علم او فن- علمي څېړنيزه مجله

توسعهٔ محصولات زراعتی سازگار با اقلیم در شرایط تغییرات اقلیمی: ستراتیژیهای بایوتکنالوژیکی و چشم‌اندازهای آینده

محمد مدثر توفیق[۱*]، سید قدیر دانشیار[۱] ، فرید احمد شیرزی[۱]
[۱] دیپارتمنت بایوتکنالوژی و تولید تخم های بذری، پوهنځی زراعت، پوهنتون کابل، کابل افغانستان

خلاصه

تغییرات اقلیمی با افزایش درجه حرارت، خشکی، گرما و گسترش امراض، تهدید جدی برای تولید محصولات زراعتی و امنیت غذایی جهانی ایجاد کرده است. این مقاله مروری به بررسی نقش بایوتکنالوژی نباتی در توسعه ارقام زراعتی سازگار با اقلیم می‌پردازد. تکنالوژی های مانند CRISPR/Cas9، انجینری جنتیک، انتخاب به کمک نشانگر و انتخاب جینومی، امکان شناسایی و اصلاح هدفمند جین‌های مرتبط با تحمل تنش‌های محیطی را فراهم ساخته‌اند. در سطح مالیکولی و فیزیولوژیکی، میکانیزم هایی شامل فکتورهای رونویسی، پروتئین‌های شوک حرارتی، اسموپروتکتانت‌ها و سیستم‌های انتی‌اکسیدانی نقش اساسی در افزایش مقاومت نباتات دارند. ادغام این تکنالوژی‌ها با روش‌های اصلاح سنتی و زراعت پایدار می‌تواند زمینه توسعه ارقام پربازده، مقاوم و با کیفیت تغذیه‌ای بهتر را در شرایط تغییرات اقلیمی فراهم سازد.

کلیدی کلیمات: تغییرات اقلیمی، محصولات زراعتی سازگار با اقلیم، بایوتکنالوژی نباتی، ویرایش جینوم، تحمل تنش‌های غیرزنده، اصلاح نباتات

Development of climate-resilient crops under climate change: biotechnological strategies and future perspectives

Mohammad Modaser Tawfeeq[1]*, Sayeed Qadir Danishiar[1], Farid Ahmad Sherzai[1]
[1]Department of Biotechnology and Seed Production, Agriculture Faculty, Kabul University, Afghanistan
*Corresponding Author Emial: tawfeeqmodaser8@gmail.com

Abstract

Climate change is increasingly undermining global agricultural production and food security through rising temperatures, prolonged drought, heat stress, and the growing prevalence of plant diseases. Plant biotechnology offers powerful opportunities to enhance crop resilience to these environmental constraints. This review examines the role of advanced biotechnological approaches, including CRISPR/Cas9 genome editing, genetic engineering, marker-assisted selection, and genomic selection, in the development of climate-resilient crop varieties. These tools facilitate the precise identification and improvement of genes associated with stress tolerance and adaptive performance. In addition, molecular and physiological mechanisms such as transcriptional regulation, heat shock responses, osmoprotectant accumulation, and antioxidant activity are central to plant adaptation under climatic stress. The integration of these modern technologies with conventional breeding and sustainable crop management practices represents a robust strategy for producing high-yielding and stress-tolerant crops, thereby supporting long-term agricultural sustainability and global food security.

Keywords: Climate change; Climate-resilient crops; Plant biotechnology; Genome editing; Abiotic stress; Crop improvement

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین تهدیدات برای امنیت غذایی جهانی محسوب می‌شود و تولید محصولات زراعتی را در سراسر دنیا به طور جدی تحت تأثیر قرار داده است. افزایش درجه حرارت، تغییر الگوهای بارندگی، و وقوع رویدادهای اقلیمی شدید منجر به کاهش قابل توجه عملکرد محصولات شده است. امنیت غذایی جهانی به‌طور فزاینده‌ای در اثر تغییرات اقلیمی در معرض خطر قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC) پیش‌بینی می‌کند حاصل محصولات اساسی تا سال ۲۰۵۰ ممکن است ۱۰ تا ۲۵ درصد کاهش یابد(Ullah et al., 2025) . در مناطق آسیب‌پذیر، این کاهش حتی می‌تواند به ۳۰ درصد نیز برسد(Abebaw, 2025) . تنش های محیطی مانند گرما و خشکی به عنوان مهم‌ترین عوامل محدودکننده، باعث اختلال در رشد و نمو نباتات، کاهش فتوسنتز، و در نهایت کاهش تولید می‌شوند(Sato et al., 2024) . این شرایط ضرورت استفاده از راهبردهای بایوتکنالوژیکی را برجسته می‌سازد.

تغییرات اقلیمی نه تنها به طور مستقیم بر نباتات تأثیر می‌گذارد، بلکه باعث افزایش شدت و گستردگی تنش‌های زنده و غیر زنده نیز می‌شود. تنش‌های غیر زنده شامل خشکی، گرما، شوری، و سرمازدگی از جمله مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصول هستند(Perveen et al., 2025) . مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب تنش‌های خشکی و گرما اثرات منفی بیشتری نسبت به هر یک از آن‌ها به تنهایی دارد(Sato et al., 2024) . از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی شرایط مطلوب‌تری برای گسترش آفات و بیماری‌ها فراهم می‌کندکه حسین و همکاران گفته اند سالانه بیماری های نباتی میتواند 220 میلیارد دالر امریکایی ممکن است محصولات به خاطر بیماری ها از بین برود (Hossain et al., 2024) . پاتوجین‌های نباتی در شرایط آب و هوای متغیر، توانایی بیشتری پیدا میکند که با محیط توافق حاصل نمایند. این پیچیدگی‌باعث میشود که رویکردهای جامع و چندوجهی برای توسعهٔ محصولات مقاوم را ضروری می‌سازد.

با توجه به پیش‌بینی افزایش جمعیت جهان به بیش از ۹ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰، نیاز به افزایش ۷۰ درصدی تولید مواد غذایی امری اجتناب‌ناپذیر است. این در حالی است که منابع قابل کشت و آب به طور فزاینده‌ای در حال کاهش هستند (Hajj, 2023). روش‌های اصلاح سنتی، اگرچه در گذشته موفقیت‌هایی داشته‌اند، به دلیل زمان‌بر بودن و کارایی پایین در مواجهه با تنش‌های چندگانه، دیگر پاسخگوی نیازهای کنونی نیستنداین روش های جدید نه تنها که حاصلات را زیاد میکند بلکه نیاز به مواد کیمیاوی را میتواند کاهش داد(Mohapatra et al., 2024) . بایوتکنالوژی مدرن، از جمله انجینری جنتیک، ویرایش جینوم، و انتخاب به کمک نشانگرهای مالیکولی، فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای توسعهٔ سریع ارقام سازگار با اقلیم فراهم می‌آورد. این تکنالوژی‌ها قادرند به طور هدفمند جین‌های مسئول تحمل به تنش را شناسایی و به ارقام تجاری منتقل کنند، و بدین ترتیب به تسریع فرایند اصلاح نباتات کمک نمایند(Lallawmkimi et al., 2024) .

انجینری جنتیک امکان توسعه محصولات میوه‌ای اصلاح شده جنتیکی با صفات بهبود یافته مانند مقاومت به آفات و بیماری‌ها، افزایش ارزش تغذیه‌ای و طول عمر نگهداری بیشتر را فراهم کرده است. انتخاب کمکی با نشانگر، فرایند اصلاح نباتات را تسریع می‌کند زیرا اجازه شناسایی صفات مطلوب در سطح مالیکولی را می‌دهد و به این ترتیب کارایی و دقت برنامه‌های اصلاحی افزایش می‌یابد (Sushmitha et al., 2024) .استفاده از ابزارهای پیشرفته‌ای مانند CRISPR/Cas9 امکان ایجاد اصلاحات دقیق و هدفمند در جینوم نباتات را بدون نیاز به دخالت DNA خارجی فراهم می‌کند که این پیشرفت‌ها امکان اصلاحات جنتیکی هدفمند را فراهم می‌کنند که تحمل به **تنش‌های زنده و غیر زنده** را افزایش می‌دهد(Chen et al., 2024) . علاوه بر این، ترکیب تکنالوژی‌های بایوتکنالوژیکی با روش‌های زراعتی پایدار، مانند زراعت حفاظتی و استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید، می‌تواند به ایجاد سیستم‌های زراعت انعطاف‌پذیر و کارآمد منجر شود که قادر به تأمین نیازهای غذایی آینده در شرایط تغییرات اقلیمی هستند(Srivastava et al., 2022) .

در مجموع، شواهد علمی نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی با تشدید تنش‌های زنده و غیر زنده، پایداری سیستم‌های زراعتی و امنیت غذایی جهانی را به طور جدی به چالش کشیده است. کاهش عملکرد محصولات، محدودیت منابع طبیعی، و ناکارآمدی نسبی روش‌های اصلاح سنتی، ضرورت حرکت به سوی راهکارهای نوین و کارآمد را برجسته می‌سازد. در این میان، بایوتکنالوژی نباتی به‌عنوان یک ابزار کلیدی و تحول‌آفرین، امکان شناسایی، اصلاح و به‌کارگیری جین‌های مؤثر در تحمل تنش‌های اقلیمی را فراهم نموده و زمینه را برای توسعهٔ ارقام سازگار با اقلیم مهیا می‌سازد. ادغام این تکنالوژی‌ها با رویکردهای زراعت پایدار می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش حاصلات، کاهش آسیب‌پذیری محصولات، و تضمین امنیت غذایی نسل‌های آینده در شرایط تغییرات اقلیمی ایفا نماید.

مواد و روش

منابع اصلی داده‌ها و اطلاعات شامل مقالات از ژورنال‌های معتبر، کتاب‌های علمی و تحقیقی مرتبط با نقش بایوتکنالوژی در افزایش مقاومت محصولات زراعتی در برابر تغییرات اقلیمی می‌باشد. این منابع از پایگاه‌های علمی مانند Google Scholar، PubMed، Web of Scienceو SIDشناسایی شده‌اند. تمرکز این تحقیق بر شناسایی پیشرفت‌های تاریخی، اجماع علمی کنونی، و شکاف‌های موجود در دانش درباره نقش تغییرات اقلیمی بر نباتات است که بیشتر در این مقاله از تحقیق ها و مقالات که از سال 2015 تا 2025 به نشر رسیده استفاه شده است.

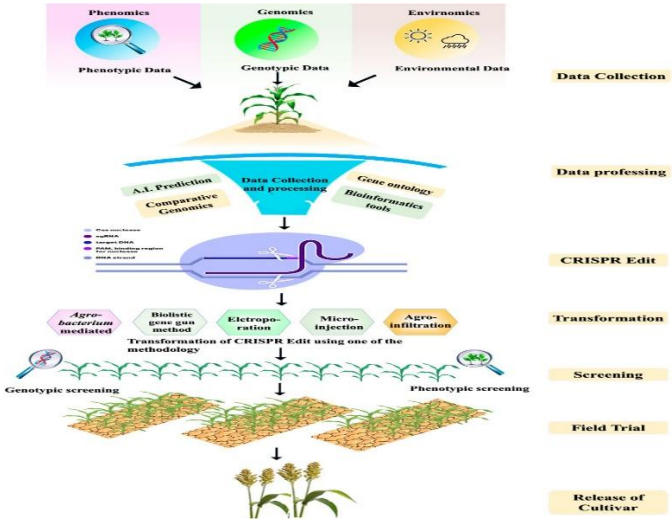
برای درک چگونگی استفاده از بایوتکنالوژی در شرایط تغییرات اقلیمی، این مطالعه از روش مرور روایتی استفاده کرده است که با ترکیب ادبیات علمی موجود و یافته‌های تجربی، گزارشی منسجم از سازگاری‌های فیزیولوژیکی و جنتیکی در نباتات ارائه می‌دهد. این روش از یک رویکرد زمان‌بندی‌شده و موضوع‌محور پیروی می‌کند که کشفیات کلیدی را بررسی کرده و آن‌ها را با پیشرفت‌های نوین در علوم نباتی پیوند می‌دهد. فصل‌بندی مقاله بر اساس رویکرد موضوع‌محور (Thematic Structure) انجام شده است. در این روش، مقالات و منابع علمی ابتدا بر اساس موضوعات اصلی مرتبط با نقش بایوتکنالوژی در توسعه محصولات زراعتی سازگار با اقلیم دسته‌بندی گردیده‌اند. سپس هر فصل به یکی از تکنالوژی‌ها یا رویکردهای مهم در این زمینه اختصاص داده شده است

تکنالوژی CRISPR/Cas9 و ویرایش جینوم در نباتات زراعتی

اصول و میکانیزم‌های CRISPR/Cas9

تکنالوژی CRISPR/Cas9 یک انقلاب را در زمینهٔ انجینری جنتیک به وجود آورده که امکان دستکاری دقیق و کارآمد جینوم نباتات را فراهم آورده است. روش های پیشرفته ویرایش جینوم، به ویژه سیستم‌های **CRISPR/Cas**، آماده ایجاد تحول چشم‌انداز زراعت و ایفای نقش حیاتی در تضمین امنیت غذایی آینده هستند. این سیستم که ابتدا به عنوان بخشی از سیستم ایمنی بکتریا کشف شد، بر اساس مکانیسم شناسایی و برش رشته های خاص DNA عمل می‌کند(Doggalli et al., 2025). پروتئین Cas9 به عنوان یک آندونوکلئاز عمل نموده و با RNA راهنما(gRNA) ، می‌تواند به نقاط مشخصی در جینوم وصل شده و برش ایجاد کند. این برش‌ها سپس از طریق مکانیسم‌های ترمیم DNA نبات، شامل ترمیم غیرهمولوگ (NHEJ) یا ترمیم هدایت‌شده با همولوگی(HDR) ، بازسازی می‌شوند و منجر به ایجاد جهش‌های هدفمند یا درج توالی‌های جدید ساخته شده‌اند(شکل 1)(Chavhan et al., 2025) . دقت و سرعت بالای این تکنالوژی آن را به ابزاری بهتری برای بهبود سریع انواع محصولات زراعتی تبدیل کرده است. قابل توجه است که در سال 2021، ژاپن اولین بادنجان رومی ویرایش‌شده با

CRISPR/Cas9در جهان را معرفی کرد، یعنی بادنجان رومی (Sicilian Rouge High GABA)، که به منظور افزایش سطح γ-امینوبوتیریک اسید (GABA) مهندسی شده بود (Chavhan et al., 2025).



شکل1. نمایش نموداری CRISPR-Cas و روند کاری آن (Chavhan et al., 2025)

کاربردهای CRISPR در بهبود تحمل به تنش‌های اقلیمی

CRISPR/Cas9در بهبود تحمل به تنش‌های مختلف اقلیمی، از جمله خشکی، گرما، شوری و سرما کاربردهای گسترده‌ای یافته است. در محصولاتی مانند برنج، گندم و جواری ویرایش جین‌هایی مانند DREB، HSP، SOS، و NHX توسط این روش منجر به افزایش قابل توجه نباتات تحمل به تنش‌های محیطی شده است که بعد از تغیر میتواند به روش های مختلف به نبات اصلاح شده وارد شود به طور مثال در گندم که کار شده انتقال از طریق آگروباکتریوم (Agrobacterium-mediated transformation) برای وارد کردن سازه‌های CRISPR **به** رویان‌های نابالغ گندم استفاده شده است (Kaur et al., 2025). برای مثال، در برنج، ویرایش جین‌های مرتبط با تحمل به خشکی منجر به افزایش ۲۰ تا ۳۰ درصدی عملکرد در شرایط کم‌آبی شده است(Riaz et al., 2025) . در گندم نیز، استفاده ازCRISPR برای بهبود تحمل به تنش های گرما و شوری نتایج امیدوارکننده‌ای به همراه داشته است(Ahtisham & Obaid, 2024) . این تکنالوژی همچنین در توسعهٔ محصولاتی با مقاومت بهبودیافته به بیماری‌ها و آفات به کار رفته واستفاده و به کارگیری از آفت کش ها و مواد کیمیاوی را به اندازه قابل قبول کم میکند (Sarfraz et al., 2025) .

پیشرفت‌های اخیر در تکنالوژی CRISPR

پیشرفت‌های اخیر در تکنالوژیCRISPR منجر به توسعهٔ نسل‌های جدید ویرایشگرها شده که دقت و کارایی بیشتری دارند. ویرایشگرهای پایه (Base Editors) امکان تبدیل مستقیم یک نوکلئوتید به نوکلئوتید دیگر را بدون ایجاد برش دورشته‌ای در DNAفراهم می‌کنند، که خطر اثرات نامطلوب را کاهش می‌دهد(Chen et al., 2024) . ویرایشگرهای اولیه (Prime Editors)نیز قابلیت‌های پیشرفته‌تری دارند و می‌توانند درج، حذف و جایگزینی‌های دقیق را بدون نیاز به DNA الگو انجام دهند(Chavhan et al., 2025) . این ابزارهای پیشرفته در محصولاتی مانند بادنجان رومی، بادرنگ، و بادنجان سیاه برای بهبود صفاتی که در مقابل تنش های زنده و غیر زنده مقاومت نشان بدهند استفاده شده‌اند(Larriba et al., 2024) . استفاده از این تکنالوژی‌های جدید همچنین امکان دستکاری دقیق‌تر مسیرهای متابولیکی برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای و افزایش محتوای موادی مانند ویتامین‌ها و مواد معدنی را فراهم می‌آورد(Aishwarya & Singh, 2025) .

موفقیت‌ها و چالش‌های تکنالوژی CRISPR در زراعت

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، تکنالوژی CRISPR همچنان با چالش‌هایی مواجه است که باید برای کاربرد گسترده‌تر آن برطرف شوند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، اثرات خارج از هدف (off-target effects) است که می‌تواند منجر به تغییرات ناخواسته در جینوم شود(Mann et al., 2024) . با این حال، بهبودهای اخیر در طراحی RNA راهنما و استفاده از انواع جدید پروتئین‌هایCas ، این خطر را به طور قابل توجهی کاهش داده است. چالش دیگر، روش‌های انتقال کارآمد اجزای CRISPRبه حجره های نباتی و بازسازی نباتات کامل از آن‌هاست، که در برخی محصولات همچنان دشوار است (Inam et al., 2024). از منظر نظارتی، وضعیت قانونی محصولات ویرایش‌شده با CRISPR در کشورهای مختلف متفاوت است و این ابهام می‌تواند مانعی برای تجاری‌سازی باشد(Mann et al., 2024) . با این وجود، موفقیت‌های اخیر در توسعه و تأیید تجاری برخی محصولات ویرایش‌شده، مانند کیله با محتوای بالایβ-carotene در فیلیپین، نشان‌دهندهٔ پتانسیل بالای این تکنالوژی برای کمک به امنیت غذایی است(Tripathi et al., 2024) . این میکانیزم‌ها در مطالعات جدید نیز تأیید شده‌اند.

انجینری جنتیک و تکنالوژی‌های ترانسجنیک

توسعهٔ نباتات اصلاح شده مقاوم به تنش‌های محیطی

انجینری جنتیک از طریق توسعهٔ نباتات اصلاح شده (GM) ، نقش مهمی در بهبود تحمل محصولات زراعتی به تنش‌های محیطی ایفا کرده است. این رویکرد شامل انتقال جین‌های خاص از منابع مختلف به نباتات هدف برای بهبود صفات مطلوب است. نباتات اصلاح شده‌ای که برای تحمل به خشکی، گرما، شوری، و سرما توسعه یافته‌اند، در آزمایش‌های مزرعه‌ای عملکرد بهتری نسبت به ارقام معمولی نشان داده‌اند (Rusmayadi, 2024) . به عنوان مثال، نباتات اصلاح شده‌ای که جین های DREB1Aو HSP70 را بیان می‌کنند، تحمل قابل توجهی به تنش‌های خشکی و گرما از خود نشان داده‌اند. در یک مطالعه، نباتات اصلاح شده در شرایط تنش خشکی ۱۵.۲ درصد و در شرایط دمای بالا ۳۳.۲ درصد افزایش عملکرد نسبتاً خوب داشتند (Rusmayadi, 2024). این پیشرفت‌ها نشان‌دهندهٔ پتانسیل بالای انجینری جنتیک در ایجاد سیستم‌های زراعتی سازگارتر و پایدارتر است.

جین های کلیدی برای تحمل به خشکی و گرما

شناسایی و کاربرد جین‌های کلیدی برای تحمل به تنش‌های خشکی و گرما، از اهمیت بسزایی برخوردار است. خانواده‌های جینی DREB، NAC، WRKY، و bZIP از جمله مهم‌ترین فاکتورهای رونویسی هستند که در تنظیم پاسخ به تنش نقش دارند (Singh et al., 2025). جین‌های کد کننده پروتئین‌های شوک حرارتی (HSPs) نیز برای حفاظت از پروتئین‌های حیاتی در برابر تنش گرما ضروری هستند. علاوه بر این، جین‌هایی که در بیوسنتز اسموپروتکتانت‌ها مانند پرولین، گلیسین‌بتائین، و ترهالوز نقش دارند، می‌توانند تحمل به تنش آبی را افزایش دهند(Singh et al., 2025) . مطالعات نشان داده‌اند که بیان بیش از حد این جین‌ها در نباتات اصلاح شده جنتیکی منجر به بهبود عملکرد در شرایط تنش می‌شود. همچنین، جین‌های دخیل در تنظیم هموستاز یونی، مانند NHX وSOS ، برای تحمل به شوری اهمیت دارند. درک عمیق‌تر از شبکه‌های جینی و مسیرهای سیگنالینگ دخیل در پاسخ به تنش، امکان طراحی راهبردهای هدفمندتر برای انجینری جنتیک را فراهم می‌آورد.

بیوفورتیفیکیشن و بهبود کیفیت تغذیه‌ای

بیوفورتیفیکیشن، یعنی افزایش محتوای مواد مغذی در محصولات زراعتی، یکی دیگر از کاربردهای مهم انجینری جنتیک است که می‌تواند به مقابله با سوء تغذیه کمک کند. استفاده از بایوتکنالوژی برای افزایش محتوای ویتامین‌ها، مواد معدنی، و

پروتئین‌های ضروری در محصولات غذایی، راه‌حل نوینی برای بهبود امنیت تغذیه‌ای است(Mandal et al., 2024) . برای مثال، برنج طلایی (Golden Rice) که حاوی β-carotene است، برای مقابله با کمبود ویتامین A توسعه یافته است. همچنین، افزایش محتوای آهن و روی در گندم و برنج می‌تواند به کاهش کمبودهای ریزمغذی‌ها در جوامع آسیب‌پذیر کمک کند(Lallawmkimi et al., 2024) . قابل توجه است که محصولات مقدار مواد غذایی مفید آن افزایش یافته نه تنها کیفیت تغذیه‌ای بهتری دارند، بلکه در برخی موارد تحمل بیشتری به تنش‌های محیطی نیز نشان داده‌اند. این هم افزایی بین بهبود کیفیت تغذیه‌ای و تحمل به تنش، فرصت منحصر به فردی برای توسعهٔ محصولاتی فراهم می‌آورد که هم سالم‌تر و هم سازگارتر با شرایط تغییرات اقلیمی هستند(Mandal et al., 2024) .

ملاحظات ایمنی زیستی و پذیرش عمومی

با وجود مزایای بالقوهٔ نباتات اصلاح شده جنتیکی، نگرانی‌هایی در مورد ایمنی زیستی، اثرات زیست‌محیطی، و پذیرش عمومی وجود دارد. ارزیابی‌های ایمنی جامع برای اطمینان از عدم تأثیر منفی بر سلامت انسان و محیط زیست ضروری است (Seid & Andualem, 2021). سیستم‌های نظارتی سختگیرانه در بسیاری از کشورها برای تأیید محصولات اصلاح شده جنتیکی وجود دارد، اما تفاوت‌های قابل توجهی در قوانین مختلف کشورها مشاهده می‌شود(Kumar, 2025) . پذیرش عمومی نیز چالش مهمی است که تحت تأثیر عوامل فرهنگی، اجتماعی، و اقتصادی قرار دارد. ارتباط شفاف با عموم، آموزش علمی، و نشان دادن مزایای ملموس این تکنالوژی‌ها می‌تواند به افزایش پذیرش کمک کند. مشارکت ذینفعان مختلف، از جمله زارعین، مصرف‌کنندگان، و سیاست‌گذاران، در فرایند توسعه و تصمیم‌گیری اهمیت بالایی دارد. تجربیات کشورهایی که محصولات GM را با موفقیت پذیرفته‌اند نشان می‌دهد که رویکردهای مبتنی بر شواهد علمی و شفافیت می‌تواند به کاهش نگرانی‌ها و افزایش پذیرش منجر شود(Adegbaju et al., 2024) . این میکانیزم‌ها در مطالعات جدید نیز تأیید شده‌اند.

انتخاب به کمک نشانگر و اصلاح جینومی

نشانگرهای مالیکولی وQTL های مرتبط با تحمل تنش

انتخاب به کمک نشانگر (MAS) یکی از ابزارهای کلیدی در اصلاح نباتات مدرن است که امکان شناسایی و انتخاب جینوتایپ‌های برتر در مراحل اولیه رشد را فراهم می‌آورد. شناسایی نشانگرهای مالیکولی مرتبط با صفات مهم زراعتی، از جمله تحمل به تنش، از طریق مطالعات نقشه‌برداری QTL و GWAS امکان‌پذیر شده است(Tyagi et al., 2024) . برای مثال، در گندم، QTLهای متعددی برای تحمل به خشکی و گرما شناسایی شده‌اند که در برنامه‌های اصلاحی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Bellundagi et al., 2022). در برنج نیز، QTLهایی مانند Sub1 برای تحمل به غرقابی و Saltol برای تحمل به شوری شناسایی و با موفقیت به ارقام تجاری منتقل شده‌اند(Mohanavel et al., 2024) . استفاده از نشانگرهای SNP با تراکم بالا امکان نقشه‌برداری دقیق‌تر و شناسایی جین‌های کاندید را فراهم می‌آورد. این پیشرفت‌ها به اصلاح‌گران اجازه می‌دهد تا با دقت و سرعت بیشتری جینوتیپ‌های برتر را برای صفات پیچیده‌ای مانند تحمل به تنش انتخاب کنند.

انتخاب جینومی و پیش‌بینی ارزش اصلاحی

انتخاب جینومی (GS) یک پیشرفت مهم در اصلاح نباتات است که از اطلاعات تمام نشانگرها در سراسر جینوم برای پیش‌بینی ارزش اصلاحی استفاده می‌کند. برخلاف MAS که تنها بر نشانگرهای مرتبط باQTL های شناخته‌شده تمرکز دارد، GSاز تمام اطلاعات جینومی برای ایجاد مدل‌های پیش‌بینی استفاده می‌کند(Budhlakoti et al., 2022) . این رویکرد به ویژه برای صفات کمی با کنترل جنتیکی پیچیده، مانند تحمل به تنش و عملکرد، مؤثر است. مطالعات نشان داده‌اند که GS می‌تواند دقت

انتخاب را تا ۵۰ درصد افزایش دهد و زمان چرخهٔ اصلاحی را کاهش دهد(Budhlakoti et al., 2022) . در گندم و برنج، استفاده از GS منجر به پیشرفت جنتیکی قابل توجهی برای صفاتی مانند تحمل به خشکی و گرما شده است. ترکیب GS با سرعت‌بخشی اصلاح (speed breeding) می‌تواند به طور چشمگیری زمان لازم برای توسعهٔ ارقام جدید را کاهش دهد. این تکنالوژی‌ها به ویژه برای توسعهٔ ارقام سازگار با تغییرات اقلیمی که نیاز به بهبود همزمان چندین صفت دارند، بسیار مناسب هستند (Soni et al., 2024).

برنامه‌های بک‌کراس به کمک نشانگر (MABC)

بک‌کراس به کمک نشانگر (MABC) یکی از کاربردهای موفق MAS در اصلاح نباتات است که امکان انتقال هدفمند جین‌ها یاQTL های خاص به ارقام نخبه را فراهم می‌آورد. این روش از انتخاب پیش‌زمینه برای شناسایی فرزندانی که جین‌های هدف را دارند و انتخاب پس‌زمینه برای بازیابی جینوم والد تکرارشونده استفاده می‌کند(Bellundagi et al., 2022) . در گندم، برنامه‌های MABC برای انتقال جین‌های تحمل به گرما منجر به توسعهٔ خطوطی شده که ۹۰ تا ۹۷ درصد جینوم والد تکرارشونده را بازیابی کرده‌اند(Bellundagi et al., 2022) . در برنج نیز، هرمیدگی موفقیت‌آمیز جین‌های مقاومت به بیماری‌ها و تحمل به تنش‌های مختلف از طریق MABC گزارش شده است(Mohanavel et al., 2024) . این رویکرد به ویژه برای صفاتی که توسط تعداد محدودی جین کنترل می‌شوند مؤثر است. استفاده از نشانگرهای کارآمد و پلتفرم‌های جینوتایپینگ با توان بالا، کارایی و سرعت MABC را بهبود بخشیده و آن را به ابزاری ارزشمند برای اصلاح‌گران تبدیل کرده است.

ادغام روش‌های سنتی و مالیکولی در اصلاح نباتات

ادغام روش‌های اصلاح سنتی با تکنیک‌های مالیکولی، رویکردی هم افزا (Synergistic) برای بهبود کارایی برنامه‌های اصلاحی ارائه می‌دهد. در حالی که اصلاح سنتی از تنوع جنتیکی طبیعی و انتخاب فنوتایپی استفاده می‌کند، روش‌های مالیکولی امکان شناسایی دقیق‌تر و سریع‌تر جینوتایپ‌های برتر را فراهم می‌آورند(Chang-Brahim et al., 2024) . این ادغام در توسعهٔ خطوط با تحمل چندگانه به تنش بسیار مؤثر است. برای مثال، در برنج، ترکیب MAS با روش‌های سنتی منجر به توسعهٔ خطوطی شده که همزمان به خشکی، شوری، غرقابی، و بیماری‌ها مقاوم هستند(Mohanavel et al., 2024) . استفاده از فنوتایپینگ با توان بالا همراه با جینوتایپینگ، امکان ارزیابی دقیق‌تر فینوتایپ‌ها و جینوتایپ‌ها را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، ترکیب داده‌های omics مختلف (جینومیکس، ترانسکریپتومیکس، پروتئومیکس، و متابولومیکس) با روش‌های اصلاحی می‌تواند به درک عمیق‌تری از مکانیسم‌های تحمل به تنش منجر شود و راهبردهای اصلاحی هدفمندتری را امکان‌پذیر سازد (Joshi et al., 2023). این میکانیزم‌ها در مطالعات جدید نیز تأیید شده‌اند.

مکانیزم‌های مالیکولی و فیزیولوژییکی تحمل به تنش

پاسخ‌های مالیکولی به تنش خشکی

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید محصولات زراعتی است که پاسخ‌های پیچیده‌ای در سطح مالیکولی، فیزیولوژییکی، و بیوشیمیایی ایجاد می‌کند. در سطح مالیکولی، تنش خشکی منجر به فعال‌شدن زنجیره (Cascade) سیگنالینگ و بیان جین‌های پاسخ‌دهنده به تنش می‌شود(Franco-Navarro et al., 2025) . فاکتورهای رونویسی خانواده‌هایDREB ، NAC، و MYB نقش کلیدی در تنظیم بیان جین‌های دفاعی دارند. این فاکتورها با اتصال به عناصر-cis acting در پروموتر جین‌های هدف، بیان آن‌ها را تنظیم می‌کنند(Joshi et al., 2016) . علاوه بر این، هورمون‌های نباتی، به ویژه اسید آبسیزیک(ABA) ، نقش محوری در پاسخ به تنش خشکی دارند ABA .باعث بسته شدن ستوماتا، کاهش تعرق، و

فعال‌شدن جین‌های پاسخ‌دهنده به تنش می‌شود(Vishwakarma et al., 2017) . سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، شامل آنزیم‌هایی مانندSOD ، CAT، وPOD ، برای مقابله با انواع فعال آکسیجن (ROS) که در شرایط تنش افزایش می‌یابند، ضروری هستند(Sachdev et al., 2021) . درک این مکانیسم‌ها برای توسعهٔ راهبردهای هدفمند بهبود تحمل به خشکی بسیار مهم است.

سازگاری با تنش حرارتی و گرما

تنش حرارتی و گرما اثرات مخربی بر رشد، نمو، و عملکرد نباتات دارد، به ویژه در مراحل حساس مانند گلدهی و پرشدن دانه. در سطح مالیکولی، نباتات در پاسخ به تنش گرما، پروتئین شوک حرارتی (HSPs) تولید می‌کنند که نقش حفاظتی برای پروتئین‌های حجروی دارند و از تخریب آن‌ها جلوگیری می‌کنند(Hasanuzzaman et al., 2013) . HSPs به عنوان پروتئینِ راهنما و محافظ پروتئین‌های دیگر (Chaperone) مالیکولی عمل کرده و به حفظ ساختار و عملکرد پروتئین‌ها در شرایط تنش کمک می‌کنند. علاوه بر این، مکانیسم‌های دیگری مانند تنظیم متابولیسم کربوهیدرات‌ها، افزایش تولید اسموپروتکتانت‌ها، و تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی در سازگاری با تنش گرما نقش دارند(Bita & Gerats, 2013) . تغییرات اپی‌جنتیکی، از جمله میتایلیشن DNA و اصلاحات هیستونی، نیز در ایجاد حافظهٔ تنش و انتقال تحمل به نسل‌های بعدی مؤثر هستند(Jin et al., 2024) . درک جامع این مکانیسم‌ها امکان طراحی راهبردهای مؤثر برای بهبود تحمل نباتات به درجه حرارت بالا را فراهم می‌آورد.

نقش فاکتورهای رونویسی و مسیرهای سیگنالینگ

فاکتورهای رونویسی به عنوان سوئیچ‌های کلیدی در تنظیم پاسخ‌های تنش عمل می‌کنند و می‌توانند بیان صدها جین را هماهنگ کنند. مطالعات نشان داده‌اند که دستکاری فاکتورهای رونویسی خاص می‌تواند به طور قابل توجهی تحمل به تنش‌های چندگانه را افزایش دهد(Ma & Lanjuan, 2024) . مسیرهای سیگنالینگ مختلف، از جمله مسیرهای وابسته به کلسیم، MAPK، و هورمون‌ها، در انتقال سیگنال‌های تنش از محیط خارجی به داخل حجره نقش دارند. این مسیرها از طریق تعاملات پیچیده با یکدیگر، پاسخ‌های یکپارچه و هماهنگ ایجاد می‌کنند که به نبات امکان سازگاری با شرایط محیطی متغیر را می‌دهد.

۵ اسموس تنظیمی و سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی

تنظیم عملیه اسموس یکی از مهم‌ترین استراتژی‌های نباتات برای مقابله با تنش‌های آبی است. تجمع اسموپروتکتانت‌هایی مانند پرولین، گلیسین‌بتائین، و قندهای محلول به حفظ فشار تورژسانس حجروی و حفاظت از ساختارهای حجروی کمک می‌کند (Haddad et al., 2023). سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی نیز برای خنثی کردن اثرات مخرب ROS که در شرایط تنش به طور قابل توجهی افزایش می‌یابند، حیاتی هستند. این سیستم‌ها شامل انزایم‌های آنتی‌اکسیدانی و ترکیبات غیرآنزیمی مانند آسکوربات و گلوتاتیون هستند که با هم برای حفظ تعادل ردوکس حجروی عمل می‌کنند(Sachdev et al., 2021) . جینوتایپ‌های متحمل به تنش معمولاً فعالیت بالاتری از این سیستم‌ها نشان می‌دهند، که نشان‌دهندهٔ اهمیت آن‌ها در سازگاری با تنش است. این میکانیزم‌ها در مطالعات جدید نیز تأیید شده‌اند.

٦ .چشم‌اندازهای آینده و چالش‌های پیش‌رو

٦.١ .ادغام تکنالوژی‌های نوین با روش‌های سنتی اصلاح نباتات

آینده اصلاح محصولات زراعتی سازگار با اقلیم در تلفیق هوشمندانه تکنالوژی‌های بایوتکنالوژیکی پیشرفته با روش‌های سنتی اصلاح نهفته است. انتخاب جینومی که از اطلاعات تمام نشانگرهای جینومی استفاده می‌کند، پتانسیل بالایی برای افزایش دقت و

سرعت اصلاح دارد(Budhlakoti et al., 2022) . ترکیب این روش با فینوتایپینگ با توان بالا می‌تواند کارایی برنامه‌های اصلاحی را چند برابر کند.

استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده جینومی و فینوتایپی، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد جینوتایپ‌ها را فراهم می‌کند(Pasupuleti, 2025) . این رویکردها می‌توانند به شناسایی ترکیبات مناسب والدین برای تولید نسل‌های برتر کمک کنند. همچنین، مدل‌سازی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر عملکرد محصولات می‌تواند به طراحی راهبردهای اصلاحی آینده‌نگر کمک کند.

۶.۲ .چالش‌های تنظیمی و پذیرش عمومی

یکی از چالش‌های اصلی در تجاری‌سازی محصولات ویرایش‌شده جینومی، مقررات و پذیرش عمومی است. اگرچه بسیاری از کشورها محصولات ویرایش‌شده با CRISPR را با محصولات اصلاح شده جنتیکی متفاوت می‌دانند، اما هنوز چارچوب‌های تنظیمی واضحی در بسیاری از کشورها وجود ندارد(Ullah et al., 2025) . ایجاد مقررات شفاف، واضع و مبتنی بر دانش برای این تکنالوژی‌ها ضروری است.

پذیرش عمومی محصولات بایوتکنالوژیکی نیز نیاز به ارتباطات شفاف و واضع در مورد امنیت و مزایای این تکنالوژی‌ها دارد (Adegbaju et al., 2024).آموزش عموم مردم و ذینفعان در مورد تفاوت‌های بین روش‌های مختلف بایوتکنالوژی و مزایای آن‌ها برای امنیت غذایی می‌تواند به افزایش پذیرش کمک کند.

۶.۳ .حفظ تنوع جنتیکی و بهره‌برداری از منابع وحشی

برای تضمین **امنیت غذایی پایدار**، حفظ و نگهداری تنوع جنتیکی این منابع ارزشمند یک ضرورت اساسی است. به دلیل تغییرات محیطی و **فرسایش جنتیکی**، برخی از منابع جنتیکی باارزش تاکنون از بین رفته‌اند. نژادهای بومی(Landraces) ، خویشاوندان وحشی، گونه‌های وحشی، ذخایر جنتیکی، مواد اصلاحی پیشرفته و ارقام مدرن از جمله مهم‌ترین منابع جنتیکی نباتات به‌شمار می‌روند. این منابع متنوع نقش مهمی در حفظ **تنوع پایدار زنده** ایفا کرده‌اند (Salgotra & Chauhan, 2023) . حفظ و بهره‌برداری از تنوع جنتیکی موجود در گونه‌های وحشی و اجداد محصولات زراعتی برای موفقیت بلندمدت برنامه‌های اصلاحی حیاتی است(Salgotra & Chauhan, 2023) . بسیاری از صفات تحمل تنش در انواع نباتات وحشی یافت می‌شوند که می‌توانند از طریق اصلاح بین انواع یا کلونینگ جین‌ها به ارقام زراعتی منتقل شوند(Zhang et al., 2016) .

استفاده از رویکردهای پان‌جینومیک که تنوع جنتیکی گسترده‌ای از جرم‌پلاسم را در بر می‌گیرد، می‌تواند به شناسایی الیل‌های جدید و مفید کمک کند(Raza et al., 2025) . بانک‌های جین و مجموعه‌های جرم‌پلاسم نقش کلیدی در حفظ این تنوع برای استفاده آینده دارند و نیاز به حمایت و توسعه مداوم دارند.

۶.۴ .راهبردهای یکپارچه برای زراعت پایدار

توسعه محصولات زراعتی سازگار با اقلیم، اگرچه گامی اساسی در مواجهه با پیامدهای تغییرات اقلیمی است، اما به‌تنهایی نمی‌تواند تضمین‌کننده پایداری واقعی زراعت باشد. دستیابی به یک سیستم زراعتی پایدار مستلزم آن است که این محصولات با شیوه‌های بهبودیافته مدیریت مزرعه، استفاده مؤثر و هدفمند از منابع آب، و حفظ و بهبود سلامت خاک همراه شوند (Franco-Navarro et al., 2025).در این میان، رویکردهای زراعت هوشمند اقلیمی که تلفیقی از مدیریت علمی زراعت، تکنالوژی‌های نوین و ارقام بهبودیافته را در بر می‌گیرند، نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش تاب‌آوری سیستم‌های زراعتی و تضمین پایداری تولید در آینده دارند.

علاوه بر این، اجرای موفق چنین راهبردهایی بدون تقویت همکاری‌های بین‌المللی در زمینه تحقیق و توسعه، تبادل دانش و تکنالوژی، و حمایت هدفمند از زارعین کوچک در کشورهای در حال توسعه امکان‌پذیر نخواهد بود(Kole et al., 2015) . سرمایه‌گذاری مستمر در تحقیقات بایوتکنالوژی و توسعه ظرفیت‌های انسانی از طریق آموزش نیروی متخصص، نه‌تنها به تسریع نوآوری‌های علمی کمک می‌کند، بلکه زمینه بهره‌برداری مؤثر و پایدار از این دستاوردها را در بخش زراعت فراهم می‌سازد. این میکانیزم‌ها در مطالعات جدید نیز تأیید شده‌اند.

نتیجه گیری

این مرور نشان داد که تغییرات اقلیمی با افزایش تنش های غیرزنده و زنده، پایداری سیستم های زراعتی و امنیت غذایی جهانی را با چالش های جدی مواجه ساخته است. کاهش عملکرد محصولات، محدودیت منابع آب و خاک، و ناکارآمدی نسبی روش های اصلاح سنتی نشان می دهد که دستیابی به ارقام زراعتی سازگار با اقلیم یک ضرورت اجتناب ناپذیر است. در این راستا، بایوتکنالوژی نباتی به عنوان یک ابزار موثر و تحول آفرین، نقش مهمی در شناسایی و بهبود جین ها و مسیرهای مالیکولی مرتبط با تحمل تنش های محیطی ایفا می کند.

تکنالوژی هایی مانند ویرایش جینوم باCRISPR/Cas9 ، انجینری جنتیک، انتخاب به کمک نشانگر و انتخاب جینومی، امکان توسعه ارقام پربازده، مقاوم به تنش های چندگانه و دارای کیفیت تغذیه ای بهتر را فراهم ساخته اند. در سطح مالیکولی و فیزیولوژیکی، مکانیسم هایی شامل فاکتورهای رونویسی، پروتئین های شوک حرارتی، اسموپروتکتانت ها و سیستم های آنتی اکسیدانی نقش کلیدی در افزایش سازگاری نباتات با شرایط نامساعد اقلیمی دارند.

در مجموع، ادغام رویکردهای بایوتکنالوژیکی با روش های اصلاح سنتی و شیوه های زراعت پایدار می تواند مسیر موثری برای افزایش تاب آوری زراعت، کاهش آسیب پذیری محصولات و تضمین امنیت غذایی در شرایط تغییرات اقلیمی فراهم سازد. تداوم پژوهش های علمی، توسعه زیرساخت های تحقیقاتی و انتقال تکنالوژی، برای بهره برداری موثر از این راهبردها در آینده ضروری خواهد بود.

منابع

Abebaw, S. E. (2025). A Global Review of the Impacts of Climate Change and Variability on Agricultural Productivity and Farmers'' Adaptation Strategies. Food Science & Nutrition. https://doi.org/10.1002/fsn3.70260

Perveen, N., Pachauri, E., Bhavani, B., Ahmad, A., Kumar, P., Singh, J., Kumari, P., Sinha, D., Singh, A. K., & Kashyap, S. (2025). Breeding for Climate Resilience: Genetic Strategies for Developing Drought and Heat Tolerant Crops. Plant Science Archives. https://doi.org/10.51470/psa.2026.11.1.01

Sato, H., Mizoi, J., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2024). *Complex plant responses to drought and heat stress under climate change*. The Plant Journal, 117(6), 1873–1892. https://doi.org/10.1111/tpj.16612

Hossain, M. M., Sultana, F., Mostafa, M., Ferdus, H., Rahman, M., Rana, J. A., Islam, S. S., Adhikary, S., Sannal, A., Hosen, M. A. E., Nayeema, J., Emu, N. J., Kundu, M., Biswas, S. K., Farzana, L., & Al Sabbir, M. A. (2024). *Plant disease dynamics in a changing climate: Impacts, molecular mechanisms, and climate-informed strategies for sustainable management*. Discover Agriculture, 2, Article 132. https://doi.org/10.1007/s44279-024-00144-w

El Hajj, A. K. (2023). *Current and future of plant breeding strategies to cope with climate change: A review*. Open Access Journal of Agricultural Research, 8(3), 338–351. https://doi.org/10.23880/oajar-16000338

Mohapatra, R., Kouser, H. M., Toko, A., Singh, M. S., & Tripathi, D. K. (2024). *A review on biotechnological innovations in developing stress-tolerant crops for adverse environmental conditions*. Journal of Scientific Research and Reports, 30(7), 2200. https://journaljsrr.com/index.php/JSRR/article/view/2200

Sushmitha, T., Ranganna, G., Gavhale, K. N., Singh, A., Mali, V. S., Diksha, Shingade, D. M., & Khatri, R. (2024). *The role of biotechnology in the future of fruit crop production: A review*. Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 27(9), 967–987. https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i91368

Srivastava, R. K., Yadav, O. P., Sivasubramani, S., Gupta, S. K., Serba, D. D., Choudhary, S., Govindaraj, M., & Prasad, P. V. V. (2022). *Breeding drought-tolerant pearl millet using conventional and genomic approaches: Achievements and prospects*. Frontiers in Plant Science, 13, 781524. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.781524

Doggalli, G., Kavya, K., Oinam, S., Singh, R., & Sharma, P. (2024). *Transformative gene editing methods: Precision in genetically modified crops through trait modification*. Journal of Scientific Research and Reports, 30(8), Article 2283. https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i82283

Chavhan, R. L., Jaybhaye, S. G., Hinge, V. R., Deshmukh, A. S., Shaikh, U. S., Jadhav, P. K., Kadam, U. S., & Hong, J. C. (2025). *Emerging applications of gene editing technologies for the development of climate-resilient crops*. Frontiers in Genome Editing, 2, Article 1524767. https://doi.org/10.3389/fgeed.2025.1524767

Kaur, N., Qadir, M., Francis, D. V., Alok, A., Tiwari, S., & 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

Riaz, A., Uzair, M., Raza, A., Inam, S., Iqbal, R., Jameel, S., Bibi, B., & Khan, M. R. (2025). *Enhancing the productivity and resilience of rice (Oryza sativa) under environmental stress conditions using clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR) technology*. Functional Plant Biology, 52(1), FP24101. https://doi.org/10.1071/fp24101

Lallawmkimi, M. C., Ashoka, P., Sri Veda, D. J. M. S. N. K., Yadav, A., Dhivya, B., Kumar, M., & Rout, A. (2024). Innovative approaches in crop genetic engineering for sustainable agriculture: A review. Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 27(8), 615–631. https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i81177

Ahtisham, M., & Obaid, Z. (2024). *The role of CRISPR/CAS9 technology in enhancing crop resilience to climate change*. Premier Journal of Plant Biology, 1, Article 100001. https://doi.org/10.70389/pjpb.100001

Sarfraz, Z., Zarlashat, Y., Ambreen, A., Mujahid, M., & Iqbal, M. S. (2025). *Advanced gene editing techniques for enhancing disease resistance and climate resilience in crops*. Functional Plant Biology, 52(6), FP24357. https://doi.org/10.1071/FP24357

Chen, F., Chen, L., Yan, Z., Xu, J., Feng, L., He, N., Guo, M., Zhao, J., Chen, Z., Chen, H., Yao, G., & Liu, C. (2024). *Recent advances of CRISPR-based genome editing for enhancing staple crops*. Frontiers in Plant Science, 15, 1478398. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1478398

Aishwarya, V., & Singh, S. (2025). *Application of CRISPR/CAS9 for manipulating vegetable crops: A review*. International Journal of Plant & Soil Science, 37(4), 55–73. https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i45387

Wikandari, R., Manikharda, M., Baldermann, S., Ningrum, A., & Taherzadeh, M. J. (2021). *Application of cell culture technology and genetic engineering for production of future foods and crop improvement to strengthen food security*. Bioengineered, 12(2), 11305–11330. https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2003665

Larriba, E., Yaroshko, O., & Pérez-Pérez, J. M. (2024). *Recent advances in tomato gene editing*. International Journal of Molecular Sciences, 25(5), 2606. https://doi.org/10.3390/ijms25052606

Inam, S., Muhammad, A., Irum, S., Rehman, N., Riaz, A., Uzair, M., & Khan, M. R. (2024). *Genome editing for improvement of biotic and abiotic stress tolerance in cereals*. Functional Plant Biology, 51, FP24092. https://doi.org/10.1071/FP24092

Tripathi, L., Ntui, V. O., & Tripathi, J. N. (2024). Application of CRISPR/Cas-based gene-editing for developing better banana. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12, 1395772. https://doi.org/10.3389/fbioe.2024.1395772 Frontiers

Rusmayadi, G. (2024). Using biotechnology to create transgenic crops that resist climate change. Science Get Journal, 1(3), 17–27. https://doi.org/10.69855/science.v1i3.83

Singh, A., Bahadur, V., Singh, S., & Bawane, A. S. (2025). *Molecular techniques for enhanced drought resistance in vegetable crops: A review*. Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology, 26(5-6), 101–110. https://doi.org/10.56557/pcbmb/2025/v26i5-69304

Mandal, O., Krishnamoorthi, A., Singh, A., Kaur, R., Kalaiselvi, P., Nageshwar, N., Tiwari, U., & Mitra, M. (2024). *Biofortification: Enhancing nutritional content in crops through biotechnology and fighting climate change*. Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 27(2), 186–210. https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i2710

Seid, A., & Andualem, B. (2021). *The role of green biotechnology through genetic engineering for climate change mitigation and adaptation, and for food security: Current challenges and future perspectives*. Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 24(1), 1–11. https://doi.org/10.9734/jabb/2021/v24i130192

Kumar, A. (2025). *Legal framework governing genetically modified crops in India: Assessing regulatory gaps*. Journal of Extension Systems, 39(1), 4–11. https://doi.org/10.48165/jes.2023.39.1.2

Adegbaju, M. S., Ajose, T., Adegbaju, I. E., Omosebi, T., Ajenifujah-Solebo, S. O., Falana, O. Y., Shittu, O. B., Adetunji, C. O., & Akinbo, O. (2024). *Genetic engineering and genome editing technologies as catalyst for Africa's food security: The case of plant biotechnology in Nigeria*. Frontiers in Genome Editing, 6, 1398813. https://doi.org/10.3389/fgeed.2024.1398813

Tyagi, A., Mir, Z. A., Almalki, M. A., Deshmukh, R., & Ali, S. (2024). Genomics-assisted breeding: A powerful breeding approach for improving plant growth and stress resilience. Agronomy, 14(6), 1128. https://doi.org/10.3390/agronomy14061128

Bellundagi, A., Ramya, K. T., Krishna, H., Jain, N., Shashikumara, P., Singh, P. K., Singh, G. P., & Prabhu, K. V. (2022). *Marker-assisted backcross breeding for heat tolerance in bread wheat (Triticum aestivum L.)*. Frontiers in Genetics, 13, Article 1056783. https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1056783

Mohanavel, V., Muthu, V., Kambale, R., Palaniswamy, R., Seeli, P., Ayyenar, B., Rajagopalan, V., Manickam, S., Rajasekaran, R., Rahman, H., Nallathambi, J., Swaminathan, M., Chellappan, G., Vellingiri, G., & Muthurajan, R. (2024). *Marker-assisted breeding accelerates the development of multiple-stress-tolerant rice genotypes adapted to wider environments*. Frontiers in Plant Science, 15, 1402368. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1402368

Budhlakoti, N., Kushwaha, A. K., Rai, A., Chaturvedi, K. K., Kumar, A., Pradhan, A. K., Kumar, U., Kumar, R. R., Juliana, P., Mishra, D. C., & Kumar, S. (2022). *Genomic selection: A tool for accelerating the efficiency of molecular breeding for development of climate-resilient crops*. Frontiers in Genetics, 13, Article 832153. https://doi.org/10.3389/fgene.2022.832153

Soni, R., Ashaq, M., Manjunath, P., Ashoka, P., Pandey, S. K., Hosur, S. R., Das, R., Das, J., Raj, R., & Singh, B. V. (2024). *Harnessing genomic resources and molecular breeding techniques for advancing crop resilience and productivity*. Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology, 25(11-12), https://doi.org/10.56557/pcbmb/2024/v25i11-128905

Chang-Brahim, I., Koppensteiner, L. J., Beltrame, L., Bodner, G., Saranti, A., Salzinger, J., Fanta-Jende, P., Sulzbachner, C., Bruckmüller, F., Trognitz, F., Samad-Zamini, M., Zechner, E., Holzinger, A., & Molin, E. M. (2024). *Reviewing the essential roles of remote phenotyping, GWAS and explainable AI in practical marker-assisted selection for drought-tolerant winter wheat breeding*. Frontiers in Plant Science, 15, 1319938. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1319938

Joshi, S., Patil, S., Shaikh, A., Jamla, M., & Kumar, V. (2024). *Modern omics toolbox for producing combined and multifactorial abiotic stress tolerant plants*. Plant Stress, 11, 100301. https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100301

Joshi, R., Wani, S. H., Singh, B., Bohra, A., Dar, Z. A., Lone, A. A., Pareek, A., & Singla-Pareek, S. L. (2016). *Transcription factors and plants response to drought stress: Current understanding and future directions*. Frontiers in Plant Science, 7, 1029. ht Srivastava tps://doi.org/10.3389/fpls.2016.01029

Vishwakarma, K., Upadhyay, N., Kumar, N., Yadav, G., Singh, J., Mishra, R. K., Kumar, V., Verma, R., Upadhyay, R. G., Pandey, M., & Sharma, S. (2017). *Abscisic acid signaling and abiotic stress tolerance in plants: A review on current knowledge and future prospects*. Frontiers in Plant Science, 8, 161. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00161

Sachdev, S., Ansari, S. A., Ansari, M. I., Fujita, M., & Hasanuzzaman, M. (2021). *Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms*. Antioxidants, 10(2), 277. https://doi.org/10.3390/antiox10020277

Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Roychowdhury, R., & Fujita, M. (2013). Physiological, biochemical, and molecular mechanisms of heat stress tolerance in plants. International Journal of Molecular Sciences, 14(5), 9643–9684. https://doi.org/10.3390/ijms14059643

Bita, C. E., & Gerats, T. (2013). *Plant tolerance to high temperature in a changing environment: Scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops*. Frontiers in Plant Science, 4, 273. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00273

Jin, Q., Chachar, M., Ali, A., Chachar, Z., Zhang, P., Riaz, A., Ahmed, N., & Chachar, S. (2024). *Epigenetic regulation for heat stress adaptation in plants: New horizons for crop improvement under climate change*. Agronomy, 14(9), 2105. https://doi.org/10.3390/agronomy14092105

El Haddad, N., En-nahli, Y., Choukri, H., Aloui, K., Mentag, R., El-Baouchi, A., Hejjaoui, K., Rajendran, K., Smouni, A., Maalouf, F., & Agrawal, S. K. (2023). *Metabolic mechanisms underlying heat and drought tolerance in lentil accessions: Implications for stress tolerance breeding*. Plants, 12(23), 3962. https://doi.org/10.3390/plants12233962

Mann, A., Ranga, P., Choudhary, P., Yadav, S., Kaul, N., Dahiya, A., Prakash, N. R., Kumar, A., Kumar, A., & Sanwal, S. K. (2024). Genome editing technologies for enhancing plant resilience to biotic and abiotic stresses - brief review. Journal of Soil Salinity and Water Quality, 16(2), 180–193. https://doi.org/10.56093/jsswq.v16i2.156291

Arif, M., Ilyas, M., Adnan, M., Kalsoom, R., Ren, M., Xu, R., & Li, L. (2025). *Molecular mechanisms and breeding strategies for enhancing wheat resilience to environmental stresses: The role of heat shock proteins and implications for food security*. International Journal of Biological Macromolecules, 308(Part 3), 142468. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142468

Ullah, S. S., Iqbal, R., Ghafoor, A., Batool, S. A., Bashir, T., & Mehmood, A. (2025). *Next-generation CRISPR biotechnology for Pakistan: AI-driven, climate-resilient super crops and the future of food security*. Futuristic Biotechnology, 5(3), 28–35. https://doi.org/10.54393/fbt.v5i3.189

Raza, A., Zaman, Q. U., Shabala, S., Tester, M., Munns, R., Hu, Z., & Varshney, R. K. (2025). *Genomics-assisted breeding for designing salinity-smart future crops*. Plant Biotechnology Journal, 23(8), 3119–3151. https://doi.org/10.1111/pbi.70104

Franco-Navarro, J. D., Padilla, Y. G., Álvarez, S., Calatayud, Á., Colmenero-Flores, J. M., Gómez-Bellot, M. J., Hernández, J. A., Martínez-Alcalá, I., Penella, C., Pérez-Pérez, J. G., Sánchez-Blanco, M. J., Tasa, M., & Acosta-Motos, J. R. (2025). *Advancements in water-saving strategies and crop adaptation to drought: A comprehensive review*. Physiologia Plantarum, 177(4), e70332. https://doi.org/10.1111/ppl.70332

Kole, C., Muthamilarasan, M., Henry, R. J., Edwards, D., Sharma, R., Abberton, M., Batley, J., Bentley, A. R., Blakeney, M., Bryant, J., Cai, H., Çakir, M., Cseke, L. J., Cockram, J., de Oliveira, A. C., De Pace, C. D., Dempewolf, H., Ellison, S., Gepts, P., Greenland, A. J., Hall, A., Hori, K., Hughes, S., Humphreys, M. W., Iorizzo, M., Ismail, A.

M., Marshall, A., Mayes, S., Nguyen, H. T., Ogbonnaya, F. C., Ortiz, R., Paterson, A. H., Simon, P. W., Tohme, J., Tuberosa, R., Valliyodan, B., Varshney, R. K., Wullschleger, S. D., Yano, M., & Prasad, M. (2015). *Application of genomics-assisted breeding for generation of climate resilient crops: Progress and prospects*. Frontiers in Plant Science, 6, 563. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00563

Zhang, F., Zhu, G., Du, L., Shang, X., Cheng, C., Yang, B., Hu, Y., Cai, C., & Guo, W. (2016). Genetic regulation of salt stress tolerance revealed by RNA-Seq in cotton diploid wild species, *Gossypium davidsonii*. *Scientific Reports, 6*, 20582. https://doi.org/10.1038/srep20582

Salgotra, R. K., & Chauhan, B. S. (2023). *Genetic diversity, conservation, and utilization of plant genetic resources*. Genes, 14(1), 174. https://doi.org/10.3390/genes14010174

Ma, Z., & Lanjuan, L. (2024). *WRKY transcription factor responses and tolerance to abiotic stresses in plants*. International Journal of Molecular Sciences, 25(13), 6845. https://doi.org/10.3390/ijms25136845