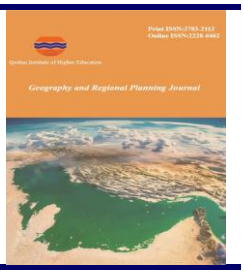
Iranian Association of Geopolitical

Geography and Regional Planning

ISSN (Print): 2783-2112 - ISSN (Online): 2228-6462

Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/



Abiotic Stresses, Seed Quality, and Seed Certification under Climate Change: An Integrated Framework for Resilient Seed Production

Parisa Sharifi[1], **Nima Khaledi**[2]

1. research assistant professor, seed and plant certification and registration research institute. Email: p-sharifi@areeo.ac.ir
2. seed and plant certification and registration research institute. Email: n_khaledi@areeo.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article history:
Received: August 27, 2026
Revised: September 30, 2026
Accepted: November 12, 2026
Published online: November 15, 2026

Keywords:
abiotic stresses
climate change
seed quality
seed certification

Abstract

Abiotic stresses are among the most important factors limiting the production of high-quality seeds under climate change conditions. They reduce final seed quality during seed formation, maturation, and storage. The consequences of these stresses include reductions in seed weight, germination capacity, seedling vigor, germination uniformity, membrane stability, and seed longevity. The main underlying mechanisms involve disruptions in water and hormonal balance, increased production of reactive oxygen species and oxidative stress, impaired transport of photosynthetic assimilates and grain filling, and alterations in the carbohydrate, protein, and lipid reserves of seeds. This review examines the relationships among the type, intensity, and timing of abiotic stresses; the physiological and biochemical responses of mother plants and seeds; seed quality indicators; and seed certification standards. Evidence indicates that the effects of stress on seed quality depend on the developmental stage at which stress occurs, genotype, stress intensity and duration, and management conditions. Therefore, interpreting seed responses based on a single indicator or developmental stage is insufficient. Recent strategies, including genetic improvement and genome editing, priming and biopriming, biological seed coating with plant growth-promoting microorganisms, nanopriming, precision water and soil management, and the application of biostimulants, are evaluated. These strategies have considerable potential to mitigate stress-induced damage and maintain the physiological quality of seeds; however, their effectiveness depends on the plant species, genotype, stress type, environmental conditions, and scale of implementation. Overall, seed production under climate change must move beyond an exclusive focus on quantitative yield toward an integrated approach that simultaneously ensures quality stability, compliance with certification standards, and adaptation to changing climatic conditions.

How to cite: sharifi, P. & khaledi, N. (2026). Abiotic Stresses, Seed Quality, and Seed Certification under Climate Change: An Integrated Framework for Resilient Seed Production. Geography and Regional Planning, 16(4),508-524. https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.604656.4567

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights
Publisher: Qeshm Institute of Higher Education
DOI: https://doi.org/10.22034/jgeoq.2026.604656.4567

Introduction

High-quality seed is a fundamental input for sustainable agriculture and food security because it combines physiological, genetic, physical, and sanitary attributes, including germination capacity, seed and seedling vigor, germination rate and uniformity, purity, health, and storability. However, climate change and the increasing frequency of drought, heat waves, salinity, heavy rainfall, waterlogging, and temperature fluctuations threaten seed production. These stresses can disrupt reproductive development, pollination, fertilization, embryo formation, seed filling, maturation, drying, and storage. By impairing water and assimilate transport, photosynthesis, source–sink balance, hormonal regulation, antioxidant defenses, membrane stability, and reserve accumulation, they may reduce seed weight, germination, vigor, and longevity. Seed certification assesses varietal identity, purity, physiological quality, and health against standards, yet conventional laboratory tests may not fully predict performance under stressful field conditions. Therefore, understanding how stress type, intensity, duration, and timing interact with crop genotype and management is essential. This review examines these relationships and evaluates genetic, biological, nanotechnological, and management-based strategies for maintaining seed quality and strengthening climate-resilient seed production.

Methodology

This study employed a systematic–analytical review approach. Relevant literature was retrieved from Web of Science, Scopus, PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar using keywords related to abiotic stresses, climate change, seed quality, germination, seed vigor, certification, priming, and biostimulants. Research articles, review papers, institutional reports, and international standards were selected based on relevance, methodological rigor, and contribution to understanding stress effects and mitigation strategies.

Results and Discussion

The findings indicate that drought, heat, salinity, waterlogging, and temperature fluctuations impair seed quality from reproductive development and seed formation to maturation, drying, and storage. Their effects vary with crop species, genotype, stress intensity and duration, developmental timing, maternal-plant condition, and management practices. Stress disrupts water and ion balance, photosynthesis, assimilate transport, hormonal regulation, antioxidant defenses, and reserve accumulation. Consequently, seed weight, germination capacity and speed, seedling vigor, emergence uniformity, membrane stability, and longevity may decline. Seed certification assesses varietal identity, purity, physiological quality, and health; however, laboratory tests may not adequately predict performance under stressful field conditions. Complementary indicators, including vigor, germination speed, emergence uniformity, and stress performance, provide a broader assessment. Mitigation strategies include tolerant-genotype selection, breeding, molecular markers, genome editing, priming, biopriming, biological seed coatings, nanopriming, biostimulants, and precision water and soil management. Their effectiveness depends on crop, genotype, stress type, environment, and application scale, while evidence remains limited to laboratory, greenhouse, or small-scale field studies. The review identifies the need to evaluate durability, field performance, cost, safety, and regulatory compatibility, and to integrate seed production, quality assessment, and certification in practice.

Conclusion

This Abiotic stresses challenge high-quality seed production under climate change, affecting the entire production cycle from reproductive development and seed formation to maturation, drying, and storage. Their impacts arise through disturbances in water and ion balance, photosynthesis, assimilate transport, hormonal regulation, oxidative balance, and reserve metabolism. Consequently, seed weight, germination capacity, seedling vigor, germination uniformity, membrane stability, and longevity may decline. The extent of damage depends on crop species, genotype, developmental stage, stress intensity and duration, maternal-plant condition, and management practices.

Therefore, no single stress indicator or response can adequately represent seed quality across different crops and environments. The review highlights that conventional seed-certification procedures, although used to assess varietal identity, purity, physiological quality, and health, may not fully predict seed performance under stressful field conditions. Complementary indicators, including vigor, germination speed, emergence uniformity, and stress performance, can strengthen quality assessment, provided that they are standardized and validated. Genetic improvement, tolerant-genotype selection, genome editing, seed priming and biopriming, biological coatings, nanopriming, biostimulants, and precision water and soil management offer promising mitigation strategies. Nevertheless, their effectiveness remains context-dependent, and available evidence is still limited to laboratory, greenhouse, or small-scale field studies. Their durability, field performance, cost, safety, and regulatory compatibility therefore require further evaluation. The proposed stress–quality–certification framework emphasizes that quality management should begin during production rather than being restricted to postharvest testing. Site and planting-date selection, water and nutrient management, genotype choice, stress control during critical stages, appropriate harvesting, and storage should be considered interconnected components of quality assurance. Under climate change, higher yield alone is insufficient; sustainable seed production requires coordination among breeding, production, quality control, and certification, supported by reproducible, field-relevant evidence and multi-environment evaluation. Strengthening these links can improve climate adaptation, seed-system resilience, agricultural sustainability, and long-term food security.

Ethical considerations

Following the principles of research ethics

The authors have observed the principles of ethics in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by all of them.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

First author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Second author: Preparation of samples, conducting experiments and collecting data, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, preparing a draft of the article

Ethical Considerations

The authors affirm that they have adhered to ethical research practices, avoiding plagiarism, misconduct, data fabrication or falsification, and have provided their consent for this article's publication.

Funding

This research was conducted without any financial support from Payam Noor University.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



فصلنامه جغرافیا و برنامه ریزی منطقه ای

شاپا چاپی: ۶۴۶۲- ۲۲۲۸ شاپا الکترونیکی: ۲۱۱۲ -۲۷۸۳

Homepage: https://www.jgeoqeshm.ir/

انجمن ژئوپلیتیک ایران

تنش‌های غیرزیستی، کیفیت و گواهی بذر در شرایط تغییر اقلیم: چارچوبی یکپارچه برای تولید بذر تاب‌آور

پریسا شریفی✉[۱]، نیما خالدی[۲]

۱. نویسنده مسئول. هیات علمی موسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال. یارانامه:p-sharifi@areeo.ac.ir

۲. هیات علمی موسسه تحقیقات ثبت و گواهی بذر و نهال. یارانامه:n_khaledi@areeo.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۲۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۲۴

کلیدواژه ها:

تنش‌های غیرزیستی

تغییر اقلیم

کیفیت بذر

گواهی بذر

چکیده

تنش‌های غیرزیستی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید بذر باکیفیت در شرایط تغییر اقلیم هستند و در مراحل تشکیل، رسیدگی و انبارمانی بذر، کیفیت نهایی آن را کاهش می‌دهند. پیامدهای این تنش‌ها شامل کاهش وزن بذر، قوه‌نامیه، بنیه گیاهچه، یکنواختی جوانه‌زنی، پایداری غشا و ماندگاری بذر است. سازوکارهای اصلی شامل برهم‌خوردن تعادل آب و هورمون‌ها، افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و تنش اکسیداتیو، اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی و پرشدن دانه، و تغییر در ذخایر کربوهیدراتی، پروتئینی و لیپیدی بذر می‌باشد در این مقاله مروری، ارتباط میان نوع، شدت و زمان وقوع تنش‌های غیرزیستی، پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه مادر و بذر، شاخص‌های کیفیت بذر و معیارهای گواهی بذر بررسی شده است. شواهد نشان می‌دهد اثر تنش بر کیفیت بذر به مرحله وقوع تنش، ژنوتیپ، شدت و مدت تنش و شرایط مدیریتی وابسته است؛ بنابراین تفسیر پاسخ بذر بر اساس یک شاخص یا مرحله واحد کافی نیست. راهبردهای نوین شامل اصلاح ژنتیکی و ویرایش ژنوم، پرایمینگ و بیوپرایمینگ، پوشش‌دهی زیستی بذر با میکروارگانیسم‌های محرک رشد، نانوپرایمینگ، مدیریت دقیق آب و خاک و کاربرد بیواستیمولانت‌ها ارزیابی شده‌اند. این راهبردها ظرفیت قابل‌توجهی برای کاهش آسیب‌های ناشی از تنش و حفظ کیفیت فیزیولوژیک بذر دارند؛ اما اثربخشی آن‌ها به گونه، ژنوتیپ، نوع تنش، شرایط محیطی و مقیاس اجرا وابسته است. در مجموع، تولید بذر در شرایط تغییر اقلیم باید از تمرکز صرف بر عملکرد کمی فاصله گرفته و به رویکردی یکپارچه حرکت کند که پایداری کیفیت، انطباق با معیارهای گواهی و سازگاری با شرایط اقلیمی متغیر را هم‌زمان تأمین نماید.

استناد: شریفی، پریسا و خالدی، نیما. (۱۴۰۵). تنش‌های غیرزیستی، کیفیت و گواهی بذر در شرایط تغییر اقلیم: چارچوبی یکپارچه برای تولید بذر تاب‌آور. جغرافیا و برنامه ریزی منطقه‌ای، ۱۶(۴)، ۵۰۸-۵۲۴. DOI: 10.22034/jgeoq.2026.604656.4567

ناشر: موسسه آموزش عالی قشم

© نویسندگان.

مقدمه

بذر باکیفیت یکی از بنیادی‌ترین نهاده‌های تولید است و نقشی اساسی در کشاورزی پایدار و امنیت غذایی دارد. استقرار سریع و یکنواخت گیاهچه، تراکم مطلوب بوته، کارایی مصرف آب و عناصر غذایی و پایداری عملکرد، تا حد زیادی به کیفیت فیزیولوژیکی، ژنتیکی، فیزیکی و بهداشتی بذر وابسته‌اند؛ کیفیت بذر مفهومی چندبعدی است که قوه‌نامیه، بنیه بذر و گیاهچه، سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی، خلوص فیزیکی و ژنتیکی، سلامت و قابلیت نگهداری را دربرمی‌گیرد (Bewley et al., 2013 ; ISTA, 2023). تغییر اقلیم و افزایش پدیده‌های حدی، از جمله خشکسالی، موج‌های گرما، شوری، بارندگی‌های شدید، غرقابی و نوسان دمایی، تولید بذر باکیفیت را با چالش‌های فراوانی مواجه کرده است. تنش‌های غیرزیستی می‌توانند در مراحل مختلف چرخه تولید بذر، از رشد زایشی و گل‌دهی گیاه مادر تا گرده‌افشانی، لقاح، تشکیل جنین، پرشدن دانه، رسیدگی فیزیولوژیک، خشک‌شدن و انبارمانی، اختلال ایجاد کنند(Machado et al., 2025;Sehgal et al., 2018)، از طریق کاهش جذب و انتقال آب، اختلال در فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی، برهم‌خوردن تعادل منبع–مخزن، افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و تغییر وضعیت هورمونی. این تغییرات می‌توانند پرشدن دانه، انباشت نشاسته و پروتئین‌های ذخیره‌ای، پایداری غشا و ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی را تغییر داده و در نهایت به کاهش وزن بذر، قوه‌نامیه، بنیه گیاهچه و ماندگاری بذر منجر شوند(Farooq et al., 2018; Paes de Melo et al., 2022). شرایط محیطی دوره تشکیل و رسیدگی بذر می‌تواند ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی بذرهای حاصل را نیز تغییر دهد؛ برای نمونه، خشکی یا گرمای شدید در دوره پرشدن دانه با کاهش انتقال مواد فتوسنتزی و کوتاه‌شدن این دوره، مقدار و ترکیب ذخایر بذر و در پی آن سرعت جوانه‌زنی، بنیه گیاهچه و تحمل اولیه بذر به تنش را تغییر می‌دهد؛ شدت و جهت این پاسخ‌ها در گونه‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف متفاوت است و باید با توجه به برهم‌کنش ژنوتیپ×محیط تفسیر شود(Sehgal et al., 2018; Nguyen et al., 2021).

فرایند گواهی بذر با هدف ارزیابی و تأیید هویت رقم، خلوص ژنتیکی و فیزیکی، کیفیت فیزیولوژیک و سلامت بذر، بر پایه استانداردها و آزمون‌های ملی و بین‌المللی انجام می‌شود(ISTA, 2023 ; OECD, 2022). بااین‌حال، معیارهای رسمی گواهی عمدتاً بر نتایج آزمون‌های استاندارد استوارند و ممکن است توان واقعی بذر برای جوانه‌زنی و استقرار در شرایط تنش‌زا را کامل نشان ندهند؛ بذری که در آزمون آزمایشگاهی حداقل معیارهای قوه‌نامیه و خلوص را کسب می‌کند، ممکن است در شرایط نامساعد مزرعه از نظر سرعت سبزشدن، یکنواختی استقرار و بنیه اولیه عملکرد متفاوتی داشته باشد. بنابراین، ارزیابی کیفیت بذر در شرایط تغییر اقلیم باید، در کنار آزمون‌های استاندارد، شاخص‌های مکملی نظیر بنیه، سرعت جوانه‌زنی، یکنواختی سبزشدن و عملکرد بذر تحت تنش را نیز دربرگیرد(Reed et al., 2022).

در سال‌های اخیر، راهکارهای گوناگونی برای کاهش آثار مخرب تنش‌های غیرزیستی توسعه یافته‌اند: اصلاح نباتات، گزینش ژنوتیپ‌های متحمل، نشانگرهای مولکولی و ویرایش ژنوم برای شناسایی و توسعه ارقام سازگارتر با خشکی، شوری، گرما و سایر تنش‌ها(Kumar et al., 2023)؛ و روش‌هایی مانند پرایمینگ و بیوپرایمینگ بذر، پوشش‌دهی زیستی، بیواستیمولانت‌ها و میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه که ممکن است با تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی، تعدیل پاسخ‌های هورمونی و بهبود جذب آب و عناصر غذایی، به استقرار بهتر گیاهچه کمک کنند(Colla et al., 2017). بااین‌حال، ارتباط میان شرایط تنش‌زا، کیفیت بذر و فرایند گواهی هنوز به‌صورت جامع تبیین نشده است؛ بیشتر پژوهش‌های موجود بر پاسخ گیاه مادر، عملکرد دانه یا تحمل گیاهچه متمرکزند، درحالی‌که نقش مرحله وقوع تنش، مسیرهای اثرگذاری و میزان انطباق بذر با معیارهای گواهی کمتر بررسی شده است؛ همچنین تعمیم اثربخشی روش‌هایی مانند بیوپرایمینگ، نانوپرایمینگ و ویرایش ژنوم به شرایط واقعی تولید هنوز محدود است، زیرا بخش عمده شواهد از آزمایش‌های آزمایشگاهی و مطالعات مزرعه‌ای با مقیاس محدود به‌دست آمده است(Westengen et al., 2023). بر این اساس، این مقاله مروری با هدف بررسی ارتباط میان تنش‌های غیرزیستی، کیفیت بذر و فرایند گواهی بذر تدوین شده است: نخست اثر تنش‌های مهم محیطی بر جوانه‌زنی، استقرار اولیه و مراحل مختلف تولید بذر بررسی می‌شود؛ سپس تغییرات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی مرتبط با کاهش کیفیت بذر و پیامدهای آن برای فرایند گواهی تحلیل می‌گردد؛ و در

نهایت ظرفیت و محدودیت راهبردهای ژنتیکی، زیستی، نانویی و مدیریتی برای تولید بذر باکیفیت و سازگارتر با تغییر اقلیم ارزیابی می‌شود.

روش پژوهش

این پژوهش به‌صورت یک مطالعه مروری نظام‌مند ـ تحلیلی انجام شد. برای گردآوری منابع، پایگاه‌های علمی معتبر از جمله Web of Science، Scopus، PubMed، ScienceDirect و Google Scholar با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌های مرتبط با تنش‌های غیرزیستی، تغییر اقلیم، کیفیت بذر، جوانه‌زنی، بنیه بذر، گواهی بذر، پرایمینگ، بیواستیمولانت‌ها و تولید بذر تاب‌آور جست‌وجو شدند. مقالات پژوهشی، مطالعات مروری، گزارش‌های سازمانی و استانداردهای ملی و بین‌المللی منتشرشده، با تأکید بر منابع جدید و مطالعات بنیادی، شناسایی و ارزیابی شدند. پس از حذف منابع تکراری و نامرتبط، مطالعات بر اساس ارتباط موضوعی، اعتبار روش‌شناختی و ارائه شواهد درباره اثر تنش‌های خشکی، گرما، شوری، غرقابی و نوسان دما بر مراحل تولید، کیفیت و گواهی بذر انتخاب شدند. داده‌های استخراج‌شده شامل نوع و زمان وقوع تنش، گونه و ژنوتیپ، شاخص‌های فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و مولکولی کیفیت بذر، معیارهای گواهی و راهبردهای کاهش آسیب بود. در نهایت، یافته‌ها به‌صورت مقایسه‌ای و تلفیقی تحلیل شدند تا ارتباط میان تنش‌های غیرزیستی، پاسخ گیاه مادر و بذر، شاخص‌های کیفیت و الزامات گواهی تبیین و چارچوبی یکپارچه برای تولید بذر تاب‌آور ارائه شود.

انواع تنش‌های غیرزیستی و اثرات آن‌ها بر جوانه‌زنی بذر

تنش‌های غیرزیستی مجموعه‌ای از عوامل نامساعد محیطی مانند خشکی، شوری، دماهای نامطلوب، غرقابی، سمیت عناصر غذایی، آلودگی به فلزات سنگین و تابش شدید را دربرمی‌گیرند که از طریق برهم‌زدن تعادل آب و یون‌ها، اختلال در فعالیت‌های متابولیکی، تنظیم هورمونی و کاهش پایداری غشا، جوانه‌زنی، سبزشدن و استقرار اولیه گیاهچه را تحت تأثیر قرار می‌دهند؛ شدت پاسخ بذر نیز به نوع، شدت و مدت تنش، مرحله رشد، اندازه و ترکیب ذخایر و ویژگی‌های ژنتیکی ژنوتیپ بستگی دارد(Jiang et al., 2021; Farooq et al., 2018). جوانه‌زنی با جذب آب آغاز می‌شود و از طریق ترمیم غشا، فعال‌شدن متابولیسم و آنزیم‌های هیدرولیتیک، تجزیه ذخایر و رشد محور جنینی ادامه می‌یابد؛ هرگونه اختلال در این مراحل زمان جوانه‌زنی را افزایش داده و درصد، سرعت و یکنواختی آن را کاهش می‌دهد. در شرایط تنش، محدودیت آب قابل‌دسترس، اختلال در تنفس و تعادل هورمونی و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن از مهم‌ترین عوامل محدودکننده این مسیر هستند(Nonogaki, 2019). باید میان کاهش قوه‌نامیه و تأخیر در جوانه‌زنی تمایز قائل شد؛ برای نمونه تنش اسمزی ممکن است ابتدا سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی را کاهش دهد بی‌آنکه توان جوانه‌زنی نهایی از بین برود. بنابراین، استفاده هم‌زمان از شاخص‌های جوانه‌زنی و رشد گیاهچه، از جمله درصد نهایی جوانه‌زنی، میانگین و سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن خشک گیاهچه و شاخص بنیه ارزیابی دقیق‌تری از پاسخ بذر به تنش فراهم می‌کند.

تنش دمایی

دما یکی از مهم‌ترین عوامل تنظیم‌کننده جوانه‌زنی است؛ هر گونه و ژنوتیپ دامنه دمایی مطلوبی (دمای پایه، بهینه و حداکثر) برای جوانه‌زنی دارد که خروج از آن باعث اختلال در فعالیت آنزیم‌ها، سیالیت غشا، تنفس، تعادل هورمونی و رشد محور جنینی می‌شود (Sharifi et al., 2022; Nonogaki, 2019). دمای بالا با افزایش بیش‌ازحد سیالیت غشا، آسیب به پروتئین‌ها و آنزیم‌های حساس و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن جوانه‌زنی را مختل می‌کند؛ نشت الکترولیت و آسیب اکسیداتیو ممکن است ترمیم غشا را محدود کنند و تغییر تعادل هورمونی (افزایش اسید آبسیزیک، تغییر پاسخ به جیبرلین‌ها) شروع جوانه‌زنی را به تأخیر بیندازد (Paes de Melo et al., 2022). دمای پایین، با کاهش سرعت واکنش‌های آنزیمی و فعالیت تنفسی، آبنوشی و تجزیه ذخایر را به تأخیر انداخته و رشد ریشه‌چه را محدود می‌کند؛ توانایی جوانه‌زنی در دمای پایین با حفظ پایداری غشا، ترکیب متعادل اسیدهای چرب و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی مرتبط است (Dhaliwal and Angeles-Shim, 2022). در سطح مولکولی، تنش گرما و سرما الگوی بیان ژن‌های پروتئین‌های شوک حرارتی، آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و ترمیم غشا را تغییر می‌دهند؛ ژنوتیپ‌های متحمل معمولاً با حفظ بهتر پایداری غشا و فعال‌سازی سریع‌تر سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، آسیب ناشی از دما را محدود می‌کنند (Dhaliwal and Angeles-Shim, 2022). از نظر مدیریتی، هیدروپرایمینگ، اسموپرایمینگ و برخی تیمارهای دمایی کنترل‌شده

می‌توانند زمان جوانه‌زنی و یکنواختی سبزشدن را بهبود بخشند، هرچند موفقیت آن‌ها به گونه، کیفیت اولیه بذر، روش پرایمینگ و شرایط پس از تیمار وابسته است (Gohari et al., 2025).

تنش خشکی

تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده جوانه‌زنی و استقرار اولیه گیاهچه، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، است. کاهش پتانسیل آب محیط نیروی محرک جذب آب را کاهش داده و ممکن است مانع رسیدن بذر به آستانه آبنوشی لازم برای فعالیت‌های متابولیکی شود، درنتیجه شروع جوانه‌زنی به تأخیر افتاده و درصد، سرعت و یکنواختی آن کاهش می‌یابد (Farooq et al., 2018). خشکی همچنین فعالیت آمیلازها، پروتئازها و لیپازها را کاهش داده و انتقال قندها، اسیدهای آمینه و چرب به محور جنینی را محدود می‌کند که می‌تواند به گیاهچه‌های کوتاه، ضعیف یا ناهنجار بینجامد (Batool et al., 2022). در سطح سلولی، خشکی با افزایش گونه‌های فعال اکسیژن همراه است و در صورت ناکافی بودن ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، به پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی و آسیب پروتئین‌ها منجر می‌شود؛ ژنوتیپ‌های متحمل با تقویت تنظیم اسمزی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی این آسیب را کاهش می‌دهند (Mohammadkhani and Sharifi, 2022). اسموپرایمینگ (با پلی‌اتیلن‌گلیکول یا نمک)، هیدروپرایمینگ، بیوپرایمینگ و زیست‌تحریک‌کننده‌ها می‌توانند شاخص‌های جوانه‌زنی تحت خشکی را بهبود بخشند، هرچند این اثرات به نوع ماده، غلظت، مدت تیمار و شدت تنش وابسته‌اند و نباید به‌صورت کلی تعمیم داده شوند (Gohari et al., 2025).

تنش شوری

شوری خاک و آب آبیاری از مهم‌ترین تنش‌های غیرزیستی محدودکننده جوانه‌زنی است، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با تبخیر زیاد و زهکشی محدود. شوری از دو مسیر اثر می‌گذارد: کاهش پتانسیل اسمزی محلول خاک که جذب آب را محدود می‌کند، و تجمع یون‌های سمی که تعادل یونی و تغذیه معدنی را مختل می‌سازند؛ شدت پاسخ به نوع و غلظت نمک، مدت مواجهه و حساسیت ژنوتیپ وابسته است (Fu and Yang, 2023). با تداوم یا افزایش شوری، تجمع سدیم و کلر فعالیت آنزیم‌ها، پایداری غشا و رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه را مختل کرده و به کاهش درصد و سرعت جوانه‌زنی، افزایش میانگین زمان جوانه‌زنی و افت شاخص بنیه می‌انجامد (Farooq et al., 2015). ژنوتیپ‌های متحمل با انباشت اسمولیت‌های سازگار، تنظیم انتخابی جذب و انتقال یون‌ها (انتقال سدیم به واکوئل، حفظ نسبت پتاسیم به سدیم) و فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، بخشی از آسیب شوری را کاهش می‌دهند (Singh et al., 2022). ارزیابی تحمل باید بر پایه مجموعه‌ای از شاخص‌ها (سرعت و درصد جوانه‌زنی، میانگین زمان جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه، شاخص بنیه) و نه فقط درصد نهایی جوانه‌زنی انجام شود؛ پرایمینگ بذر با عوامل اسمزی، نمک‌ها، تنظیم‌کننده‌های رشد یا میکروارگانیسم‌های محرک رشد می‌تواند جوانه‌زنی را در شرایط شوری بهبود بخشد، هرچند اثربخشی آن به نوع ماده، غلظت، مدت تیمار و شدت شوری وابسته است (Ahmad et al., 2021).

سمیت فلزات سنگین

فلزات سنگین و شبه‌فلزات (کادمیم، سرب، جیوه، و در برخی شرایط نیکل و آرسنیک) از آلاینده‌های مهم خاک‌های کشاورزی‌اند که خطر آن‌ها برای بذر و گیاهچه به غلظت، شکل شیمیایی، pH خاک، ماده آلی و زیست‌فراهمی وابسته است. این عناصر با اختلال در آبنوشی، آسیب به غشا، مهار آنزیم‌ها و برهم‌زدن تقسیم و طویل‌شدن سلولی، رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه را محدود کرده و درصد و سرعت جوانه‌زنی را کاهش می‌دهند؛ ریشه‌چه به دلیل تماس مستقیم‌تر با محلول خاک نخستین اندام آسیب‌دیده است (Girija et al., 2022). سمیت فلزات سنگین عمدتاً از طریق افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و تنش اکسیداتیو عمل می‌کند؛ ژنوتیپ‌های متحمل با اتصال فلزات به گلوتاتیون و فیتوکلاتین‌ها، محصورسازی در واکوئل و تقویت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آسیب سلولی را کاهش می‌دهند (Hasanuzzaman et al., 2020). مدیریت این تنش بر دو محور استوار است: کاهش زیست‌فراهمی فلز در خاک (مثلاً با بیوچار و زئولیت، با کارایی وابسته به pH، دوز و بافت خاک) و تقویت سیستم‌های دفاعی گیاه از طریق پرایمینگ و زیست‌تحریک‌کننده‌ها که باید پیش از توصیه گسترده در شرایط مزرعه‌ای اعتبارسنجی شوند (Girija et al., 2022). بهبود جوانه‌زنی لزوماً به معنای کاهش تجمع فلز در اندام‌های برداشت‌شونده نیست؛ بنابراین ارزیابی روش‌های مدیریتی باید غلظت فلز در بافت گیاهی و ریسک انتقال به زنجیره غذایی را نیز دربرگیرد.

تنش غرقابی

تنش غرقابی در پی اشباع طولانی‌مدت خاک ایجاد می‌شود و با محدود کردن تبادل گاز، غلظت اکسیژن اطراف بذر و ریشه را کاهش می‌دهد؛ شدت آن به مدت اشباع، دما و بافت خاک، عمق آب و مرحله رشد بستگی دارد. کاهش اکسیژن تنفس هوازی و تولید ATP را محدود کرده و بذر را به‌سوی متابولیسم تخمیری سوق می‌دهد؛ تجمع اتانول و اسیدهای آلی در تنش شدید یا طولانی به کاهش جوانه‌زنی و استقرار می‌انجامد (Pan et al., 2021). غرقابی همچنین ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک (احیایی‌ترشدن، تغییر شکل عناصر، جامعه میکروبی) را دگرگون کرده و جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم را مختل می‌کند (Rho et al., 2025). گیاهان متحمل با تشکیل آئرانشیم، توسعه ریشه‌های نابجا، تنظیم تنفس و تغییر بیان ژن‌های مرتبط با کمبود اکسیژن، و نیز تنظیم هورمونی (نقش اتیلن)، انتقال اکسیژن به بافت‌های داخلی را بهبود می‌بخشند (Geng et al., 2025). مدیریت این تنش به رویکردی تلفیقی شامل بهبود زهکشی، اصلاح فیزیکی خاک، تنظیم زمان و حجم آبیاری، انتخاب زمان کاشت و ارقام متحمل نیاز دارد؛ انتخاب رقم باید بر پایه ارزیابی چندمحیطی انجام شود، زیرا پاسخ به غرقابی به دما، بافت خاک، مرحله رشد و مدت اشباع وابسته است (Manik et al., 2019).

تأثیر تنش‌های غیرزیستی بر مراحل مختلف تولید بذر

تولید بذر فرایندی پیوسته و چندمرحله‌ای است که از تمایز اندام‌های زایشی و گل‌دهی آغاز شده و تا گرده‌افشانی، لقاح، تشکیل جنین، پرشدن دانه، رسیدگی، خشک‌شدن و انبارمانی ادامه می‌یابد؛ موفقیت این مراحل به وضعیت فیزیولوژیک گیاه، دسترسی به آب و عناصر غذایی، دما، تابش و سلامت اندام‌های منبع و مخزن وابسته است(Nonogaki, 2017). شدت اثرات به زمان وقوع تنش بستگی دارد: تنش کوتاه‌مدت در مرحله رویشی ممکن است پس از بهبود شرایط جبران شود، اما تنش در گل‌دهی، گرده‌افشانی، لقاح و پرشدن دانه اثر مستقیم‌تری بر تعداد، وزن و کیفیت فیزیولوژیک بذر دارد؛ پاسخ به تنش‌های ترکیبی (مانند گرما–خشکی یا شوری–دمای بالا) نیز لزوماً حاصل جمع اثرات منفرد نیست، چون برهم‌کنش میان آن‌ها می‌تواند پاسخ گیاه را تشدید، تعدیل یا دگرگون کند(Sehgal et al., 2018). تنش‌های محیطی در مراحل زایشی و پرشدن دانه، با کاهش فتوسنتز، اختلال در انتقال مواد پرورده و تغییرات هورمونی، تعداد بذر، وزن هزار بذر، درصد پرشدگی و قوه‌نامیه را کاهش داده و ترکیب شیمیایی و پایداری غشای بذر را نیز تغییر می‌دهند. شرایط محیطی گیاه مادری می‌تواند کیفیت بذر و عملکرد اولیه نسل بعد را از طریق اندازه بذر، ترکیب ذخایر، وضعیت هورمونی و پایداری غشا تحت تأثیر قرار دهد؛ بااین‌حال، به‌کارگیری اصطلاح "حافظه مادری" باید با احتیاط انجام شود، زیرا هر تغییر مشاهده‌شده در نسل بعد لزوماً نشان‌دهنده انتقال پایدار یک سازوکار وراثتی نیست و ممکن است تنها به تغییر ذخایر غذایی یا وضعیت فیزیولوژیک بذر مرتبط باشد(Vazquez-Ramirez et al., 2025).

اثر تنش بر تشکیل بذر و مراحل زایشی

گل‌دهی، گرده‌افشانی و لقاح از حساس‌ترین مراحل تولید بذر در برابر تنش‌اند. گرما، خشکی، شوری و غرقابی با کاهش رشد اندام‌های زایشی، زنده‌مانی دانه گرده و رشد لوله گرده و گاه اختلال در پذیرش کلاله، احتمال لقاح موفق را کاهش داده و پیامد آن معمولاً کاهش تعداد بذر در واحد سطح، افزایش بذرهای پوچ و ناهمگونی رشد بذر است. کاهش فتوسنتز و اختلال در انتقال مواد فتوسنتزی نیز منابع لازم برای رشد تخمدان و جنین را محدود می‌کند. در مناطقی که گل‌دهی و گرده‌افشانی با گرما یا خشکی هم‌زمان است، انتخاب تاریخ کاشت مناسب، ژنوتیپ‌های متحمل و مدیریت بهینه آب می‌تواند خطر کاهش تشکیل بذر را کاهش دهد، هرچند کارایی این راهکارها باید برای هر گونه و شرایط به‌طور جداگانه ارزیابی شود.

اثر تنش بر جوانه‌زنی و استقرار بذر

جوانه‌زنی نخستین مرحله‌ای است که کیفیت عملکردی بذر در آن آشکار می‌شود و نقش مهمی در استقرار بوته، یکنواختی مزرعه و توان رقابتی گیاهچه دارد. خشکی، شوری، دمای نامناسب، سمیت فلزات سنگین و غرقابی با محدود کردن جذب آب، آسیب به غشا، برهم‌زدن تعادل هورمونی، کاهش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده ذخایر و افزایش تنش اکسیداتیو، آغاز و تداوم جوانه‌زنی را مختل می‌کنند (Nonogaki, 2019). افزایش اسید آبسیزیک یا تغییر نسبت آن به جیبرلین می‌تواند در برخی شرایط آغاز رشد جنین را به تأخیر اندازد، هرچند این پاسخ به گونه، وضعیت خواب و شدت تنش بستگی دارد؛ کاهش فعالیت آلفاآمیلاز، پروتئازها و لیپازها نیز تأمین انرژی و مواد لازم برای رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه را محدود می‌کند (Farooq et al., 2018). تفاوت ژنوتیپ‌ها در

تحمل تنش طی جوانه‌زنی به پایداری غشا، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، تنظیم اسمزی، ترکیب ذخایر و سرعت فعال‌شدن مسیرهای متابولیکی وابسته است؛ غربالگری باید بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌ها (درصد و سرعت جوانه‌زنی، میانگین زمان، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه، وزن خشک گیاهچه، شاخص بنیه) و با گزارش شفاف روش محاسبه شاخص‌های تحمل انجام شود (Ahmed et al., 2025; Sedghi, 2025). پرایمینگ بذر (هیدرو، اسمو، هورمونی، شیمیایی، زیستی) می‌تواند با پیش‌فعال‌سازی متابولیسم، ترمیم غشا و تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی را بهبود بخشد، اما جایگزین کیفیت مطلوب بذر و مدیریت مناسب مزرعه نیست و اثربخشی آن به نوع تیمار، شدت تنش و شرایط پس از تیمار بستگی دارد (Chen and Arora, 2013).

اثر تنش بر پر شدن دانه

پرشدن دانه مرحله‌ای اساسی در تعیین اندازه، وزن و ترکیب شیمیایی بذر است که طی آن مواد فتوسنتزی از اندام‌های منبع به دانه در حال رشد منتقل شده و نوع و مقدار ذخایر (نشاسته، پروتئین، لیپید، عناصر معدنی) را تعیین می‌کند (Bewley et al., 2013). خشکی، گرما، شوری و تغذیه نامتعادل با کاهش سطح برگ فعال، بسته‌شدن روزنه‌ها، تخریب کلروفیل و کاهش فعالیت فتوسنتزی، عرضه مواد به دانه را محدود کرده و دوره پرشدن را کوتاه‌تر، تجمع ماده خشک را کندتر و وزن هزاردانه را کمتر می‌کنند و احتمال تشکیل بذرهای چروکیده یا ناقص را افزایش می‌دهند (Sehgal et al., 2018). تنش گرما در این دوره، افزون بر کاهش فتوسنتز، با آسیب به دستگاه فتوسنتزی و تغییر فعالیت آنزیم‌های سنتز نشاسته و پروتئین، ترکیب ذخایر بذر را تغییر می‌دهد؛ شدت و جهت این تغییرات به محصول، ژنوتیپ و زمان وقوع تنش وابسته است (Shi et al., 2024). در تنش شدید، انتقال مجدد کربوهیدرات‌های غیرساختاری از اندام‌های رویشی ممکن است سهم بیشتری در پرشدن دانه داشته باشد، هرچند ارائه درصدهای ثابت و عمومی بدون ذکر گونه و شرایط آزمایش از نظر علمی قابل دفاع نیست. مدیریت آبیاری و تغذیه، حفظ سطح برگ فعال، انتخاب ژنوتیپ متحمل و تنظیم زمان کاشت و برداشت از مهم‌ترین راهکارهای کاهش این آسیب‌ها هستند.

اثر تنش بر رسیدگی، خشک شدن و انبارمانی

رسیدگی فیزیولوژیک، خشک‌شدن و انبارمانی از مراحل مهم تعیین ماندگاری بذرند. تنش در اواخر فصل رشد با کاهش تجمع ذخایر، افزایش آسیب اکسیداتیو و تغییر پایداری غشا، کیفیت اولیه و قابلیت نگهداری بذر را کاهش می‌دهد. پس از برداشت، رطوبت و دمای انبار، اکسیژن، آسیب مکانیکی و کیفیت اولیه بذر سرعت زوال را تعیین می‌کنند؛ ازاین‌رو کاهش ماندگاری را نمی‌توان تنها به تنش‌های مزرعه‌ای نسبت داد، بلکه باید اثر متقابل شرایط تولید، زمان برداشت، خشک‌کردن، بسته‌بندی و انبارمانی را در نظر گرفت. افزایش نشت الکترولیت، پراکسیداسیون لیپیدها و کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز با افت بنیه و کوتاه‌شدن عمر انباری همراه است. آزمون‌های پیری تسریع‌شده، هدایت الکتریکی و رشد گیاهچه، در کنار آزمون استاندارد جوانه‌زنی، اطلاعات تکمیلی درباره کیفیت و قابلیت نگهداری فراهم می‌کنند. در مجموع، مراحل زایشی، پرشدن دانه و رسیدگی فیزیولوژیک حساس‌ترین دوره‌ها برای تعیین تعداد، وزن، ترکیب و کیفیت بذر هستند؛ اما پاسخ نهایی، به برهم‌کنش زمان و شدت تنش، ژنوتیپ، شرایط مادری، مدیریت مزرعه و عوامل پس از برداشت بستگی دارد و ارزیابی کیفیت بذر باید بر مجموعه‌ای از شاخص‌های فیزیکی، فیزیولوژیک و عملکردی استوار باشد، نه فقط یک آزمون منفرد (Sehgal et al., 2018).

تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ناشی از تنش‌های غیرزیستی در بذر و گیاه مادر

تنش‌های غیرزیستی با برهم‌زدن تعادل فیزیولوژیک گیاه مادری و بذر، مجموعه‌ای از پاسخ‌های متابولیکی، هورمونی و مولکولی تغییر وضعیت آب، تنظیم یونی، فتوسنتز، تعادل تولید و حذف گونه‌های فعال اکسیژن، تنظیم هورمونی و متابولیسم کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها را فعال می‌کنند؛ شدت و جهت این تغییرات به نوع، شدت و مدت تنش، مرحله رشد، وضعیت تغذیه‌ای و ویژگی‌های ژنتیکی ژنوتیپ بستگی دارد(Paes de Melo et al., 2022 ;Farooq et al., 2018). در گیاه مادری، تنش با کاهش هدایت روزنه‌ای، محدود کردن فتوسنتز و برهم‌زدن رابطه منبع–مخزن، رشد و پرشدن بذر را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ در بذر، این تغییرات ممکن است به کاهش پایداری غشا، افزایش آسیب اکسیداتیو، تغییر فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده ذخایر و کاهش قابلیت نگهداری منجر شوند، هرچند همه این تغییرات لزوماً زیان‌بار نیستند و برخی پاسخ‌ها در شدت‌های متوسط نقش سازشی دارند.

تنش اکسیداتیو و سیستم اکسیدانی

گونه‌های فعال اکسیژن (سوپراکسید، پراکسید هیدروژن، رادیکال هیدروکسیل) در شرایط عادی در پیام‌رسانی سلولی و تنظیم رشد نقش دارند، اما در شرایط تنش، افزایش تولید آن‌ها می‌تواند از ظرفیت سیستم‌های خنثی‌کننده فراتر رفته و تنش اکسیداتیو ایجاد کند (Panda et al., 2024) که به لیپیدهای غشایی، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک آسیب می‌رساند و با افزایش نشت الکترولیت و افت قوه‌نامیه و بنیه همراه می‌شود؛ پراکسیداسیون لیپیدها و تجمع مالون‌دی‌آلدهید از شاخص‌های رایج این آسیب‌اند، هرچند تفسیر آن‌ها باید در کنار سایر شاخص‌های فیزیولوژیک انجام شود. گیاهان برای تنظیم گونه‌های فعال اکسیژن از سیستم‌های آنزیمی (سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز) و غیرآنزیمی (آسکوربات، گلوتاتیون، کاروتنوئیدها، توکوفرول‌ها، ترکیبات فنولی) استفاده می‌کنند که کارایی آن به تعادل میان تولید، انتقال، خنثی‌سازی و پیام‌رسانی این گونه‌ها وابسته است. ژنوتیپ‌های متحمل با حفظ بهتر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و محدود کردن آسیب غشایی مقاومت بیشتری نشان می‌دهند؛ بااین‌حال، افزایش فعالیت یک آنزیم به‌تنهایی معیار کافی تحمل نیست و ارزیابی باید بر اساس مجموعه‌ای از شاخص‌ها (مالون‌دی‌آلدهید، پراکسید هیدروژن، نشت الکترولیت، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، شاخص‌های رشد) انجام شود (Saed-Moucheshi et al., 2023).

تغییر در تعادل هورمونی

هورمون‌های گیاهی در تنظیم تولید، رشد، بلوغ، خواب و جوانه‌زنی بذر نقش اساسی دارند: اسید آبسیزیک در القای خواب و بلوغ و پاسخ به تنش، جیبرلین‌ها در رشد جنین و جوانه‌زنی، و اکسین‌ها و سیتوکینین‌ها در تقسیم و تمایز سلولی و انتقال مواد به دانه مؤثرند (Nonogaki, 2019). خشکی، شوری و دمای نامطلوب می‌توانند با تغییر غلظت یا حساسیت بافت‌ها به اسید آبسیزیک و جیبرلین، زمان آغاز جوانه‌زنی را تغییر دهند؛ بااین‌حال، افزایش ABA و کاهش GA را نمی‌توان الگویی عمومی برای همه بذرها دانست، زیرا این پاسخ به گونه، مرحله رشد، وضعیت خواب و شدت تنش وابسته است. در دوره پرشدن دانه، تنش‌های محیطی ممکن است تعادل اکسین، سیتوکینین، ABA و سایر تنظیم‌کننده‌های رشد را تغییر داده و از این طریق تقسیم سلولی، توسعه آندوسپرم و طول دوره پرشدن را تحت تأثیر قرار دهند. تنظیم‌کننده‌های رشد و زیست‌تحریک‌کننده‌ها در برخی مطالعات با تعدیل پاسخ‌های هورمونی، جوانه‌زنی و بنیه گیاهچه را در شرایط تنش بهبود داده‌اند؛ بااین‌حال، اثر کاربرد خارجی هورمون‌ها به غلظت، زمان مصرف و نوع بافت وابسته است و مصرف نامناسب ممکن است پاسخ معکوس ایجاد کند (Ma et al., 2024).

تغییرات متابولیسم کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها

کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها سه گروه اصلی ذخایر بذرند که انرژی و مواد لازم برای رشد جنین و گیاهچه را تأمین می‌کنند؛ هرگونه اختلال در ساخت، انتقال یا ذخیره‌سازی این ترکیبات کیفیت فیزیولوژیک بذر را کاهش می‌دهد. تنش‌های خشکی، گرما و شوری، به‌ویژه در دوره پرشدن دانه، انتقال قندهای محلول به دانه را محدود کرده و فعالیت آنزیم‌های کلیدی ساخت نشاسته را تغییر می‌دهند که معمولاً به کاهش مقدار نشاسته و وزن نهایی بذر می‌انجامد. تنش‌های گرما و خشکی الگوی ساخت پروتئین‌های ذخیره‌ای را نیز تغییر داده و فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین را افزایش می‌دهند و بر مقدار کل پروتئین و ترکیب اسیدهای آمینه اثر می‌گذارند (Nagy-Réder et al., 2022)؛ افزایش درصد پروتئین لزوماً به معنای بهبود کیفیت تغذیه‌ای نیست، زیرا ترکیب و قابلیت هضم پروتئین نیز تعیین‌کننده‌اند. لیپیدها هم به‌عنوان منبع انرژی و هم اجزای ساختاری غشا نقش حیاتی دارند؛ کاهش پایداری لیپیدها و افزایش اکسیداسیون لیپیدی می‌تواند یکپارچگی غشا، جوانه‌زنی و ماندگاری بذر را تضعیف کند، و بذرهای روغنی به‌دلیل محتوای بالاتر لیپید در انبارمانی حساس‌ترند. مجموع این تغییرات ممکن است به کاهش قوه‌نامیه، بنیه، سرعت جوانه‌زنی و طول عمر انباری منجر شود؛ آزمون‌های مکمل (جوانه‌زنی استاندارد، پیری تسریع‌شده، هدایت الکتریکی، سنجش ترکیب ذخایر و شاخص‌های اکسیداتیو) می‌توانند تصویر کامل‌تری از وضعیت فیزیولوژیک بذر ارائه دهند، هرچند هیچ‌یک به‌تنهایی جایگزین آزمون‌های استاندارد نیست. از نظر مدیریتی، تأمین متعادل عناصر غذایی، بهبود وضعیت آب خاک، اصلاح‌کننده‌های خاک و محرک‌های زیستی می‌توانند بخشی از این اختلال‌های متابولیکی را تعدیل کنند، هرچند اثر آن‌ها به گونه، خاک و شرایط مزرعه وابسته است و توصیه عمومی بدون اعتبارسنجی چندمحیطی و چندساله مناسب نیست.

تأثیر تنش‌های غیرزیستی بر فرایند گواهی بذر

گواهی بذر فرایندی رسمی برای ارزیابی و تأیید هویت و خلوص رقم، خلوص فیزیکی، کیفیت فیزیولوژیک و سلامت بذر است که بر اساس مقررات ملی و طرح‌های هماهنگ بین‌المللی و معمولاً شامل بازرسی مزرعه، کنترل نسل‌های بذری، نمونه‌برداری استاندارد و آزمون‌های خلوص، قوه‌نامیه، رطوبت و سلامت اجرا می‌شود(ISAT, 2023; OECD, 2022). تنش‌های غیرزیستی از دو مسیر بر گواهی بذر اثر می‌گذارند: نخست، اثر مستقیم یا غیرمستقیم بر کیفیت بذر (کاهش قوه‌نامیه، بنیه، سلامت یا یکنواختی) که ممکن است انطباق با الزامات گواهی را کاهش دهد؛ دوم، اثر بر فرایند تولید و کنترل بذر (کاهش موفقیت گرده‌افشانی، ناهمگونی رسیدگی، دشواری بازرسی مزرعه، افزایش ریسک اختلاط یا آلودگی). بااین‌حال، باید میان "اثر تنش بر کیفیت بذر" و "ردشدن بذر در فرایند گواهی" تمایز قائل شد: کاهش یک شاخص کیفیت الزاماً به رد بذر منجر نمی‌شود مگر آنکه از حد تعیین‌شده در مقررات پایین‌تر باشد؛ همچنین همه شاخص‌های مرتبط با تاب‌آوری اقلیمی در نظام‌های رسمی گواهی به‌عنوان معیار الزامی به‌کار نمی‌روند، بنابراین گواهی بذر را نباید معادل تأیید کامل عملکرد بذر در همه شرایط محیطی دانست.

استانداردهای گواهی بذر و شاخص‌های کلیدی

استانداردهای گواهی بذر شامل هویت و خلوص ژنتیکی رقم، خلوص فیزیکی، قوه‌نامیه در آزمون استاندارد، رطوبت، سلامت بذر و در برخی نظام‌ها بنیه یا آزمون‌های تکمیلی و ویژگی‌های طبقه بذری است (ISTA, 2023; OECD, 2022). حداقل قابل‌قبول هر شاخص به گونه، طبقه بذری، کشور و استاندارد مرجع بستگی دارد؛ بیان دامنه‌ای عمومی (مانند ۸۰ تا ۹۰ درصد قوه‌نامیه برای همه غلات) بدون تعیین گونه و مقررات ملی، از نظر علمی و حقوقی دقیق نیست. تنش‌های غیرزیستی شاخص‌های گواهی را به شکل‌های متفاوت تحت تأثیر قرار می‌دهند: خشکی و گرمای شدید در پرشدن دانه ممکن است وزن بذر و بنیه را کاهش دهند؛ شوری و فلزات سنگین جوانه‌زنی و رشد گیاهچه را محدود می‌کنند؛ رطوبت بالا و غرقابی خطر آلودگی و دشواری خشک‌کردن را افزایش می‌دهند. آزمون قوه‌نامیه در شرایط استاندارد برای پیش‌بینی عملکرد در محیط‌های تنش‌زا همیشه کافی نیست؛ آزمون‌های بنیه، پیری تسریع‌شده، سرما، هدایت الکتریکی، تصویربرداری و جوانه‌زنی تحت خشکی، شوری یا دمای کنترل‌شده می‌توانند اطلاعات مکملی فراهم کنند که باید از نظر تکرارپذیری و ارتباط با عملکرد مزرعه‌ای ارزیابی شوند (Reed et al., 2022).

چالش‌های گواهی بذر تحت تغییر اقلیم

تغییر اقلیم با تغییر دما، بارندگی، طول فصل رشد و افزایش پدیده‌های حدی، تولید و گواهی بذر را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ گرم‌ترشدن و تغییر الگوی بارش می‌تواند زمان گل‌دهی، پرشدن دانه، رسیدگی و برداشت را جابه‌جا کرده و بازرسی، نمونه‌برداری، برداشت و خشک‌کردن بذر را دشوارتر کند (Ray et al., 2019). تنش گرما یا خشکی در مراحل زایشی و پرشدن دانه ممکن است کیفیت بذر را کاهش دهد، اما میزان آن به گونه، ژنوتیپ، شدت و مدت تنش و وضعیت آب و تغذیه بستگی دارد؛ تغییر اقلیم ریسک تولید بذر را در مناطق سابقاً مناسب نیز افزایش می‌دهد و نیاز به داده‌های اقلیمی، پایش مزرعه، برنامه‌ریزی منطقه‌ای و تنوع‌بخشی مناطق تولید را پررنگ می‌کند. افزودن آزمون‌های مکمل برای سنجش عملکرد بذر تحت تنش می‌تواند مفید باشد، اما پیش از ورود هر آزمون به نظام گواهی باید اعتبار، تکرارپذیری، ارتباط با عملکرد مزرعه‌ای، هزینه و امکان اجرا در آزمایشگاه‌های مختلف بررسی شود؛ رویکرد منطقی، توسعه تدریجی آزمون‌های مکمل همراه با اعتبارسنجی و حفظ آزمون‌های پایه است.

اهمیت صفات تحمل در ارزیابی بذر

با افزایش نوسان‌های اقلیمی، صفات مرتبط با تحمل تنش توانایی جوانه‌زنی در کم‌آبی، حفظ بنیه در دمای نامناسب، پایداری غشا، تنظیم اسمزی، رشد ریشه‌چه و استقرار یکنواخت در اصلاح نباتات و تولید بذر اهمیت بیشتری یافته‌اند، بی‌آنکه به‌معنای انطباق خودکار با استانداردهای رسمی گواهی باشند. برای ارزیابی این صفات می‌توان از آزمون‌های جوانه‌زنی تحت تنش، سنجش رشد گیاهچه، تصویربرداری دیجیتال، طیف‌سنجی و نشانگرهای مولکولی استفاده کرد؛ این فناوری‌ها غربالگری تعداد زیادی نمونه را ممکن می‌سازند اما به کالیبراسیون، استانداردسازی و اعتبارسنجی نیاز دارند (Angidi et al., 2025). انتخاب ژنوتیپ باید چندصفته و در چند محیط انجام شود، زیرا تحمل یک تنش لزوماً تضمین‌کننده عملکرد خوب در برابر تنش‌های ترکیبی یا متوالی نیست؛ آزمون‌های تحمل تنش بهتر است ابتدا به‌عنوان ابزارهای مکمل تحقیقاتی و غربالگری استفاده شوند و تنها پس از اعتبارسنجی کافی وارد پروتکل‌های رسمی گواهی شوند. بنابراین، پیشنهاد اصلی برای نظام‌های گواهی، جایگزینی فوری معیارهای موجود

نیست بلکه توسعه و اعتبارسنجی تدریجی آزمون‌های مکملی است که بتوانند عملکرد بذر را در محیط‌های تنش‌زا بهتر پیش‌بینی کنند.

راهبردهای مقابله با تنش‌های غیرزیستی در تولید بذر

تولید بذر باکیفیت در شرایط تغییر اقلیم نیازمند ترکیبی هماهنگ از راهبردهای ژنتیکی، زیستی، مدیریتی و فناورانه است که هدف آن‌ها تنها افزایش عملکرد نیست، بلکه حفظ کیفیت فیزیولوژیک، خلوص و سلامت بذر، کاهش نوسان کیفیت میان سال‌ها و مناطق و افزایش انطباق با الزامات گواهی است. این راهبردها را می‌توان در دو سطح دید: کاهش مواجهه گیاه مادر و بذر با تنش (انتخاب منطقه و زمان کاشت، مدیریت آب و تغذیه، اصلاح خاک)، و افزایش ظرفیت تحمل گیاه یا بذر (اصلاح ژنتیکی، انتخاب ژنوتیپ متحمل، پرایمینگ، بیوپرایمینگ، پوشش‌دهی بذر). بهترین نتایج معمولاً از تلفیق این دو سطح به‌دست می‌آید و نباید صرفاً به یک فناوری منفرد اتکا کرد (Kaur et al., 2025).

اصلاح ژنتیکی و ویرایش ژنوم

اصلاح ژنتیکی، گزینش به‌کمک نشانگرها و ویرایش ژنوم ابزارهایی قدرتمند برای شناسایی و بهبود صفات تحمل تنش‌اند؛ خانواده‌های ژنی DREB، NAC و WRKY و ژن‌های مرتبط با پروتئین‌های شوک حرارتی، تنظیم اسمزی، انتقال یون و دفاع آنتی‌اکسیدانی در بسیاری از مطالعات با پاسخ گیاه به تنش پیوند داده شده‌اند (Kumar et al., 2023). فناوری CRISPR/Cas9 امکان ایجاد تغییر هدفمند در توالی‌های ژنی را فراهم کرده است، اما مشاهده تحمل در سطح ژن یا گیاهچه به‌تنهایی به معنای تولید بذر گواهی‌شده یا عملکرد پایدار در مزرعه نیست؛ هر ژنوتیپ ویرایش‌شده باید از نظر پایداری صفت، عملکرد، کیفیت بذر، ایمنی زیستی، الزامات قانونی و عملکرد در محیط‌های مختلف ارزیابی شود، و خطر پیوستگی میان تحمل و صفات نامطلوب (کاهش عملکرد، تغییر زمان رسیدگی یا کیفیت تغذیه‌ای) باید در نظر گرفته شود. ویرایش ژنوم در حال حاضر بیشتر ابزاری اصلاحی و پژوهشی است و ورود محصولات آن به زنجیره تولید و گواهی به مقررات کشور و الزامات ارزیابی بستگی دارد.

بیواستیمولانت‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد

بیواستیمولانت‌ها گروه متنوعی از مواد (هیدرولیزهای پروتئینی، عصاره‌های جلبک، اسیدهای هیومیک و فولویک، اسیدهای آمینه، پلی‌آمین‌ها، فرآورده‌های میکروبی) هستند که ممکن است با تحریک فرایندهای تغذیه‌ای و دفاعی رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشند (Bulgari et al., 2015). اثر آن‌ها به منبع، ترکیب، غلظت، روش کاربرد، مرحله رشد و شدت تنش وابسته است؛ برخی با بهبود تنظیم اسمزی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و حفظ فتوسنتز پاسخ گیاه به خشکی و شوری را بهبود می‌دهند، هرچند این اثرات نباید بدون مشخص‌کردن ماده و شرایط آزمایش تعمیم داده شوند. تنظیم‌کننده‌های رشد مانند جیبرلین‌ها، اکسین‌ها و سیتوکینین‌ها نیز می‌توانند بر جوانه‌زنی، رشد ریشه و پرشدن دانه اثر بگذارند؛ پاسخ به این ترکیبات وابسته به غلظت است و مصرف بیش‌ازحد ممکن است رشد یا کیفیت بذر را مختل کند، بنابراین کاربرد آن‌ها باید بر پایه آزمایش‌های ارزیابی سطوح دز انجام گیرد.

پرایمینگ و بیوپرایمینگ بذر

پرایمینگ فرایندی است که طی آن بذر تا سطحی کنترل‌شده آب‌گیری می‌شود تا برخی فرایندهای پیش از جوانه‌زنی فعال شوند بی‌آنکه خروج ریشه‌چه رخ دهد؛ هیدروپرایمینگ، اسموپرایمینگ، پرایمینگ هورمونی، شیمیایی و زیستی از انواع رایج آن‌اند که با ترمیم غشا، پیش‌فعال‌سازی متابولیسم و تقویت پاسخ آنتی‌اکسیدانی می‌توانند سرعت و یکنواختی جوانه‌زنی و استقرار اولیه را در برابر خشکی، شوری یا دمای نامناسب بهبود بخشند، هرچند نتیجه آن به کیفیت اولیه بذر، مقدار آب جذب‌شده، دما، مدت تیمار و شرایط پس از تیمار وابسته است. بیوپرایمینگ، ترکیب پرایمینگ با میکروارگانیسم‌های مفید (گونه‌های Bacillus و Pseudomonas)، از طریق تولید ترکیبات محرک رشد، بهبود جذب عناصر غذایی، القای مقاومت سیستمیک و تعدیل سیستم آنتی‌اکسیدانی به بهبود رشد گیاهچه کمک می‌کند (Cardarelli et al., 2022)؛ موفقیت آن به سازگاری میکروارگانیسم با بذر، خاک و شرایط محیطی وابسته است و نتایج آزمایشگاهی را نمی‌توان بدون اعتبارسنجی به مزرعه تعمیم داد. حفظ زنده‌مانی میکروارگانیسم در طول خشک‌کردن، بسته‌بندی و انبارمانی از چالش‌های مهم توسعه تجاری این فناوری است.

مدیریت یکپارچه آب، تغذیه و خاک

مدیریت آب، تغذیه و خاک نخستین خط دفاعی در کاهش اثر تنش بر گیاه مادر و بذر در حال تشکیل است؛ زمان‌بندی مناسب آبیاری، بهبود زهکشی و افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌تواند شدت تنش خشکی و غرقابی را کاهش دهد، هرچند آبیاری بیش‌ازحد ممکن است شوری و کمبود اکسیژن ریشه را تشدید کند و مدیریت آب باید بر اساس ویژگی خاک، نیاز گیاه و داده‌های اقلیمی انجام شود. تأمین متعادل نیتروژن، فسفر، پتاسیم و عناصر کم‌مصرف (روی، سیلیکون، سلنیوم) می‌تواند در تنظیم دفاع آنتی‌اکسیدانی و پایداری غشا نقش داشته باشد، هرچند اثر آن به شکل شیمیایی، مقدار مصرف و گونه گیاهی وابسته است. بیوچار و زئولیت با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، ظرفیت نگهداری آب و زیست‌فراهمی عناصر را تغییر می‌دهند بیوچار می‌تواند تحرک فلزات سنگین را کاهش دهد و زئولیت در نگهداری آب مؤثر باشد اما عملکرد این مواد به منبع، دوز، pH خاک و ماده آلی وابسته است و توصیه آن‌ها باید بر پایه آزمایش خاک انجام شود (Ghorbani et al., 2022). حسگرهای رطوبت خاک، آبیاری دقیق و ابزارهای اینترنت اشیا می‌توانند پایش و زمان‌بندی آبیاری را بهبود دهند، هرچند مقدار صرفه‌جویی به طراحی سیستم و شرایط اقلیمی بستگی دارد.

فناورهای پوشش‌دهی و نانویی بذر

پوشش‌دهی بذر می‌تواند برای تثبیت مواد فعال، اصلاح ویژگی‌های فیزیکی سطح بذر و انتقال تدریجی ترکیبات به‌کار رود؛ پوشش‌های زیستی حاوی میکروارگانیسم یا مواد آلی و پوشش‌های معدنی یا پلیمری نقش حامل یا محافظ دارند. پوشش میکروبی با سویه‌های منتخب Bacillus یا Pseudomonas در برخی مطالعات با بهبود جوانه‌زنی و رشد گیاهچه همراه بوده، هرچند مقدار اثر به سویه، تراکم سلولی، ماده حامل و شرایط خاک وابسته است. نانوپرایمینگ و نانوپوشش‌دهی (با نانوذرات اکسید روی، سیلیکا یا ترکیبات سلنیوم) می‌توانند از طریق افزایش سطح تماس و رهش تدریجی، جوانه‌زنی یا ظرفیت آنتی‌اکسیدانی را در غلظت مناسب بهبود بخشند، اما در غلظت بالا احتمال سمیت، اختلال رشد و آثار زیست‌محیطی وجود دارد (Geremew et al., 2025). پیش از توصیه گسترده این فناوری‌ها، لازم است پایداری فرمولاسیون، دوز بهینه، اثر بر میکروبیوم خاک، انتقال به اندام خوراکی، ایمنی کاربر و سرنوشت زیست‌محیطی آن‌ها در آزمایش‌های مزرعه‌ای چندمحیطی و چندساله ارزیابی شود.

رویکردهای یکپارچه

تولید بذر تاب‌آور به یک راهکار منفرد وابسته نیست؛ انتخاب ژنوتیپ، مدیریت آب و تغذیه، اصلاح خاک، زمان‌بندی کشت، پرایمینگ یا پوشش‌دهی بذر و کنترل شرایط برداشت و انبارمانی باید در قالب یک برنامه هماهنگ طراحی شوند برای نمونه، ژنوتیپ متحمل بدون مدیریت مناسب آب یا تیمار پرایمینگ بدون بذر باکیفیت، اثر پایدار نشان نمی‌دهند. این رویکردها باید بر اساس هدف، محصول و محیط تعریف شوند: در مناطق شور، مدیریت آب و نمک همراه با ژنوتیپ متحمل و پرایمینگ؛ در مناطق مستعد گرما، انتخاب تاریخ کاشت و ژنوتیپ‌های با دوره پرشدن مناسب؛ و در مناطق مستعد غرقابی، زهکشی، اصلاح بستر و مدیریت تراکم کاشت. ارزیابی این رویکردها باید افزون بر قوه‌نامیه و بنیه، شامل عملکرد مزرعه، هزینه، پایداری، ایمنی و قابلیت پذیرش توسط تولیدکننده باشد؛ راهبردهای ژنتیکی، زیستی، مدیریتی و نانویی ظرفیت قابل‌توجهی برای کاهش آثار تنش دارند، اما هیچ‌یک به‌تنهایی تضمین‌کننده تولید بذر تاب‌آور نیست و مسیر مناسب، ترکیب راهبردها و اعتبارسنجی هم‌زمان در شرایط مزرعه‌ای است.

محدودیت‌های مطالعه و مسیرهای پژوهشی آینده

این مقاله مروری، مانند هر مطالعه تلفیقی، با محدودیت‌هایی همراه است. نخست، بخش قابل‌توجهی از شواهد موجود درباره اثر تنش‌های غیرزیستی بر جوانه‌زنی، کیفیت بذر و راهبردهای کاهش تنش از آزمایش‌های آزمایشگاهی یا گلخانه‌ای به‌دست آمده و تعمیم مستقیم آن به شرایط مزرعه‌ای، به‌ویژه در برابر تنش‌های ترکیبی، متوالی و نوسان‌دار، باید با احتیاط انجام شود. دوم، مطالعات موجود از نظر گونه، ژنوتیپ، نوع بستر، شدت و مدت تنش، مرحله رشد و شاخص‌های کیفیت تفاوت زیادی دارند و این ناهمگونی استخراج یک پاسخ عمومی را دشوار می‌کند. سوم، شواهد مربوط به راهبردهای نوین (بیوپرایمینگ، نانوپرایمینگ، پوشش‌دهی زیستی، ویرایش ژنوم) هنوز از نظر مقیاس اجرا، پایداری اثر، هزینه و سازگاری با تولید تجاری محدود است و نیازمند

ارزیابی‌های چندمحیطی و چندساله است. چهارم، استانداردهای گواهی بذر در کشورها و نظام‌های مختلف یکسان نیستند؛ ازاین‌رو اعداد و آستانه‌های کیفی نباید بدون ذکر منبع رسمی، گونه و طبقه بذری به‌صورت عمومی ارائه شوند، و هرگونه افزودن آزمون تحمل به فرایند رسمی گواهی باید پس از بررسی تکرارپذیری، اعتبار پیش‌بینی و امکان اجرا در آزمایشگاه‌های مختلف انجام شود. پنجم، چارچوب مفهومی "تنش–کیفیت–گواهی" پیشنهادشده در این مقاله بر پایه تلفیق شواهد موجود است و هنوز به‌صورت مستقل در قالب آزمایش‌های میدانی استاندارد اعتبارسنجی نشده؛ بنابراین باید به‌عنوان مدلی مفهومی برای سازمان‌دهی شواهد و طراحی پژوهش‌های آینده در نظر گرفته شود، نه یک مدل پیش‌بینی‌شده و قطعی. بر اساس این محدودیت‌ها، پژوهش‌های آینده باید بر محورهای زیر تمرکز کنند: طراحی آزمایش‌های چندمحیطی و چندساله برای بررسی اثر تنش‌های منفرد، ترکیبی و متوالی بر کیفیت بذر؛ ایجاد ارتباط کمی میان شاخص‌های آزمایشگاهی بذر و استقرار، عملکرد و ماندگاری آن در مزرعه؛ استانداردسازی آزمون‌های جوانه‌زنی و بنیه تحت خشکی، شوری و دماهای نامناسب؛ بررسی هم‌زمان کیفیت بذر، وضعیت گیاه مادر، ترکیب ذخایر، شاخص‌های اکسیداتیو و عملکرد نسل بعد؛ ارزیابی پایداری اثر پرایمینگ، بیوپرایمینگ و پوشش‌دهی در طول انبارمانی؛ بررسی دوز، سمیت و سرنوشت زیست‌محیطی مواد نانویی؛ ارزیابی ژنوتیپ‌های متحمل بر اساس مجموعه‌ای از صفات نه یک نشانگر منفرد؛ تدوین چارچوب‌هایی برای ارتباط میان نظام اصلاح، تولید بذر، آزمون‌های کیفیت و گواهی رسمی؛ و تحلیل اقتصادی و اجرایی فناوری‌های نوین پیش از توصیه برای کاربرد گسترده.

نتیجه‌گیری

تنش‌های غیرزیستی می‌توانند در مراحل مختلف تولید بذر از رشد زایشی و تشکیل بذر تا پرشدن دانه، رسیدگی، خشک‌شدن و انبارمانی کیفیت بذر را از طریق تغییر در وضعیت آب و یون‌ها، اختلال در فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی، برهم‌خوردن تعادل هورمونی، افزایش تنش اکسیداتیو و تغییر متابولیسم کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها و لیپیدها تحت تأثیر قرار دهند؛ پیامد نهایی ممکن است به‌صورت کاهش وزن بذر، قوه‌نامیه، بنیه گیاهچه، یکنواختی جوانه‌زنی، پایداری غشا و ماندگاری بذر ظاهر شود. بررسی شواهد نشان می‌دهد رابطه میان تنش، کیفیت بذر و گواهی بذر رابطه‌ای چندمرحله‌ای و وابسته به زمینه است؛ نوع و شدت اثر تنش به گونه، ژنوتیپ، مرحله رشد، مدت مواجهه، شرایط گیاه مادر و مدیریت مزرعه بستگی دارد و نمی‌توان اثر یک تنش یا یک شاخص کیفیت را بدون توجه به زمینه تولید به همه محصولات و نظام‌های گواهی تعمیم داد. چارچوب "تنش–کیفیت–گواهی" پیشنهادشده در این مقاله نشان می‌دهد که مدیریت کیفیت بذر باید از مراحل اولیه تولید آغاز شود و فقط به آزمون نهایی پس از برداشت محدود نماند؛ در این رویکرد، انتخاب منطقه و زمان کاشت، مدیریت آب و تغذیه، انتخاب ژنوتیپ، کنترل تنش در مراحل حساس، برداشت مناسب و شرایط انبارمانی اجزای به‌هم‌پیوسته یک نظام تضمین کیفیت‌اند. راهبردهایی مانند اصلاح ژنتیکی، گزینش ژنوتیپ‌های متحمل، ویرایش ژنوم، پرایمینگ، بیوپرایمینگ، پوشش‌دهی زیستی، نانوپرایمینگ و مدیریت دقیق آب و خاک ظرفیت کاهش آثار تنش و بهبود برخی شاخص‌های کیفیت بذر را دارند، اما اثربخشی آن‌ها به شرایط آزمایش و محیط اجرا وابسته است و بخش قابل‌توجهی از شواهد موجود هنوز به مقیاس آزمایشگاهی، گلخانه‌ای یا مزرعه‌ای محدود مربوط می‌شود؛ ازاین‌رو این راهبردها باید پیش از توصیه گسترده، از نظر پایداری اثر، عملکرد واقعی، هزینه، ایمنی و سازگاری با مقررات ارزیابی شوند. در شرایط تغییر اقلیم، افزایش عملکرد دانه به‌تنهایی برای تضمین کیفیت بذر کافی نیست؛ تولید بذر باید به‌گونه‌ای طراحی شود که کیفیت فیزیولوژیک، انطباق با الزامات گواهی و عملکرد قابل‌قبول در محیط‌های متغیر را هم‌زمان دنبال کند. بااین‌حال، افزودن معیارهای جدید به نظام رسمی گواهی نیازمند شواهد استاندارد، تکرارپذیر و مرتبط با عملکرد مزرعه‌ای است؛ بنابراین اولویت‌های اصلی پژوهشی شامل اعتبارسنجی آزمون‌های مکمل تحت تنش، ارزیابی چندمحیطی راهبردهای نوین و ایجاد ارتباط نظام‌مند میان اصلاح نباتات، تولید بذر، کنترل کیفیت و گواهی بذر است. در مجموع، تولید بذر تاب‌آور به یک فناوری منفرد وابسته نیست، بلکه حاصل تعامل ژنوتیپ، محیط، مدیریت و نظام ارزیابی کیفیت است؛ ایجاد این پیوند می‌تواند پایداری تولید بذر، سازگاری با تغییرات اقلیمی و امنیت غذایی را در بلندمدت تقویت کند.

References

Ahmed, K., Shabbir, G., and Ahmed, M. 2025. Exploring drought tolerance for germination traits of diverse wheat genotypes at seedling stage: A multivariate analysis approach. BMC Plant Biology, 25, 390. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06345-9. (Journal)

Angidi, S., Madankar, K., Tehseen, M. M., and Bhatla, A. 2025. Advanced high-throughput phenotyping techniques for managing abiotic stress in agricultural crops: A comprehensive review. Crops, 5(2), Article 8. https://doi.org/10.3390/crops5020008. (Journal)

Batool, M., El-Badri, A. M., Wang, C., Mohamed, I. A. A., Wang, Z., Khatab, A., Bashir, F., Xu, Z., Wang, J., Kuai, J., Wang, B., and Zhou, G. 2022. The role of storage reserves and their mobilization during seed germination under drought stress conditions of rapeseed cultivars with high and low oil contents. Crop and Environment, 1, 231–240. https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.09.003. (Journal)

Bewley, J. D., Bradford, K. J., Hilhorst, H. W. M., and Nonogaki, H. (2013). Seeds: Physiology of development, germination and dormancy (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4. (Journal)

Cardarelli, M., Woo, S. L., Rouphael, Y., and Colla, G. 2022. Seed treatments with microorganisms can have a biostimulant effect by influencing germination and seedling growth of crops. Plants, 11(3), Article 259. https://doi.org/10.3390/plants11030259. (Journal)

Chen, K., and Arora, R. 2013. Priming memory invokes seed stress-tolerance. Environmental and Experimental Botany, 94, 33–45. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.03.005. (Journal)

Chen, S. P. J., Li, M. W., Wong, H. Y., Wong, F. L., Wu, T., Gai, J., Han, T., and Lam, H. M. 2022. The seed quality assurance regulations and certification system in soybean production: A Chinese and international perspective. Agriculture, 12(5), Article 624. https://doi.org/10.3390/agriculture12050624. (Journal)

Colla, G., Hoagland, L., Ruzzi, M., Cardarelli, M., Bonini, P., Canaguier, R., and Rouphael, Y. 2017. Biostimulant action of protein hydrolysates: Unraveling their effects on plant physiology and microbiome. Frontiers in Plant Science, 8, Article 2202. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02202. (Journal)

Dhaliwal, L. K., and Angeles-Shim, R. B. 2022. Cell membrane features as potential breeding targets to improve cold germination ability of seeds. Plants, 11(23), Article 3400. https://doi.org/10.3390/plants11233400. (Journal)

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2019. Climate-smart agriculture sourcebook (2nd ed.). FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2022. The state of food and agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. FAO.

Farooq, M., Hussain, M., Wakeel, A., and Siddique, K. H. M. 2015. Salt stress in maize: Effects, resistance mechanisms, and management–-A review. Agronomy for Sustainable Development, 35, 461–481. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0287-0. (Journal)

Farooq, M., Hussain, M., Usman, M., Farooq, S., Alghamdi, S. S., and Siddique, K. H. M. 2018. Impact of abiotic stresses on grain composition and quality in food legumes. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66(34), 8887–8897. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b02924. (Journal)

Geng, R., Xu, M., Xu, L., Yan, G., and Cai, G. 2025. Biological mechanisms of waterlogging tolerance in plants. Plant, Cell and Environment, 49(2), 685–699. https://doi.org/10.1111/pce.70241. (Journal)

Geremew, A., Stovall, L., Woldesenbet, S., Ma, X., and Carson, L. 2025. Nanopriming with zinc oxide: A novel approach to enhance germination and antioxidant systems in amaranth. Frontiers in Plant Science, 16, 1599192. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1599192. (Journal)

Ghorbani, M., Amirahmadi, E., Konvalina, P., Moudrý, J., Bárta, J., Kopecký, M., Teodorescu, R. I., and Bucur, R. D. 2022. Comparative influence of biochar and zeolite on soil hydrological indices and growth characteristics of corn (Zea mays L.). Water, 14(21), 3506. https://doi.org/10.3390/w14213506. (Journal)

Girija, D., Abirami, K., and Vikrant, A. (2022). Evaluation of seed germination and early seedling growth under heavy metals stress conditions in coastal red rice (Oryza sativa L.). Journal of Stress Physiology and Biochemistry, 18(3), 17–31. (Journal)

Gohari, G., Spanos, A., Ioannou, A., Efstathiou, I., Panahirad, S., Kolbert, Z., and Fotopoulos, V. 2026. Seed priming approaches for climate-resilient agriculture. Journal of Experimental Botany. Advance online publication. https://doi.org/10.1093/jxb/eraf440. (Journal)

Jiang, L., She, C., Tian, C., Tanveer, M., and Wang, L. 2021. Storage period and different abiotic factors regulate seed germination of two Apocynum species–-Cash crops in arid saline regions in northwestern China. Frontiers in Plant Science, 12, 671157. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.671157. (Journal)

Kaur, N., Qadir, M., Francis, D. V., Alok, A., Tiwari, S., and Ahmed, Z. F. R. 2025. CRISPR/Cas9: A sustainable technology to enhance climate resilience in major staple crops. Frontiers in Genome Editing, 7, 1533197. https://doi.org/10.3389/fgeed.2025.1533197. (Journal)

Kumar, M., Prusty, M. R., Pandey, M. K., Singh, P. K., Bohra, A., Guo, B., and Varshney, R. K. 2023. Application of CRISPR/Cas9-mediated gene editing for abiotic stress management in crop plants. Frontiers in Plant Science, 14, 1157678. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1157678. (Journal)

Ma, Y., Freitas, H., and Dias, M. C. 2024. Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants. Frontiers in Plant Science, 15, 1310243. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1310243. (Journal)

Machado, J., Silva, M. N. D., Vasconcelos, M. W., and Santos, C. S. 2025. The impact of climate change-induced abiotic stresses on the nutritional quality of legume seeds. Journal of Experimental Botany, 76(12). https://doi.org/10.1093/jxb/eraf085. (Journal)

Manik, S. M. N., Pengilley, G., Dean, G., Field, B., Shabala, S., and Zhou, M. 2019. Soil and crop management practices to minimize the impact of waterlogging on crop productivity. Frontiers in Plant Science, 10, 140. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00140. (Journal)

Mohammadkhani, N. & Sharifi, P. 2016. Anti-oxidative response of different wheat genotypes to drought during anthesis. Iranian Journal of Plant Physiology, 6, 1845-1854. (Journal)

Nagy-Réder, D., Birinyi, Z., Rakszegi, M., Békés, F., and Gell, G. 2022. The effect of abiotic stresses on the protein composition of four Hungarian wheat varieties. Plants, 11(1), 1. https://doi.org/10.3390/plants11010001. (Journal)

Nonogaki, H. 2017. Seed biology updates: Highlights and new discoveries in seed dormancy and germination research. Frontiers in Plant Science, 8, 524. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00524. (Journal)

Nonogaki, H. 2019. Seed germination and dormancy: The classic story, new puzzles, and evolution. Journal of Integrative Plant Biology, 61(5), 541–563. https://doi.org/10.1111/jipb.12762. (Journal)

Organisation for Economic Co-operation and Development. 2020. Boosting productivity and trade through seed certification. OECD Publishing. https://www.oecd.org/en/publications/boosting-productivity-and-trade-through-seed-certification_185cedb6-en.html .

Organisation for Economic Co-operation and Development. 2022. OECD schemes for the varietal certification or the control of seed moving in international trade: Rules and regulations. OECD Publishing. https://www.oecd.org/seeds.

Paes de Melo, B., Carpinetti, P. D. A., Fraga, O. T., Rodrigues-Silva, P. L., Fioresi, V. S., de Camargos, L. F., and Ferreira, M. F. D. S. 2022. Abiotic stresses in plants and their markers: A practice view of plant stress responses and programmed cell death mechanisms. Plants, 11(9), 1100. https://doi.org/10.3390/plants11091100. (Journal)

Pan, J., Sharif, R., Xu, X., & Chen, X. 2021. Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: Research progress and prospects. Frontiers in Plant Science. 11, 627331. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627331. (Journal)

Panda, S. K., Gupta, D., Patel, M., Van der Vyver, C., and Koyama, H. 2024. Functionality of reactive oxygen species (ROS) in plants: Toxicity and control in Poaceae crops exposed to abiotic stress. Plants, 13(15), 2071. https://doi.org/10.3390/plants13152071. (Journal)

Ray, D. K., West, P. C., Clark, M., Gerber, J. S., Prishchepov, A. V., and Chatterjee, S. 2019. Climate change has likely already affected global food production. PLOS ONE, 14(5), e0217148. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217148. (Journal)

Reed, R. C., Bradford, K. J., and Khanday, I. 2022. Seed germination and vigor: Ensuring crop sustainability in a changing climate. Heredity, 128(6), 450–459. https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2. (Journal)

Rho, H., Kand, S. B., Lin, S. W., Lin, T. H., and Barchenger, D. W. 2025. Physiological characteristics of flooding tolerance in wild and domesticated species of Capsicum. HortScience, 60(10), 1785–1792. https://doi.org/10.21273/HORTSCI18728-25. (Journal)

Saed-Moucheshi, A., Sohrabi, F., and Shirkhani, A. 2024. A review on reactive oxygen species (ROS) production, function, and their influence on plants. Crop Biotechnology, 13(4), 53–70. https://doi.org/10.30473/cb.2024.70071.1940. (Journal)

Sedghi, M. 2025. An integrated assessment of seed germination performance using classical and complementary metrics under abiotic stress. Scientific Reports, 15, 41880. https://doi.org/10.1038/s41598-025-25806-7. (Journal)

Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K. H. M., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R. K., HanumanthaRao, B., Nair, R. M., Prasad, P. V. V., and Nayyar, H. 2018. Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: Impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. Frontiers in Plant Science, 9, 1705. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705. (Journal)

Sharifi, P., Amirnia, R., & Shirani Bidabadi, S. 2022. Role of silicon in mediating heat shock tolerance in soybean. Gesunde Pflanzen, 74(2), 397–411. https://doi.org/10.1007/s10343-021-00617-8. (Journal)

Shi, J., Ding, Z., Ge, X., Qiu, X., Xu, J., Xiao, L., Liu, L., Tang, L., Cao, W., Zhu, Y., and Liu, B. 2024. Compound extreme heat and drought stress alter the spatial gradients of protein and starch in wheat grains. Agricultural Water Management, 303, 109049. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109049. (Journal)

Singh, P., Choudhary, K. K., Chaudhary, N., Gupta, S., Sahu, M., Tejaswini, B., and Sarkar, S. 2022. Salt stress resilience in plants mediated through osmolyte accumulation and its crosstalk mechanism with phytohormones. Frontiers in Plant Science, 13, 1006617. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1006617. (Journal)

Vázquez-Ramírez, J., White, D. J., Harding, J., Hirst, M. J., Wevill, T., and Venn, S. E. 2025. A drier maternal environment increases water-stress tolerance of alpine seeds and seedlings. Ecology and Evolution, 15(10), e72247. https://doi.org/10.1002/ece3.72247. (Journal)

Westengen, O. T., Dalle, S. P., and Mulesa, T. H. 2023. Navigating toward resilient and inclusive seed systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(14), e2218777120. https://doi.org/10.1073/pnas.2218777120. (Journal)

Yang, J., Tang, M., and Zhao, H. 2026. Physiological mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria in enhancing abiotic stress tolerance of vegetable crops: A review. Plants, 15(5), 686. https://doi.org/10.3390/plants15050686. (Journal)