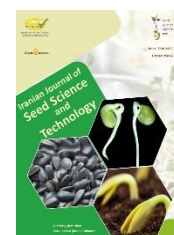




Iranian Journal of Seed Science and Technology



ISSN: 2588-4638

Research Article

Seed Production and Climate Change

Mohammad Khajeh-Hosseini^{1*} , Fatemeh Yaghoubi² 

1. Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran; ISTA Vigour Committee, International Seed Testing Association.
2. Postdoctoral Researcher, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Article Information

Received: 05 May 2025
Revised: 10 Jul. 2025
Accepted: 14 Jul. 2025

Keywords:

Adaptation Strategies,
Agricultural Ecosystems,
Global Warming,
Natural Ecosystems,
Seed Security.

Corresponding Author:
saleh@ferdowsi.um.ac.ir



Abstract

Climate change is one of the major global challenges that exerts profound and wide-ranging impacts on seed production as a critical biological process in both agricultural and natural ecosystems. This review paper provides a comprehensive assessment of these impacts and presents adaptation strategies. The findings reveal that in agricultural ecosystems, climate change affects all stages of seed production, from planting and vegetative growth to harvesting, storage, and transportation. Changes in temperature, precipitation patterns, and increased frequency of extreme weather events lead to reductions in both the quantity and quality of seeds. In natural ecosystems, climate change alters biodiversity, species distribution, seed dormancy, and the performance of natural seed banks, causing significant shifts in the composition and distribution of native species. To address these challenges, various adaptation strategies are proposed. In agricultural ecosystems, key measures include relocating seed production sites, developing and selecting climate-resilient varieties, improving the management of cultivation, seed processing, and storage, leveraging advanced technologies, and enhancing farmer education and empowerment. In natural ecosystems, strategies such as conserving and managing natural seed banks, facilitating seed dispersal, and assisted migration of species are recommended. The study highlights the critical need for the development and implementation of comprehensive and coordinated strategies to mitigate the impacts of climate change and ensure seed production security in both agricultural and natural ecosystems. Integrated approaches, grounded in scientific knowledge and adaptive management, are essential for maintaining seed quality and sustaining seed production under variable climatic conditions.

How to cite this paper: Khajeh-Hosseini, M., & Yaghoubi, F. (2026). Seed Production and Climate Change. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 15 (2), 1-20. <https://doi.org/10.22092/ijst.2025.369385.1560>



© Authors, Published by Iranian Journal of Seed Science and Technology. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate change has become a defining global challenge of the 21st century, primarily driven by anthropogenic greenhouse gas emissions. Its consequences, rising global temperatures, altered precipitation patterns, and increased frequency of extreme weather events such as floods, droughts, and heatwaves are widely documented. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), global warming could reach 5.7°C under SSP5-8.5 scenario or be contained below 2°C under SSP2-1.6 scenario. These changes are significantly disrupting ecological systems, particularly plant-based biological processes.

Seed production, a vital component of ecological resilience, agricultural sustainability, and food security, is especially vulnerable to climate change. High-quality seeds, defined by strong germination capacity, genetic purity, and resilience to biotic and abiotic stresses, are essential for successful plant establishment and yield. Climate change affects seed production across both agricultural and natural ecosystems, influencing all stages from planting and pollination to harvest, and processing. This review article aims to provide a comprehensive overview of how climate change affects seed production and to outline adaptation strategies in both agroecosystems and natural ecosystems.

Materials and Methods

As a narrative review, this article synthesizes findings from recent peer-reviewed literature to examine the multifaceted impacts of climate change on seed production. The reviewed studies span various agroclimatic zones and cover both managed agricultural systems and unmanaged natural habitats. Key themes include changes in phenology, physiological seed traits, pollinator interactions, and ecological resilience.

Results and Discussion

Climate change has disrupted almost every stage of seed production in agricultural ecosystems, from planting to post-harvest processes. At the early planting stage, temperature and soil moisture are essential for successful germination. While moderate warming may accelerate sprouting, heat stress and water scarcity often lead to uneven emergence and reduced seedling vigor. As crops enter the vegetative phase, prolonged heat and drought impair photosynthesis, water and nutrient uptake, and root development, all of which reduce a plant's ability to support high-quality seed formation.

The reproductive stage is particularly sensitive to climatic fluctuations. Elevated temperatures can delay flowering and lower pollen viability, thereby reducing pollination success. In many regions, mismatches between crop flowering periods and the activity patterns of pollinators, caused by phenological shift, further reduce seed set and quality. Fertilization and seed filling processes are also highly susceptible to heat and drought. When temperatures exceed critical thresholds, pollen

production and longevity decrease, fertilization becomes impaired, and the duration of seed filling shortens, leading to underdeveloped seeds with poor nutritional content.

Harvesting and post-harvest stages face additional risks. Rising temperatures may hasten seed maturity, pushing farmers to harvest before seeds reach their full physiological potential. This can reduce seed viability and storability. Moreover, erratic rainfall contributes to pre-harvest sprouting (PHS), which compromises seed germination and shelf life. Seed processing, including drying and cleaning, is increasingly difficult under fluctuating environmental conditions, while transport systems are vulnerable to temperature and humidity swings that degrade seed quality and threaten supply chains.

In natural ecosystems, climate change interferes with critical reproductive processes like germination, flowering, and dispersal. Temperature and precipitation variability can disrupt seasonal timing, leading to mismatches between plant phenology and pollinator availability. These mismatches reduce reproductive success and seed output. Additionally, shifting climate zones are forcing plant species to migrate toward more suitable habitats. Yet, these range shifts are slow, often hindered by physical barriers such as land development, and may result in reduced seed viability or local extinction, particularly for narrowly adapted species.

Seed dispersal pathways are also disrupted. Wind-dispersed seeds suffer from altered air flow patterns, while aquatic seed dispersal is constrained by shifting hydrological regimes. Animal-mediated dispersal is jeopardized as birds and mammals change their movement patterns or decline in population due to climate stress. This fragmentation of dispersal networks can isolate plant populations and reduce gene flow. Furthermore, many species rely on specific environmental cues, like prolonged cold periods, to break seed dormancy. Warmer winters may inhibit these cues, reducing germination rates for cold-adapted species. Natural seed banks, which play a crucial role in conserving biodiversity, are being depleted by recurrent extreme weather events, leading to long-term reductions in seed viability in situ.

Addressing these multifaceted challenges requires ecosystem-specific adaptation strategies. In agricultural systems, relocating seed production to climatically stable areas can reduce exposure to temperature extremes and erratic rainfall. Breeding and selecting climate-resilient crop varieties, through advanced methods such as genome editing and evolutionary breeding, offer long-term solutions to build stress tolerance. Adjusting planting dates and using transplanting techniques for vulnerable crops can help synchronize growth with favorable environmental windows. Improving irrigation and nutrient management systems can buffer plants against water and heat stress, while innovations in post-harvest handling such as advanced drying, storage, and seed treatment can enhance seed quality and longevity

even under adverse conditions.

The integration of digital agriculture, including precision farming and data-driven forecasting tools, also holds promise for improving seed production resilience. Alongside technological solutions, farmer training, extension services, and supportive government policies are essential for successful implementation. Policy frameworks must prioritize investment in seed research, infrastructure, and climate-smart agriculture practices.

In natural ecosystems, adaptation strategies focus on preserving and enhancing the regenerative capacity of plant communities. This includes diversifying and managing native seed sources, promoting ecological restoration using species with traits suited to future climate scenarios, and protecting both natural and artificial seed banks. Facilitating natural seed dispersal by maintaining habitat connectivity can aid species migration, while assisted migration may be necessary for slow-moving or highly vulnerable species. Adaptive ecosystem management, supported by continuous monitoring of climate impacts, will be essential to maintain biodiversity and ecosystem function under changing climatic conditions.

Conclusion

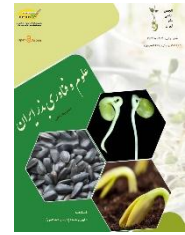
Climate change poses a significant threat to seed production and global food security by disrupting ecological balance in both managed and unmanaged systems. While it brings serious risks such as reduced seed quality, lower yields, and biodiversity loss, it also offers a chance to transform seed management practices using scientific innovation and systemic reforms.

Resilience-building strategies tailored to each ecosystem can help buffer against these impacts. For agriculture, this means integrating climate-smart technologies, improved crop varieties, and policy support. For natural systems, it involves safeguarding genetic diversity, restoring ecosystems, and enabling species to adapt or relocate.

Ultimately, collaboration among scientists, policymakers, farmers, and local communities is crucial. Education and public awareness will also play key roles in building climate-resilient seed systems capable of sustaining future generations in an increasingly unstable climate.



نشریه علوم و فناوری بذر ایران



ISSN: 2588-4638

مقاله پژوهشی

تولید بذر و تغییرات اقلیمی

محمد خواجه حسینی^{۱*}، فاطمه یعقوبی^۲

۱. استاد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران؛ کمیته Vigour ایستا.

۲. پژوهشگر پسادکتری، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳

واژه‌های کلیدی:

امنیت غذایی،

بوم‌نظام‌های طبیعی،

بوم‌نظام‌های کشاورزی،

راهبردهای سازگاری،

گرمایش جهانی.

نویسنده مسئول:

saleh@ferdowsi.um.ac.ir



تغییر اقلیم یکی از چالش‌های بزرگ جهانی است که تأثیرات عمیق و گسترده‌ای بر تولید بذر، به‌عنوان یکی از فرآیندهای حیاتی در بوم‌نظام‌های کشاورزی و طبیعی، بر جای می‌گذارد. این مقاله مروری به بررسی جامع این تأثیرات و ارائه راهبردهای سازگاری پرداخته است. در بوم‌نظام‌های کشاورزی، تغییر اقلیم بر تمامی مراحل تولید بذر از کاشت و رشد رویشی تا برداشت، انبارداری و حمل‌ونقل اثرگذار است. تغییرات در دما، الگوهای بارش و افزایش رویدادهای حدی اقلیمی، منجر به کاهش کمیت و کیفیت بذر می‌شوند. در بوم‌نظام‌های طبیعی، تغییر اقلیم تنوع زیستی، پراکنش گونه‌ها، خواب بذر و عملکرد بانک‌های بذر طبیعی را دستخوش دگرگونی کرده و باعث تغییرات قابل توجه در ترکیب و پراکنش گونه‌های بومی می‌شود. برای مقابله با این چالش‌ها، راهبردهای سازگاری گوناگونی پیشنهاد شده است. در بوم‌نظام‌های کشاورزی، انتقال مکان‌های تولید بذر، اصلاح و انتخاب ارقام مقاوم به تنش‌های اقلیمی، بهبود مدیریت کشت و فرآوری بذر، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و آموزش و توانمندسازی کشاورزان از اقدامات کلیدی به‌شمار می‌روند. در بوم‌نظام‌های طبیعی، حفاظت و مدیریت بانک‌های بذر طبیعی، تسهیل پراکنش بذر و مهاجرت کمکی گونه‌ها، از جمله راهکارهای پیشنهادی هستند. یافته‌های این مطالعه بر اهمیت تدوین و اجرای راهبردهای جامع و هماهنگ برای مقابله با تأثیرات تغییر اقلیم و حفظ امنیت تولید بذر در هر دو بوم‌نظام تأکید دارد. رویکردهای یکپارچه، مبتنی بر علم و مدیریت سازگار، نقش مهمی در تضمین کیفیت و استمرار تولید بذر در شرایط اقلیمی متغیر ایفا خواهند کرد.

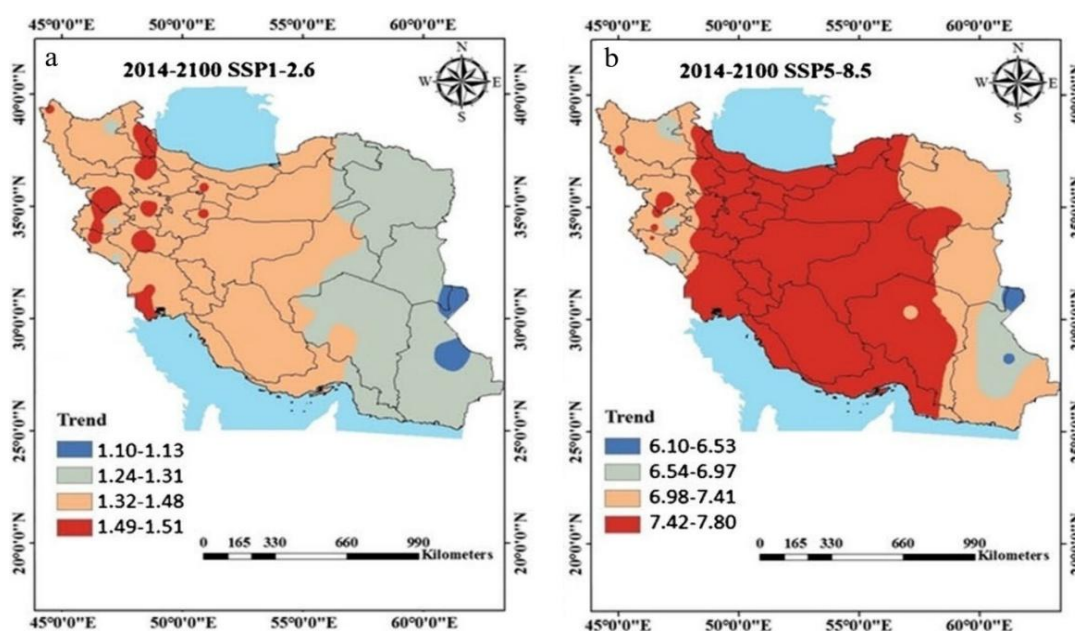
نحوه استناد به این مقاله:

Khajeh-Hosseini, M., & Yaghoubi, F. (2026). Seed Production and Climate Change. *Iranian Journal of Seed Science and Technology*, 15 (2), 1-20. <https://doi.org/10.22092/ijssst.2025.369385.1560>

مقدمه

۵/۷ درجه سلسیوس شود، درحالی که سناریوی خوشبینانه (SSP2-1.6) قادر به محدود کردن گرمایش به کمتر از ۲ درجه سلسیوس خواهد بود (IPCC, 2023). تحلیل داده‌های مکانی از ایران نیز مؤید همین روند است؛ به طوری که در دوره ۲۱۰۰-۲۰۱۴ نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۶۰، میانگین دما در بخش عمده‌ای از کشور تحت سناریوی خوشبینانه تنها ۱/۱ تا ۱/۵ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد، درحالی که در سناریوی بدبینانه این مقدار در اغلب مناطق کشور به بیش از ۷/۴ درجه سلسیوس می‌رسد (شکل ۱).

تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر به یکی از چالش‌های بحرانی جهان تبدیل شده است. این پدیده که بطور عمده ناشی از فعالیت‌های انسانی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای است، با پیامدهایی مانند افزایش دمای متوسط زمین، تغییر در الگوهای بارش و افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی اقلیمی نظیر سیلاب‌ها، خشکسالی‌ها و موج‌های گرما همراه است (Mukheef et al., 2024). آخرین گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC¹) نشان می‌دهد که ادامه روند فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند در سناریوی بدبینانه (SSP²5-8.5) منجر به افزایش دمای جهانی تا



شکل ۱- تغییرات زمانی و مکانی میانگین دما (درجه سلسیوس) در دوره ۲۱۰۰-۲۰۱۴ نسبت به دوره پایه (۱۹۶۰-۲۰۱۴)

Figure 1- Temporal and spatial variations in mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) during the 2014–2100 period relative to the baseline (1960–2014) (Usta et al., 2022)

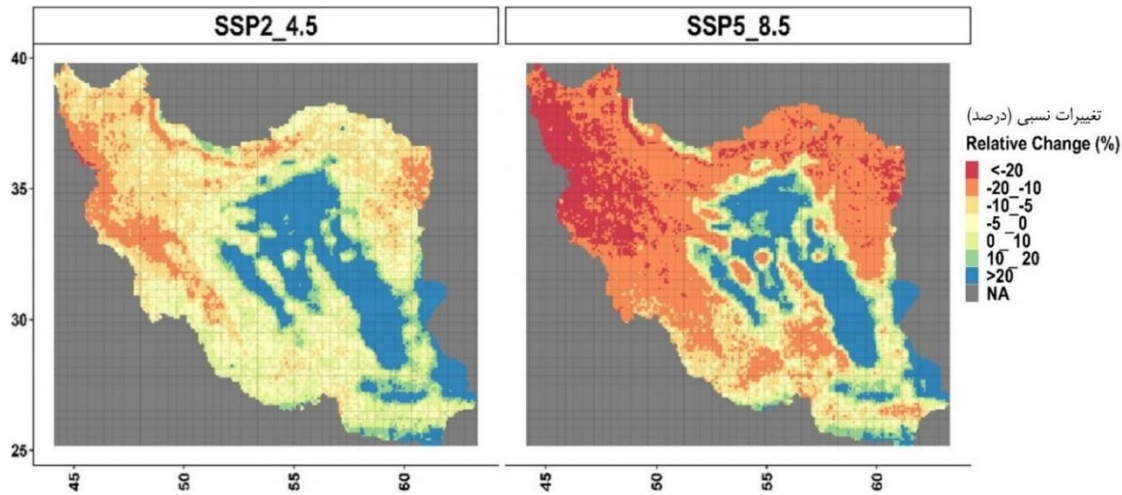
و فرآیندهای زیستی خواهند داشت (Rashid et al., 2021). در کنار این تغییرات، افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی نیز از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم محسوب می‌شود. رویدادهای حدی به پدیده‌های اقلیمی غیرمعمول مانند خشکسالی‌ها، موج‌های گرما، بارندگی‌های شدید، سیل‌ها و طوفان‌های مخرب اطلاق می‌شود که با وجود نادر بودن، تأثیرات عمیق و گاه فاجعه‌باری بر بوم‌نظام‌ها دارند (Han et al., 2024). شواهد مدل‌سازی اقلیمی

تغییر اقلیم نه تنها باعث افزایش دما می‌شود، بلکه تأثیرات گسترده‌ای بر سایر جنبه‌های نظام اقلیمی دارد. برای مثال، افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در اتمسفر، علاوه بر گرم شدن زمین، به اسیدی شدن اقیانوس‌ها، تغییر در چرخه کربن جهانی و کاهش تنوع زیستی دریایی منجر می‌شود (Muhaisen et al., 2024). این تغییرات، همراه با تغییر در الگوهای بارش و افزایش شدت و فراوانی رویدادهای حدی، اثرات گسترده‌ای بر بوم‌نظام‌های طبیعی

1- Intergovernmental Panel on Climate Change
2- Shared Socio-economic Pathways

شمال غرب کشور به بیش از ۲۰ درصد می‌رسد. در مقابل، برخی نواحی مرکزی و جنوب شرقی به‌ویژه در سناریوی حدواسط (SSP2-4.5) افزایش جزئی در بارش نشان می‌دهند (شکل ۲).

برای ایران نشان می‌دهد که بارندگی سالانه نیز تحت تأثیر این تغییرات قرار گرفته و در بیشتر مناطق کشور روند کاهشی دارد؛ به‌ویژه در سناریوی بدبینانه که کاهش بارش در غرب و



شکل ۲- تغییرات زمانی و مکانی میانگین بارش سالانه (درصد) در دوره ۲۰۲۳-۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

Figure 2- Temporal and spatial variations in mean annual precipitation (%) during the 2023–2100 period relative to the baseline (1990–2020) (Raeesi et al., 2024)

زیستگاهی تأثیرگذار هستند.

در بوم‌نظام‌های کشاورزی، تغییرات اقلیمی تأثیرات آشکاری بر کمیت و کیفیت تولید بذر دارند. این تغییرات به‌ویژه از طریق افزایش دما، تغییرات در الگوهای بارش و شدت رویدادهای حادی مانند خشکسالی و سیلاب‌ها، فرآیندهای زیستی مرتبط با تولید بذر را مختل می‌کنند (Hampton et al., 2016). تغییرات دمایی می‌توانند زمان‌بندی گل‌دهی را تغییر داده و موجب کاهش کمیت و کیفیت بذر^۳ تولیدی شوند (He et al., 2024). علاوه‌براین، تغییرات بارش می‌تواند مشکلاتی در زمینه آبیاری ایجاد کرده و به کاهش رطوبت خاک منجر شود که این امر نیز تأثیر منفی بر رشد گیاهان و تولید بذر دارد (Muleke et al., 2022). همچنین، تغییرات اقلیمی موجب بروز تنش‌های محیطی نظیر خشکسالی و شوری خاک می‌شود که به‌طور مستقیم بر عملکرد محصولات کشاورزی تأثیر می‌گذارد (Nouri et al., 2017). ظهور آفات و بیماری‌های جدید یا گسترش گونه‌های موجود در این شرایط نیز فرآیند تولید بذر را پیچیده‌تر می‌کند

تولید بذر، به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین فرآیندهای زیستی برای بقای گونه‌ها، پایداری بوم‌نظام‌ها و امنیت غذایی، به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر این تغییرات قرار گرفته است (Afzal et al., 2019). بذرها، علاوه‌براینکه به‌عنوان منابع غذایی و دارویی برای انسان‌ها و سایر موجودات زنده اهمیت دارند، نقشی کلیدی در بازتولید گیاهان و پایداری بوم‌نظام‌ها ایفا می‌کنند (Ali et al., 2019). بذر با کیفیت دارای ویژگی‌هایی نظیر خلوص ژنتیکی و فیزیکی بالا، عاری بودن از آفات و بیماری‌ها، جوانه‌زنی و بنيه^۱ بالا و محتوی رطوبت مناسب است. استفاده از چنین بذری، منجر به جوانه‌زنی و سبز شدن^۲ سریع، رشد قوی و تولید گیاهانی سالم می‌شود (Afzal et al., 2019). تغییرات اقلیمی می‌توانند ویژگی‌های تولید بذر از جمله زمان تولید، کمیت و کیفیت از جمله قابلیت جوانه‌زنی و بنيه آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهند (et al., 2023). این اثرات، در بوم‌نظام‌های کشاورزی و طبیعی به‌صورت متفاوتی بروز می‌کنند و از طریق تغییرات مستقیم و غیرمستقیم در روابط بوم‌شناختی، منابع زیستی و شرایط

1- Vigour

2- Emergence

3- Seed quality

(Hampton et al., 2016).

در بوم‌نظام‌های طبیعی، فرآیندهای تولید بذر، از جمله گرده‌افشانی، لقاح و پراکنش، به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرند. تغییرات دمایی و الگوهای بارندگی، به ویژه در مناطق نیمه‌خشک و خشک، می‌توانند زمان‌بندی گل‌دهی و تولید بذر را مختل کرده و موفقیت تولیدمثل گیاهان را کاهش دهند (Solbreck & Knappe., 2017). علاوه بر این، منابع حیاتی مانند آب و خاک که برای تولید بذر ضروری هستند، تحت تأثیر این تغییرات دچار افت کیفیت می‌شوند (Walck et al., 2011). در زیست‌بوم‌هایی نظیر جنگل‌ها و مراتع، تغییرات اقلیمی ممکن است به تغییر توزیع جغرافیایی گونه‌ها و تخریب زیستگاه‌های حساس منجر شود که در نهایت، پراکنش بذرها و عملکرد کلی بوم‌نظام را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بر پایداری بوم‌نظام‌های طبیعی و توانایی آن‌ها در ارائه خدمات زیست‌محیطی نظیر تنظیم چرخه آب و ترسیب کربن اثر منفی دارد (Rae & Bai, 2022).

با توجه به اهمیت بذر در حفظ تنوع زیستی و تأمین امنیت غذایی، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تولید بذر از اولویت بالایی برخوردار است. با در نظر گرفتن پیش‌بینی‌های اقلیمی و پیامدهای آن بر منابع غذایی و زیست‌محیطی، شناسایی تهدیدهای بالقوه و توسعه راهکارهای سازگاری ضروری است. هدف این مطالعه، بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر تولید بذر در بوم‌نظام‌های کشاورزی و طبیعی و ارائه راهبردهایی برای کاهش اثرات منفی و حفظ پایداری این فرآیند کلیدی است.

تأثیر تغییر اقلیم بر تولید بذر در بوم‌نظام‌های کشاورزی

دما، بارندگی و غلظت دی‌اکسید کربن از مهم‌ترین عوامل اقلیمی هستند که به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر کیفیت و ارزش کاشت بذر تأثیر می‌گذارند. تمام مراحل تولید بذر از کاشت تا برداشت و انبارداری آن تحت تأثیر شرایط اقلیمی قرار دارند (Maity et al., 2023) که در ادامه به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

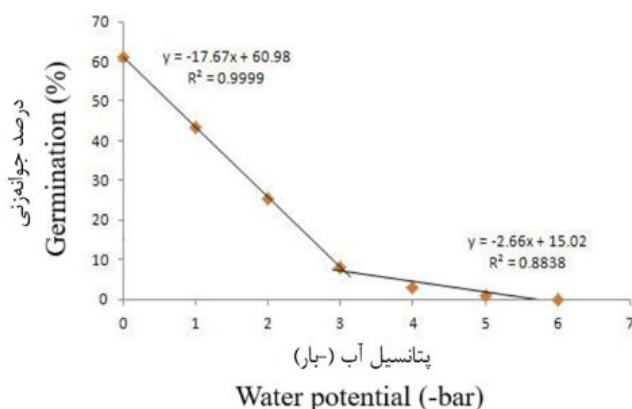
مرحله کاشت یکی از حساس‌ترین مراحل تولید بذر است که بطور مستقیم تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی قرار می‌گیرد. دمای خاک و رطوبت آن، به ویژه در آغاز رشد، نقش مهمی در این زمینه ایفا

می‌کنند. افزایش دما تا حد بهینه می‌تواند جوانه‌زنی و سبز شدن را تسریع کند، اما فراتر از آستانه بحرانی، به کاهش جوانه‌زنی و قدرت گیاهچه منجر می‌شود (Hampton et al., 2012). با این حال، واکنش گیاهان زراعی و گونه‌های مختلف به افزایش دما متفاوت است. به عنوان مثال، میزان جوانه‌زنی ذرت و سورگوم در دمای بالای ۴۰ درجه سلسیوس به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Iloh et al., 2014) در حالی که سویا بهترین جوانه‌زنی را در دمای ۲۰ تا ۳۰ درجه سلسیوس نشان می‌دهد و بالاتر از این دما جوانه‌زنی آن کاهش می‌یابد (Begum et al., 2022). دمای بالا با عواملی نظیر رطوبت خاک و غلظت دی‌اکسید کربن نیز تعامل دارد و می‌تواند بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه تأثیر بگذارد (Hu et al., 2024). کاهش بارندگی و کمبود آب در خاک، به ویژه در نظام‌های دیم، ممکن است منجر به تأخیر در کاشت و کاهش یکنواختی جوانه‌زنی شود (Nouri et al., 2017). در مطالعه‌ای که توسط برومند رضازاده و همکاران (۱۴۰۲) انجام شد، تأثیر تنش خشکی بر مرحله جوانه‌زنی اکوتیپ‌های مختلف زیره سبز در شرایط دمای پایین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش پتانسیل آب، درصد جوانه‌زنی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (شکل ۳).

مرحله رویشی گیاه به شدت تحت تأثیر متغیرهای اقلیمی نظیر دما، نور و دسترسی به آب قرار می‌گیرد. دمای مناسب در این مرحله برای رشد و توسعه گیاهچه حیاتی است. تغییرات دما می‌توانند سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک را افزایش یا کاهش دهند و این تغییرات مستقیماً بر استقرار گیاه اثرگذار هستند (Führer, 2003; Streck, 2005). از سوی دیگر، کاهش منابع آبی ناشی از تغییرات اقلیمی باعث محدود شدن جذب آب و عناصر غذایی توسط ریشه‌ها می‌شود که در نهایت رشد اولیه گیاه را مختل می‌کند (Querejeta et al., 2021). افزایش دمای خاک نیز به‌طور مستقیم بر صفات ریشه، شامل سازماندهی، رشد و عملکرد آن تأثیر می‌گذارد. معماری سیستم ریشه که به سازماندهی ریشه‌های اولیه، ساقه‌زاد و جانبی اشاره دارد، به شدت تحت تأثیر افزایش دمای خاک قرار می‌گیرد (Calleja-Cabrera et al., 2020). در مقایسه با گیاهانی که در شرایط مطلوب رشد می‌کنند، دمای بالاتر منجر به تغییراتی در الگوی توسعه ریشه می‌شود. این

می شود که در نهایت می تواند تولید بذر را در محصولات زراعی به شدت کاهش دهد.

تغییرات معماری ریشه به همراه سایر اثرات تغییر اقلیم، موجب کاهش جذب عناصر غذایی و آب توسط ریشه ها برای گیاه



شکل ۳- اثر پتانسیل آب بر درصد جوانه زنی بذر زیره سبز

Figure 3- The effect of water potential on the germination percentage of cumin seeds (Boroumand Rezazadeh et al., 2023)

سطح CO₂ اتمسفر است که تأثیر جزئی بر زمان گل دهی دارد و معمولاً منجر به تسریع آن می شود (جدول ۱). با این حال، اثر مثبت CO₂ اغلب توسط تنش گرمایی در مراحل گل دهی خنثی یا کاهش می یابد (Jagadish et al., 2016). به طور کلی، نوسانات اقلیمی باعث بی نظمی در زمان گل دهی شده و مدیریت زراعی مانند زمان بندی آبیاری و کوددهی را دشوار می سازد؛ این اختلالات در نهایت ریسک تولید بذر و امنیت غذایی را افزایش می دهند (Bathiany et al., 2023).

دمای محیط نقش کلیدی در زمان بندی گل دهی دارد؛ افزایش دما معمولاً گل دهی را تسریع می کند، اما دماهای بالا می توانند کیفیت و تعداد گل ها را کاهش دهند (Zheng et al., 2002). دمای پایین نیز گل دهی را به تأخیر می اندازد و در محصولات حساس، اختلال در تولید ایجاد می کند (Craufurd & Wheeler, 2007). علاوه بر دما، دوره نوری بر زمان گل دهی اثر گذار است و ترکیب این عوامل می تواند الگوهای غیر قابل پیش بینی ایجاد کند (Harper & Morris, 2007). از دیگر متغیرهای اقلیمی، افزایش

جدول ۱- دامنه تغییرات (روز) در زمان گل دهی گونه های زراعی مختلف تحت شرایط افزایش دی اکسید کربن و دمای هوا

Table 1- Range of variation (days) in flowering time of different crop species under elevated CO₂ and air temperature conditions (Jagadish et al., 2016)

گونه	افزایش دی اکسید کربن	افزایش دما
Species	Elevated CO ₂	Warming
گندم بهاره	-1 to -3	-
Spring wheat	-1 to -3	-
آفتاب گردان	-	-
Sunflower	-	-4 to -14
گندم پاییزه	-	-6 to -17
Winter wheat	-	-3 to -21
یولاف بهاره	-	-
Spring oat	-	-
ذرت	-	-
Maize	-2 to +11	-
سویا	-	-
Soybean	-7	-
برنج	-	-
Rice	-	-

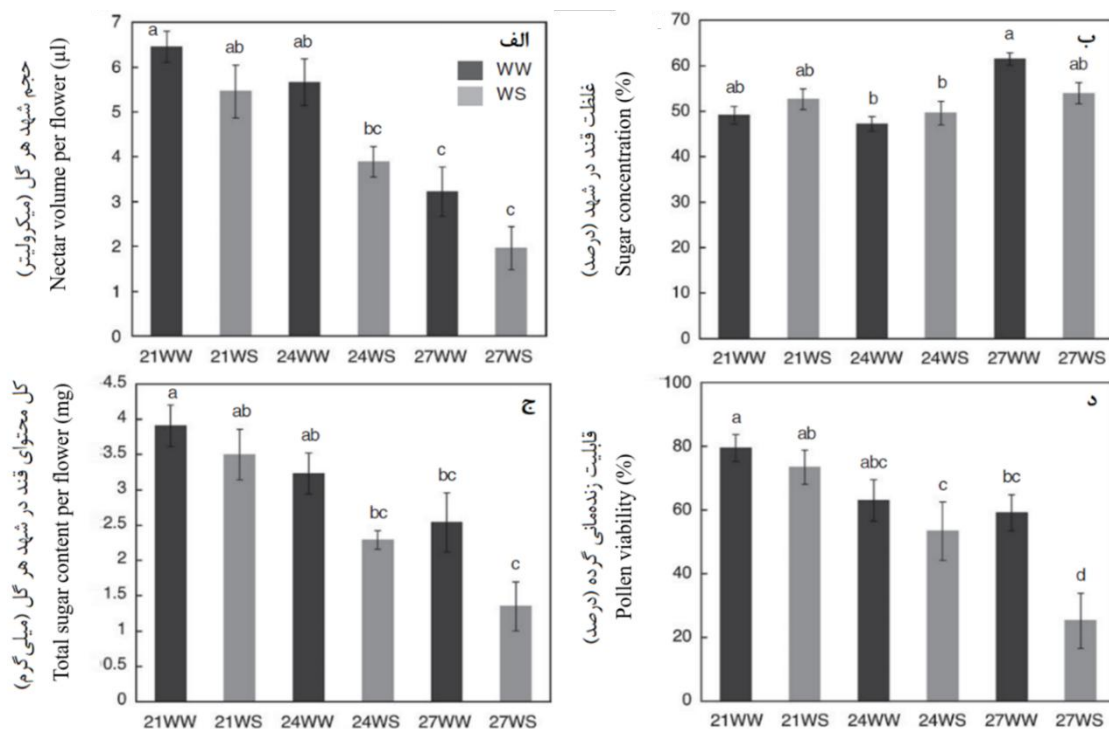
فرآیند تلقیح که طی آن گرده به کلاله منتقل می‌شود و لقاح موفقیت آمیز گیاه را ممکن می‌سازد، به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی مانند دما و رطوبت قرار دارد. دماهای بالاتر یا پایین تر از محدوده بهینه می‌توانند رشد لوله گرده را کاهش داده و مانع از لقاح مؤثر شوند. در دماهای بسیار بالا، گرده‌ها ممکن است خشک شده و قدرت باروری آن‌ها به شدت کاهش یابد. این شرایط می‌تواند به مختل شدن کلی فرآیند تلقیح منجر شود (Prasad et al., 2019).

در مراحل بعد از تلقیح، دمای بالا می‌تواند رشد جنین را با مشکلات متعددی مواجه کند. در برخی موارد، دماهای بیش از حد می‌تواند به تخریب ساختارهای جنینی منجر شوند و حتی باعث مرگ کامل جنین گردند (Confalone et al., 2017). علاوه بر این، فعالیت آنزیم‌ها و فرآیندهای بیوشیمیایی مرتبط با رشد جنین نیز تحت تأثیر منفی دمای بالا قرار می‌گیرند (Shohalet et al., 2006). کمبود آب یکی دیگر از عوامل محیطی است که به طور مستقیم رشد جنین را مختل می‌کند. در مراحل اولیه پس از تلقیح، تنش آبی منجر به کاهش انتقال عناصر غذایی به جنین می‌شود که این امر رشد آن را کند کرده و به تولید بذرهایی با کیفیت پایین منجر می‌گردد. خشکسالی و کاهش ظرفیت گیاه برای جذب مواد غذایی از خاک، تأثیر مضاعفی بر کاهش رشد جنین دارند (Escudero et al., 2024).

مرحله پر شدن دانه از حساس ترین دوره‌های رشد بذر است که طی آن، بذر مواد ذخیره‌ای لازم برای جوانه زنی و رشد آینده را جذب می‌کند. دمای بالا در این دوره سرعت پر شدن را افزایش می‌دهد (Dubey et al., 2020)، اما زمان ناکافی برای تجمع نشاسته، پروتئین و چربی می‌تواند به کاهش کیفیت و وزن بذر منجر شود (Woo et al., 2020). این مسئله، توان جوانه زنی و رشد گیاه را کاهش می‌دهد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2018) دریافته‌اند که تنش گرما موجب کاهش اندازه بلال و دانه‌های ذرت شده و وزن دانه‌ها در این شرایط کمتر از حالت طبیعی بود. رطوبت نیز نقش کلیدی دارد؛ خشکی خاک جذب عناصر غذایی را مختل و ذخیره‌سازی در بذر را ناقص می‌کند. این وضعیت سبب کاهش نشاسته و پروتئین، افت کیفیت بذر و حتی مرگ آن در زمان بلوغ می‌شود (Cheng et al., 2013).

دمای بالا می‌تواند به بافت‌های گل آسیب زده و کارایی گرده‌افشانی را کاهش دهد (Luo et al., 2023). در دوره گل‌دهی، گرما ممکن است تولیدمثل گیاه را مختل کند؛ به عنوان مثال، موج‌های گرما در ذرت سبب کاهش ۵۶/۸۸ درصدی عملکرد شد (Hatfield & Prueger, 2015). تغییرات اقلیمی همچنین باعث ناهماهنگی بین زمان گل‌دهی و فعالیت گرده‌افشان‌ها می‌شود که موفقیت گرده‌افشانی را کاهش می‌دهد (Scaven & Rafferty, 2013). گرمای زیاد، به ویژه در تابستان، فعالیت گرده‌افشان‌هایی مانند زنبورها را محدود می‌کند (Descamps et al., 2021). افزون بر گرما، تغییر الگوی بارندگی و افزایش رطوبت نیز شرایط نامناسبی برای گرده‌افشان‌ها ایجاد می‌کند (Rader et al., 2016). پدیده‌های جوی مانند بارندگی شدید، طوفان و یخبندان هم می‌تواند حضور گرده‌افشان‌ها را مختل کرده و در نتیجه کیفیت بذر و عملکرد محصول را کاهش دهند (Gezon et al., 2016).

شرایط نامساعد محیطی، مانند دمای بالا و کمبود آب، نه تنها دسترسی گرده‌افشان‌ها به گل‌ها را محدود می‌کند، بلکه بر کمیت و کیفیت گرده نیز تأثیر گذار است. افزایش دما و تنش آبی به کاهش قابل توجه در کمیت و کیفیت گرده منجر می‌شود. برای مثال، در دماهای بالاتر از ۳۵ درجه سلسیوس، تولید گرده به طور محسوسی کاهش می‌یابد و کیفیت گرده‌ها ممکن است به حدی پایین بیاید که فرآیند لقاح با مشکل مواجه شود (Descamps et al., 2021). دمای بالا همچنین می‌تواند زنده‌مانی گرده را کاهش دهد و موفقیت باروری و تشکیل بذر را مختل کند. دکامپس و همکاران (Descamps et al., 2018) نشان دادند که افزایش دما و تنش آبی تأثیر منفی قابل توجهی بر ویژگی‌های شهد گل گاوزبان، به جز غلظت قند در شهد دارد (شکل ۴). این پژوهشگران بیان کردند که کاهش حجم شهد، کاهش کل محتوی قند و کاهش زنده‌مانی دانه گرده می‌تواند تعامل گیاه با گرده‌افشان‌ها را مختل کرده و در نهایت بر تولید بذر تأثیر منفی بگذارد. مجدی (Majdi, 2024) نیز نشان داد که افزایش دمای روز به بیش از ۲۸ درجه سلسیوس موجب کاهش معنی‌دار درصد جوانه زنی دانه گرده، تغییر در ریخت شناسی سطح دانه گرده و کاهش طول لوله گرده گوجه‌فرنگی گردید.



شکل ۴- اثر افزایش دما و تنش خشکی بر حجم شهد در گل (الف)، غلظت قند در شهد (ب)، کل محتوی قند در شهد هر گل (ج) و قابلیت زنده‌مانی دانه گرده (د) در گل گاوزیان

بیمارهایی که حروف مشترک ندارند در سطح $p < 0.05$ تفاوت معنی‌داری دارند. ۲۱ = ۲۱ درجه‌سانتی‌گراد؛ ۲۴ = ۲۴ درجه‌سانتی‌گراد؛ ۲۷ = ۲۷ درجه‌سانتی‌گراد؛ آبیاری مناسب؛ WS، تنش آبی.

Figure 4- Effects of elevated temperature and drought stress on nectar volume per flower (a), sugar concentration in nectar (b), total sugar content per flower (c), and pollen viability (d) in *Borago officinalis* (Descamps et al., 2018) Treatments followed by different letters are significantly different at $p < 0.05$. 21 = 21°C; 24 = 24°C; 27 = 27°C; WW, well-watered; WS, water-stressed

رطوبت بیش‌ازحد پیش از برداشت، علاوه‌بر نرم کردن و آسیب به بذرها، شرایط مناسبی برای رشد قارچ‌ها و میکروب‌ها فراهم می‌کند که بر کیفیت و قابلیت انبارداری بذرها تأثیر منفی دارد (Singh et al., 2013).

جوانه‌زنی قبل از برداشت (PHS¹)، یعنی جوانه زدن زود هنگام بذرها درحالی‌که هنوز روی گیاه مادری قرار دارند، از پیامدهای مهم تغییرات اقلیمی در مناطق با نوسانات شدید آب‌وهوایی است (Patwa & Penning, 2020). بارندگی، دما و رطوبت نسبی به‌طور مشترک بر این پدیده تأثیر دارند و ترکیب رطوبت مداوم با نوسانات دما، بحرانی‌ترین شرایط محسوب می‌شود (Hull et al., 2024). این اختلال بطور عمده به‌دلیل کاهش سطح اسیدآبسیزیک و افزایش فعالیت اسیدجیبرلیک رخ می‌دهد که هر

تغییرات اقلیمی تأثیرات قابل توجهی بر زمان برداشت بذر و فرآیندهای مدیریتی مرتبط با آن دارند. افزایش دما یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییرات اقلیمی است که می‌تواند فرآیند رسیدگی بذر را تسریع کند (Naik et al., 2024). اگرچه این امر باعث کاهش زمان رسیدن محصول به برداشت می‌شود، اما ممکن است بذرها پیش از دستیابی به پتانسیل کامل خود برداشت شوند. این برداشت زود هنگام اغلب کیفیت بذرها را کاهش داده و قابلیت جوانه‌زنی و مقاومت آن‌ها در برابر شرایط محیطی و بیماری‌ها را تضعیف می‌کند (Marcinkowski & Piniewski, 2018). علاوه‌براین، تغییرات در الگوهای بارندگی، مانند بارش‌های غیرمنتظره یا مداوم در زمان رسیدگی محصول، می‌تواند کیفیت بذرها، به‌ویژه در گیاهانی مانند گندم و ذرت را کاهش دهد.

1- Pre-harvest sprouting

بوجاری بذرها می‌شود که این امر به افزایش هزینه‌ها و کاهش کارایی تأسیسات فرآوری منجر می‌گردد (Singh et al., 2013). خشک کردن بذر، به‌عنوان یکی از مراحل کلیدی فرآوری، به‌شدت به شرایط محیطی وابسته است. دماهای بالا اگرچه فرآیند خشک کردن را تسریع می‌کنند، اما در صورت عدم مدیریت مناسب، می‌توانند به آسیب سلولی و کاهش کیفیت فیزیولوژیکی بذر منجر شوند (Hampton et al., 2012). ازسوی دیگر، رطوبت محیطی بالا فرآیند خشک کردن را کند کرده و احتمال رشد قارچ‌ها را افزایش می‌دهد (Panqiang et al., 2018).

تغییرات اقلیمی با افزایش دما و رطوبت، خطر فساد بذر و رشد قارچ‌ها را در طی انبارداری تشدید می‌کند (Altieri et al., 2015). علاوه بر این، تغییرات اقلیمی چرخه زیستی آفات انباری مانند شپشه‌ها (*Sitophilus spp.*) و شب‌پره هندی (*Plodia interpunctella*) را تسریع می‌کند. این آفات با تغذیه از بذرها، آسیب‌های مکانیکی ایجاد کرده و به‌طور قابل توجهی قابلیت جوانه‌زنی و کیفیت بذرها را کاهش می‌دهند (Shabana et al., 2019). همچنین، سرعت زوال بذر با افزایش دمای انبارداری و مدت زمان نگهداری تسریع می‌شود (Khan et al., 2016). به‌عنوان مثال، چشمه‌سفیدی و همکاران (Cheshmeh-Sefidi et al., 2022) گزارش کردند که دما و رطوبت بذر تأثیر مستقیمی بر کاهش کیفیت بذر کاملینا در طول دوره انبارداری دارند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش هر یک از این عوامل، کاهش درصد جوانه‌زنی و تعداد گیاهچه‌های نرمال را تسریع می‌کند (شکل ۵). بنابراین، برای حفظ کیفیت بذر کاملینا، ضروری است بذرها در شرایطی با دمای پایین و رطوبت مناسب نگهداری شوند.

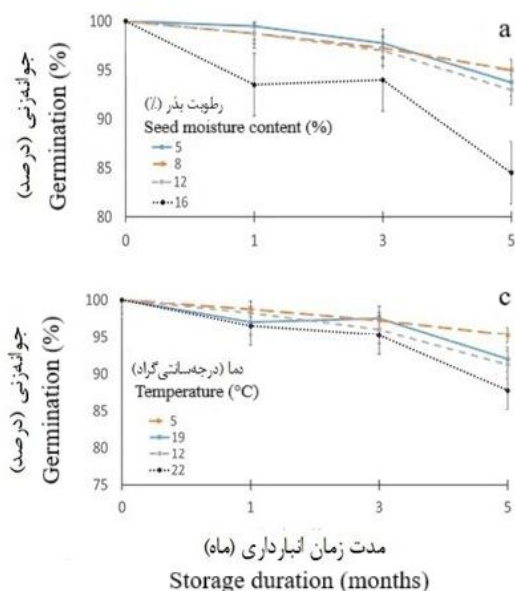
حمل و نقل بذر یکی از مراحل حیاتی در زنجیره تأمین بذر است که کیفیت و دسترسی به بذرها را تضمین می‌کند. باین‌حال، تغییرات اقلیمی و وقوع رویدادهای حادی اقلیمی، چالش‌های جدی در این فرایند ایجاد کرده‌اند. افزایش دما و نوسانات شدید رطوبت در طول حمل و نقل می‌توانند قابلیت جوانه‌زنی و بنيه بذر را کاهش داده و حتی به از دست رفتن محموله‌ها منجر شوند (Sloat et al., 2020). افزایش دما باعث کاهش محتوی رطوبت بذر و افت کیفیت آن می‌شود، درحالی‌که دماهای پایین و

دو هورمون در فرآیند جوانه‌زنی نقش کلیدی دارند (Sohn et al., 2021). جوانه‌زنی قبل از برداشت بذور کیفیت، ماندگاری و توان جوانه‌زنی بذر را کاهش داده و در نتیجه عملکرد و درآمد کشاورزان را تهدید می‌کند (Singh et al., 2021). در اروپا، کانادا و استرالیا نیز بارندگی‌های پیش از برداشت موجب افزایش PHS و کاهش کیفیت و ارزش تجاری بذر گندم شده‌اند (Mares & Mrva, 2014; Zhou et al., 2020).

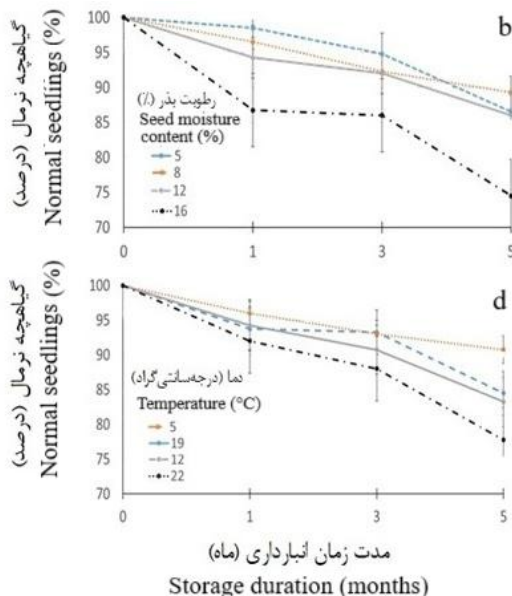
کیفیت فیزیولوژیکی بذر، شامل جوانه‌زنی، بنيه، طول عمر و مقاومت به بیماری، به‌شدت تحت تأثیر تنش‌های اقلیمی مانند دما و کم‌آبی است. این تنش‌ها به‌ویژه در مراحل حساس رشد، عملکرد و قابلیت بذر را کاهش می‌دهند (Poudel et al., 2024). دمای بالا در پایان رشد بذر با آسیب به آنزیم‌ها و پروتئین‌های ضروری، جوانه‌زنی را مختل می‌کند و رقابت‌پذیری گیاهچه را می‌کاهد (Hampton et al., 2012). تنش آبی نیز با محدود کردن جذب آب و مواد مغذی و کاهش ذخایر انرژی، روند جوانه‌زنی را دچار اختلال می‌کند (Borges et al., 2024). خواجه حسینی و همکاران (Khajeh-Hosseini et al., 2022) در مطالعه‌ای در استان خراسان رضوی نشان دادند که افزایش دما با کاهش وزن هزار دانه و رطوبت بذر، و بارندگی با افزایش رطوبت بذر ارتباط معناداری دارد. همچنین دمای بالا با کاهش سرعت جوانه‌زنی مرتبط بود. این یافته‌ها بر اهمیت مدیریت صحیح دما و رطوبت در دوره رشد و بلوغ بذر تأکید دارند، زیرا این عوامل می‌توانند تأثیر مثبتی بر کیفیت فیزیولوژیکی بذر داشته باشند. بذرها تولیدشده در شرایط تنش، کیفیت پایین‌تری دارند و در برابر بیماری‌ها و آفات آسیب‌پذیرترند. خواجه حسینی و همکاران (Khajeh-Hosseini et al., 2022) در پژوهش خود دریافته‌اند که بین بارندگی و رطوبت نسبی محیط با درصد آلودگی بذور گندم تولیدی به قارچ *Fusarium sp.* همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. ازسوی دیگر، افزایش آلودگی بذور به قارچ *Rhizopus sp.* با دماهای بالا در مرحله زایشی ارتباط داشت.

تغییرات اقلیمی می‌توانند بر ویژگی‌های بذر نظیر اندازه و رطوبت آن تأثیر بگذارند و فرآیندهای فرآوری بذر را مختل کنند (Ahmed & Stepp, 2016). افزایش دما و تغییر در الگوهای بارندگی موجب پیچیدگی بیشتر در مراحل خشک کردن و

بذر می شود (Singh et al., 2013). همچنین، رویدادهای حدی اقلیمی نظیر طوفان‌ها و بارندگی‌های ناگهانی علاوه بر آسیب به محموله و بسته‌بندی، موجب تأخیر در تحویل و کاهش کیفیت بذر می شوند (Bellon et al., 2011).



بخزدگی ممکن است به ساختار سلولی بذر آسیب برساند (Dürr et al., 2018). رطوبت نیز عامل مهمی است؛ محیط‌های مرطوب می‌توانند فعالیت‌های متابولیکی ناخواسته و رشد قارچ‌ها را تحریک کرده، درحالی‌که خشکی بیش‌ازحد باعث کاهش بینه



شکل ۵- روند تغییرات درصد جوانه‌زنی و گیاهچه نرمال بذر کاملینا تحت تأثیر سطوح مختلف رطوبت (الف و ب) و دما (ج و د) در طول دوره انبارداری
Figure 5- Trends in germination percentage and normal seedlings of camelina seeds under different seed moisture levels (a and b) and temperatures (c and d) during storage period (Cheshmeh-Sefidi et al., 2022)

تولید بذر را کاهش می‌دهد (Bartomeus et al., 2011). این موضوع به‌ویژه در نظام‌های گرده‌افشانی تخصصی که به یک گونه خاص از گرده‌افشان وابسته هستند، اهمیت بیشتری دارد (Weaver & Mallinger, 2022).

تغییرات اقلیمی همچنین باعث تغییر در توزیع جغرافیایی گونه‌های گیاهی می‌شود. تغییر در رژیم‌های دما و بارندگی، گیاهان را مجبور به مهاجرت به زیستگاه‌های جدید و مناسب‌تر می‌کند. با این حال، این مهاجرت اغلب با کاهش تولید بذرها همراه است (Huang et al., 2021). بسیاری از گونه‌های گیاهی نمی‌توانند به سرعت با تغییرات هماهنگ شوند و مهاجرت آن‌ها به‌کندی و در طول چند نسل رخ می‌دهد. موانع فیزیکی مانند توسعه شهری یا تخریب زیستگاه‌ها نیز این مهاجرت را محدود کرده و خطر انقراض محلی را برای گونه‌های با دامنه تحمل محدود افزایش می‌دهد (Thomas et al., 2004). پراکنش بذر نقش حیاتی در تجدید حیات گیاهان دارد و

تأثیر تغییر اقلیم بر تولید بذر در بوم‌نظام‌های طبیعی

تولید بذر در بوم‌نظام‌های طبیعی نقش حیاتی در حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کند و به‌عنوان یک مخزن ژنتیکی برای گونه‌های کشاورزی و غیرکشاورزی عمل می‌نماید. تغییرات اقلیمی به‌طور قابل توجهی از طریق تغییرات دما، الگوهای بارندگی و وقوع رویدادهای حدی بر این بوم‌نظام‌ها و تولید بذر تأثیرگذار هستند. این اثرات شامل تغییر در جوانه‌زنی، رویدادهای فنولوژیکی، پراکنش بذر و پایداری بانک‌های بذر است که در ادامه بررسی می‌شود.

تأثیر تغییرات اقلیمی بر جوانه‌زنی و رویدادهای فنولوژیکی، مشابه آنچه در بوم‌نظام‌های کشاورزی مشاهده می‌شود، در بوم‌نظام‌های طبیعی نیز قابل مشاهده است. تغییرات در دما و بارندگی می‌تواند بر جوانه‌زنی، زمان گل‌دهی و فرآیند رسیدن بذر تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، نوسانات دمایی ممکن است به گل‌دهی زود هنگام یا دیر هنگام منجر شود که این امر باعث عدم تطابق زمانی با فعالیت گرده‌افشان‌ها شده و موفقیت گرده‌افشانی و

به جوانه‌زنی زودرس یا تأخیری شود که گیاهچه‌ها را در برابر خطرات محیطی مانند کمبود منابع یا دماهای نامساعد قرار می‌دهد. این اختلالات به‌طور کلی منجر به جوانه‌زنی نامناسب، کاهش نرخ بقای گیاهچه‌ها و در نهایت کاهش موفقیت در بازسازی جمعیت‌های گیاهی می‌شود (Fenner & Thompson, 2005).

بانک‌های بذر، چه طبیعی و چه مصنوعی، یکی از ارکان اساسی برای حفاظت از تنوع ژنتیکی گیاهان به‌شمار می‌روند، اما تغییرات اقلیمی چالش‌های چشمگیری را در مدیریت و کارایی آن‌ها ایجاد کرده است. در بانک‌های بذر طبیعی، عواملی مانند نوسانات دمایی، خشکسالی‌های پی‌درپی و سیل‌های شدید منجر به تغییر شرایط زیستی خاک شده و باعث کاهش تدریجی ذخایر بذر در طبیعت می‌شود (Walck & Hidayati, 2022). این امر نه تنها تنوع زیستی را کاهش می‌دهد بلکه توانایی بوم‌نظام‌ها برای بازسازی پس از اختلالات را نیز تضعیف می‌کند (Pritchard et al., 2022). از سوی دیگر، بانک‌های بذر مصنوعی نیز با مشکلاتی نظیر افزایش دما و نوسانات رطوبت در محیط‌های کنترل‌شده روبرو هستند. این شرایط نامطلوب می‌تواند موجب فساد یا کاهش کیفیت بذرهای ذخیره‌شده شود. علاوه بر این، حفظ شرایط ایده‌آل برای ذخیره‌سازی نیازمند استفاده از فناوری‌های پیشرفته مانند سامانه‌های تنظیم دما و رطوبت است که هزینه‌های عملیاتی را به‌طور چشمگیری افزایش داده و نیاز به منابع مالی و تخصصی بیشتری را ایجاد می‌کند (Bailly & Roldan, 2023).

راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی در تولید بذر

باتوجه به مطالب بیان‌شده، تغییرات اقلیمی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی تولید بذر است که تأثیرات منفی متعددی بر مراحل مختلف تولید بذر دارد. برای تضمین امنیت غذایی و تولید پایدار، توسعه راهبردهای سازگاری مبتنی بر دانش علمی و فناوری‌های نوین ضرورت دارد. این راهبردها باید به جنبه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی توجه داشته باشند.

راهبردهای بوم‌نظام‌های کشاورزی

- انتقال مکان‌های تولید بذر: جابه‌جایی مکان‌های تولید بذر به مناطقی با شرایط اقلیمی مطلوب‌تر، از جمله تغییر عرض

به‌شدت از تغییرات اقلیمی تأثیر می‌پذیرد. تغییر در الگوهای باد و جریان آب، به‌ویژه در مناطقی که این عوامل پراکنش‌دهنده اصلی‌اند، حرکت بذر و استقرار در زیستگاه‌های جدید را محدود می‌کند (Taller et al., 2016). کاهش شدت و تغییر جهت باد، پراکنش بذرهای سبک را کاهش می‌دهد و نوسانات بارندگی با مختل کردن سطح آب، پراکنش بذرهای آب‌دوست را دشوار می‌سازد (Merritt & Wohl, 2006). همچنین، تغییرات اقلیمی باعث جابجایی یا کاهش جمعیت جانوران بذرپراکن مانند پرندگان و پستانداران می‌شود که شبکه‌های پراکنش را مختل کرده و منجر به انزوای جمعیت‌های گیاهی می‌گردد (Muller-Landau et al., 2004). گونه‌هایی که برای پراکنش به جانوران خاصی وابسته‌اند، بیشتر در معرض تهدید هستند، به‌ویژه با کاهش تنوع زیستی و تخریب زیستگاه‌ها (Donoso et al., 2022). سازوکارهای شکستن خواب بذر که تضمین‌کننده جوانه‌زنی در شرایط مناسب هستند، به‌شدت به تغییرات اقلیمی حساس هستند. این سازوکارها معمولاً شامل تعاملات پیچیده‌ای میان دما، رطوبت و شرایط محیطی است که برای شروع جوانه‌زنی لازم است. به‌عنوان مثال، گونه‌هایی که برای شکستن خواب به دوره‌های طولانی دمای پایین نیاز دارند، ممکن است در مناطقی با زمستان‌های گرم‌تر با کاهش موفقیت جوانه‌زنی مواجه شوند. این تغییرات می‌تواند مانع از تنظیم درست سازوکارهای فیزیولوژیکی در بذر شوند و فرآیندهایی مانند نرم شدن پوسته بذر یا فعالیت آنزیم‌های ضروری را تحت‌تأثیر قرار دهند (Walck & Hidayati, 2022). مطالعات انجام‌شده روی گونه‌های بومی مانند زیره سیاه نشان داده است که نیاز به دوره‌های سرمایی طولانی برای شکستن خواب بذر، یکی از چالش‌های اساسی در کشت و اهلی‌سازی این گونه‌ها است (Saeidnejad et al., 2013). این یافته‌ها تأیید می‌کنند که تغییرات اقلیمی و افزایش دمای زمستان می‌تواند به‌طور مستقیم موفقیت جوانه‌زنی و در نتیجه سبز شدن گونه‌هایی با نیازهای سرمایی بالا را در بوم‌نظام‌های طبیعی و کشاورزی کاهش دهد. از سوی دیگر، خشکسالی یا بارندگی بیش‌ازحد می‌تواند الگوی رطوبت خاک را تغییر داده و فرآیندهای مربوط به خواب بذر را مختل کند (Pritchard et al., 2022). تغییرات در میزان و توزیع رطوبت خاک ممکن است منجر

- نشاء کاری گیاهان زراعی: نشاء کاری به عنوان روشی مؤثر برای سازگاری با تغییرات اقلیمی، با کاهش مدت زمان حضور گیاه در مزرعه، ریسک تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی و گرما را کاهش می‌دهد (Semida et al., 2017). این روش با بهبود یکنواختی سبز شدن و بهره‌وری مصرف آب، امکان زمان‌بندی انعطاف‌پذیر کاشت و مدیریت بهتر دوره رشد را در مواجهه با نوسانات اقلیمی فراهم می‌کند (Khajeh-Hosseini, 2016; Hussain et al., 2024).

- مدیریت آبیاری و تغذیه گیاه: استفاده از آبیاری قطره‌ای یا زیرسطحی و جمع‌آوری آب باران می‌تواند از کاهش تولید بذر در نتیجه تغییرات اقلیمی جلوگیری نموده و بهره‌وری منابع آبی را بهبود بخشد (Kumar et al., 2024). اتخاذ شیوه‌های مدیریت تغذیه هوشمند مبتنی بر اقلیم، مانند کوددهی متعادل (Brouder & Volenec, 2008)، مکمل سیلیکون (Irfan et al., 2023)، کودهای زیستی (Rocha et al., 2019) و ترسیب کربن (Elbasiouny et al., 2023) می‌تواند به طور قابل توجهی انعطاف‌پذیری گیاه را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش و تلفات بذر را کاهش دهد.

- بهبود انبارداری و فرآوری بذر: برای حفظ کیفیت بذرها در برابر تغییرات اقلیمی، استفاده از خشک‌کن‌های هوشمند و انبارهای مجهز به حسگرهای دما و رطوبت ضروری است (Bakhtavar & Afzal, 2020). بسته‌بندی‌های چندلایه مقاوم و جاذب رطوبت، همراه با فناوری نانو برای تنظیم شرایط داخلی بسته‌ها، کیفیت و ماندگاری بذرها را تضمین می‌کند (Baraz & Gholdareh, 2017). همچنین، استفاده از روش‌های شیمیایی و زیستی مانند قارچ‌کش‌ها و عوامل کنترل‌کننده بیماری‌ها، خطر آلودگی‌های میکروبی و قارچی را کاهش می‌دهد (Kumar et al., 2024).

- استفاده از فناوری‌های دیجیتال و داده‌های بزرگ: فناوری‌های دیجیتال مانند حسگرهای هوشمند، پهپادها و مدل‌های شبیه‌سازی پیشرفته می‌توانند در مدیریت بهتر فرآیندهای تولید بذر و کاهش تأثیرات تغییرات اقلیمی نقش داشته باشند. این

جغرافیایی یا ارتفاع می‌تواند تنش‌های غیرزیستی را کاهش دهد (Hampton et al., 2016). این اقدام نیازمند مطالعات دقیق در زمینه اقلیم، خاک و دسترسی به منابع آبی است.

- اصلاح و انتخاب ارقام مقاوم به تغییرات اقلیمی: اصلاح و معرفی ارقام مقاوم به تغییرات اقلیمی راهبردی اساسی برای مقابله با اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر تولید بذر است. با استفاده از منابع ژنتیکی غنی مانند ژرم‌پلاسماهای بومی و وحشی و فناوری‌های پیشرفته مانند ویرایش ژنوم^۱، می‌توان ویژگی‌هایی مانند مقاومت به خشکی، شوری و گرما را تقویت کرد (Abdelraheem et al., 2019; Joshi et al., 2023). ادغام روش‌های کلاسیک اصلاح نباتات با تکنیک‌های مولکولی مانند نشانگرهای ژنتیکی می‌تواند سرعت و دقت اصلاح را افزایش دهد (Ahmad et al., 2017). استفاده از ابزارهای مدرن مانند مدل‌سازی صفات پیچیده و تحلیل داده‌های بزرگ نیز امکان بهبود تحمل چندگانه تنش‌های زیستی و غیرزیستی را فراهم می‌کند (Lakshmanan et al., 2021; Medina et al., 2016). همچنین اصلاح نباتات تکاملی^۲ که به عنوان یک رویکرد نوین و مؤثر در سازگاری با تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود، با ایجاد جمعیت‌های ژنتیکی متنوع که به طور طبیعی در طی نسل‌ها تحت تأثیر انتخاب محیطی قرار می‌گیرند، تاب‌آوری گیاهان را در برابر تغییرات اقلیمی و تنش‌های محیطی افزایش داده و پایداری عملکرد آن‌ها را در شرایط مختلف بهبود می‌بخشد (Ceccarelli & Grando, 2020).

- مدیریت زمان و روش کاشت: با تنظیم زمان کاشت بر اساس پیش‌بینی‌های هواشناسی و مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه، می‌توان تأثیر تنش‌های اقلیمی را به حداقل رساند (Hatfield & Prueger, 2015). همچنین روش‌هایی مانند کاشت مستقیم و کاهش خاک‌ورزی می‌توانند به حفظ رطوبت خاک و کاهش آسیب‌های ناشی از خشکی کمک کنند (Kassam et al., 2014). روش‌های پرایمینگ بذر، مانند هیدروپرایمینگ و بیوپرایمینگ نیز تاب‌آوری بذر را در برابر تنش‌های غیرزیستی مانند خشکسالی افزایش می‌دهد و جوانه‌زنی و عملکرد کلی محصول را بهبود می‌بخشد (Rawal et al., 2024).

1- Genome editing
2- Evolutionary plant breeding

بومی و حفاظت از زیستگاه‌ها به حفظ تعادل بوم‌نظام‌ها کمک می‌کند (Vitt et al., 2022).

- مهاجرت کمکی گونه‌ها: در مواردی که تغییرات اقلیمی بسیار سریع است و گونه‌ها نمی‌توانند به‌طور طبیعی به مناطق مناسب مهاجرت کنند، انتقال هدفمند بذر یا گیاهان به مناطق جدیدتر می‌تواند به بقای آن‌ها کمک کند (Hampton et al., 2016).

- پایش مداوم و مدیریت تطبیقی: پایش مداوم تغییرات اقلیمی و پاسخ‌های بوم‌نظام‌ها به این تغییرات، امکان ارزیابی اثربخشی راهبردهای اجرا شده و اصلاح آن‌ها را فراهم می‌کند (Chen et al., 2023).

نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی چالشی جدی برای تولید بذر و امنیت غذایی است که پایداری بوم‌نظام‌های کشاورزی و طبیعی را تهدید می‌کند. تأثیرات آن، از کاهش عملکرد و کیفیت بذر در بوم‌نظام‌های کشاورزی گرفته تا اختلال در تنوع زیستی و پراکنش گونه‌ها در بوم‌نظام‌های طبیعی، نیازمند توجه فوری است. با این حال، این چالش‌ها فرصتی نیز برای بازنگری در شیوه‌های مدیریت بذر و بهره‌گیری از نوآوری‌های علمی فراهم می‌آورند.

راهبردهای سازگاری نظیر انتقال مکان‌های تولید بذر، اصلاح و انتخاب ارقام مقاوم، بهبود مدیریت آب و تغذیه و استفاده از فناوری‌های دیجیتال می‌تواند به تقویت تاب‌آوری بوم‌نظام‌های کشاورزی کمک کند. در بوم‌نظام‌های طبیعی نیز مدیریت منابع بذر، حفاظت از بانک‌های بذر طبیعی و تسهیل مهاجرت گونه‌ها از اقدامات کلیدی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم بر تنوع زیستی است. در نهایت، هم‌افزایی میان سیاست‌گذاران، پژوهشگران، کشاورزان و جوامع محلی برای طراحی و اجرای راه‌حل‌های پایدار ضروری است. تقویت آگاهی عمومی و تأکید بر برنامه‌های آموزشی نیز می‌تواند نقش مهمی در مقابله با تهدیدات اقلیمی ایفا کند. حرکت به سوی نظام‌های پایدار و انعطاف‌پذیر، تضمینی برای تولید بذر و امنیت غذایی در آینده‌ای با اقلیم متغیر خواهد بود.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در رابطه با نگارش و یا انتشار این مقاله ندارند.

ابزارها امکان پایش مستمر شرایط محیطی و تصمیم‌گیری دقیق‌تر برای مدیریت تولید بذر را فراهم می‌کنند (Singh et al., 2026).

- آموزش و توانمندسازی کشاورزان: آموزش کشاورزان و توانمندسازی آن‌ها برای استفاده از راهبردهای جدید یکی از پیش‌نیازهای اساسی موفقیت در سازگاری با تغییرات اقلیمی است. ایجاد برنامه‌های آموزشی، ارائه مشاوره فنی و ترویج روش‌های نوین کشاورزی می‌تواند به ارتقای دانش و مهارت کشاورزان در مقابله با تغییرات اقلیمی کمک کند (Ramadas et al., 2018).

- سیاست‌گذاری و حمایت‌های دولتی: دولت‌ها می‌توانند با تدوین سیاست‌های مناسب و ارائه حمایت‌های مالی و فنی، زمینه را برای سازگاری با تغییرات اقلیمی فراهم کنند. این حمایت‌ها شامل ارائه تسهیلات برای خرید تجهیزات مدرن، توسعه زیرساخت‌های ذخیره‌سازی و حمایت از تحقیقات مرتبط با تغییرات اقلیمی و کشاورزی پایدار است (OECD, 2020).

راهبردهای بوم‌نظام‌های طبیعی

- مدیریت و تنوع‌بخشی منابع بذر: برای افزایش تاب‌آوری جمعیت‌های گیاهی در برابر تغییرات اقلیمی، جمع‌آوری بذر از جمعیت‌های متنوع یک گونه در یک منطقه پیشنهاد می‌شود. این رویکرد به حفظ تنوع ژنتیکی و افزایش احتمال سازگاری با شرایط محیطی جدید کمک می‌کند (Bucharova et al., 2019). - احیای بوم‌نظام با بذرهای سازگار با اقلیم آینده: استفاده از بذر گیاهانی که در شرایط آب و هوایی شبیه به آینده پیش‌بینی شده رشد می‌کنند، می‌تواند موفقیت پروژه‌های احیا را افزایش دهد. این رویکرد با شناسایی اکوتیپ‌ها یا جمعیت‌های مقاوم به تغییرات اقلیمی امکان‌پذیر است (Vitt et al., 2022).

- حفاظت از بانک‌های بذر طبیعی و ایجاد بانک‌های بذر مصنوعی: حفاظت از زیستگاه‌های طبیعی و ایجاد بانک‌های بذر برای ذخیره‌سازی بذر گونه‌های مختلف، نقش مهمی در حفظ تنوع ژنتیکی ایفا می‌کند. این رویکرد به‌ویژه برای گونه‌های در معرض خطر انقراض، اهمیت بیشتری دارد (Wang & Morgenstern, 2009).

- تسهیل پراکنش طبیعی بذر: حمایت از سازوکارهای طبیعی پراکنش بذر مانند باد، آب و حیوانات از طریق ایجاد راهروهای

References

- Abdelraheem, A., Esmacili, N., O'Connell, M., & Zhang, J. (2019). Progress and perspective on drought and salt stress tolerance in cotton. *Industrial Crops and Products*, 130, 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.070>
- Afzal, I., Shabir, R., & Rauf, S. (2019). Seed production technologies of some major field crops. In M. Hasanuzzaman (Ed.), *Agronomic Crops* (pp. 655-678). Springer.
- Ahmad, F., Akram, A., Farman, K., Abbas, T., Bibi, A., Khalid, S., & Waseem, M. (2017). Molecular markers and marker-assisted plant breeding: Current status and their applications in agricultural development. *Journal of Environmental and Agricultural Sciences*, 11, 35-50.
- Ahmed, S., & Stepp, J. (2016). Beyond yields: Climate change effects on specialty crop quality and agroecological management. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 4, 000092. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000092>
- Ali, H., Fatima, Z., & Ahmad, S. (2019). Fundamentals of seed production and processing of agronomic crops. In M. Hasanuzzaman (Ed.), *Agronomic crops* (pp. 623-653). Springer.
- Altieri, M., Nicholls, C., Henao, A., & Lana, M. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 869-890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Bailly, C., & Roldan, M. (2023). Impact of climate perturbations on seeds and seed quality for global agriculture. *The Biochemical Journal*, 480(3), 177-196. <https://doi.org/10.1042/BCJ20220246>
- Bakhtavar, M.A., & Afzal, I. (2020). Climate smart Dry Chain Technology for safe storage of quinoa seeds. *Sci. Rep.*, 10, 12554. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69190-w>
- Baraz, F., & Gholdareh, E. (2017). Effect of nano packing and aluminium on deterioration of soybean and corn seed in different storage conditions [Conference abstract]. *Journal of Food and Dairy Technology*, 5(3), Article 34. <https://doi.org/10.4172/2472-0542-C1-008>
- Bartomeus, I., Ascher, J., Wagner, D., Danforth, B., Colla, S., Kornbluth, S., & Winfree, R. (2011). Climate-associated phenological advances in bee pollinators and bee-pollinated plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 20645-20649. <https://doi.org/10.1073/pnas.1115559108>
- Bathiany, S., Belleflamme, A., Zohbi, J., Ney, P., Goergen, K., & Rechid, D. (2023). Increasing interannual climate variability during crop flowering in Europe. *Environmental Research Letters*, 18(4), 044037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc87e>
- Begum, N., Wang, L., & Zhao, T. (2022). Effects of temperature regimes on seed germination and early growth of different soybean cultivars. *International Journal of Applied and Experimental Biology*, 1(2), 75-85. <https://doi.org/10.56612/ijaeb.v1i2.15>
- Bellon, M., Hodson, D., & Hellin, J. (2011). Assessing the vulnerability of traditional maize seed systems in Mexico to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 13432-13437. <https://doi.org/10.1073/pnas.1103373108>
- Boroumand Rezazadeh, E., Nezami, A., Khorasani, Z., & Khajeh Hosseini, M. (2023). Response of Cumin (*Cuminum cyminum* L.) ecotypes to drought stress during germination stage at low temperature. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 21(1), 1-10. <https://doi.org/10.22067/jcesc.2020.38273> [In Persian]
- Brouder, S., & Volenec, J. (2008). Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 705-724. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01136.x>
- Bucharova, A., Bossdorf, O., Hölzel, N., Kollmann, J., Prasse, R., & Durka, W. (2018). Mix and match: regional admixture provenancing strikes a balance among different seed-sourcing strategies for ecological restoration. *Conservation Genetics*, 20, 7-17. <https://doi.org/10.1007/s10592-018-1067-6>
- Calleja-Cabrera, J., Boter, M., Oñate-Sánchez, L., & Pernas, M. (2020). Root growth adaptation to climate change in crops. *Frontiers in Plant Science*, 11, 544. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00544>
- Ceccarelli, S., & Grando, S. (2020). Evolutionary plant breeding as a response to the complexity of climate change. *iScience*, 23(12), 101815. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101815>
- Chen, S., Liu, W., Yan, Z., Morel, J., Parsons, D., & Du, T. (2023). Adaptation strategy can ensure seed and food production with improving water and nitrogen use efficiency under climate change. *Earth's Future*, 11(2), e2022EF002879. <https://doi.org/10.1029/2022EF002879>
- Cheng, Y. J., Deng, X. P., Kwak, S. S., Chen, W., & Eneji, A. E. (2013). Enhanced tolerance of transgenic potato plants expressing choline oxidase in chloroplasts against water stress. *Botanical Studies*, 54, 30. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-54-30>
- Cheshmeh-Sefidi, R., Khajeh-Hosseini, M., & Jalali-Honarmand, S. (2022, November 2-4). *Investigation on storage potential of camelina (Camelina sativa L.)* [Conference presentation]. ISTA Seed Symposium, Athens, Greece.

- Confalone, A. E., Vilatte, C. A., Aguas, L. M., Barufaldi, M. F., Eseiza, M. F., & Ponce, G. D. (2017). Biophysical effect of climate change on summer crops. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 51(2), 1-11. <https://www.cjasience.com/index.php/CJAS/article/view/717>
- Craufurd, P., & Wheeler, T. (2009). Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany*, 60(9), 2529-2539. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp196>
- Descamps, C., Boubnan, N., Jacquemart, A., & Quinet, M. (2021). Growing and flowering in a changing climate: Effects of higher temperatures and drought stress on the bee-pollinated species *Impatiens glandulifera* Royle. *Plants*, 10(5), 988. <https://doi.org/10.3390/plants10050988>
- Descamps, C., Quinet, M., Baijot, A., & Jacquemart, A. L. (2018). Temperature and water stress affect plant-pollinator interactions in *Borago officinalis* (Boraginaceae). *Ecology and Evolution*, 8(6), 3443-3456. <https://doi.org/10.1002/ece3.3914>
- Donoso, I., Fricke, E., Hervías-Parejo, S., Rogers, H., & Traveset, A. (2022). Drivers of ecological and evolutionary disruptions in the seed dispersal process: Research trends and biases. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 794481. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.794481>
- Dubey, R., Pathak, H., Chakrabarti, B., Singh, S., Gupta, D., & Harit, R. (2020). Impact of terminal heat stress on wheat yield in India and options for adaptation. *Agricultural Systems*, 181, 102826. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102826>
- Elbasiouny, H., El-Ramady, H., Elbehiry, F., Rajput, V., Minkina, T., & Mandzhieva, S. (2022). Plant nutrition under climate change and soil carbon sequestration. *Sustainability*, 14(2), 914. <https://doi.org/10.3390/su14020914>
- Escudero, V., Fuenzalida, M., Rezende, E., González-Guerrero, M., & Roschztardt, H. (2024). Perspectives on embryo maturation and seed quality in a global climate change scenario. *Journal of Experimental Botany*, 75, eae154. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae154>
- Fenner, M., & Thompson, K. (2005). *The Ecology of Seeds*. Cambridge University Press.
- Fuhrer, J. (2003). Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 97, 1-20. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00125-7)
- Gezon, Z., Inouye, D., & Irwin, R. (2016). Phenological change in a spring ephemeral: Implications for pollination and plant reproduction. *Global Change Biology*, 22(5), 1779-1793. <https://doi.org/10.1111/gcb.13209>
- Hampton, J., Boelt, B., Rolston, M., & Chastain, T. (2012). Effects of elevated CO₂ and temperature on seed quality. *The Journal of Agricultural Science*, 151(2), 154-162. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000263>
- Hampton, J., Conner, A., Boelt, B., Chastain, T., & Rolston, P. (2016). Climate change: Seed production and options for adaptation. *Agriculture*, 6(3), 33. <https://doi.org/10.3390/agriculture6030033>
- Han, H., Su, Z., Zhang, K., & Bai, Y. (2024). Impact of extreme weather events on ecosystem services. *Applied Ecology & Environmental Research*, 22(4), 3577-3602. https://doi.org/10.15666/aeer/2204_35773602
- Harper, G., & Morris, L. (2007). Flowering and Climate Change: Part II. *Sibbaldia: The International Journal of Botanic Garden Horticulture*, 5, 25-42. <https://doi.org/10.24823/Sibbaldia.2007.4>
- Hatfield, J., & Prueger, J. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- He, Y., Xiong, W., Hu, P., Huang, D., Feurtado, J.A., Zhang, T., Hao, C., DePauw, R., Zheng, B., Hoogenboom, G., & Dixon, L.E. (2024). Climate change enhances stability of wheat-flowering-date. *Science of the Total Environment*, 917, 170305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170305>
- Hu, G., He, X., Wang, N., Liu, J., & Zhou, Z. (2024). The impact of water potential and temperature on native species' capability for seed germination in the Loess Plateau region, China. *Plants*, 13(5), 693. <https://doi.org/10.3390/plants13050693>
- Huang, E., Chen, Y., Fang, M., Zheng, Y., & Yu, S. (2021). Environmental drivers of plant distributions at global and regional scales. *Global Ecology and Biogeography*, 30(3), 697-709. <https://doi.org/10.1111/geb.13251>
- Hull, S. I., Swanepoel, P. A., & Botes, W. C. (2024). A critical review of the factors influencing pre-harvest sprouting of wheat. *Agronomy Journal*, 116(6), 3354-3367. <https://doi.org/10.1002/agj2.21701>
- Hussain, K., Hakki, E. E., Ilyas, A., Gezgin, S., & Kamran, M. A. (2024). Role of nitrogen fertilization and sowing date in productivity and climate change adaptation forecast in rice-wheat cropping system. *Nitrogen*, 5(4), 977-991. <https://doi.org/10.3390/nitrogen5040062>
- Iloh, A. C., Omatta, G., Ogbadu, G. H., & Onyenekwe, P. C. (2014). Effects of elevated temperature on seed germination and seedling growth on three cereal crops in Nigeria. *Scientific Research and Essays*, 9(18), 806-813. <https://doi.org/10.5897/SRE2014.5968>

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023).** *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero, Eds.). IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Irfan, M., Maqsood, M., Rehman, H., Mahboob, W., Sarwar, N., Hafeez, O., Hussain, S., Ercişli, S., Akhtar, M., & Aziz, T. (2023).** Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: Overview and prospects. *Water*, 15(4), 739. <https://doi.org/10.3390/w15040739>
- Jagadish, S. K., Bahuguna, R. N., Djanaguiraman, M., Gamuyao, R., Prasad, P. V., & Craufurd, P. Q. (2016).** Implications of high temperature and elevated CO₂ on flowering time in plants. *Frontiers in Plant Science*, 7, 913. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00913>
- Joshi, A., Yang, S., Song, H., Min, J., & Lee, J. (2023).** Genetic databases and gene editing tools for enhancing crop resistance against abiotic stress. *Biology*, 12(11), 1400. <https://doi.org/10.3390/biology12111400>
- Kassam, A., Derpsch, R., & Friedrich, T. (2014).** Global achievements in soil and water conservation: The case of Conservation Agriculture. *International Soil and Water Conservation Research*, 2, 5-13. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30009-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30009-5)
- Khajeh-Hosseini, M. (2016).** Transplanting cultivation: An approach to saving water use in agriculture. In A. Koocheki & M. Khajeh-Hosseini (Eds.), *Low-water agriculture in Iran: Strategies and applications*. Jahad-e-Daneshgahi Publications. [In Persian]
- Khajeh-Hosseini, M., Cheshmi, M., Fallahpour, F., Mamarabadi, M., Mazaheri Tehrani, M., & Sanaei Nejad, S. H. (2022, November 2-4).** *Effect of climatic and farm management factors on the quality and nutritional value of produced wheat seeds* [Conference presentation]. ISTA Seed Symposium, Athens, Greece.
- Khan, A. Z., Imran, Muhammad, A., Khalil, A., Gul, H., Akbar, H., & Wahab, S. (2016).** Impact of fertilizer priming on seed germination behavior and vigor of maize. *Pure and Applied Biology*, 5(4), 744-751. <https://doi.org/10.19045/bspab.2016.50093>
- Kumar, M., Boruah, A., Sonia, H., & Padha, K. (2024).** Building agricultural resilience: Strategies for climate change adaptation. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(11), 561-568. <https://doi.org/10.9734/ijeccc/2024/v14i114568>
- Luo, N., Mueller, N., Zhang, Y., Feng, P., Huang, S., Liu, D.L., Yu, Y., Wang, X., Wang, P., & Meng, Q. (2023).** Short-term extreme heat at flowering amplifies the impacts of climate change on maize production. *Environmental Research Letters*, 18(8), 084021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ace7e3>
- Maity, A., Paul, D., Lamichaney, A., Sarkar, A., Babbar, N., Mandal, N., Dutta, S., Maity, P.P., & Chakrabarty, S.K. (2023).** Climate change impacts on seed production and quality: Current knowledge, implications, and mitigation strategies. *Seed Science and Technology*, 51(1), 7-38. <https://doi.org/10.15258/sst.2023.51.1.07>
- Majdi, M. (2024).** *Effect of heat stress on pollen development and seed set in tomato (Solanum lycopersicum)*. [Doctoral dissertation, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad]. [In Persian]
- Marcinkowski, P., & Piniewski, M. (2018).** Effect of climate change on sowing and harvest dates of spring barley and maize in Poland. *International Agrophysics*, 32, 265-271. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0015>
- Mares, D.J., & Mrva, K. (2014).** Wheat grain preharvest sprouting and late maturity alpha-amylase. *Planta*, 240, 1167-1178. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2172-5>
- Medina, C., Kaur, H., Ray, I., & Yu, L. (2021).** Strategies to increase prediction accuracy in genomic selection of complex traits in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Cells*, 10(12), 3372. <https://doi.org/10.3390/cells10123372>
- Lakshmanan, M., Cheung, C. Y. M., Mohanty, B., & Lee, D.-Y. (2016).** Modeling rice metabolism: From elucidating environmental effects on cellular phenotype to guiding crop improvement. *Frontiers in Plant Science*, 7, Article 1795. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01795>
- Merritt, D. M., & Wohl, E. E. (2006).** Plant dispersal along rivers fragmented by dams. *River Research and Applications*, 22(1), 1-26. <https://doi.org/10.1002/rra.890>
- Muhaisen, N. K., Khayyun, T. S., Al Mukhtar, M., & Hassan, W. H. (2024).** Forecasting changes in precipitation and temperatures of a regional watershed in Northern Iraq using LARS-WG model. *Open Engineering*, 14(1), 20220567. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0567>
- Mukheef, R. A., Hassan, W. H., & Alquzweeni, S. (2024).** Projections of temperature and precipitation trends using CMhyd under CMIP6 scenarios: A case study of Iraq's Middle and West. *Atmospheric Research*, 306, 107470. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107470>
- Muleke, A., Harrison, M.T., De Voil, P., Hunt, I., Liu, K., Yanotti, M., & Eisner, R. (2022).** Earlier crop flowering caused by global warming alleviated by irrigation. *Environmental Research Letters*, 17(4), 044032.
- Muller-Landau, H. C., Dalling, J. W., Harms, K. E., Wright, S. J., Condit, R., Hubbell, S. P., Foster, R. B., & Muller-Landau, H. (2004).** Seed dispersal and density-dependent seed and seedling survival in *Trichilia tuberculata* and *Miconia argentea*. In E. C. Losos & E. G. Leigh Jr. (Eds.), *Tropical Forest diversity and dynamism: Findings from a large-scale plot network* (pp. 340-362). University of Chicago Press.

- Naik, A., Jogi, M., & Shreenivas, B. (2024).** Assessing the impact of climate change on global crop yields and farming practices. *Archives of Current Research International*, 24, 696-712. <https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i5743>
- Nouri, M., Homae, M., Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2017).** Towards shifting planting date as an adaptation practice for rainfed wheat response to climate change. *Agricultural Water Management*, 186, 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.004>
- Organization for Economic Co-operation and Development. (2023).** *Policies for agricultural adaptation to a changing climate*. OECD Publishing. https://www.oecd-ilibrary.org/policies-for-agricultural-adaptation-to-a-changing-climate_af245310-en.pdf
- Panqiang, Y., Yang, C., Sicheng, Y., Huiyi, Z., Mingyi, F., Hongqing, Z., Lin, T., Hao, Z., Yong, W., & Dan, Z. (2018).** The impact of two drying methods on the quality of high-moisture rice. In C. S. Adler, G. Opit, B. Fürstenau, C. Müller-Blenkle, P. Kern, F. H. Arthur, C. G. Athanassiou, R. Bartosik, J. Campbell, M. O. Carvalho, W. Chayaprasert, P. Fields, Z. Li, D. Maier, M. Nayak, E. Nukenine, D. Obeng-Ofori, T. Phillips, J. Riudavets, et al. (Eds.), *Proceedings of the 12th International Working Conference on Stored Product Protection (IWCSPP), Berlin, Germany, October 7–11, 2018* (Vol. 463, pp. 65–72). Julius Kühn-Institut. <https://doi.org/10.5073/jka.2018.463.019>
- Patwa, N., & Penning, B. W. (2020).** Environmental impact on cereal crop grain damage from pre-harvest sprouting and late maturity alpha-amylase. In R. Roychowdhury, S. Choudhury, M. Hasanuzzaman & S. Srivastava (Eds.), *Sustainable Agriculture in the Era of Climate Change* (pp. 23-41). Springer.
- Poudel, S., Vennam, R. R., Sankarapillai, L. V., Liu, J., Reddy, K. R., Wijewardane, N. K., Mukhtar, M. S., & Bheemanahalli, R. (2024).** Negative synergistic effects of drought and heat during flowering and seed setting in soybean. *Environmental and Experimental Botany*, 222, 105769. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105769>
- Pritchard, H. W., Serphen, S., Tsan, F. Y., Wen, B., Jaganathan, G. K., Calvi, G., Pence, V. C., Mattana, E., Ferraz, I. D. K., & Seal, C. E. (2022).** Regeneration in recalcitrant-seeded species and risks from climate change. In C. C. Baskin & J. M. Baskin (Eds.), *Plant regeneration from seeds* (pp. 259–273). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823731-1.00014-7>
- Querejeta, J., Ren, W., & Prieto, I. (2021).** Vertical decoupling of soil nutrients and water under climate warming reduces plant cumulative nutrient uptake, water use efficiency and productivity. *New Phytologist*, 230(4), 1378-1393. <https://doi.org/10.1111/nph.17258>
- Rae, E., & Bai, Y. (2022).** Effect of climate change on regeneration of plants from seeds in grasslands. In C. C. Baskin & J. M. Baskin (Eds.), *Plant regeneration from seeds* (pp. 87–99). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823731-1.00019-6>
- Raeesi, M., Zolfaghari, A. A., Kaboli, S. H., Rahimi, M., de Vente, J., & Eekhout, J. P. (2024).** Using quantile mapping and random forest for bias-correction of high-resolution reanalysis precipitation data and CMIP6 climate projections over Iran. *International Journal of Climatology*, 44(12), 4495-4514. <https://doi.org/10.1002/joc.8593>
- Ramadas, S., Kumar, A., Singh, S., & Kumar, S. (2018, July 28–August 2).** *Perception, yield sensitivity and adaptation strategies to climate change: Insights from wheat production in India* [Conference presentation]. International Conference of the International Association of Agricultural Economists, Vancouver, British Columbia, Canada.
- Rawal, J. S., Puspa, R. C., & Mandal, A. (2024).** A review on seed priming to combat climate variability in agriculture. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 9(3), 593-605. <https://doi.org/10.26832/24566632.2024.0903026>
- Rocha, I., Vosátka, M., Freitas, H., & Oliveira, R. (2019).** Growth and nutrition of cowpea (*Vigna unguiculata*) under water deficit as influenced by microbial inoculation via seed coating. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205(5), 447-459. <https://doi.org/10.1111/jac.12335>
- Saeidnejad, A. H., Khajeh-Hosseini, M., & Askarzadeh, M. A. (2013).** Breaking dormancy of seeds from eight populations of *Bunium persicum* (Apiaceae). *Seed Science and Technology*, 41(3), 452-457. <https://doi.org/10.15258/sst.2013.41.3.11>
- Scaven, V., & Rafferty, N. (2013).** Physiological effects of climate warming on flowering plants and insect pollinators and potential consequences for their interactions. *Current Zoology*, 59(3), 418-426. <https://doi.org/10.1093/czoolo/59.3.418>
- Semida, W. M., Abd El-Mageed, T. A., Mohamed, S. E., & El-Sawah, N. A. (2017).** Combined effect of deficit irrigation and foliar-applied salicylic acid on physiological responses, yield, and water-use efficiency of onion plants in saline calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(9), 1227-1239. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1264579>
- Shabana, A. I., Abdalla, G. E., & Farroh, K. Y. (2019).** Impact of certain safe treatments on growth, productivity, and protection against some insect pests of cowpea grown under thermal stress condition. *Journal of Plant Production*, 10(2), 193-203. <https://doi.org/10.21608/jpp.2019.36249>

- Shohaël, A., Ali, M., Yu, K., Hahn, E., & Paek, K. (2006). Effect of temperature on secondary metabolites production and antioxidant enzyme activities in *Eleutherococcus senticosus* somatic embryos. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 85, 219-228. <https://doi.org/10.1007/s11240-005-9075-x>
- Singh, K. S., Kaleel, I., Solanki, P. P., Swarnkar, N., Swarnkar, V., Chauhan, V., Nandeha, N., Wasifur, S., & Mandloi, M. (2026). Climate-smart agriculture: Strategies for enhancing productivity, resilience and sustainability. *Journal of Scientific Research and Reports*, 32(2), 576-587. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2026/v32i24007>
- Singh, C., Kamble, U. R., Gupta, V., Singh, G., Sheoran, S., Gupta, A., Tyagi, B. S., Kumar, P., Mishra, C. N., Krishannapa, G., Bishnoi, S. K., Sharma, A. K., Kumar, S., & Singh, G. P. (2021). Pre-harvest sprouting in wheat: current status and future prospects. *Journal of Cereal Research*, 13(S1). <https://doi.org/10.25174/2582-2675/2021/114484>
- Singh, R., Prasad, P., & Reddy, K. (2013). Impacts of changing climate and climate variability on seed production and seed industry. *Advances in Agronomy*, 118, 49-110. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405942-9.00002-5>
- Sloat, L., Davis, S., Gerber, J., Moore, F., Ray, D., West, P., & Mueller, N. (2020). Climate adaptation by crop migration. *Nature Communications*, 11(1), 1243. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15076-4>
- Sohn, S. I., Pandian, S., Kumar, T. S., Zoclanclounon, Y. A. B., Muthuramalingam, P., Shilpha, J., Satish, L., & Ramesh, M. (2021). Seed dormancy and pre-harvest sprouting in rice—an updated overview. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(21), 11804. <https://doi.org/10.3390/ijms222111804>
- Solbreck, C., & Knappe, J. (2017). Seed production and predation in a changing climate: new roles for resource and seed predator feedback? *Ecology*, 98(9), 2301-2311. <https://doi.org/10.1002/ecy.1941>
- Streck, N. (2005). Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. *Ciencia Rural*, 35, 730-740. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300041>
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>
- Usta, D. F. B., Teymouri, M., & Chatterjee, U. (2022). Assessment of temperature changes over Iran during the twenty-first century using CMIP6 models under SSP1-26, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 416. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09709-9>
- Vitt, P., Finch, J., Barak, R., Braum, A., Frischie, S., & Redlinski, I. (2022). Seed sourcing strategies for ecological restoration under climate change: A review of the current literature. *Frontiers in Conservation Science*, 3, 938110. <https://doi.org/10.3389/fcsc.2022.938110>
- Walck, J. L., & Hidayati, S. N. (2022). Plant regeneration from seeds in the temperate deciduous forest zone under a changing climate. In: *Plant Regeneration from Seeds*, (pp. 131-143). Academic Press.
- Walck, J. L., & Hidayati, S. N. (2022). Plant regeneration from seeds in the temperate deciduous forest zone under a changing climate. In *Plant regeneration from seeds* (pp. 131-143). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823731-1.00010-X>
- Wang, B., & Morgenstern, E. (2009). A strategy for seed management with climate change. *Forestry Chronicle*, 85, 39-42. <https://doi.org/10.5558/tfc85039-1>
- Weaver, S., & Mallinger, R. (2022). A specialist bee and its host plants experience phenological shifts at different rates in response to climate change. *Ecology*, e3658. <https://doi.org/10.1002/ecy.3658>
- Woo, D., Riley, W., & Wu, Y. (2020). More fertilizer and impoverished roots required for improving wheat yields and profits under climate change. *Field Crops Research*, 249, 107756. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107756>
- Yang, H., Gu, X., Ding, M., Lu, W., & Lu, D. (2018). Heat stress during grain filling affects activities of enzymes involved in grain protein and starch synthesis in waxy maize. *Scientific Reports*, 8(1), 15665. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33644-z>
- Zheng, S. H., Nakamoto, H., Yoshikawa, K., Furuya, T., & Fukuyama, M. (2002). Influences of high night temperature on flowering and pod setting in soybean. *Plant Production Science*, 5(3), 215-218. <https://doi.org/10.1626/pps.5.215>
- Zhou, L., Lu, Y., Zhang, Y., Zhang, C., Zhao, L., Yao, S., Sun, X., Chen, T., Zhu, Z., Zhao, Q., & Zhao, C. (2020). Characteristics of grain quality and starch fine structure of japonica rice kernels following pre harvest sprouting. *Journal of Cereal Science*, 95, 103023. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103023>