



نقش بایوتکنالوژی نباتی در سازگاری با تغییرات اقلیمی

محمد مدثر توفیق^۱، سید قدیر دانشیار^۱، محمد ایجاز مومند^۱، فرید احمد شیرزی^۱

^۱دپارتمنت بایوتکنالوژی و تولید تخم های بذری، پوهنځی زراعت، پوهنتون کابل

خلاصه

تغییرات اقلیمی با افزایش درجه حرارت، خشکسالی ها، شوری خاک و بارندگی های نامنظم، تهدیدی جدی برای زراعت جهانی محسوب می شود و منجر به کاهش حاصل و ناامنی غذایی می گردد. بایوتکنالوژی نباتی به عنوان یک راهکار مؤثر، ظرفیت تقویت مقاومت محصولات در برابر تنش های بایوتیک و غیربایوتیک را فراهم می سازد. روش های مدرن مانند انجینری جنتیک، ویرایش جینوم (CRISPR/Cas9) و انتخاب به کمک نشانگر (MAS) امکان انکشاف وراثتی های مقاوم در مقابل خشکی، گرما و شوری را فراهم می کنند. کاربرد مایکروارگانیزم های مفید مانند رایزوبیوم ها، قارچ های مایکوریزا و باکتریای محرک نمو نبات (PGPR) باعث بهبود جذب مواد مغذی، نمو و سازگاری نباتات با شرایط نامساعد محیطی می شود. افزون بر آن، بایوتکنالوژی با افزایش کارایی استفاده از مواد مغذی و نصب کاربن در کاهش گازهای گلخانه ای و ترویج زراعت پایدار نقش دارد. با وجود چالش هایی مانند نگرانی های ایمنی زیستی، هزینه های بلند و پذیرش محدود اجتماعی، نمونه های موفق مانند پنبه Bt، برنج طلایی و جواری مقاوم درمقابل خشکی نقش کلیدی بایوتکنالوژی را در سازگاری با تغییرات اقلیمی نشان می دهند. تحقق زراعت پایدار و مقاوم در مقابل اقلیم نیازمند همکاری میان متخصصان بایوتکنالوژی، دانشمندان اقلیم، زارعین و سیاست گذاران است.

کلیمات کلیدی: امنیت غذایی؛ بایوتکنالوژی نباتی؛ تغییرات اقلیمی؛ تحمل به استرس؛ ویرایش جینوم

Role of Plant Biotechnology in Climate Change Adaptation

Mohammad Modaser Tawfeeq^{*1}, Sayed Qadir Daneshyar¹, Mohammad Ijaz Momand¹, Farid Ahmad Sherzy¹

¹Department of Biotechnology and Seed Production, Agriculture Faculty, Kabul University

^{*}Corresponding Author Email: tawfeeqmodaser8@gmail.com

Abstract

Climate change severely threatens global agriculture through rising temperatures, droughts, soil salinity, and irregular rainfall, leading to reduced yields and food insecurity. Plant biotechnology provides an effective solution to enhance crop resilience against biotic and abiotic stresses. Modern approaches such as genetic engineering, genome editing (CRISPR/Cas9), and marker-assisted selection (MAS) enable the development of stress-tolerant varieties adapted to drought, heat, and salinity. The use of beneficial microorganisms—such as rhizobia, mycorrhizal fungi, and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) improves nutrient uptake, growth, and environmental adaptation. Moreover, biotechnology enhances nutrient-use efficiency and carbon sequestration, contributing to reduced greenhouse gas emissions and sustainable farming systems. Despite challenges including biosafety concerns, high costs, and limited public acceptance, successful cases like Bt cotton, Golden Rice, and drought-tolerant maize highlight biotechnology's vital role in climate change adaptation. Achieving sustainable, climate-resilient agriculture requires close collaboration among biotechnologists, climate scientists, policymakers, and farmers to ensure global food security and environmental stability.

Keywords: Climate change; Food security; Genome editing; Plant biotechnology; Stress tolerance.

اهمیت مقاومت محصولات زراعتی در برابر تغییرات اقلیمی به عنوان یک تهدید چندبعدی برای زراعت جهانی محسوب می شود، به ویژه به دلیل تأثیرات منفی آن بالای حاصلدهی نباتات و امنیت غذایی. افزایش درجه حرارت، الگوهای نامنظم بارندگی و افزایش کثرت رویدادهای شدید اقلیمی مانند خشکسالی، موج های گرما و تخریب خاک ناشی از شوری، ثبات عملکرد محصولات را در سراسر جهان تضعیف میکند. این نوسانات محیطی به ویژه برای مناطق آسیب پذیر آگرواکولوژیک که زراعت ستون فقرات معیشت مردم محسوب می شود، بسیار چالش برانگیز بوده و می تواند جمعیت های تحت تأثیر را به سوی ناامنی غذایی و بی ثباتی اقتصادی سوق دهد.

خشکسالی، درجه حرارت بلند و شوری خاک از مهم ترین عوامل غیرزنده محدود کننده عملکرد محصولات زراعتی هستند. برای مثال، خشکسالی طولانی مدت باعث کاهش دسترسی به آب می شود که برای ترکیب ضیایی و عملکردهای حیاتی حجروی ضروری است، در حالی که تنش گرمایی فعالیت های آنزیمی و رشد تولید مثل را مختل میکند. شوری خاک، که اغلب به دلیل روش های نادرست آبیاری در شرایط تنش اقلیمی تشدید می شود، منجر به سمیت آیونی و تنش اسمزی شده و رشد محصولات را مختل می سازد. پیامدهای اجتماعی-اقتصادی این پدیده ها عمیق و گسترده است: طوریکه کاهش یا از دست رفتن محصول باعث کاهش درآمد دهاقین، نوسان قیمت مواد غذایی و افزایش فقر در جوامع روستایی وابسته به زراعت میشود.

با توجه به چالش های فزاینده ناشی از تغییرات اقلیمی، تقویت مقاومت محصولات زراعتی برای حفظ تولید جهانی غذا، تأمین معیشت دهاقین و پایداری سیستم های غذایی ملی ضروری می باشد. مدل های اقلیمی به طور پیوسته کاهش چشمگیر عملکرد غلات اساسی را پیش بینی میکنند؛ برای مثال، پیش بینی می شود که عملکرد گندم در تمام مناطق تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 تا سال ۲۰۴۰ حدود ۱۸ تا ۲۰ درصد کاهش یابد، تا سال ۲۰۷۰ حدود ۲۷ تا ۲۸ درصد کاهش یابد، و تا سال ۲۰۹۹ نسبت به میانگین های تاریخی حدود ۲۸ تا ۳۰ درصد کاهش داشته باشد. همچنین پیش بینی می شود که مناطق خشک و نیمه خشک، مانند شمال سینا (مصر) و زاگرس (ایران)، تا پایان قرن تحت سناریوی RCP 8.5 کاهش بسیار شدید بین ۶۰ تا ۸۸ درصد را تجربه کنند (Tita Davida et al, 2025).

تحقیقات ساحوی و تجربی نیز تأیید می کند که استفاده از وراثتی های گندم مقاوم در مقابل گرما و خشکسالی همراه با مداخلات زراعتی مانند بهینه سازی تاریخ کاشت و بهبود حاصلخیزی خاک می تواند کاهش عملکرد را جبران کرده و تولید را تثبیت کند (Hu, Li, & Shi, United States Environmental Protection Agency, 2025). این یافته ها در یک مطالعه تازه منتشر شده در مجله *Nature* به تاریخ ۱۸ جون ۲۰۲۵ گزارش شده است. این مطالعه نشان می دهد که در برابر هر ۱ درجه سانتی گراد افزایش درجه سانتی گراد متوسط سطح زمین، تولید جهانی غذا به طور سالانه حدود 5.5×10^4 کیلوکالری کاهش می یابد که معادل کاهش ۱۲۰ کیلوکالری در برابر هر نفر در روز، یا حدود ۴.۴ فیصد از مصرف روزانه کنونی می باشد. حتی با وجود اقدامات سازگاری، مانند تغییر در روش های زراعتی و افزایش درآمدها، پیش بینی می شود که تنها ۲۳ فیصد از این خسارات تا سال ۲۰۵۰ و ۳۴ فیصد تا پایان قرن، تحت سناریوی انتشار متوسط گازهای گلخانه ای جبران شود. این مطالعه تأکید می کند که تغییرات اقلیمی تأثیر قابل ملاحظه ای بر امنیت غذایی جهانی دارد و نشان می دهد که هرچند اقدامات سازگاری می تواند برخی از خسارات را کاهش دهد، اما به طور کامل قادر به جبران اثرات منفی افزایش درجه حرارت بر عملکرد محصولات نیست (Hultgren et al., 2025). این یافته ها به طور کلی بر ضرورت ادغام وراثتی های مقاوم به تغییرات اقلیمی و مدیریت سازگار زراعتی در سیستم های کشت، به منظور حفظ امنیت غذایی و ثبات اقتصادی تأکید می نمایند.

در نهایت، با توجه به تهدیدات پیچیده و چندجانبه ای که تغییرات اقلیمی برای زراعت جهانی ایجاد کرده است، تمرکز بر توسعه و ترویج وراثتی های مقاوم در مقابل خشکسالی، گرما و شوری اهمیت حیاتی برخوردار می باشد. ادغام این وراثتی ها با روش های مدیریتی سازگار و تکنالوژی های نوین بایوتکنالوژی می تواند نقش کلیدی در حفظ تولید پایدار و ارتقای امنیت غذایی ایفا نماید.

بر این اساس، هدف این مقاله بررسی نقش بایوتکنالوژی نباتی در افزایش مقاومت محصولات زراعتی در برابر تنش های اقلیمی و تبیین کاربرد روش های نوینی چون انجینری جنتیک، ویرایش جینوم (CRISPR/Cas9)، انتخاب به کمک نشانگر (MAS) و تکنالوژی های چندامیکس (Multi-omics) در انکشاف وراثتی های مقاوم در مقابل شرایط نامساعد محیطی می باشد. همچنان، این مقاله به ارزیابی نقش مایکروارگانیزم های مفید در بهبود سازگاری نباتات و بررسی تأثیر این فناوری ها بر پایداری تولید زراعتی و تأمین امنیت غذایی جهانی می پردازد.

مواد و روش

منابع اصلی ارقام و اطلاعات این تحقیق شامل مقالات منتشر شده در ژورنال‌های معتبر علمی، کتاب‌های علمی و تحقیقی مرتبط با نقش بایوتکنالوژی در افزایش مقاومت محصولات زراعتی در برابر تغییرات اقلیمی می‌باشد. این منابع از دیتابیس‌های علمی معتبر مانند Google Scholar، PubMed، Web of Science و SID شناسایی و گردآوری شده‌اند. تمرکز این تحقیق بر شناسایی پیشرفت‌های تاریخی، اجماع علمی کنونی، و خالاهای موجود در دانش درباره نقش تغییرات اقلیمی بر نباتات است. موضوع محوری این مطالعه تغییرات اقلیمی می‌باشد که به عنوان یکی از چالش‌های اساسی عصر حاضر، نقش مهمی در جوامع بشری و سیستم‌های زراعتی ایفا می‌کند.

به منظور درک چگونگی بقای نباتات در شرایط تغییرات اقلیمی، این مطالعه از روش مرور روایتی (Narrative Review) استفاده کرده است. در این روش، با ترکیب منابع علمی موجود و یافته‌های تجربی، گزارشی منسجم از سازگاری‌های فیزیولوژیکی و جنتیکی در نباتات ارائه می‌گردد. این روش از یک چارچوب زمان‌بندی شده و موضوع‌محور پیروی می‌کند که ضمن کشفیات کلیدی، آنها را با پیشرفت‌های نوین در علوم نباتی و بایوتکنالوژی پیوند می‌دهد.

نتایج و مباحثه

۱. تعریف و دامنه بایوتکنالوژی در زراعت

بایوتکنالوژی در چارچوب زراعت، شامل مجموعه‌ای از تکنیک‌های علمی بیولوژیکی است که از موجودات زنده، حجره‌ها یا بایومالیکول‌ها به منظور توسعه، بهبود یا اصلاح محصولات و فرآیندهای زراعتی استفاده می‌نماید. دامنه بایوتکنالوژی زراعتی هم روش‌های سنتی مانند اصلاح نژادی انتخابی و کشت نسج را در بر می‌گیرد و هم رویکردهای مدرن مالیکولی مانند انجینری جنتیک و ویرایش جینوم را شامل می‌شود. این حوزه گسترده، جنتیک کلاسیک را با پیشرفت‌های بیولوژی مالیکولی، جنومیکس و بیولوژی محاسباتی ادغام می‌کند تا روند اصلاح نباتات را سریعتر، دقیق‌تر و هدفمندتر سازد.

رویکردهای سنتی بایوتکنالوژی عمدتاً شامل انتخاب فینوتایپی و تلاقی‌گیری بوده و در برخی موارد با القای جهش یا ایجاد تغییرات سومکلوئال از طریق کشت نسج تکمیل می‌شود. این روش‌ها در گذشته نقش مهمی در افزایش حاصلات، بهبود کیفیت و مقاومت در برابر امراض شده‌اند؛ معمولاً با چرخه‌های طولانی اصلاح نباتات و دقت پایین محدودیت‌هایی همراه بوده‌اند.

در مقابل، ابزارهای مدرن بایوتکنالوژی از مارکرهای مالیکولی، تکنالوژی DNA نوترکیب و پلتفرم‌های ویرایش جین مانند سیستم‌های CRISPR-Cas استفاده می‌کنند که امکان ایجاد تغییرات جنتیکی دقیق و هدفمند را فراهم می‌سازد. این پیشرفت‌ها ورود صفات مشخص برای تحمل تنش‌های زنده (بیوتیک) و غیرزنده (ابیوتیک) را ممکن ساخته، بهره‌وری محصولات را افزایش داده و دامنه تنوع جنتیکی قابل انتخاب را فراتر از تنوع طبیعی گسترش می‌دهند. به طور مثال، اصلاح محصولات برای تحمل فشارهای محیطی، افزایش مقاومت در مقابل امراض و آفات، و بهبود کیفیت غذایی، از جمله موفقیت‌های چشمگیر این حوزه به شمار می‌رود که تا کنون توسعه یافته و در مزارع مختلف به کار گرفته شده‌اند (Rajender Singh DSR et al., 2025). همچنین تکنالوژی‌های نوین بایوتکنالوژی با کاهش وابستگی به ورودی‌های کیمیاوی، به کاهش آلودگی محیط زیست و بهبود سلامت خاک کمک می‌کنند که این امر در نهایت به حفاظت منابع طبیعی کمک شایانی می‌نماید (Qurban Ali et al., 2024).

ادغام تکنالوژی‌های ترانسکریپتومیکس، پروتئومیکس، متابولومیکس و اپی‌جینومیکس، همراه با پشتیبانی بیوانفورماتیک پیشرفته و یادگیری ماشینی، در حال تغییر چهره اصلاح دقیق و هدفمند نباتات می‌باشد. پروفایل‌گیری پرطرفیت ترانسکریپتوم و پروتئوم تحت شرایط تنش، شبکه‌های تنظیمی جنتیکی و تغییرات پس‌اترجمه‌ای دخیل در تحمل تنش را آشکار می‌سازد، در حالی که متابولومیکس تغییرات مسیرهای متابولیکی را که رشد نبات را در شرایط نامساعد محیطی پشتیبانی می‌کنند، نشان می‌دهد (Yang et al., 2021). این ارقام چند-آمیکس به مودل‌های پیش‌بینی‌کننده که با استفاده از یادگیری ماشینی ساخته می‌شوند مانند الگوریتم‌های انتخاب جنومیک و روش‌های یادگیری عمیق که بر اطلاعات فنوتایپی و محیطی اعمال می‌شوند، تغذیه می‌رسانند تا بیومارکرها را شناسایی گردیده، صفات پیچیده پیش‌بینی شوند و در نهایت تصمیم‌گیری در اصلاح نباتات را بهبود یابد (Wojcik-Gront et al., 2024).

به‌طور کلی، این رویکرد در سطح سیستم یا اصلاح نباتات نه تنها انکشاف واریتی‌های مقاوم در مقابل خشکی، شوری، آفات و گرما را تسریع می‌کند، بلکه کارایی استفاده از منابع و پایداری محیط زیست را نیز بهبود می‌بخشد (Varadharajan et al., 2025). مطالعات تجربی در برنج، باقلی و سایر محصولات مهم نشان می‌دهد که ادغام چند-آمیکس با ارزیابی فنوتایپی و ویرایش جینوم، چرخه‌های اصلاح نباتات را به‌طور چشمگیری کوتاه کرده و میزان موفقیت در توسعه واریتی‌های مقاوم در مقابل تنش را افزایش می‌دهد (Thingujam et al., 2025).

۱.۱. اهداف کلی استفاده از بایوتکنالوژی در افزایش تحمل پذیری

زراعت استفاده از بایوتکنالوژی در زراعت با هدف دستیابی به چند هدف کلیدی دنبال می‌شود که در نهایت منجر به افزایش پایداری و تاب‌آوری بخش زراعت می‌گردد. یکی از اصلی‌ترین اهداف، بهبود مقاومت محصولات در برابر استرس‌های مختلف خشکی، شوری، حرارت و امراض است. این امر از طریق دستکاری جنتیکی و بهبود صفات متعدد نباتی قابل تحقق است و امکان کشت نباتات با بازدهی بالا در شرایط سخت اقلیمی را فراهم می‌آورد (Tinashe Zenda et al., 2021). همچنین بایوتکنالوژی امکان کاهش وابستگی به مواد کیمیاوی مانند کودها و آفت‌کش‌ها را مهیا می‌سازد که اثر مثبت بر محیط زیست و بهداشت عمومی دارد. نهایتاً هدف توسعه محصولات است که امنیت غذایی را تضمین کرده، منابع طبیعی را محافظت نمایند و در عین حال پاسخگوی نیاز جمعیت رو به رشد جهان باشند (Q. Ali et al., 2024). بدین ترتیب، این فناوری‌ها می‌توانند تضمین کننده تولید محصول پایدار و قابل قبول از نظر کمیت و کیفیت تحت فشار روزافزون شرایط زیستی و غیرزیستی ناشی از تغییرات اقلیمی باشند (Muhilan Mahendhiran et al., 2024).

۲.۱. یکپارچه‌سازی میان رشته‌ای

علم اقلیم و بایوتکنالوژی پیچیدگی‌های تغییرات اقلیمی مستلزم یک رویکرد چندرشته‌ای است که علم اقلیم و بایوتکنالوژی را برای بهبود هدفمند محصولات زراعتی به هم پیوند دهد. مدل‌سازی اقلیم و پایش محیطی، دیدگاه‌های حیاتی در مورد تغییرات پیش‌بینی شده در درجه حرارت، بارندگی، غلظت CO_2 جوی و رویدادهای حدی فراهم می‌کنند که امکان تدوین راهبردهای سازگاری آگاهانه را فراهم می‌سازد. این نتایج علمی به اصلاح‌گران و متخصصان بایوتکنالوژی اجازه می‌دهد تلاش‌های خود را با سناریوهای پیش‌بینی شده محیطی هماهنگ کرده و انتخاب صفات و اولویت‌های اصلاحی را بهبود بخشند.

مدل‌های پیشرفته اقلیمی، از جمله مدل‌های گردش عمومی مانند GFDL و HadCM3، پیش‌بینی‌های دقیقی از متغیرهای اقلیمی را در مقیاس‌های مکانی و زمانی که برای تولید محصولات زراعتی حیاتی‌اند، ارائه می‌کنند. این مدل‌ها با پیش‌بینی جابه‌جایی مناطق بومی زراعتی، نقش مهمی در ارزیابی خطر ایفا می‌کنند و بدین ترتیب مناطق در معرض خطر خشکسالی، گرما و تنش شوری را شناسایی می‌کنند (Lobell et al., 2013). ادغام پیش‌بینی‌های اقلیمی با اطلاعات جینومیک و فوتوتیپی به‌طور قابل توجهی دقت برنامه‌های اصلاحی را افزایش می‌دهد و امکان توسعه ارقامی را فراهم می‌سازد که متناسب با شرایط محیطی آینده باشند (Cooper et al., 2021). برای مثال، مطالعات شبیه‌سازی که افزایش غلظت CO_2 جوی و تغییرات درجه حرارت مرتبط را برآورد می‌کنند، به پیش‌بینی واکنش عملکرد محصولات کمک کرده و راهنمایی برای ادغام راهبردی صفات سازگارکننده مانند تحمل گرما و خشکی در مسیرهای اصلاحی فراهم می‌نمایند (Tardieu et al., 2018).

علاوه بر این، تحقیق‌های میان‌رشته‌ای به‌طور فزاینده‌ای اصلاح مالیکولی را با تحلیل‌های سناریوهای اقلیمی تلفیق می‌کنند تا وراثتی‌های را توسعه دهند که قادر به رشد و عملکرد مطلوب در شرایط محیطی متغیر و شدید باشند. این رویکرد هم‌افزا به محققین امکان می‌دهد تا تعاملات جینوتایپ-محیط ($G \times E$) را تجزیه و تحلیل کنند و صفات پایدار و پاسخگو به تنش را تحت پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده شناسایی نمایند (Hickey et al., 2019). وارد کردن اطلاعات اقلیمی با وضوح پایین‌تر به برنامه‌های اصلاحی کمک می‌کند تا صفاتی مانند تحمل گرما، رسیدگی زودرس و کارایی مصرف آب مطابق با تغییرات پیش‌بینی شده در مناطق بومی زراعتی هدف‌گذاری شوند (Reynolds et al., 2021). مطالعات نشان می‌دهند که ادغام خروجی‌های مدل‌سازی اقلیم در چارچوب‌های انتخاب جینومی، دقت استراتژی‌های اصلاحی را که به پروفایل‌های استرسی در حال تحول سازگار شده‌اند، به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد و عملکرد و تاب‌آوری محصولات را ارتقا می‌بخشد. علاوه بر این، همکاری نزدیک میان دانشمندان اقلیم و متخصصان بایوتکنالوژی مکانیزم بازخورد دینامیکی ایجاد می‌کند که در آن نتایج اصلاحی به بهبود مدل‌ها کمک می‌کند و بالعکس، و به این ترتیب ظرفیت سازگاری سیستم زراعتی را در مواجهه با تغییرات اقلیمی تقویت می‌کند (Bailey-Serres et al., 2019).

۲. درک اثرات تغییرات اقلیمی بالای نباتات (Understanding the Impacts of Climate Change on Plants)

۱.۲. اثرات مستقیم بالای فزیولوژی نبات (Direct Effects on Plant Physiology)

تغییرات اقلیمی، شامل نوسانات درجه حرارت، تغییر الگوهای بارش، و افزایش غلظت دی‌اکسید کربن (CO_2) در جو، اثرات مستقیمی بر فرآیندهای فزیولوژیکی نباتات دارد. این تغییرات می‌توانند تأثیرات گسترده‌ای بر رشد، توسعه، و بقای نباتات داشته باشند. برای مثال، افزایش درجه حرارت می‌تواند منجر به افزایش سرعت تنفس نباتات شود، که در نتیجه، مصرف انرژی افزایش می‌یابد و رشد نباتات محدود می‌شود. از طرفی، تغییر در الگوهای بارش می‌تواند منجر به دوره‌های طولانی خشکسالی یا بارندگی بیش از حد شود که هر دو حالت می‌توانند به‌طور جدی به نباتات آسیب برسانند. افزایش CO_2 در ابتدا ممکن است به نظر برسد که برای نباتات مفید است، زیرا CO_2 ماده اولیه برای فتوسنتز

است، اما در بسیاری از انواع نباتات، افزایش CO₂ منجر به کاهش محتوای مواد مغذی در نسج‌های نباتات می‌شود، که این امر می‌تواند کیفیت غذایی محصولات زراعتی را کاهش دهد (Saurav Kumar et al., 2023), (T. Munaweera et al., 2022).

استرس‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی، به ویژه خشکی و گرما، می‌توانند باعث کاهش رشد و عملکرد نباتات شوند. خشکی باعث کاهش پتانسیل آب در خاک می‌شود، که این امر منجر به کاهش جذب آب توسط ریشه‌ها و در نتیجه، کاهش فشار داخلی حجروی و بسته شدن روزنه‌ها می‌شود. بسته شدن روزنه‌ها از دست دادن آب از طریق تعرق را کاهش می‌دهد، اما در عین حال، ورود CO₂ به برگ‌ها را نیز محدود می‌کند، که این امر باعث کاهش فتوسنتز و تولید انرژی می‌شود. گرما نیز می‌تواند به طور مستقیم به پروتئین‌ها و غشاهای حجروی آسیب برساند، و همچنین باعث افزایش تولید رادیکال‌های آزاد شود که می‌تواند به DNA و سایر مالیکول‌های حیاتی آسیب برساند. این استرس‌ها می‌توانند منجر به کاهش عملکرد محصول، کاهش کیفیت محصولات زراعتی، و افزایش خطر از بین رفتن محصولات شوند (Juan Francisco Jimnez- (Bremont et al., 2013).

تغییرات در الگوهای آب و هوایی همچنین می‌توانند منجر به افزایش شیوع آفات و بیماری‌ها شوند که به طور منفی بر کارایی تولید زراعتی تأثیر می‌گذارند. افزایش درجه حرارت و تغییر در الگوهای بارش می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای رشد و تکثیر آفات و پاتوژن‌ها فراهم کند. به عنوان مثال، برخی از آفات حشرات در دماهای بالاتر سریع‌تر رشد می‌کنند و می‌توانند دوره‌های تولید مثل بیشتری در طول یک فصل داشته باشند. همچنین، تغییر در الگوهای بارش می‌تواند باعث افزایش رطوبت در برخی مناطق شود، که این امر می‌تواند شرایط مناسب‌تری برای رشد قارچ‌ها و سایر پاتوژن‌های نباتی فراهم کند. افزایش شیوع آفات و بیماری‌ها می‌تواند منجر به کاهش عملکرد محصول، افزایش هزینه‌های کنترل آفات، و افزایش خطر از بین رفتن محصولات شود (T. Munaweera et al., 2022).

۲.۲. تأثیرات غیر مستقیم از طریق تغییرات در محیط زیست (Indirect Impacts Through Environmental Changes)

تغییرات آب و هوایی می‌تواند منجر به تخریب خاک، تغییر در دسترس بودن مواد مغذی، و افزایش شوری خاک شود، که همگی بر رشد نباتات تأثیر می‌گذارند. افزایش درجه حرارت و تغییر در الگوهای بارش می‌تواند باعث افزایش فرسایش خاک شود، زیرا بارندگی‌های شدید می‌تواند لایه سطحی خاک را که غنی از مواد مغذی است، از بین ببرد. همچنین، تغییر در الگوهای بارش می‌تواند منجر به تغییر در سطح آب‌های زیرزمینی شود، که این امر می‌تواند باعث افزایش شوری خاک در برخی مناطق شود. شوری خاک می‌تواند جذب آب و مواد مغذی توسط ریشه‌ها را محدود کند، و همچنین می‌تواند به طور مستقیم به حجره‌های نباتی آسیب برساند. کاهش مواد مغذی در خاک نیز می‌تواند رشد نباتات را محدود کند، زیرا نباتات برای رشد و توسعه به مواد مغذی ضروری مانند نیتروژن، فسفر، و پتاسیم نیاز دارند. افزایش درجه حرارت می‌تواند منجر به تغییر در ترکیب جوامع نباتی و کاهش تنوع زیستی شود. گونه‌های نباتی مختلف دارای تحمل متفاوتی نسبت به درجه حرارت و سایر شرایط محیطی هستند. با افزایش درجه حرارت، برخی از انواع نباتات ممکن است قادر به زنده ماندن در یک منطقه خاص نباشند، در حالی که انواع نباتات دیگر ممکن است بتوانند بهتر رشد کنند. این امر می‌تواند منجر به تغییر در ترکیب جوامع نباتی و کاهش تنوع زیستی شود. کاهش تنوع زیستی می‌تواند اکوسیستم‌ها را آسیب‌پذیرتر در برابر تغییرات آب و هوایی و سایر استرس‌ها کند (Ali Raza et al., 2019).

تغییرات در الگوهای بارش می‌تواند منجر به افزایش خطر سیل و خشکسالی شود که می‌تواند باعث از بین رفتن محصولات زراعتی شود. سیل می‌تواند باعث غرق شدن ریشه‌ها و خفگی نباتات شود، و همچنین می‌تواند مواد مغذی را از خاک بشوید. خشکسالی می‌تواند باعث کمبود آب و استرس خشکی در نباتات شود، که این امر می‌تواند منجر به کاهش رشد و عملکرد محصول شود. افزایش خطر سیل و خشکسالی می‌تواند زراعت را ناپایدارتر کند و امنیت غذایی را تهدید کند (Ali Raza et al., 2019).

۳.۲. اثرات بر امنیت غذایی و زراعتی (Effects on Food Security and Agriculture)

تغییرات آب و هوایی تهدیدی جدی برای امنیت غذایی جهانی است، زیرا می‌تواند منجر به کاهش عملکرد محصول و افزایش ناپایداری قیمت مواد غذایی شود. کاهش عملکرد محصول می‌تواند به دلیل استرس‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی مانند خشکی، گرما، و آفات و بیماری‌ها باشد. افزایش ناپایداری قیمت مواد غذایی می‌تواند به دلیل کاهش عرضه و افزایش تقاضا باشد. تغییرات آب و هوایی می‌تواند تولید مواد غذایی را در برخی مناطق کاهش دهد، در حالی که تقاضا برای مواد غذایی به دلیل افزایش جمعیت و تغییر در الگوهای مصرف افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند منجر به افزایش قیمت مواد غذایی و کاهش دسترسی به مواد غذایی برای فقیرترین افراد جهان شود (Tribhuwan Kumar et al., 2025).

زراعت یکی از آسیب‌پذیرترین بخش‌ها در برابر اثرات تغییرات آب و هوایی است، به ویژه در مناطقی که در حال حاضر با کمبود منابع آب و خاک مواجه هستند. زارعین در این مناطق اغلب به بارندگی‌های موسمی وابسته هستند و دسترسی محدودی به سیستم‌های آبیاری و مدیریت خاک دارند. تغییرات آب و هوایی می‌تواند الگوهای بارندگی را غیرقابل پیش‌بینی‌تر کند و منابع آب را کاهش دهد، که این امر می‌تواند زراعت را در این مناطق بسیار دشوارتر کند. تخریب خاک و افزایش شوری خاک نیز می‌تواند کارایی تولید زراعتی را کاهش دهد (Wilhelmina, 2012; Quaye et al., 2012).

برای مقابله با چالش‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی، نیاز به توسعه استراتژی‌های جدید برای انطباق و کاهش اثرات منفی بر زراعت است. این استراتژی‌ها می‌توانند شامل توسعه وراثتی مقاوم به تنش، بهبود کارایی استفاده از مواد مغذی، افزایش پتانسیل ترسیب کربن، و استفاده از شیوه‌های زراعت پایدار باشند. بایوتکنالوژی نباتی می‌تواند نقش مهمی در توسعه این استراتژی‌ها ایفا کند (Tribhuwan Kumar et al., 2025).

۳. نقش بایوتکنالوژی نباتی در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی (The Role of Plant Biotechnology in Mitigating Climate Change Impacts)

۳.۱. انکشاف وراثتی‌های تحمل‌کننده تنش (Development of Stress-Tolerant Varieties)

بایوتکنالوژی نباتی ابزاری قدرتمند برای انکشاف وراثتی‌های تحمل‌کننده تنش خشکی، گرما و شوری است. این وراثتی‌های تحمل‌کننده تنش می‌توانند عملکرد و پایداری بیشتری در شرایط سخت محیطی داشته باشند، که این امر می‌تواند به بهبود امنیت غذایی و کاهش اثرات منفی تغییرات آب و هوایی بر زراعت کمک کند. انکشاف وراثتی‌های تحمل‌کننده تنش شامل شناسایی و انتقال جین‌های مرتبط با تحمل تنش از نباتات مقاوم به نباتات زراعتی حساس است. این فرآیند می‌تواند از طریق انجینری جنتیک، ویرایش جینوم، و سایر رویکردهای بایوتکنالوژیکی انجام شود (T. Munaweera et al., 2022; A. Srivastava et al., 2025).

مهندسی جنتیک، ویرایش جینوم و سایر رویکردهای بایوتکنالوژیکی می‌توانند برای بهبود تحمل نباتات در برابر شرایط سخت محیطی استفاده شوند. انجینری جنتیک شامل وارد کردن جین‌های جدید به نباتات برای بهبود صفات مطلوب است. ویرایش جینوم شامل استفاده از ابزارهای مالیکولی برای تغییر دقیق جینوم نبات است. این تکنیک‌ها می‌توانند برای افزایش تحمل نباتات به خشکی، گرما، شوری، و سایر استرس‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی استفاده شوند. به عنوان مثال، جین‌های مقاوم به خشکی می‌توانند از نباتات مقاوم به خشکی مانند کاکتوس‌ها به نباتات زراعتی حساس مانند جواری منتقل شوند (Gangadhara Doggalli et al., 2024).

استفاده از نشانگرهای مالیکولی و انتخاب به کمک نشانگر (MAS) می‌تواند روند اصلاح نژاد برای تحمل تنش را تسریع کند. نشانگرهای مالیکولی قطعات DNA هستند که با ژن‌های مرتبط با تحمل به تنش مرتبط هستند. انتخاب به کمک نشانگر شامل استفاده از این نشانگرها برای شناسایی نباتات با ژن‌های مطلوب است. این روش می‌تواند روند اصلاح نژاد را تسریع کند، زیرا به محققان اجازه می‌دهد تا نباتات مقاوم درمقابل تنش را به سرعت و به طور دقیق شناسایی کنند (A. Srivastava et al., 2025).

۳.۲. بهبود کارایی استفاده از مواد مغذی (Improving Nutrient Use Efficiency)

بایوتکنالوژی نباتی می‌تواند برای بهبود کارایی استفاده از نایتروژن و سایر مواد مغذی در نباتات استفاده شود، که می‌تواند به کاهش مصرف کود و آلودگی محیط زیست کمک کند. کودهای نایتروژنی می‌توانند منبع اصلی آلودگی محیط زیست باشند، زیرا نایتروژن اضافی می‌تواند به آب‌های زیرزمینی نفوذ کند و باعث آلودگی آب شود. همچنین، نایتروژن اضافی می‌تواند به گازهای گلخانه‌ای مانند اکسید نایتروژن تبدیل شود که به تغییرات آب و هوایی کمک می‌کنند. بهبود کارایی استفاده از مواد مغذی می‌تواند به کاهش مصرف کود و کاهش اثرات منفی زیست محیطی زراعت کمک کند (Vadim G. Lebedev & papova A. Shestibratov, 2021).

انجینری جنتیک می‌تواند برای افزایش جذب و استفاده از مواد مغذی در نباتات استفاده شود. به عنوان مثال، جین‌هایی که باعث افزایش رشد ریشه می‌شوند می‌توانند به نباتات منتقل شوند تا جذب مواد مغذی را افزایش دهند. همچنین، جین‌هایی که باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم مواد مغذی می‌شوند می‌توانند به نباتات منتقل شوند تا استفاده از مواد مغذی را افزایش دهند. این تغییرات جنتیکی می‌توانند به نباتات کمک کنند تا با استفاده از مقدار کمتری کود، عملکرد بیشتری تولید کنند (Juan Francisco Jimnez-Bremont et al., 2013).

استفاده از کودهای زیستی و سایر رویکردهای بیولوژیکی می‌تواند به بهبود دسترسی نباتات به مواد مغذی کمک کند. کودهای زیستی حاوی میکروارگانیسم‌هایی هستند که می‌توانند به بهبود دسترسی نباتات به مواد مغذی کمک کنند. به عنوان مثال، برخی از باکتری‌ها می‌توانند نایتروژن

را از جو تثبیت کنند و آن را در دسترس نباتات قرار دهند. سمارق های میکوریزا نیز می توانند به ریشه های نباتات متصل شوند و جذب فسفر و سایر مواد مغذی را افزایش دهند (A. Srivastava et al., 2025).

۳.۳. افزایش پتانسیل نصب کربن (Enhancing Carbon Sequestration Potential)

بایوتکنالوژی نباتی می تواند برای افزایش پتانسیل ترسیب کربن در نباتات و خاک استفاده شود، که می تواند به کاهش غلظت CO₂ در جو کمک کند. ترسیب کربن فرآیندی است که طی آن CO₂ از جو جذب شده و در نباتات و خاک ذخیره می شود. نباتات CO₂ را از طریق فتوسنتز جذب می کنند و از آن برای تولید قندها و سایر ترکیبات آلی استفاده می کنند. این ترکیبات آلی در نسج های نباتی ذخیره می شوند و همچنین می توانند به خاک منتقل شوند و در آنجا به عنوان ماده آلی خاک ذخیره شوند. افزایش ترسیب کربن می تواند به کاهش غلظت CO₂ در جو و کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی کمک کند (Emma Kovak et al., 2022). انجینری جنتیک می تواند برای افزایش رشد ریشه و تجمع کربن در خاک استفاده شود. ریشه ها نقش مهمی در ترسیب کربن در خاک دارند، زیرا می توانند مقدار زیادی کربن را در خاک ذخیره کنند. جین هایی که باعث افزایش رشد ریشه می شوند می توانند به نباتات منتقل شوند تا تجمع کربن در خاک را افزایش دهند. همچنین، جین هایی که باعث افزایش تولید لیگنین می شوند می توانند به نباتات منتقل شوند، زیرا لیگنین یک ترکیب آلی مقاوم است که می تواند برای مدت طولانی در خاک ذخیره شود (A. Srivastava et al., 2024). استفاده از شیوه های زراعت پایدار، مانند کشت بدون نرم کردن زمین، می تواند به افزایش ترسیب کربن در خاک کمک کند. کشت بدون نرم کردن زمین شامل عدم نرم کردن خاک است، که این امر می تواند به حفظ ماده آلی خاک و افزایش ترسیب کربن کمک کند. شخم زدن خاک می تواند باعث از بین رفتن ماده آلی خاک شود و CO₂ را به جو آزاد کند. شیوه های زراعت پایدار می توانند به کاهش اثرات منفی زیست محیطی زراعتی و افزایش پایداری کمک کنند (A. Srivastava et al., 2025).

۴. تکنیک های کلیدی بایوتکنالوژی نباتی برای سازگاری با اقلیم (Key Plan Biotechnology Techniques for Climate Adaptation)

۱.۴. انجینری جنتیک (Genetic Engineering)

انجینری جنتیک شامل وارد کردن جین های جدید به نباتات برای بهبود صفات مطلوب، مانند تحمل به تنش و کارایی استفاده از مواد مغذی است. این تکنیک به محققان اجازه می دهد تا جین هایی را که به نباتات کمک می کنند تا در شرایط سخت محیطی رشد کنند، شناسایی کرده و به نباتات زراعتی منتقل کنند. این فرآیند می تواند شامل استفاده از بکتیریا برای انتقال جین ها به نباتات، یا استفاده از تفنگ جینی برای شلیک جین ها به حجره های نباتی باشد (T. Munaweera et al., 2022)، (Gangadhara Doggalli et al., 2024). جین های مقاوم به خشکی، گرما و آفات می توانند از سایر نباتات یا میکروارگانیسم ها به نباتات زراعتی منتقل شوند. به عنوان مثال، جین هایی که به نباتات کمک می کنند تا آب را به طور موثرتری استفاده کنند، می توانند از نباتات مقاوم به خشکی مانند کاکتوس ها به نباتات زراعتی حساس مانند جواری منتقل شوند. همچنین، جین هایی که به نباتات کمک می کنند تا در برابر آفات مقاوم شوند، می توانند از باکتری ها به نباتات زراعتی منتقل شوند. این جین ها می توانند به نباتات کمک کنند تا در برابر استرس های ناشی از تغییرات آب و هوایی مقاوم تر شوند (Ntsomboh-Ntsefong et al., 2025).

نباتات ترانسجیک می توانند عملکرد و پایداری بیشتری در شرایط تغییرات آب و هوایی داشته باشند نباتات ترانسجیک می توانند عملکرد بیشتری در شرایط سخت محیطی داشته باشند، زیرا دارای جین هایی هستند که به آنها کمک می کنند تا در برابر استرس ها مقاومت کنند. همچنین، نباتات ترانسجیک می توانند پایداری بیشتری داشته باشند، زیرا می توانند در برابر آفات و بیماری ها مقاوم باشند. این امر می تواند به بهبود امنیت غذایی و کاهش اثرات منفی تغییرات آب و هوایی بر زراعت کمک کند (Azizi, 2022).

۲.۴. ویرایش جینوم (Genome Editing)

ویرایش جینوم، به ویژه با استفاده از CRISPR/Cas9، امکان تغییرات دقیق تر و هدفمندتر در جینوم نبات را فراهم می کند CRISPR/Cas9 یک سیستم ویرایش جینوم است که از یک پروتئین Cas9 و یک RNA راهنما برای هدف قرار دادن و برش DNA در یک مکان خاص استفاده می کند. این سیستم به محققان اجازه می دهد تا جین ها را با دقت و کارایی بیشتری ویرایش کنند. ویرایش جینوم می تواند برای غیرفعال کردن جین های نامطلوب یا بهبود بیان جین های مفید استفاده شود (Gangadhara Doggalli et al., 2022)، (Wen Cong Gan & A. P. Ling, 2022).

این تکنیک می تواند برای غیرفعال کردن جین های نامطلوب یا بهبود بیان جین های مفید استفاده شود. به عنوان مثال، جین هایی که باعث حساسیت نباتات به خشکی می شوند می توانند غیرفعال شوند. همچنین، جین هایی که باعث افزایش تحمل نباتات به خشکی می شوند می توانند

بهبود داده شوند. این تغییرات جینیکی می‌توانند به نباتات کمک کنند تا در برابر استرس‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی مقاوم‌تر شوند (A. Srivastava et al., 2024). ویرایش جینوم پتانسیل زیادی برای توسعه سریع‌تر وراثتی‌های مقاوم مقابل تنش مقاوم به آب و هوا دارد. ویرایش جینوم یک تکنیک سریع و کارآمد است که می‌تواند برای توسعه وراثتی‌های مقاوم به آب و هوا استفاده شود. این تکنیک به محققان اجازه می‌دهد تا جین‌ها را با دقت و کارایی بیشتری ویرایش کنند، که این امر می‌تواند روند اصلاح نژاد را تسریع کند. ویرایش جینوم می‌تواند به توسعه وراثتی‌های مقاوم به آب و هوا کمک کند که می‌توانند عملکرد بیشتری در شرایط سخت محیطی داشته باشند (Gangadhara et al., 2024).

۳.۴. انتخاب به کمک نشانگر (Marker-Assisted Selection)

انتخاب به کمک نشانگر (MAS) از نشانگرهای DNA برای شناسایی نباتات با صفات مطلوب استفاده می‌کند، که روند اصلاح نژاد را تسریع می‌کند. نشانگرهای DNA قطعات DNA هستند ۸۳ هبا جین‌های مرتبط با صفات مطلوب مرتبط هستند. انتخاب به کمک نشانگر شامل استفاده از این نشانگرها برای شناسایی نباتات با جین‌های مطلوب است. این روش می‌تواند روند اصلاح نژاد را تسریع کند، زیرا به محققان اجازه می‌دهد تا نباتات با صفات مطلوب را به سرعت و به طور دقیق شناسایی کنند (A. Srivastava et al., 2025).

MAS می‌تواند برای انتخاب نباتات دارای تحمل مقابل تنش، کارایی استفاده از مواد مغذی و سایر صفات مرتبط با سازگاری با آب و هوا استفاده شود به عنوان مثال، انتخاب به کمک نشانگر می‌تواند برای انتخاب نباتات با جین‌های مرتبط با تحمل مقابل خشکی، گرما، شوری، و کارایی استفاده از نایتروجن استفاده شود. این روش می‌تواند به توسعه وراثتی‌های مقاوم به آب و هوا کمک کند که می‌توانند عملکرد بیشتری در شرایط سخت محیطی داشته باشند (A. Srivastava et al., 2025). این تکنیک به ویژه برای صفات پیچیده که توسط جین‌های متعدد کنترل می‌شوند مفید است برخی از صفات، مانند تحمل مقابل خشکی، توسط جین‌های متعدد کنترل می‌شوند. این صفات پیچیده را نمی‌توان به راحتی با روش‌های سنتی اصلاح نسل بهبود بخشید. انتخاب به کمک نشانگر می‌تواند برای شناسایی نباتات با ترکیبی از جین‌های مطلوب استفاده شود، که این امر می‌تواند به بهبود این صفات پیچیده کمک کند (A. Srivastava et al., 2025).

۵. نقش میکروارگانیسم‌ها در افزایش مقاومت نباتات (The Role of Microorganisms in Enhancing Plant Resistance)

۱.۵. استفاده از ریزوبیوم‌ها (Use of Rhizobacteria)

ریزوبیوم‌ها می‌توانند به نباتات کمک کنند تا در برابر استرس‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی مانند خشکی و گرما مقاوم‌تر شوند. ریزوبیوم‌ها گروهی از باکتری‌ها هستند که در خاک زندگی می‌کنند و با ریشه‌های نباتات رابطه همزیستی برقرار می‌کنند. این باکتری‌ها با تثبیت نایتروجن از جو و تبدیل آن به آمونیوم، که یک فرم قابل استفاده برای نباتات است، به نباتات کمک می‌کنند. تثبیت نایتروجن یک فرآیند مهم است، زیرا نایتروجن یک ماده مغذی ضروری برای رشد نباتات است (A. Srivastava et al., 2025). این باکتری‌ها با تولید هورمون‌های نباتی و بهبود جذب مواد مغذی به رشد نباتات کمک می‌کنند. علاوه بر تثبیت نایتروجن، ریزوبیوم‌ها می‌توانند هورمون‌های نباتی مانند اکسین و سیتوکینین تولید کنند. این هورمون‌ها می‌توانند به رشد و توسعه ریشه‌ها، ساقه‌ها، و برگ‌های نباتات کمک کنند. همچنین، ریزوبیوم‌ها می‌توانند جذب مواد مغذی مانند فسفر و پتاسیم را بهبود بخشند (Hafiza Shafaq Ishaq et al., 2025). تلقیح نباتات با ریزوبیوم‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد محصول در شرایط سخت کمک کند. تلقیح نباتات با ریزوبیوم‌ها شامل افزودن ریزوبیوم‌ها به خاک یا بذرها است. این کار می‌تواند به افزایش جمعیت ریزوبیوم‌ها در خاک و بهبود رابطه همزیستی بین ریزوبیوم‌ها و نباتات کمک کند. تلقیح نباتات با ریزوبیوم‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد محصول در شرایط سخت مانند خشکی، گرما، و خاک‌های فقیر از مواد مغذی کمک کند (Ashim Das Astapati & Soumitra Nath, 2023).

۲.۵. استفاده از قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار (Use of Arbuscular Mycorrhizal Fungi)

قارچ‌های میکوریزا آربوسکولار (AMF) می‌توانند به نباتات کمک کنند تا در برابر استرس‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی مانند خشکی و گرما مقاوم‌تر شوند. AMF ها گروهی از قارچ‌ها هستند ۸۳ هبا ریشه‌های نباتات رابطه همزیستی برقرار می‌کنند. این قارچ‌ها با تشکیل شبکه‌ای از هیف‌ها در خاک، سطح تماس ریشه‌ها با خاک را افزایش می‌دهند. این امر به نباتات کمک می‌کند تا آب و مواد مغذی بیشتری جذب کنند (A. Srivastava et al., 2025). این قارچ‌ها با بهبود جذب آب و مواد مغذی به رشد نباتات کمک می‌کنند. AMF ها می‌توانند به نباتات کمک کنند تا آب و مواد مغذی بیشتری جذب کنند، زیرا آنها می‌توانند به مناطقی از خاک دسترسی پیدا کنند که ریشه‌ها نمی‌توانند به آنها دسترسی پیدا کنند. همچنین، AMF ها می‌توانند مواد مغذی را از خاک به ریشه‌ها منتقل کنند. این امر می‌تواند به بهبود رشد و عملکرد نباتات کمک کند (A. Srivastava et al., 2025). تلقیح نباتات با AMF ها می‌تواند به بهبود عملکرد محصول در شرایط سخت کمک کند. تلقیح

نباتات AMF ها شامل افزودن AMF ها به خاک یا بذرها است. این کار می تواند به افزایش جمعیت AMF ها در خاک و بهبود رابطه همزیستی بین AMF ها و نباتات کمک کند. تلقیح نباتات با AMF ها می تواند به بهبود عملکرد محصول در شرایط سخت مانند خشکی، گرما، و خاک های فقیر از مواد مغذی کمک کند (A. Srivastava et al., 2025).

۳.۵. استفاده از باکتریای محرک نموی نباتات ((Use of Plant Growth-Promoting Bacteria (PGPR) (باکتری

محرک نموی نبات (PGPR) می تواند به نباتات کمک کند تا در برابر استرس های ناشی از تغییرات آب و هوایی مانند خشکی و گرما مقاوم تر شوند PGPR ها گروهی از باکتری ها هستند که در خاک زندگی می کنند و با ریشه های نباتات رابطه همزیستی برقرار می کنند. این باکتری می تواند به نباتات کمک کند تا نمو کنند و در برابر استرس ها مقاوم کنند. این باکتری با تولید هورمون های نباتی، بهبود جذب مواد مغذی و سرکوب پاتوژن ها به نموی نباتات کمک می کنند. PGPR ها می توانند هورمون های نباتی مانند اکسین، سائتوکینین، و جیبرلین تولید کنند. این هورمون ها می توانند به نمو و انکشاف ریشه ها، ساقه ها، و برگ های نباتات کمک کنند. همچنین، PGPR ها می توانند جذب مواد مغذی مانند فسفر و پتاسیم را بهبود بخشند. علاوه بر این، PGPR ها می توانند پاتوژن های نباتی را سرکوب کنند (Hafiza Shafaq Ishaq et al., 2025). تلقیح نباتات با PGPR ها می تواند به بهبود عملکرد محصول در شرایط سخت کمک کند. تلقیح نباتات با PGPR ها شامل افزودن PGPR ها به خاک یا تخم ها است. این کار می تواند به افزایش جمعیت PGPR ها در خاک و بهبود رابطه همزیستی بین PGPR ها و نباتات کمک کند. تلقیح نباتات با PGPR ها می تواند به بهبود عملکرد محصول در شرایط سخت مانند خشکی، گرما، و خاک های فقیر از مواد مغذی کمک کند (A. Srivastava et al., 2025).

۶. چالش ها و محدودیت های بایوتکنالوژی نباتی (Challenges and Limitations of Plant Biotechnology)

۱.۶. نگرانی های ایمنی زیستی و مقررات (Biosafety Concerns and Regulations)

نگرانی هایی در مورد ایمنی زیستی نباتات ترانسجیک، از جمله اثرات بالقوه بر سلامت انسان و محیط زیست وجود دارد (Aynias Seid & Berhanu Andualem, 2021). این نگرانی ها شامل احتمال ایجاد آلرژی، سمیت و اثرات منفی بر تنوع زیستی است. ارزیابی دقیق خطرات و مدیریت آنها برای اطمینان از ایمنی نباتات ترانسجیک ضروری است. مقررات سختگیرانه ای برای ارزیابی و مدیریت خطرات مرتبط با نباتات ترانسجیک وجود دارد. این مقررات شامل ارزیابی خطرات زیست محیطی، ارزیابی خطرات بهداشتی و برچسب زدن محصولات ترانسجیک است. ایجاد یک سیستم نظارتی شفاف و کارآمد برای ترویج نوآوری و در عین حال محافظت از سلامت انسان و محیط زیست ضروری است (Wilhelmina Quay et al., 2012). تعادل بین مزایای بالقوه بایوتکنالوژی نباتی و خطرات احتمالی آن ضروری است (Aynias Seid & Berhanu Andualem, 2021). بایوتکنالوژی نباتی پتانسیل زیادی برای کمک به زراعت برای سازگاری با تغییرات آب و هوایی و تضمین امنیت غذایی دارد، اما مهم است که خطرات احتمالی را نیز در نظر بگیریم و اقدامات لازم را برای مدیریت آنها انجام دهیم.

۲.۶. پذیرش عمومی و مسائل اخلاقی (Public Acceptance and Ethical Issues)

پذیرش عمومی نباتات ترانسجیک متفاوت است و برخی از مصرف کنندگان نگرانی هایی در مورد ایمنی و برچسب زدن دارند. این نگرانی ها اغلب ناشی از عدم آگاهی و اطلاعات نادرست در مورد نباتات ترانسجیک است. آموزش و ارتباطات عمومی می تواند به افزایش درک و پذیرش بایوتکنالوژی نباتی کمک کند (Hui et al., 2024). مسائل اخلاقی مربوط به انجینری جنتیکی نباتات، از جمله حقوق مالکیت معنوی و دسترسی به اطلاعات، وجود دارد حقوق مالکیت معنوی می تواند دسترسی به اطلاعات را محدود کند و مانع از توسعه وراثتی های جدید شود. اطمینان از دسترسی عادلانه به فناوری برای کشورهای در حال توسعه ضروری است (Aynias Seid & Berhanu Andualem, 2021).

آموزش و ارتباطات عمومی می تواند به افزایش درک و پذیرش بایوتکنالوژی نباتی کمک کند (Wilhelmina Quay et al., 2012). ارائه اطلاعات دقیق و شفاف در مورد مزایا و خطرات نباتات ترانسجیک می تواند به مصرف کنندگان کمک کند تا تصمیمات آگاهانه تری بگیرند. آموزش و ارتباطات عمومی می تواند به ایجاد اعتماد و افزایش پذیرش بایوتکنالوژی نباتی کمک کند.

۳.۶. محدودیت های فنی و هزینه ها (Technical Limitations and Costs)

توسعه و تجاری سازی نباتات ترانسجیک می تواند پرهزینه و زمان بر باشد (Ranjini Warriar & Hem Pande, 2016). این امر می تواند مانع از ورود شرکت های کوچک و متوسط به بازار شود و نوآوری را محدود کند. ارائه حمایت مالی و فنی به شرکت های کوچک و متوسط می تواند به ترویج نوآوری و افزایش رقابت کمک کند. محدودیت های فنی در انتقال جین و ویرایش جینوم وجود دارد که می تواند کاربرد این تکنیک ها را محدود کند (Wen Cong Gan & A. P. Ling, 2022). برخی از نباتات به سختی قابل تبدیل هستند و ویرایش جینوم همیشه

دقیق و کارآمد نیست. سرمایه گذاری در تحقیق و توسعه برای غلبه بر این محدودیت ها ضروری است. تحقیق و توسعه می تواند به توسعه روش های جدید و کارآمدتر برای انتقال جین و ویرایش جینوم کمک کند و کاربرد بایوتکنالوژی نباتی را گسترش دهد. سرمایه گذاری در تحقیق و توسعه برای پیشبرد بایوتکنالوژی نباتی ضروری است (Ranjini Warriar & Hem Pande, 2016).

۷. مطالعات موردی موفقیت آمیز در کاربرد بایوتکنالوژی نباتی (Successful Case Studies in Plant Biotechnology Application)

۱.۷. پنبه Bt مقاوم در مقابل آفات (Bt Cotton Resistant to Pests)

پنبه Bt، که از طریق انجینیری جنتیک برای تولید سم Bt مقاوم در مقابل آفات شده است، به طور گسترده ای در سراسر جهان کشت می شود (Peter Barfoot & Graham Brookes, 2014). سم Bt یک حشره کش طبیعی است که برای انسان و محیط زیست بی خطر است. پنبه Bt به کاهش استفاده از حشره کش های کیمیاوی و افزایش عملکرد محصول کمک کرده است. پنبه Bt منجر به کاهش قابل توجهی در استفاده از حشره کش ها و افزایش عملکرد محصول شده است (Peter Barfoot & Graham Brookes, 2014). این امر منجر به کاهش هزینه های تولید، افزایش سودآوری و بهبود سلامت زارعین شده است. پنبه Bt یک مطالعه موردی موفقیت آمیز در مورد چگونگی استفاده از بایوتکنالوژی نباتی برای کاهش اثرات آفات بر زراعت است. پنبه Bt نشان می دهد که بایوتکنالوژی نباتی می تواند ابزاری قدرتمند برای حل مشکلات زراعت باشد (Peter Barfoot & Graham Brookes, 2014).

۲.۷. برنج طلایی غنی شده با ویتامین ای (Golden Rice Enriched with Vitamin A)

برنج طلایی، که از طریق انجینیری جنتیک برای تولید بتاکاروتن پیش ساز ویتامین A غنی شده است، پتانسیل بهبود تغذیه در مناطقی که کمبود ویتامین A شایع است را دارد کمبود ویتامین A یک مشکل بهداشتی جدی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه است و می تواند منجر به نابینایی، ضعف سیستم ایمنی و مرگ شود. برنج طلایی می تواند به کاهش کمبود ویتامین A در این مناطق کمک کند (Tang, Qin, Dolnikowski, Russell, & Grusak, 2009). برنج طلایی یک مطالعه موردی در مورد چگونگی استفاده از بایوتکنالوژی نباتی برای بهبود ارزش غذایی محصولات زراعتی است (Nicholas C. Carpita & Maureen C. McCann, 2020). برنج طلایی نشان می دهد که بایوتکنالوژی نباتی می تواند ابزاری قدرتمند برای بهبود سلامت انسان باشد. برنج طلایی یک مثال عالی از چگونگی استفاده از بایوتکنالوژی نباتی برای بهبود ارزش غذایی محصولات زراعتی و کاهش کمبود مواد مغذی است.

با این حال، برنج طلایی با مخالفت هایی از سوی برخی گروه ها مواجه شده است و پذیرش آن کند بوده است. این مخالفت ها اغلب ناشی از نگرانی های ایمنی زیستی و مسائل اخلاقی است. ارائه اطلاعات دقیق و شفاف در مورد برنج طلایی می تواند به افزایش درک و پذیرش آن کمک کند (Aynias Seid & Berhanu Andualem, 2021).

۳.۷. جواری تحمل کننده خشکی (Drought-Tolerant Maize)

جواری تحمل کننده خشکی، که از طریق انجینیری جنتیک و اصلاح نژاد سنتی توسعه یافته است، می تواند عملکرد بیشتری در شرایط خشک داشته باشد. خشکی یکی از عوامل اصلی محدود کننده عملکرد محصول در بسیاری از مناطق جهان است. جواری تحمل کننده خشکی می تواند به زارعین کمک کند تا عملکرد محصول را در شرایط خشک حفظ کنند و امنیت غذایی را بهبود بخشند (Rasheed et al., 2023). جواری تحمل کننده خشکی یک مطالعه موردی در مورد چگونگی استفاده از بایوتکنالوژی نباتی برای سازگاری با تغییرات آب و هوایی است. جواری تحمل کننده خشکی نشان می دهد که بایوتکنالوژی نباتی می تواند ابزاری قدرتمند برای کمک به کشاورزان برای انطباق با شرایط تغییرات آب و هوایی باشد (Rasheed et al., 2023).

این محصول به ویژه برای زارعین در مناطق خشک و نیمه خشک مهم است. این مناطق اغلب با کمبود آب و خاک مواجه هستند و زارعین در این مناطق به وراثتی های تحمل کننده خشکی نیاز دارند تا بتوانند عملکرد محصول را حفظ کنند. جواری تحمل کننده خشکی می تواند به بهبود معیشت زارعین در این مناطق کمک کند (Rasheed et al., 2023).

نتیجه گیری

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از جدی ترین تهدیدهای قرن بیست و یکم، اثرات عمیق و چندجانبه ای بالای سیستم های زراعتی در سراسر جهان گذاشته است. افزایش درجه حرارت، خشکسالی های مکرر، تغییر الگوهای بارندگی و شوری خاک، عملکرد محصولات زراعتی را کاهش داده و امنیت غذایی میلیون ها انسان را تهدید می کند. در چنین شرایطی، بایوتکنالوژی نباتی به عنوان یک ابزار علمی و راهبردی نوین، نقش محوری

در افزایش تحمل پذیری و پایداری زراعت دارد. این فناوری در ترکیب با دانش جنتیک کلاسیک و روش های مدرن مالیکولی، زمینه را برای انکشاف وراثتی های مقاوم در مقابل تنش های بیوتیک و غیر بیوتیک فراهم ساخته است.

استفاده از تکنیک هایی چون انجینری جنتیک، ویرایش جینوم (CRISPR/Cas9)، انتخاب به کمک نشانگر (MAS) و فناوری های چند-أمیکس، باعث تسریع روند اصلاح نباتات، بهبود کارایی مصرف مواد مغذی و افزایش مقاومت نباتات در برابر خشکی، گرما، شوری و امراض شده است. افزون بر این، کاربرد مایکروارگانسیم های مفید مانند ریزوبیوم ها، قارچ های میکوریزا و بکتریای محرک نمو نبات (PGPR)، ظرفیت سازگاری نباتات با تنش های اقلیمی را به طور چشمگیری افزایش داده و به پایداری اکوسیستم های زراعتی کمک می کند. این سیستم ها همچنین با کاهش وابستگی به مواد کیمیاوی، ارتقای سلامت خاک و افزایش مترسب ساختن کاربن در محیط، در کاهش گازهای گلخانه ای و حفاظت از محیط زیست نقش مؤثری دارند.

با این حال، چالش هایی مانند نگرانی های ایمنی زیستی، محدودیت های فنی در ویرایش جینوم، هزینه های بالا، و پذیرش اجتماعی محدود، از جمله موانع اصلی توسعه و تجاری سازی گسترده این فناوری ها هستند. غلبه بر این موانع مستلزم ایجاد چارچوب های نظارتی شفاف، افزایش آگاهی عمومی، و فراهم سازی حمایت های مالی و علمی از مراکز تحقیقاتی و بخش خصوصی است. همکاری میان رشته ای میان دانشمندان اقلیم، متخصصان بایوتکنالوژی، اصلاح گران نباتات و سیاست گذاران، نقشی اساسی در تسریع روند انتقال فناوری و به کارگیری عملی آن در مزرعه دارد.

نمونه های موفق جهانی مانند پنبه Bt، برنج طلایی و جواری مقاوم در مقابل خشکی نشان می دهند که بایوتکنالوژی نباتی نه تنها در بهبود عملکرد محصولات بلکه در ارتقای امنیت غذایی و توسعه پایدار نقش تعیین کننده ای دارد. آینده زراعت در جهان به میزان توانایی ما در به کارگیری دانش بایوتکنالوژی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی بستگی دارد. سرمایه گذاری مستمر در تحقیق، آموزش نیروی انسانی متخصص، و توسعه سیاست های حمایتی می تواند مسیر دستیابی به زراعتی مقاوم، پایدار و سازگار با اقلیم آینده را هموار سازد. در نتیجه، بایوتکنالوژی نباتی نه فقط یک ابزار علمی، بلکه یک راهبرد حیاتی برای تضمین امنیت غذایی نسل های امروز و آینده است.

مآخذ

- Tita, D., Mahdi, K., Devkota, K. P., & Devkota, M. (2025). Climate change and agronomic management: Addressing wheat yield gaps and sustainability challenges in the Mediterranean and MENA regions. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X24003925>
- Hultgren, A., Carleton, T., Delgado, M. et al. Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation. *Nature* 642, 644–652 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09085-w>
- Varadharajan, V., Rajendran, R., Muthuramalingam, P., Runthala, A., Madhesh, V., Swaminathan, G., Murugan, P., Srinivasan, H., Park, Y., Shin, H., & Ramesh, M. (2025). Multi-omics approaches against abiotic and biotic stress—A review. *Plants*, 14(6), 865. <https://doi.org/10.3390/plants14060865>
- Wójcik-Gront, E., Zieniuk, B., & Pawełkiewicz, M. (2024). Harnessing AI-powered genomic research for sustainable crop improvement. *MDPI Agronomy*, 14(12), 2299. <https://www.mdpi.com/2077-0472/14/12/2299>
- Yang, Y., Saand, M. A., Huang, L., Abdelaal, W. B., Zhang, J., Wu, Y., Li, J., Sirohi, M. H., & Wang, F. (2021). Applications of multi-omics technologies for crop improvement. *Frontiers in Plant Science*, 12, 563953. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.563953>
- Thingujam, D., Gouli, S., Cooray, S. P., Chandran, K. B., Givens, S. B., Gandhimeyyan, R. V., Tan, Z., Wang, Y., Patam, K., Greer, S. A., Acharya, R., Moseley, D. O., Osman, N., Zhang, X., Brooker, M. E., Tagert, M. L., Schafer, M. J., Jeong, C., Hoffseth, K. F., Bheemanahalli, R., Wyss, J. M., Wijewardane, N. K., Ham, J. H., & Mukhtar, M. S. (2025). Climate-resilient crops: Integrating AI, multi-omics, and advanced phenotyping to address global agricultural and societal challenges. *Plants*, 14(17), 2699. <https://doi.org/10.3390/plants14172699>
- Ali, Q., Akhtar, T., Zuhra, N., Hasddin, S., Syarbiah, S., & Ega, A. A. (2024). Biotechnology for sustainable agriculture: innovations in disease management. *None*. <https://doi.org/10.33804/pp.008.04.5524>
- DSR, R. S., U A. D., G, R., & T, U. (2025). Environmental biotechnology in sustainable agriculture: enhancing crop resilience and conserving natural resources. *International Journal of Science and Research Archive*. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.14.3.0696>
- Mahendhiran, M., Beleri, P. S., Kotyal, K., Chowhan, L. B., & Khokale, S. (2024). The role of phytohormones in regulating plant growth and development under climate change scenarios. *None*. <https://doi.org/10.51470/psr.2024.05.01.08>
- Zenda, T., Liu, S., Dong, A., & Duan, H. (2021). Advances in cereal crop genomics for resilience under climate change. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/life11060502>

- Cooper, M., Messina, C. D., Podlich, D., Totir, L. R., Baumgarten, A., Hausmann, N. J., Wright, D., Graham, G., & Bennett, D. (2014). Predicting the future of plant breeding: Complementing empirical evaluation with genetic prediction. *Crop Science*, 61(2), 671–687. <https://connectsci.au/cp/article/65/4/311/27906/Predicting-the-future-of-plant-breeding>
- Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2013). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Tardieu, F., Cabrera-Bosquet, L., Pridmore, T., & Bennett, M. (2018). Plant phenomics, from sensors to knowledge. *Current Biology*, 27(15), R770–R783. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.12.058>
- Bailey-Serres, J., Parker, J. E., Ainsworth, E. A., Oldroyd, G. E. D., & Schroeder, J. I. (2019). Genetic strategies for improving crop yields. *Nature*, 575(7781), 109–118. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1679-0>
- Hickey, L. T., Hafeez, A. N., Robinson, H., Jackson, S. A., Leal-Bertioli, S. C. M., Tester, M., ... & Wulff, B. B. H. (2019). Breeding crops to feed 10 billion. *Nature Biotechnology*, 37(7), 744–754.
- Reynolds, M., Chapman, S., Crespo-Herrera, L., Molero, G., Mondal, S., Pequeno, D. N. L., ... Y Vargas, M. (2021). Breeder friendly phenotyping. *Plant Science*, 315, 111165. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2021.111165>
- Munaweera, T. I. K., Jayawardana, N. U., Rajaratnam, R., & Dissanayake, N. (2022). Modern plant biotechnology as a strategy in addressing climate change and attaining food security. *Agriculture & Food Security*, 11, Article 26.
- Kumar, S., Thilagam, P., Shikha, D., Saikanth, D. R. K., Rahmani, U., Huded, S., & Panigrahi, C. K. (2023). Adapting plant protection strategies to meet the challenges posed by climate change on plant diseases: A review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(12), 25–36.
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019). Impact of climate change on crop adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8(2), 34.
- Ishaq, H. S., Akif, M., Hasan, A., Khalid, A., Fatima, M., Mohsan, M., Haider Khan, A., Afzal, M., & Abbas, M. (2025). Plant science in the face of global crises: Biotechnological innovations for climate resilience, food security, and medicinal plant conservation. *Scholars Academic Journal of Biosciences*, 13(9), 1363–1380. <https://doi.org/10.36347/sajb.2025.v13i09.007>
- Quaye, W., Yawson, R. M., Ayeh, E. S., & Yawson, I. (2012). Climate change and food security: The role of biotechnology. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 12(5). <https://doi.org/10.18697/ajfand.53.11120>
- Ntsomboh-Ntsefong, G., Toukam Gabriel, M. S., Namuene, K. S., Dzeufouo Tapinfo, C. M., & Mbi Kingsley, T. (2025). Biofertilizers: An integrated approach to improving soil fertility, plant nutrition, forest and environmental sustainability. *Open Access Library Journal*, 12(08), 1–26. <https://doi.org/10.4236/oalib.1113141>
- Doggalli, G., Monya, D., Kumar, M. B., Manjunath, P., Choudhuri, S., Das, J., Mubeen, & Khokale, S. K. (2024). Techniques and approaches for developing abiotic stress-tolerant crop varieties: A comprehensive review. *Plant Molecular and Cellular Biology*, 25(7–8), 101–125.
- Munaweera, T. I. K. (2022). Modern plant biotechnology as a strategy to combat climate change and achieve food security. *Food Security and Agriculture*, 11(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s40066-022-00369-2>
- Lebedev, V. G., Popova, A. A., & Shestibratov, K. A. (2021). Genetic engineering and genome editing to improve nitrogen use efficiency in plants. *Cells*, 10(12), 3303. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8699818/>
- Kovak, E., Smith, J., & Li, H. (2022). Genetically modified crops support climate change mitigation. *Trends in Plant Science*, 27(3), 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.01.004>
- Srivastava, R. K., & Yetgin, A. (2024). An overall review on influence of root architecture on soil carbon sequestration potential. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 36(3), 165–178. <https://doi.org/10.1007/s40626-024-00323-6>
- Kumar, S. (2017). Enhancing crop resilience to climate change through genetic modification. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, 5(1), 56–57. <https://www.ijcrt.org/papers/IJCRT1135734.pdf>
- Ishaq, H. S., Akif, M., Hasan, A., Khalid, A., Fatima, M., Mohsan, M., Khan, A. H., Afzal, M., & Abbas, M. (2025). Plant science in the face of global crises: Biotechnological innovations for climate resilience, food security, and medicinal plant conservation. *Scholars Academic Journal of Biosciences*, 13(9), 1363–1380. <https://doi.org/10.36347/sajb.2025.v13i09.007>
- Astapati, A. D., & Nath, S. (2023). The complex interplay between plant-microbe and virus interactions in sustainable agriculture: Harnessing phytomicrobiomes for enhanced soil health, designer plants, resource use efficiency, and food security. *Crop Design*, 2(16), 100028. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2023.100028>
- 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://www.researchgate.net/publication/350011076_The_Role_of_Green_Biotechnology_through_Genetic_Engineering_for_Climate_Change_Mitigation_and_Adaptation_and_for_Food_Security_Current_Challenges_and_Future_Perspectives
- Yawson, R. M., & Quaye, W. (2012). A stakeholder approach to investigating public perception and attitudes towards agricultural biotechnology in Ghana. Academia.edu. https://www.academia.edu/268883/A_Stakeholder_Approach_to_Investigating_Public_Perception_and_Attitudes_Towards_Agricultural_Biotechnology_In_Ghana
- Hui, X., Amponsah, R. K., Antwi, S., Gbolonyo, P. K., Ameyaw, M. A., Bentum-Micah, G., & Adjei, E. O. (2024). Understanding the societal dilemma of genetically modified food consumption: A stimulus-organism-response investigation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, Article 1364052. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1364052>
- Quaye, W., Yawson, I., Yawson, R. M., & Williams, I. E. (2009). Acceptance of biotechnology and social cultural implications in Ghana. *African Journal of Biotechnology*, 8(9), 1997–2003. https://www.researchgate.net/publication/228295037_Acceptance_of_Biotechnology_and_Social-Cultural_Implications_in_Ghana
- Gan, W. C., & Ling, A. P. K. (2022). CRISPR/Cas9 in plant biotechnology: Applications and challenges. *BioTechnologia*, 103(1), 81–93. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9642946/>
- Brookes, G., & Barfoot, P. (2014). Economic impact of GM crops: the global income and production effects 1996–2012. *GM crops & food*, 5(1), 65–75. <https://doi.org/10.4161/gmcr.28098>
- Tang, G., Qin, J., Dolnikowski, G. G., Russell, R. M., & Grusak, M. A. (2009). Golden Rice is an effective source of vitamin A. *American Journal of Clinical Nutrition*, 89(6), 1776–1783. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2008.27119>
- Rasheed, A., Jie, H., & Ali, B. (2023). Breeding drought-tolerant maize (*Zea mays*) using molecular breeding tools: Recent advancements and future prospective. *Agronomy*, 13(6), 1459. https://www.researchgate.net/publication/371013636_Breeding_Drought-Tolerant_Maize_Zea_mays_Using_Molecular_Breeding_Tools_Recent_Advancements_and_Future_Prospertive
- Jiménez Bremont, J. F., Rodríguez Kessler, M., Liu, J.-H., & Gill, S. S. (2013). Plant stress and biotechnology. *BioMed Research International*. <https://doi.org/10.1155/2013/170367> Wiley Online Library
- Srivastava, A.K., Riaz, A., Jiang, J. et al. Advancing Climate-Resilient Sorghum: the Synergistic Role of Plant Biotechnology and Microbial Interactions. *Rice* 18, 41 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12284-025-00796-2>
- Warrier R, Pande H. Genetically engineered plants in the product development pipeline in India. *GM Crops Food*. 2016 Jan 2;7(1):12-9. Doi: 10.1080/21645698.2016.1156826. PMID: 26954729; PMCID: PMC5033223.