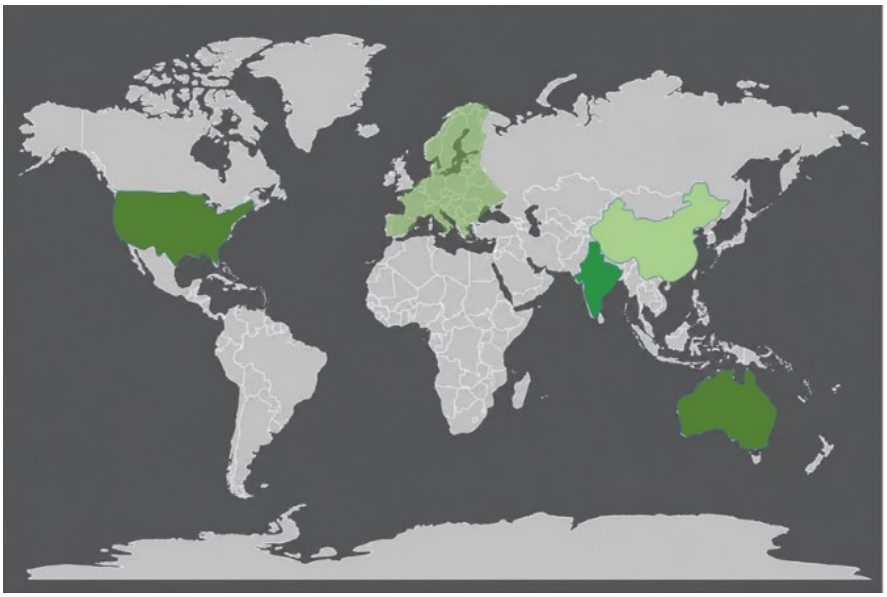


Fig. 2 Geographic Distribution of Leading Countries in Climate Change Research

شکل ۲ توزیع جغرافیایی کشورهای پیشرو در زمینه تغییر اقلیم

جدول ۲ کشورهای پیشرو در پژوهش‌های مرتبط با اثرات تغییر اقلیم بر بهره‌وری آب کشاورزی و مدیریت محیط‌زیست

Table 2 Leading Countries Conducting Research on the Effects of Climate Change on Agricultural Water Productivity and Environmental Management

Country	Research Focus	Research Characteristics	Examples of Study Areas	Main Reference
United States	Climate variability, water resources management, and agricultural ecosystem sustainability	Interdisciplinary studies and advanced modeling approaches	Watershed-scale analyses and evaluation of water management policies	Sahar et al. (2025)
China	Water productivity and the impacts of climate change on agriculture	Application of simulation models	SWAT and DSSAT models, along with climate change scenario analysis	Sahar et al. (2025)
India	Climate change and its impacts on crop production and irrigation water requirements	Emphasis on water scarcity and food security	Crop simulation modeling and water resources management	Sahar et al. (2025)
Australia	Drought risk assessment and environmental water allocation	Watershed hydrology studies and environmental flow management	Integrated watershed-scale studies	Sahar et al. (2025)
European Countries	Water governance and sustainable agriculture	Evaluation of environmental and water management policies	EU research programs focusing on climate change adaptation	Sahar et al. (2025)

در شرایط تغییر اقلیم، افزایش بهره‌وری آب صرفا از طریق کاهش حجم آب مصرفی حاصل نمی‌شود، بلکه باید همزمان افزایش تولید به ازای واحد آب، کاهش تلفات، بهبود مدیریت آبیاری، حفظ رطوبت خاک و انتخاب محصول و رقم متناسب با شرایط اقلیمی مورد توجه قرار گیرد. همچنین، بهره‌وری آب باید با درنظرگرفتن ظرفیت واقعی منابع آب و پیامدهای محیط‌زیستی ارزیابی شود؛ زیرا افزایش تولید در کوتاه‌مدت از طریق برداشت بیش از ظرفیت منابع آب، نمی‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار سازگاری تلقی شود.

۳-۱- اثرات تغییر اقلیم و شاخص های مهم و پیامد

های آن در کشاورزی

عوامل و متغیرهای اقلیمی متعددی می‌توانند به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بر میزان نیاز و مصرف آب در بخش کشاورزی اثرگذار باشند. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به افزایش دما، تغییر در الگوی زمانی و مکانی بارش، افزایش فراوانی و شدت خشکسالی، تغییرات تبخیر-تعرق و تغییر در شرایط هیدرولوژیکی اشاره کرد. این عوامل از طریق تغییر در رطوبت خاک، نیاز آبی گیاه، جریان‌های سطحی و تغذیه آبخوان‌ها، بر دسترسی به منابع آب و در نهایت بر بهره‌وری آب کشاورزی تاثیر می‌گذارند. این تاثیرگذاری در نهایت میتواند پیامدهای متفاوتی در بخش کشاورزی داشته باشد. این پیامدها لزوما برای زمین و محیط کشاورزی نیست بلکه میتواند در ابعاد دیگری مثل چرخهی زیستی گیاه، محیطهای اطراف و خود کشاورزی ایفای نقش کند (اروندی، ۱۴۰۴). از این رو در ابتدا بررسی شاخصهای تغییر اقلیم و نقش آنها در بهرهوری آب ضروری میباشد. بر اساس سنتزهای انجام شده از تحقیقات پژوهشگران مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که تغییر اقلیم از مسیرهای گوناگونی کمبود آب، مخصوصا در بخش کشاورزی و در ادامه محیطزیست را تهدید میکند و علت کمبود آب صرفا به کاهش بارشها منتهی نمیشود (Lester et al, 2026). از این منظر، تاب‌آوری منابع آب در برابر تغییر اقلیم نیازمند توجه همزمان به تغییرپذیری اقلیمی، فشارهای وارد بر منابع آب و ظرفیت مدیریتی و سازگاری نظام‌های آب است (Hajirad & Pourmohammad, 2025).

جدول ۳ مثالهایی از پیامدهای تغییرات اقلیم را نشان می‌دهد. این جدول، جمعبندی کلی از سازوکارهای اثرگذاری اقلیمی بر کشاورزی را ارائه میدهد که نشاندهنده ماهیت چندبعدی بودن تغییر اقلیم میباشد. این شرایط در مجموع منجر به افزایش تنش آبی، تشدید آسیبپذیری کشاورزی، نیاز به توسعه سیستمهای آبیاری خواهد شد.

جدول ۳ پیامدهای تغییر اقلیم و اثر آن بر بخش کشاورزی

Table 3 Impacts of Climate Change and Their Effects on the Agricultural Sector

Climatic Factor	Impact on Water Systems	Impact on Agriculture	Adaptation/Mitigation Strategy	Reference(s)
Rising temperature	Increased soil evaporation and plant transpiration; reduced river baseflow	Increased irrigation water demand; reduced water-use efficiency; intensified heat stress	Adoption of drought- and heat-tolerant crop varieties; adjustment of planting dates	Ramirez-Villegas & Challinor (2012); Makuvaro et al. (2018)
Changes in precipitation patterns	Altered temporal distribution of water supply; more frequent water shortages, droughts, and floods	Disruption of irrigation schedules; reduced crop yield; difficulty in meeting crop water requirements	Modern irrigation; water harvesting and storage; adaptive farm management	Makuvaro et al. (2018); Lester et al. (2026)
Increased reliance on groundwater resources	Declining groundwater sustainability; falling groundwater table; land subsidence; groundwater salinization	Higher production costs; deterioration of water quality; soil degradation	Artificial groundwater recharge; groundwater abstraction control; monitoring of water consumption	Lester et al. (2026)
Changes in snowmelt hydrology	Altered timing of water availability; reduced seasonal water resources	Water shortages during the warm season; disruption of traditional water distribution systems	Water storage; integrated water resources management	Lester et al. (2026)
Conflicting management objectives	Reduced environmental flow allocations; wetland degradation	Degradation of ecosystems surrounding agricultural lands	Integrated management and institutional coordination	Rockström et al. (2017); Lester et al. (2026)
Impacts on ecosystems	Increased stress on vegetation; changes in ecological water requirements	Loss of biodiversity and increased risk of species decline	Ecosystem restoration and conservation	Rockström et al. (2017); Garg et al. (2024)

جمع‌بندی مطالعات این محور نشان می‌دهد که پیامدهای تغییر اقلیم و برداشت ناپایدار از منابع آب می‌تواند فراتر از بخش کشاورزی، پایداری منابع طبیعی و عملکرد اکوسیستم‌ها را نیز تحت تاثیر قرار دهد. افت آبخوان‌ها، افزایش شوری آب و خاک، کاهش جریان‌های زیست‌محیطی، تخریب زیست‌بوم‌ها و کاهش تنوع زیستی از مهم‌ترین پیامدهای شناسایی‌شده هستند. بر این اساس، افزایش بهره‌وری آب زمانی می‌تواند به‌عنوان راهکار سازگاری پایدار تلقی شود که همزمان با حفاظت از منابع آب، کیفیت خاک و آب، جریان‌های زیست‌محیطی و ظرفیت اکولوژیک منطقه همراه باشد.

مرور مطالعات نشان می‌دهد که تغییر اقلیم از طریق افزایش دما، تغییر الگوی بارش، تشدید خشکسالی و تغییر مولفه‌های هیدرولوژیکی، همزمان بر عرضه و تقاضای آب اثر می‌گذارد. افزایش تبخیر و تعرق و نیاز آبی محصولات در شرایطی رخ می‌دهد که قابلیت اطمینان منابع آب سطحی و زیرزمینی کاهش می‌یابد. بنابراین، اثر تغییر اقلیم بر کشاورزی صرفا به کاهش عملکرد محصول محدود نیست، بلکه از طریق تغییر در وضعیت منابع آب، نیاز آبی و امنیت آبی، آسیب‌پذیری کل نظام کشاورزی را افزایش می‌دهد. این نتیجه با چارچوب ارائه‌شده در جدول ۴ مقاله نیز سازگار است که افزایش دما، تغییر بارش، وابستگی بیشتر به آب زیرزمینی و تغییرات هیدرولوژیکی را از مهم‌ترین مسیرهای اثرگذاری تغییر اقلیم معرفی می‌کند. در مجموع، یافته‌های مطالعات بررسی‌شده در این محور نشان می‌دهد که تغییر اقلیم از طریق افزایش دما، تغییر الگوی بارش، تشدید خشکسالی و تغییر در مولفه‌های هیدرولوژیکی، به‌طور همزمان عرضه و تقاضای آب در بخش کشاورزی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. افزایش نیاز آبی محصولات در کنار کاهش قابلیت اطمینان منابع آب سطحی و زیرزمینی، موجب افزایش آسیب‌پذیری تولید کشاورزی و تشدید تنش آبی می‌شود. بنابراین، ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر کشاورزی نباید صرفا بر تغییر عملکرد محصولات متمرکز باشد، بلکه لازم است پیوند میان متغیرهای اقلیمی، منابع آب، نیاز آبی و پایداری تولید به‌صورت یکپارچه مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۴ مطالعات مرتبط با آثار تغییر اقلیم بر کشاورزی و منابع آب بر اساس سال انتشار

Table 4 Studies on the Impacts of Climate Change on Agriculture and Water Resources by Publication Year

Study Year	Author(s)	Domestic/International	Topic/Approach	Main Finding Relevant to the Article
2006	Kanae & Oki	International	Hydrological Cycle and Water Resources	Climate and hydrological changes affect the status of water resources and the water cycle.
2012	Ramirez-Villegas & Challinor	International	Climate Data for Agriculture	Appropriate climate data are important for assessing the impacts of climate on agriculture.
2018	Makuvaro et al.	International	Impacts of Climate Change on Agricultural Productivity and Adaptation	Climate variability affects agricultural productivity and increases the need for adaptation.
2021	Solimani et al.	Domestic	Agricultural Adaptation to Climate Change	Adopting adaptation strategies is essential to reduce agricultural vulnerability.
2025	Dehghani Sanij & Bashi Azghadi	Domestic	Perspectives and Impacts of Climate Change	Climate change has diverse and region-specific dimensions and consequences.
2026	Alavi Nia & Babakhani	Domestic	Impacts of Climate Change on Different Systems	The consequences of climate change are multidimensional in nature.
2026	Lester et al.	International	Synergies Between Agricultural Water Access and the Environment	Climate change can simultaneously affect agricultural water availability and environmental flows.

۳-۲- راهکارهای ارائه شده برای سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش تنشها

هرچند راهبردهای متعددی وجود دارند که بتوان برای سازگاری با تغییر اقلیم از آنها بهرهمند شد، ولی به دلیل پررنگ بودن نقش افزایش دما، درنتیجه خشکی و شوری زمینها، استفاده از ارقام گوناگون محصولات که سازگاری و تحمل بالایی در مقابل این چنین تغییراتی از خود نشان دادهاند، بیش از پیش سودمند خواهد بود (Tohamy and Mustafa, 2026). بر اساس مطالعات (Malekmohammadi, 2025)، (Parnian et al, 2025)

یکی از رویکردهای نوین که برای مقابله با کمبود آب، کاهش تاثیر خشکی و شوری زمینهای کشاورزی توصیه شده است، توسعه سامانه هالوکالچرها هستند. این رویکرد تمرکز بر بهره‌گیری از آب‌های شور دارد و از گیاهانی که تحمل بالایی به شوری دارند (هالوفیت‌ها)، استفاده میکند. در واقع ساز و کار این روش بدین صورت است که بر خلاف روشهای سنتی که تبدیل آبهای شور به آب شیرین صورت میگرفت و هزینههای هنگفتی به دنبال داشت، در صدد سازگاری با آبهای شور و استفاده بهینه از ابن منابع آبی میباشند. سامانه هالوکالچرها این امکان را میدهد که بتوان از منابع آب غیرمتعارف نیز بهرهمند شد و اتلاف آب به حداقل کاهش یابد. این روش علاوه بر بهرهوری آب، راهکاری موثر برای توسعه کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز میباشد. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که با تلفیق مدیریت آب شور، انتخاب ارقام مقاوم، و استفاده از فناوری‌های نوین می‌تواند بهره‌وری تولید در محیط‌های شور را به‌طور قابلتوجهی افزایش دهد. همینطور به دلیل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در طی اجرای این روش، اعم از نمک‌زدایی و مدیریت سامانه‌های هالوکالچر هزینه‌های عملیاتی نیز کاهش یافته در عین حال پایداری این سیستم‌ها افزایش مییابد. این سامانه نه تنها با اثرات تغییر اقلیم مقابله میکند، بلکه بخش کشاورزی را به پایداری رسانده و در مدیریت محیطزیست نیز مفید واقع می شود. شایان ذکر است که ارقام انتخابی بر اساس منطقه، نیازهای اکولوژیکی و شرایط زمین متفاوت می باشد، با بررسی یافتههای پژوهش شریفی و همکاران (۲۰۲۵) از جمله گیاهان هالوفیتی که میتوان در این روش به کار برد Haloxylon persicum، Tamarix ramosissima و Halocnemum strobilaceum هستند.

۳-۳- رویکردهای سازگاری با تغییر اقلیم

در این پژوهش، رویکردهای سازگاری به چارچوب کلی و نحوه مواجهه با تغییر اقلیم اشاره دارد و بر چگونگی سازمان‌دهی اقدامات سازگاری در سطوح مختلف، از جمله سازگاری خودجوش توسط کشاورزان و جوامع محلی و سازگاری برنامه‌ریزی‌شده از طریق سیاست‌ها، نهادها و سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی، تمرکز می‌کند. در مقابل، راهکارهای سازگاری به اقدامات و فناوری‌های مشخص و عملیاتی اطلاق می‌شود که با هدف کاهش آسیب‌پذیری، کاهش تنش‌های اقلیمی و افزایش بهره‌وری آب و پایداری محیط‌زیست پیشنهاد شده‌اند. بنابراین، در حالی که بخش قبل به راهکارهای مشخص و عملیاتی سازگاری می‌پردازد، این بخش بر چارچوب و نوع رویکردهای سازگاری تمرکز دارد. از آنجایی که تغییر اقلیم از موارد اجتناب ناپذیر می باشد، راهکار قطعی برای از بین بردن کامل این موضوع وجود ندارد. به همین دلیل راهکار های پیشنهاد شده از سوی پژوهشگران، بیشتر بر محوریت سازگاری و به حداقل رساندن اثرات و پیامد ها تمرکز دارد.

هر چند راهکار های ارائه شده اگر توام با مدیریت و هماهنگی صورت نگرفته باشد، میتواند اثرات نا مطلوب را تشدید کند. با این وجود می توان رویکرد های توصیه شده را مد نظر قرار داد و از انها به بهترین نحو استفاده کرد. از دید جهانی رویکرد های جهانی در سازگاری با تغییر اقلیم شامل دو رویکرد تسکین و سازگاری میباشد. هدف از رویکرد تسکین در اصل کاهش گاز های گلخانه بوده و هدف از رویکرد سازگاری کاهش اثرات غیر قابل اجتناب میباشد.

در این میان تعریفهای متعددی برای سازگاری ارائه شده که از بین تمامی توصیفها، توصیف IPCC این گونه بیان میکند: تنظیم سیستم های طبیعی و یا انسانی در پاسخ به محرکهای فعلی و یا مورد انتظار اقلیمی و یا اثرات آنها به طوری که اسیب وارده کمتر شده و یا از فرصت های

سودمند آن بهره مند شد. در ادامه جدول ۵ راهبردهای FAO برای سازگاری با تغییر اقلیم را که مبتنی بر امنیت غذایی است نشان میدهد (حیدری، ۱۳۹۸). نتایج مطالعات این محور نشان می‌دهد که سازگاری با تغییر اقلیم یک فرایند چندسطحی و چندبعدی است و به یک راهکار منفرد محدود نمی‌شود. مطالعات اخیر نیز بر ضرورت تلفیق مدیریت و حکمرانی منابع آب، فناوری‌های نوین و رویکردهای مبتنی بر اکوسیستم برای افزایش تاب‌آوری سامانه‌های آبیاری در برابر تغییر اقلیم تاکید کرده‌اند (Hajirad et al., 2026).

در سطح مزرعه، اصلاح الگوی کشت و تقویم زراعی، استفاده از ارقام مقاوم، بهبود مدیریت آب و خاک و توسعه سامانه‌های نوین آبیاری اهمیت دارد؛ در سطح منطقه‌ای، مدیریت حوزه‌های آبخیز، حفاظت از منابع و استفاده از منابع آب غیرمتعارف مورد توجه قرار می‌گیرد؛ و در سطح نهادی، اصلاح حکمرانی آب، حمایت اقتصادی، توسعه زیرساخت و تقویت نهادهای محلی ضروری است. این ضرورت در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در نظام‌های باغبانی، اهمیت بیشتری دارد و مدیریت پایدار آب آبیاری مستلزم ترکیب راهکارهای مدیریتی، فنی و سازگار با شرایط اقلیمی منطقه است (Jabari et al., 2026). در این راستا، تلفیق منابع آب غیرمتعارف با فناوری‌های نوین آبیاری و مدیریت یکپارچه منابع آب می‌تواند به‌عنوان رویکردی مکمل برای افزایش پایداری و سازگاری نظام‌های کشاورزی مورد توجه قرار گیرد (Jabari et al., 2025). همچنین، نتایج نشان می‌دهد که سازگاری خودجوش و برنامه‌ریزی‌شده مکمل یکدیگرند و تلفیق دانش و تجربه محلی با برنامه‌ریزی و حمایت نهادی می‌تواند اثربخشی اقدامات سازگاری را افزایش دهد.

مطالعات این محور نشان می‌دهند (جدول ۶) که بهره‌وری آب حلقه اتصال میان تغییر اقلیم، مدیریت منابع آب و پایداری تولید کشاورزی است. از یک سو، افزایش دما، افزایش تبخیر و تعرق، تشدید خشکسالی و کاهش قابلیت دسترسی به آب می‌تواند مقدار آب مورد نیاز برای تولید را افزایش داده و بهره‌وری آب را کاهش دهد؛ از سوی دیگر، بهبود مدیریت تخصیص و توزیع آب، کاهش تلفات، استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری، مدیریت رطوبت خاک و انتخاب محصول و رقم متناسب با شرایط اقلیمی می‌تواند بخشی از این فشار را جبران کند. بنابراین، افزایش بهره‌وری آب صرفا به معنای کاهش حجم آب مصرفی نیست، بلکه باید همزمان عملکرد محصول، پایداری منابع آب و پیامدهای محیط‌زیستی نیز در نظر گرفته شود.

لیل پیامدهای وسیع تغییر اقلیم بر منابع آب، تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی، اتحادیه اروپا نیز طی سال‌های اخیر، راهبردها و اقداماتی جهت سازگاری با تغییر اقلیم برای کاهش آسیب‌پذیری ارائه کرده بود. پژوهشها نشان می‌دهد که افزایش دما و کاهش بارندگی در بسیاری از مناطق اروپا، مخصوصا مناطق جنوبی و حوزه مدیترانه، می‌تواند موجب تشدید خشکسالی، افزایش تقاضای آب در بخش کشاورزی، کاهش کیفیت منابع آب و افت تنوع زیستی شود. بر همین اساس در جدول ۷ راهبردها و رویکردهای سازگاری با تغییر اقلیم در کشاورزی در اتحادیه اروپا جمعآوری شدهاند.

در بحث سازگاری با تغییر اقلیم، دو نوع رویکرد شامل سازگاری خودجوش و سازگاری برنامه‌ریزی‌شده مطرح است. سازگاری خودجوش به رویکردی اشاره دارد که توسط کشاورزان و جوامع محلی و بر اساس تجربه و درک آن‌ها از تغییرات اقلیمی صورت میگیرد و معمولا بدون دخالت مستقیم دولت یا برنامه‌های رسمی است. از مهم‌ترین اقدامات در سازگاری می‌توان به اصلاح و انتخاب ارقام گیاهی مقاوم به خشکی و گرما، بهبود فناوری‌های آبیاری و تنظیم زمان و مقدار آبیاری، استفاده از روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، حفظ رطوبت خاک از طریق بقایای گیاهی، بهبود مدیریت زهکشی، تغییر الگوی کشت متناسب با شرایط اقلیمی اشاره کرد. همین طور برخی مناطق خاطر نشان کرده اند که کشاورزان برای مقابله با کم‌آبی و شوری منابع آب، به سمت کشت ارقام کم‌مصرف و با ارزش اقتصادی بالاتر، توسعه باغات دیم یا نیمه‌دیم و همچنین استفاده از فناوری‌هایی مانند شیرین‌سازی آب و افزایش کاربرد مواد آلی در خاک حرکت کرده‌اند. سازگاری برنامه‌ریزی‌شده شامل اقداماتی می باشد که در قالب سیاست‌ها، برنامه‌ها و نهادهای رسمی طراحی و اجرا می‌شود.

جدول ۵ راهبردهای FAO برای سازگاری با تغییر اقلیم

Table 5 FAO Strategies for Climate Change Adaptation

Strategy	Sub-strategy	Adaptation Method	Expected Outcome	Reference(s)
Protecting Livelihoods and Food Security	Integrated and ecosystem-based risk management	Reducing vulnerability to extreme climate events	Enhanced resilience of local communities	Heydari (2020); Garg et al. (2024)
	Development and dissemination of climate-resilient crop varieties	Increasing tolerance to drought, heat, and precipitation variability	Sustainable agricultural production	Heydari (2020); Makuvaro et al. (2018)
	Promotion of multipurpose tree species (food, fodder, and bioenergy)	Diversifying production systems and reducing dependence on annual cropping	Improved food security and household income	Heydari (2020); Rockström et al. (2017)
Preventing Disruptions to Food Supply	Integrated agricultural water management	Improving water productivity and reducing water losses	Sustainable food supply	Heydari (2020); Molden et al. (2007); Blum (2009)
	Optimized irrigation management (particularly in paddy fields)	Reducing water consumption in water-intensive crops	Reduced pressure on water resources	Heydari (2020); Jägermeyr et al. (2015)
	Improved agricultural land management	Maintaining soil fertility and reducing land degradation	Sustained agricultural production	Heydari (2020); Rockström et al. (2017)
	Adoption of energy-efficient technologies	Reducing dependence on fossil fuels	Reduced greenhouse gas emissions	Heydari (2020); Arvandi (2025)
Protecting Ecosystems and Ecosystem Services	Restoration of degraded lands	Restoring the productive and ecological functions of land	Increased carbon sequestration capacity	Heydari (2020); Rockström et al. (2017)
	Planting carbon-sequestering tree species	Enhancing carbon sequestration in soil and biomass	Contributing to climate change mitigation	Heydari (2020); Rockström et al. (2017)
	Watershed management	Increasing water storage and improving the sustainability of water resources	Enhanced water security	Heydari (2020); Molden et al. (2007)
	Prevention of land degradation and biodiversity conservation	Enhancing ecosystem resilience	Strengthened ecological resilience	Heydari (2020); Garg et al. (2024)
Enhancing Agricultural Productivity	Increasing productivity per unit area	Optimizing land use efficiency	Increased food production	Heydari (2020); Rockström et al. (2017)
	Improving water productivity	Producing more output per unit of water consumed	Adaptation to water scarcity	Heydari (2020); Molden et al. (2007); Blum (2009)
	Conservation agriculture and crop residue management	Conserving soil moisture and reducing soil erosion	Long-term sustainability of agricultural production	Heydari (2020); Rockström et al. (2017)
	Plant breeding and biotechnology	Enhancing crop tolerance to climate-related stresses	Long-term structural adaptation	Heydari (2020); Makuvaro et al. (2018)

جدول ۶ مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم و بهره‌وری آب کشاورزی بر اساس سال انتشار

Table 6 Studies on Climate Change and Agricultural Water Productivity by Publication Year

Study Year	Author(s)	Domestic/International	Topic/Approach	Main Finding
2003	Molden et al.	International	Water Productivity Framework	Water productivity provides a framework for linking production and water management.
2007	Molden	International	Water Management for Food and Agriculture	Improving water productivity is a key component of sustainable agricultural water management.
2008	Ali & Talukder	International	Improving Water Productivity in Crop Production	Water-use practices, irrigation, crops, and plant varieties are among the factors affecting water productivity.
2009	Blum	International	Water Productivity and Water-Use Efficiency	Effective water use should be considered beyond the narrow concept of water-use efficiency.
2014	Heydari	Domestic	Assessment of Agricultural Water Productivity in Iran	Water productivity, along with water-management policies and programs, is of fundamental importance in Iran.
2015	Jägermeyr et al.	International	Global Modeling of Irrigation Systems	Improving and modernizing irrigation systems can reduce water consumption and increase water productivity.
2017	Morsali	Domestic	Processes for Improving Water Productivity in Iran	Improving water allocation, transmission, and distribution management and reducing water losses can enhance water productivity.
2021	Yu et al.	International	Water Productivity and Global Water Scarcity	Increasing water productivity is proposed as one of the pathways to address water scarcity.
2023	Heydari	Domestic	Challenges in Water Productivity Indicators	The definition and application of water productivity indicators face conceptual and practical challenges.
2024	Pourgholam-Amiji et al.	Domestic	Improving Wheat Irrigation Productivity: Irrigation System and Water Management	Improving irrigation-system performance and water management can contribute to enhanced irrigation productivity in wheat production.
2024	Nayebi et al.	Domestic	Improving Wheat Irrigation Productivity: Mechanization and Farm Management	Farm management and mechanization can contribute to improving irrigation productivity through better management of agricultural operations and water use.
2025	Oyeagu & Lewu	International	Review of Agricultural Water Productivity	Improving water productivity is important for water and food security.
2025	Hajirad Domestic	Smart Irrigation Management Methods and Tools	Smart irrigation methods and tools can support improved irrigation scheduling, more efficient water use, and reduction of unnecessary irrigation consumption.	
2026	Tohamy & Mostafa	International	Climate Change, Crop Production, and WUE	Climate change can affect crop production and the water-use efficiency (WUE) of crops.
2026	Hajirad et al.	Domestic	Optimizing Water Productivity under Climate Change Using Machine Learning	Machine learning approaches can support the analysis of climate and agricultural data and improve decision-making for optimizing water productivity under changing climatic conditions.

جدول ۷ راهبرد ها و رویکرد های سازگاری با تغییر اقلیم در کشاورزی در اتحادیه اروپا

Table 7 Climate Change Adaptation Strategi

Strategy	Measures	Adaptation Mechanism	Implementation Level	Reference(s)
Institutional and Policy Frameworks	Development of climate adaptation programs (e.g., the European Climate Adaptation Plan)	Establishing policy frameworks to manage climate change impacts across multiple sectors	Policy	Heydari (2020); Sahar et al. (2025)
Agricultural Water Resources Management	Irrigation management, including deficit irrigation and the conjunctive use of surface water and groundwater	Improving water use efficiency and reducing pressure on water resources	Farm / Resource Management	Jägermeyr et al. (2015); Molden et al. (2007); Yu et al. (2021)
Economic and Management Instruments	Establishment of water markets and crop insurance schemes	Reducing economic risks associated with drought and climate variability	Policy / Economic	Heydari (2020); Sahar et al. (2025)
Innovation and Technology	Application of biotechnology	Developing climate-resilient crop varieties and production systems	Research / Technological	Arvandi (2025); Garg et al. (2024)
Natural Resources Management	Watershed management and the expansion of water harvesting infrastructure	Increasing water storage capacity and enhancing the sustainability of water resources in arid regions	Regional / Infrastructure	Molden et al. (2007); Heydari (2020)
Social and Institutional Adaptation	Strengthening institutional capacity and promoting social innovation for climate change response	Enhancing the adaptive capacity of local communities and institutions	Social / Institutional	Heydari (2020); Sahar et al. (2025)

هدف اصلی این نوع سازگاری معمولا ایجاد هماهنگی میان بخش‌های مختلف و افزایش منافع بلندمدت حاصل از مدیریت منابع طبیعی انجام می‌شود. از مهم‌ترین اقدامات در این حوزه می‌توان به بهبود حکمرانی آب، ادغام ملاحظات تغییر اقلیم در برنامه‌های توسعه، افزایش سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های آبیاری و فناوری‌های افزایش بهره‌وری آب، توسعه سامانه‌های ذخیره و انتقال آب، اصلاح مقررات مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد بازارهای کارآمد برای محصولات کشاورزی و نهاده‌ها اشاره کرد. با پیشرفت روزافزون تکنولوژی و توسعه نرم افزار های قدرتمند، استفاده از چنین نرم افزار هایی به تسریع روند ساز و کار ها کمک خواهد. این نرم افزار ها با تسریع تحلیل اطلاعات جغرافیایی، دادههای اقلیمی و مدلهای اقلیمی به بررسیها سرعت بخشیده و راهکارهای ارائه شده برای مقابله را بهتر ارزیابی و تحلیل میکند (اروندی، ۱۴۰۴). به منظور جمعآوری نرم افزارهای کاربردی در این زمینه جدول ۸، نتایج را نشان میدهد.

مرور مطالعات نشان می‌دهد (جدول ۹) که فناوری‌های نوین زمانی بیشترین نقش را در سازگاری با تغییر اقلیم ایفا می‌کنند که از سطح معرفی ابزار فراتر رفته و در فرآیند تصمیم‌گیری و مدیریت منابع به کار گرفته شوند. مدل‌های اقلیمی و ابزارهای پردازش داده امکان تحلیل تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کنند، سامانه‌های تصمیم‌یار می‌توانند اطلاعات اقلیمی، منابع آب و مدیریت مزرعه را برای تصمیم‌گیری تلفیق کنند و فناوری‌های نوین آبیاری می‌توانند از طریق کاهش تلفات و بهبود کنترل رطوبت خاک به افزایش بهره‌وری آب کمک کنند. بنابراین، توسعه فناوری به‌تنهایی کافی نیست و اثربخشی آن به دسترسی به داده‌های معتبر، ظرفیت مدیریتی، زیرساخت مناسب و توان استفاده کاربران وابسته است (Hajirad, 2025). برآیند مطالعات این محور نشان می‌دهد که مدل‌های اقلیمی، سامانه‌های تصمیم‌یار، پایگاه‌های داده اقلیمی، ابزارهای پردازش داده و فناوری‌های نوین می‌توانند ظرفیت قابل توجهی برای تحلیل ریسک، پیش‌بینی شرایط آینده،

جدول ۸ نرم‌افزار های مورد استفاده در مقابله با بحران تغییر اقلیم

Table 8 Software Applications Used in Climate Change Crisis Management

Tool / Model	Developer / Organization	Year	Tool / Model Type	Application Domain	Application Level	Primary Function / Key Finding	Reference	Software / Access URL
CMOR (Climate Model Output Rewriter)	Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI), Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)	2008–present; CMOR3 current	Climate-model output standardization library	Climate models and climate-data standardization	Research / Modeling	Converts climate-model and observational outputs into standardized, CF-compliant NetCDF files, facilitating consistent comparison and analysis across climate-model experiments.	Doutriaux et al. (2026); PCMDI	https://cmor.llnl.gov/n
CDO (Climate Data Operators)	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) and contributors	2002–present	Climate-data processing and analysis software	Climate and numerical weather prediction data	Research / Analytical	Provides a large collection of command-line operators for statistical analysis, arithmetic operations, spatial interpolation, selection, and processing of GRIB and NetCDF climate datasets.	Schulzweida (2026)	https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/embedded/index.html
Climate Data Store (CDS)	Copernicus Climate Change Service (C3S), implemented by ECMWF	2018–present	Climate-data repository and analysis platform	Climate data, agriculture, water management, and climate-impact assessment	Research / Policy / Applied	Provides access to quality-assured observations, reanalyses, seasonal forecasts, climate projections, and analytical tools that support evidence-based climate-impact and adaptation assessments.	Copernicus Climate Change Service (C3S)	https://cds.climate.copernicus.eu/
CCSM (Community Climate System Model)	National Center for Atmospheric Research (NCAR) and CCSM community	1996–2010; CCSM4	Coupled climate-system model	Global climate-system simulation	Research / Forecasting	Simulates interactions among the atmosphere, ocean, land surface, and sea ice to investigate past, present, and future climate states. CCSM4 has subsequently been superseded by CESM.	NCAR (2010)	https://www.cesm.ucar.edu/models/ccsml
LandCaRe-DSS	Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF) and collaborating researchers	2013	Spatial decision-support system	Agriculture, land use, water resources, and climate adaptation	Regional / Farm / Applied	Integrates climate scenarios, ecological models, agricultural information, and economic analysis to assess climate-change impacts and compare land-use and adaptation strategies.	Wenkel et al. (2013)	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479713001497
Climate Mapping for Resilience and Adaptation	U.S. Federal Government / NOAA and partner agencies	2022–present	Climate-risk mapping and assessment tool	Climate hazards, infrastructure, communities, and adaptation	National / Regional / Local	Maps current and projected exposure to major climate hazards, including extreme heat, drought, wildfire, flooding, and coastal inundation, supporting	U.S. Climate Resilience Toolkit / NOAA	https://coast.noaa.gov/digitalcoast/tools/cmra.html

Tool / Model	Developer / Organization	Year	Tool / Model Type	Application Domain	Application Level	Primary Function / Key Finding	Reference	Software / Access URL
(CMRA)				planning		climate-resilient planning.		
DSS (Decision Support Systems) for Agriculture and Water Management	Various research institutions; application-specific	2014–present	Decision-support framework / software systems	Agriculture, irrigation, water resources, and environmental management	Farm / District / Regional	Supports irrigation scheduling, water allocation, agricultural management, and adaptation decisions by integrating environmental, crop, climatic, and management information.	Zhai et al. (2020); Pereira et al. (2014)	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169918319069

مدیریت منابع آب و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در بخش کشاورزی ایجاد کنند. با این حال، اثربخشی این فناوری‌ها صرفا به توسعه ابزار وابسته نیست و دسترسی به داده‌های معتبر و محلی، زیرساخت مناسب، ظرفیت مدیریتی و قابلیت استفاده توسط کاربران نیز ضروری است. بنابراین، اولویت پژوهشی باید از معرفی صرف فناوری‌ها به سمت توسعه و ارزیابی ابزارهای بومی، کاربردی و قابل اتصال به نظام تصمیم‌گیری و مدیریت منابع آب حرکت کند.

۴- نتیجه‌گیری

مرور و تحلیل مطالعات داخلی و خارجی نشان داد که ارتباط تغییر اقلیم با کشاورزی، منابع آب و بهره‌وری آب، ماهیتی چندبعدی و به‌هم‌پیوسته دارد و نمی‌توان آثار تغییر اقلیم و راهکارهای سازگاری را صرفا از یک منظر مورد بررسی قرار داد.

نتایج حاصل از طبقه‌بندی مطالعات در پنج محور اصلی شامل آثار تغییر اقلیم بر کشاورزی و منابع آب، ارتباط تغییر اقلیم با بهره‌وری آب کشاورزی، پیامدهای تغییر اقلیم بر محیط‌زیست و منابع طبیعی، راهکارها و رویکردهای سازگاری و نقش فناوری‌ها و ابزارهای نوین نشان داد که تغییرات دما، بارش و تشدید خشکسالی ابتدا بر وضعیت منابع آب و نیاز آبی محصولات اثر گذاشته و سپس از طریق تغییر در میزان و قابلیت دسترسی آب، عملکرد و بهره‌وری نظام‌های کشاورزی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در ادامه، افزایش فشار بر منابع آب می‌تواند پیامدهایی همچون افت منابع آب زیرزمینی، افزایش شوری، کاهش جریان‌های زیست‌محیطی و تخریب منابع طبیعی را به همراه داشته باشد. از این رو، مدیریت آب کشاورزی، بهره‌وری آب و حفاظت از محیط‌زیست باید به‌عنوان اجزای مرتبط یک نظام واحد سازگاری مورد توجه قرار گیرند.

در محور نخست، مطالعات بررسی‌شده نشان دادند که تغییر اقلیم از طریق افزایش دما، تغییر الگوی زمانی و مکانی بارش، افزایش تبخیر و تعرق و تشدید خشکسالی، فشار مضاعفی بر منابع آب و نظام‌های تولید کشاورزی وارد می‌کند. بنابراین، پیامد تغییر اقلیم تنها به کاهش عملکرد محصولات محدود نبوده و می‌تواند همزمان عرضه آب، نیاز آبی محصولات، امنیت تولید و پایداری نظام‌های کشاورزی را تحت تاثیر قرار دهد. بر اساس این یافته، ارزیابی آثار تغییر اقلیم باید به‌صورت تلفیقی و در پیوند میان متغیرهای اقلیمی، منابع آب و تولید کشاورزی انجام شود. در محور دوم، نتایج مطالعات نشان داد که بهره‌وری آب یکی از مهم‌ترین حلقه‌های ارتباطی میان تغییر اقلیم، مدیریت منابع آب و تولید کشاورزی است. افزایش بهره‌وری آب تنها از طریق کاهش حجم آب مصرفی حاصل نمی‌شود، بلکه باید همزمان افزایش تولید به ازای واحد آب، کاهش تلفات، بهبود مدیریت آبیاری، حفظ رطوبت خاک و انتخاب مناسب محصول و رقم را دربرگیرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش بهره‌وری آب در شرایط تغییر اقلیم باید با توجه

جدول ۹ مطالعات و ابزارهای نوین مورد استفاده در تحلیل و سازگاری با تغییر اقلیم

Table 9 Studies and Emerging Tools for Climate Change Assessment and Adaptation

Year	Study/Tool	Domestic/International	Type	Main Application
2013	Wenkel et al. – LandCaRe DSS	International	Decision Support System (DSS)	Assessing the impacts of climate change and analyzing adaptation strategies for agricultural land use.
2015	Jägermeyr et al.	International	Global Modeling	Assessing the potential for water savings through improvements in irrigation systems.
2020	Zhai et al.	International	DSS / Agriculture 4.0	Supporting decision-making in agricultural and water resources management.
2025	Arvandi	Domestic	Emerging Technologies	Using artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and smart technologies to address the impacts of climate change.
2025	Hajirad	Domestic	Smart Irrigation Technology	Applying smart irrigation management methods and tools to improve irrigation scheduling and optimize agricultural water consumption.
2025	Hajirad	Domestic	Artificial Intelligence (AI)	Applying AI-based approaches to water management, data analysis, decision support, and development of climate-resilient water infrastructure.
2026	Hajirad	Domestic	Internet of Things (IoT) / Precision Agriculture	Using IoT-based technologies for monitoring, data-driven agricultural management, and improving resource-use efficiency and sustainability.
2026	Hajirad et al.	Domestic	Machine Learning (ML)	Applying machine learning approaches to optimize agricultural water productivity and support decision-making under climate change.
2026	Hajirad et al.	Domestic	Technological Governance / Resilience	Integrating technological governance, irrigation technologies, and ecosystem-based approaches to strengthen irrigation-system resilience under climate change.
—	NCAR – CCSM	International	Climate Model	Simulating and analyzing the climate system.
—	C3S Climate Data Store	International	Climate Data Platform	Accessing and analyzing climate data for climate-change assessment and planning.
2026	Schulzweida – CDO	International	Climate Data Processing Tool	Processing and analyzing climate model outputs.
—	CMOR3 – Doutriaux et al.	International	Climate Data Tool	Standardizing and preparing climate model output data.

به ظرفیت منابع آب و پیامدهای محیط‌زیستی آن ارزیابی شود؛ زیرا افزایش تولید در کوتاه‌مدت، در صورت اتکا به برداشت بیش از ظرفیت منابع آب، نمی‌تواند به‌عنوان یک راهکار پایدار سازگاری تلقی شود. در محور سوم، بررسی مطالعات نشان داد که فشارهای ناشی از تغییر اقلیم و برداشت ناپایدار از منابع آب می‌تواند پیامدهای محیط‌زیستی قابل توجهی ایجاد کند. افت آبخوان‌ها، افزایش شوری آب و خاک، کاهش جریان‌های زیست‌محیطی، تخریب اکوسیستم‌ها و کاهش پایداری منابع طبیعی از جمله پیامدهایی هستند که ضرورت پیوند دادن سیاست‌های افزایش بهره‌وری آب با حفاظت از محیط‌زیست را نشان می‌دهند. بر این اساس، بهره‌وری آب باید در چارچوب مفهوم گسترده‌تر پایداری منابع آب و محیط‌زیست تعریف و ارزیابی شود. در محور چهارم، نتایج

مرور مطالعات نشان داد که سازگاری با تغییر اقلیم یک فرایند چندسطحی است و به یک راهکار منفرد محدود نمی‌شود. در سطح مزرعه، تغییر الگوی کشت، اصلاح تقویم زراعی، استفاده از ارقام مقاوم به خشکی و گرما، بهبود مدیریت آب و خاک و استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری از مهم‌ترین اقدامات سازگاری هستند. در سطح منطقه‌ای، مدیریت حوزه‌های آبخیز، حفاظت از منابع آب و خاک،

استفاده از منابع آب غیرمتعارف و مدیریت یکپارچه منابع اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در سطح نهادی و سیاست‌گذاری نیز اصلاح نظام حکمرانی آب، ایجاد مشوق‌های اقتصادی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌ها، توسعه بیمه و تقویت ظرفیت نهادهای محلی می‌تواند زمینه اجرای موثرتر اقدامات سازگاری را فراهم کند. مقایسه دو رویکرد سازگاری خودجوش و سازگاری برنامه‌ریزی‌شده نیز نشان داد که این دو رویکرد نباید در مقابل یکدیگر قرار گیرند، بلکه مکمل یکدیگر هستند. سازگاری خودجوش عمدتا بر دانش، تجربه و تصمیم‌های کشاورزان و جوامع محلی استوار است، در حالی که سازگاری برنامه‌ریزی‌شده به سیاست‌گذاری، سرمایه‌گذاری، زیرساخت، فناوری و حمایت نهادی نیاز دارد. بنابراین، افزایش تاب‌آوری نظام‌های کشاورزی زمانی امکان‌پذیر است که دانش و تجربه محلی با برنامه‌ریزی و حمایت نهادی تلفیق شود.

در محور پنجم، مطالعات بررسی‌شده نشان دادند که مدل‌های اقلیمی، سامانه‌های تصمیم‌یار، پایگاه‌های داده اقلیمی، ابزارهای پردازش داده و فناوری‌های نوین می‌توانند نقش مهمی در شناخت آثار تغییر اقلیم و طراحی راهکارهای سازگاری ایفا کنند. این ابزارها امکان تحلیل داده‌های اقلیمی، ارزیابی ریسک، پیش‌بینی شرایط آینده و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در زمینه مدیریت منابع آب و کشاورزی را فراهم می‌کنند. با این حال، استفاده موثر از فناوری منوط به دسترسی به داده‌های معتبر و محلی، زیرساخت مناسب، قابلیت استفاده برای کاربران و پیوند آن با نظام تصمیم‌گیری است؛ بنابراین، توسعه فناوری به‌تنهایی تضمین‌کننده سازگاری موفق نخواهد بود. در مجموع، سنتز یافته‌های پنج محور نشان می‌دهد که افزایش بهره‌وری آب باید در کنار مدیریت پایدار منابع آب، حفاظت از محیط‌زیست، افزایش تاب‌آوری کشاورزی و توسعه فناوری‌های نوین دنبال شود .به عبارت دیگر، راهکار مناسب برای سازگاری کشاورزی با تغییر اقلیم، رویکردی یکپارچه است که در آن مدیریت عرضه و تقاضای آب، اصلاح نظام تولید، افزایش بهره‌وری آب، حفاظت از منابع طبیعی، سیاست‌گذاری و فناوری به‌صورت همزمان مورد توجه قرار گیرد. این نتیجه نشان می‌دهد که سیاست‌های سازگاری نباید صرفا بر افزایش تولید یا تامین آب بیشتر متمرکز باشند، بلکه باید هدف اصلی آنها افزایش تاب‌آوری نظام کشاورزی در محدوده ظرفیت اکولوژیک و آبی هر منطقه باشد.

از نظر پراکنش مطالعات، مرور انجام‌شده همچنین نشان داد که بخش قابل توجهی از مطالعات بین‌المللی بر مدل‌سازی تغییر اقلیم، بهره‌وری آب، سازگاری، مدیریت منابع و توسعه ابزارهای تصمیم‌یار تمرکز دارند، در حالی که در مطالعات داخلی، مسائل مربوط به مدیریت آب، بهره‌وری، سازگاری کشاورزی و شرایط مناطق خشک و کم‌آب اهمیت بیشتری دارند. این تفاوت بیانگر ضرورت توسعه مطالعاتی است که یافته‌ها و ابزارهای بین‌المللی را با شرایط اقلیمی، اقتصادی، اجتماعی و نهادی مناطق مختلف ایران تطبیق دهند.

بر اساس نتایج حاصل از مرور مطالعات، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده در جهت توسعه مطالعات یکپارچه اقلیم -آب -کشاورزی حرکت کنند. در این راستا، لازم است اثرات تغییر اقلیم به‌صورت همزمان بر منابع آب، نیاز آبی محصولات، عملکرد، بهره‌وری آب و پیامدهای محیط‌زیستی بررسی شود و از رویکردهای تک‌متغیره فاصله گرفته شود. همچنین، با توجه به تفاوت میان بهره‌وری آب و کارایی مصرف آب، توسعه شاخص‌های جامع بهره‌وری آب ضروری است؛ به‌گونه‌ای که علاوه بر میزان تولید محصول، مصرف واقعی آب، آب سبز و آبی، برداشت از منابع آب زیرزمینی و پیامدهای محیط‌زیستی نیز در ارزیابی بهره‌وری لحاظ شوند. از سوی دیگر، با توجه به تفاوت شرایط اقلیمی، منابع آب، الگوی کشت و ظرفیت سازگاری در مناطق مختلف ایران، افزایش مطالعات منطقه‌محور اهمیت ویژه‌ای دارد و پژوهش‌های آینده باید راهکارهای سازگاری را در مقیاس حوضه آبریز، استان، دشت و مزرعه بررسی کرده و از ارائه نسخه واحد برای همه مناطق اجتناب کنند.

در این میان، تلفیق دانش محلی و فناوری‌های نوین نیز می‌تواند نقش مهمی در ارتقای اثربخشی راهکارهای سازگاری داشته باشد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌شود ظرفیت دانش و تجربه کشاورزان و جوامع محلی با داده‌های اقلیمی، مدل‌های پیش‌بینی، سامانه‌های تصمیم‌یار، سنجش‌ازدور و

فناوری‌های هوشمند ترکیب شود. علاوه بر اثربخشی فنی، ارزیابی اقتصادی و اجتماعی راهکارهای سازگاری نیز باید مورد توجه قرار گیرد، زیرا صرف اثبات فنی اثربخشی یک راهکار برای اجرای آن کافی نیست و عواملی همچون هزینه، منافع اقتصادی، پذیرش اجتماعی، نیازهای نهادی و قابلیت اجرای راهکارها باید در مطالعات آینده ارزیابی شوند.

همچنین، مطالعات آتی باید از ارزیابی موفقیت راهکارها صرفا بر اساس افزایش عملکرد محصول خودداری کرده و آثار آنها بر آبخوان، کیفیت آب، خاک، تنوع زیستی و جریان‌های زیست‌محیطی را نیز در نظر بگیرند تا میان اهداف تولید و حفاظت از منابع طبیعی تعادل برقرار شود. با توجه به اهمیت فناوری‌ها و ابزارهای نوین، توسعه سامانه‌های تصمیم‌یار بومی و متناسب با داده‌ها و شرایط محلی ایران نیز می‌تواند به انتخاب الگوی کشت، تعیین زمان و مقدار آبیاری، مدیریت خشکسالی و ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی کمک کند.

در نهایت، تقویت مطالعات آینده‌نگر و سناریومحور از دیگر ضرورت‌های پژوهشی است و پیشنهاد می‌شود آثار سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر منابع آب، کشاورزی و بهره‌وری آب در افق‌های زمانی متفاوت بررسی شود تا سیاست‌گذاران بتوانند راهکارهای سازگاری را بر اساس ریسک‌های آینده اولویت‌بندی کنند. در مجموع، این مرور نشان می‌دهد که گذار از مدیریت واکنشی بحران آب به مدیریت پیش‌نگر، یکپارچه و سازگار با اقلیم، مهم‌ترین ضرورت پژوهشی و مدیریتی در مسیر افزایش تاب‌آوری کشاورزی است. پژوهش‌های آینده باید ضمن بهره‌گیری از تجارب جهانی، بر شرایط محلی، ظرفیت‌های نهادی و محدودیت‌های منابع آب در مناطق مختلف تمرکز کنند تا نتایج پژوهش قابلیت تبدیل شدن به سیاست و اقدام اجرایی را داشته باشد

5- List of Symbols

AI	Artificial Intelligence
C3S	Copernicus Climate Change Service
CCSM	Community Climate System Model
CDO	Climate Data Operators
DSS	Decision Support System
FAO	Food and Agriculture Organization
IoT	Internet of Things
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ML	Machine Learning
NCAR	National Center for Atmospheric Research
WP	Water Productivity
WUE	Water Use Efficiency

Acknowledgments

Appreciations are given to the editor and reviewer of the Journal of Iranian Water Engineering Research.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, I.H., and P.P.; Methodology, I.H., and P.S.; Software, M.S.S., E.A., and T.O.A; data analysis, P.S., I.H. and P.P.; Writing-Original Draft Preparation, P.P. and P.S.; Writing-Review and Editing, I.H., P.P., and P.S.; Supervision, I.H.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No funding have received.

Data Availability Statement

Not applicable.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Abedi, S. (2022). Factors affecting the adoption of efficient water technologies in adaptation to climate change and reduction of urban water losses. Natural Environment Journal, 75(2), 307-319. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jne.2022.337837.2382

Alam Tabriz, A. (2013). Productivity and quality management. Industrial Management Organization, Tehran, Iran. (In Persian).

Alavi Nia, M. and Babakhani, E. (2026). Analysis of the impacts of global climate change on different systems. Proceedings of the 30th National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, Shirvan, Iran. https://civilica.com/doc/2601346 (In Persian).

Ali, M.H. and Talukder, M.S.U. (2008). Increasing water productivity in crop production: A synthesis. Agricultural Water Management, 95, 1201-1213. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008

.06.008

Arvandi, S. (2025). Foresight and emerging technologies in climate change. Strategic Management and Futures Studies, 8(1), 137-152. (In Persian). http//doi.org/10.22034/jsmf.2025.519369.1131

Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target. Field Crops Research, 112(2-3), 119-123. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.009

Copernicus Climate Change Service (C3S). Climate Data Store. Implemented by ECMWF https://climate.copernicus.eu /

Dehghani Sanij, G. and Bashi Azghadi, S.N. (2025). Review of different perspectives on climate change: Analysis and comparison. Journal of Drought Research and Climate Change. (In Persian). https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9047.1124

Doutriaux, C., Taylor, K. E., Mauzey, C., Nadeau, D., & Durack, P. J. CMOR v3. 0 Users Guide (Climate Model Output Rewriter; CMOR3). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.16760843

Garg, S., Rumjit, N.P. and Arora, P. (2024). Addressing climate change impacts through sustainable agricultural solutions: A review. Environment, Development and Sustainability. https://doi.org/10.1007/s10668-024-05728-6.

Ghahremani, V. and Noori, O. (2025). Urban agriculture and its role in environmental resilience. Environment and Development Journal, 15(29), 65-74. https://urplanning.tabrizu.ac.ir/http/doi.org/10.22034/jprd.2026.66928.1194

Hajirad, I. (2025). AI-Powered Water Management: Developing Infrastructure for a Future That Is Climate-Resilient. Journal of Sustainable Development of Natural Resources Management, 1(3), 1-14. https://doi.org/10.13044/j.sdnarema.d1.0617

Hajirad, I. (2025). Identification of Smart Irrigation Management Methods and Tools and Their Impact on Optimizing Irrigation Water Consumption. Journal of Water and Sustainable Development, 12(2), 159-176. https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i2.2412-1389

Hajirad, I. (2026). Precision and Smart Agriculture: Harnessing IoT for Enhanced Productivity and Sustainability. Intelligent Agriculture, 2(1), 84-106. https://doi.org/10.54963/ia.v2i1.2408

Hajirad, I., & Pourmohammad, P. (2025). Global trends in water resources resilience to climate change. Journal of Sustainable Development of Natural Resources Management, 1(3), 1-25. https://doi.org/10.13044/j.sdnarema.d1.0624

Hajirad, I., Pourmohammad, P., & Siami, P. (2026). Integrated technological governance and ecosystem based strategies for irrigation system resilience under climate change a systematic review. Discover Environment, 4(1), 186. https://doi.org/10.1007/s44274-026-00713-4

Hajirad,I , Paria Pourmohammad,P P and Pourgholam Amiji,M . (2026). Optimizing Water Productivity in the Face of Climate Change: The Central Role of Machine Learning Approaches. Iranian Journal of Soil and Water Research, 56(11), 2929-2949. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.403943.670022.

Herrera-Gomez, S.S., Quevedo-Nolasco, A. and Pérez-Urrestarazu, L. (2017). The role of green roofs in climate change mitigation: A case study in Seville (Spain). Building and Environment, 123, 575-584. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.036

Heydari, N. (2014). Assessment of agricultural water productivity (WP) in Iran, and the performance of water policies and plans of the government in this regard. Majlis and Rahbord, 21(78), 177-200.

Heydari, N. (2020). Visions and approaches for adapting to climate change from agricultural water management and food security aspects. Water Management in Agriculture, 6(1), 23-36.

Heydari, N. (2023). Hidden challenges in the concept and application of water productivity index. Iranian Journal of Soil and Water Research, 54(12), 1995-2015. (In Persian). https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.367306.669600

Homayian, M. and Aghapour Sabbaghi, M. (2018). Calculation of environmentally compatible productivity in the agricultural sector. Natural Environment Journal, 71(2), 255-268. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jne.2018.210616.1200

Hosseini, A., Yadala Nia, H., Mohammadi, M. and Shekari, S. (2020). Analysis of social resilience based on social capital indicators in Tehran. Sustainable City, 3(1), 19-39. https://doi.org/10.22034/jsc.2020.218514.1192

Islamic Parliament Research Center. (2010). Law on increasing productivity of the agricultural and natural resources sector. Tehran, Iran.

Jabari, M., Hajirad, I., & Jabbari, M. (2026). Sustainable Irrigation Water Management in Horticultural Crops of Arid and Semi-Arid Regions: Approaches and Challenges. Applied Research in Water Engineering, e733343. https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2077016.1048

Jabari, M., Pourmohammad, P., Hajirad, I., & Jabari, M. (2025). Developing an Integrated Conceptual Framework for Agricultural Water Resources Management with Emphasis on the Integration of Non-Conventional Water Sources and Modern Irrigation Technologies for Sustainable Agriculture. Applied Research in Water Engineering, e733155. https://doi.org/10.22034/arwe.2025.2076443.1047

Jägermeyr, J., Gerten, D., Heinke, J., Schaphoff, S., Kummu, M. and Lucht, W. (2015). Water savings potentials of irrigation systems: Global simulation of processes and linkages. Environmental Research Letters, 10(5), 054015. https://doi.org/10.5194/hess-19-3073-2015

Kanae, S. and Oki, T. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. Science, 313(5790), 1068-1072. https://doi.org/10.1126/science.1128845

Lester, R.E., Robertson, D., Bailey, J. et al. (2026). Synergies in environmental and agricultural water availability under climate change. Nature Sustainability, 9, 234-246. https://doi.org/10.1038/s41893-025-01720-8

Makuvaro, V., Walker, S., Masere, T.P. and Dimes, J. (2018). Smallholder farmer perceived effects of climate change on agricultural productivity and adaptation strategies. Journal of Arid Environments, 152, 75-82. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.01.016

Malekmohammadi, L. (2025). Haloculture in a changing world: A comprehensive review on sustainable agriculture, saline water resource management, and future prospects under water scarcity and climate change conditions. Applied Water Science, 15, 289. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02658-0

Molden, D. (Ed.). (2007). Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture. Earthscan and IWMI.

Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R. and Makin, I. (2003). A water productivity framework for understanding and action. In: Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. CABI Publishing, Colombo, Sri Lanka. https://doi.org/10.1079/9780851996691.0001

Morsali, E. (2017). Investigating the role of processes in improving agricultural water productivity in Iran. Journal of Water Research in Agriculture, 31(2), 163-180. (In Persian). https://doi.org/10.22092/jwra.2017.113161

National Center for Atmospheric Research (NCAR). Community Climate System Model (CCSM). https://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm

Nayebi, J., Pourgholam-Amiji, M., Hajirad, I., Alavi, S. R., Nozari, F., & Akbarpour, M. (2024). Improving wheat irrigation productivity in Iran (Part two: from the viewpoint of mechanization and farm management). Water and Soil Management and Modelling, 4(1), 194-213. https://doi. /10.22098/mmws.2023.11938.1190

Oyeagu, C.E. and Lewu, F.B. (2025). Why agricultural water productivity matters: A review. In: Mabhaudhi, T., Chimonyo, V.G.P., Senzanje, A. and Chivenge, P.P. (Eds.), Enhancing Water and Food Security Through Improved Agricultural Water Productivity. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-1848-4_2.

Parnian, A. et al. (2025). Green space expansion using haloculture technology to combat climate change and global warming in MENA region: Cases, strategies, and pedagogical content knowledge (PCK) approaches. In: ElZein, Z. and Negm, A. (Eds.), Recent Approaches of Sustainable Architecture in Arid and Semi-Arid Cities. Urban Sustainability. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-1645-2_12.

Pourgholam-Amiji, M., Hajirad, I., Nayebi, J., Alavi, S. R., Nozari, F., & Akbarpour, M. (2024). Improving wheat irrigation productivity in Iran (Part one: from the view point of irrigation system and water management). Water and Soil Management and Modelling, 4(1), 171-193. https://doi.org/10.22098/mmws.2023.11937.1189

Pourmohammad, P., & Hajirad, I. (2025). Innovative Irrigation Practices for Sustainable Agriculture: Environmental Benefits and Implementation Challenges. Journal of Sustainable Development of Natural Resources Management, 1(2), 1-11. http://dx.doi.org/10.13044/j.sdnarema.d1.0601

Ramirez-Villegas, J. and Challinor, A. (2012). Assessing relevant climate data for agricultural applications. Agricultural and Forest Meteorology, 161, 26-45. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.03.015

Rockström, J., Williams, J., Daily, G. et al. (2017). Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. Ambio, 46(1), 4-17. https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6

Saeed, M. (2014). Workshop on innovative farm management practices to enhance agricultural productivity. Tehran, Islamic Republic of Iran, 6-10 September 2014.

Sahar, R., Munawaroh, M. and Iqbal, J. (2025). Climate change adaptation in agriculture food

supply chains: A bibliometric and content analysis. Discover Sustainability, 6, 1396. https://doi.org/10.1007/s43621-025-02105-9.

Schulzweida, U. (2026). Climate Data Operators (CDO). Max Planck Institute for Meteorology https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/

Sharafi, A., Javadi, S.A., Esfahan, E.Z. et al. (2025). Modeling potential of halophytes in the production of biofuel and edible oil using linear regression and an adaptive neuro-fuzzy inference system. Scientific Reports, 15, 19443. https://doi.org/10.1038/s41598-025-04372-y.

Singer, S.F., Idso, C.D. and others. (2008). Nature, not human activity, rules the climate: Summary for policymakers of the report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change. The Heartland Institute.

Solimani, M., Rahimi, D. and Yazdanpanah, H. (2021). Climate change adaptation strategy in agriculture (Rostam County). Journal of Natural Environment Hazards, 10(29), 19-32. (In Persian). https://doi.org/10.22111/jneh.2020.32681.1598

Tohamy, M. and Mostafa, H. (2026). Impact of climate change on crop production and water-use efficiency in Rashid City, Egypt. Water Science, 40, 7. https://doi.org/10.1007/s44533-025-00007-3.

Vaziri Nasab, F., Zare Mehrjerdi, M.R., mirteymouri, S., Mehrabi Beshrabadi, H. and Bakhtiari, B. (2025). Investigating the effects of green technologies and energy productivity on climate change in BRICS countries. Agricultural Meteorology. e221668. (In Persian). . https://doi.org/10.22125/agmj.2025.517603.1181

Wenkel, K. O., Berg, M., Mirschel, W., Wieland, R., Nendel, C., & Köstner, B. (2013). LandCaRe DSS--an interactive decision support system for climate change impact assessment and the analysis of potential agricultural land use adaptation strategies. Journal of environmental management, 127 Suppl, S168–S183. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.02.051

Yu, W., Uhlenbrook, S., von Gnechten, R. and van der Bliek, J. (2021). Can water productivity improvements save us from global water scarcity? White Paper No. 1. FAO, Rome, Italy, 41p

Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. Computers and electronics in agriculture, 170, 105256. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256