

روش‌های نوین اصلاح نباتات برای افزایش تحمل به تنش‌های محیطی

سید مهدی مهدوی

کارشناسی کشاورزی، گرایش زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اقلید، فارس، ایران

seyedmehdimahdavi@mail.ir

چکیده

تنش‌های غیر زیستی از جمله خشکی، شوری، گرمای شدید و سرما، به عنوان مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید محصولات کشاورزی در سطح جهانی مطرح هستند. این تنش‌ها سالانه باعث کاهش حدود ۵۰ درصدی عملکرد در محصولات زراعی عمده می‌شوند و با تشدید تغییرات اقلیمی، شدت و فراوانی آنها به طور چشمگیری رو به افزایش است. روش‌های سنتی اصلاح نباتات علیرغم دستاوردهای ارزشمند، بدلیل ماهیت چند ژنی تحمل به تنش، زمان‌بر بودن و محدودیت‌های سازگاری گونه‌ها، پاسخگوی نیاز فزاینده به تولید ارقام مقاوم نیستند. در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های شگرف در حوزه ژنو میکس، ابزارهای ویرایش ژنوم، فن تایپینگ با توان بالا، انتخاب ژنومی، سرعت‌بخشی به نسل‌های اصلاحی، مهندسی اپی‌ژنتیک، زیست‌شناسی مصنوعی و اهلی سازی مجدد گونه‌های وحشی، انقلابی در رویکردهای اصلاح نباتات برای افزایش تحمل به تنش‌های محیطی ایجاد کرده است. این مقاله مروری جامع بر روش‌های نوین اصلاح نباتات برای افزایش تحمل به تنش‌های غیرزیستی ارائه می‌دهد و ضمن بررسی مبانی مولکولی پاسخ به تنش، کاربردهای عملی هر یک از این رویکردها را در محصولات مختلف زراعی مورد تحلیل قرار می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که رویکردهای تلفیقی مبتنی بر ادغام ژنو میکس، ویرایش ژنوم، فن تایپینگ پیشرفته و یادگیری ماشین، بیشترین پتانسیل را برای توسعه ارقام مقاوم به تنش با حفظ عملکرد بالا دارا هستند. با این حال، چالش‌هایی نظیر اثرات خارج از هدف، محدودیت‌های انتقال ژن، موانع قانونی و پذیرش اجتماعی همچنان پیش روی کاربرد گسترده این فناوری‌ها قرار دارد.

واژگان کلیدی: اصلاح نباتات، تنش‌های غیرزیستی، ویرایش ژنوم CRISPR/Cas9، انتخاب به کمک نشانگر

۱. مقدمه

افزایش جمعیت جهان و تغییرات اقلیمی، فشار بی‌سابقه‌ای بر بخش کشاورزی برای تولید مواد غذایی بیشتر وارد کرده است (al et Mirzabaev, ۲۰۲۳). پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰، نرخ فعلی پیشرفت کشاورزی برای تأمین افزایش ۲۵ درصدی تقاضای مواد غذایی کافی نخواهد بود (al et Dias Cunha da, ۲۰۲۱). تنش‌های غیر زیستی از جمله خشکی، شوری، دماهای حدی (گرما و سرما) و غرقابی، از مهم‌ترین عوامل محدود کننده تولید محصولات کشاورزی هستند (al et Abdallah, ۲۰۲۲). این تنش‌ها مسئول حدود ۵۰ درصد کاهش عملکرد در گونه‌های گیاهی یکساله در سراسر جهان هستند و شدت آن‌ها به دلیل افزایش نوسانات اقلیمی در حال تشدید است.

تنش خشکی به عنوان مخرب‌ترین تنش غیر زیستی، رشد، بهره‌وری و پایداری عملکرد را در تقریباً تمام گونه‌های محصولات عمده کاهش می‌دهد (al et Ashraf, ۲۰۲۱). تنش شوری نیز با تأثیر بر جوانه‌زنی، جذب مواد مغذی و فتوسنتز، عملکرد گیاهان را به شدت کاهش می‌دهد (Tiwari, ۲۰۲۵). در ایران، از حدود ۸/۶ میلیون هکتار اراضی کشاورزی متأثر از شوری، حدود ۴/۳ میلیون هکتار صرفاً با محدودیت شوری مواجه هستند که هیچ مانع دیگری برای تولید پایدار محصولات ایجاد نمی‌کند (al et Mohammadi, ۲۰۲۵). افزایش دما، به ویژه در مراحل حساس رشد مانند گل‌دهی و پر شدن دانه، با کاهش اندازه دانه، تعداد دانه و عملکرد کلی، تأثیر منفی بر بهره‌وری گندم دارد (al et Khoshro, ۲۰۲۵).

پاسخ گیاهان به شرایط محیطی حدی به سطوح متعددی شامل سطح سلولی، آناتومیکی، مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و مولکولی وابسته است و توسط مکانیسم‌های تنظیمی پیچیده و چندزنی کنترل می‌شود (Blumwald and Mittler, ۲۰۱۰; Bowerman et al, ۲۰۲۳). دست کم شش شبکه انتقال سیگنال در کنترل تحمل به خشکی، شوری یا سرما نقش دارند (al et Uno, ۲۰۰۰; Thomashow and Fowler, ۲۰۰۲; Yamaguchi-Shinozaki and Shinozaki, ۲۰۰۷).

روش‌های سنتی اصلاح نباتات، علی‌رغم ارزشمند بودن، زمان‌بر، پرهزینه و وابسته به شرایط محیطی هستند و به چندین سال برای تولید یک رقم جدید نیاز دارند (al et Jamali, ۲۰۲۰; al et Yadav, ۲۰۲۳). این روش‌ها شامل تلاقی افراد انتخاب شده و به دنبال آن غربالگری و ارزیابی دقیق برای شناسایی و انتقال صفات مطلوب به نسل‌های بعدی است. علاوه بر این، روش‌های اصلاح سنتی به دلیل ماهیت چند زنی صفات تحمل به تنش و وراثت‌پذیری پایین آنها، با محدودیت‌های جدی مواجه هستند (al et Cavatte, ۲۰۱۲). تحمل به تنش‌های غیر زیستی معمولاً دارای وراثت‌پذیری پایین بوده و بهبود آن از طریق روش‌های مرسوم با کندی بسیار همراه است.

در مقابل، روش‌های نوین اصلاح نباتات مبتنی بر دستاوردهای ژنو میکس، بیو تکنولوژی مولکولی و فناوری‌های اطلاعاتی، انقلابی در توانایی ما برای توسعه ارقام مقاوم به تنش ایجاد کرده‌اند. این روش‌ها شامل ویرایش ژنوم با استفاده از سیستم CRISPR/Cas9، انتخاب به کمک نشانگرهای مولکولی (MAS)، انتخاب ژنومی (GS)، سرعت‌بخشی به نسل‌های اصلاحی، فن‌تایپینگ با توان بالا، مهندسی اپی‌ژنتیک، زیست‌شناسی مصنوعی و اهلی‌سازی مجدد گونه‌های وحشی هستند. این مقاله به بررسی جامع این روش‌ها، مبانی مولکولی آن‌ها، کاربردهای عملی و چالش‌های پیش رو می‌پردازد.

۲. مبانی مولکولی پاسخ به تنش‌های محیطی

۲-۱. شبکه‌های انتقال سیگنال در پاسخ به تنش

درک مکانیسم‌های مولکولی پاسخ به تنش برای طراحی راهبردهای مؤثر اصلاحی ضروری است. تنش‌های خشکی و شوری عمدتاً تعادل آبی، تنظیم اسمزی و هموستاز یونی را مختل می‌کنند، در حالی که تنش‌های گرما و سرما باعث اختلال در رشد زایشی، پایداری غشاء و عملکرد فتوسنتزی می‌شوند (Science Plant in Frontiers, ۲۰۲۶). تنش غرقابی نیز هیپوکسی ناحیه ریشه و استرس اکسیداتیو ناشی از باز اکسیژن رسانی را بدنبال دارد که متابولیسم انرژی و هموستاز اکسایشی-کاهشی را مختل می‌کند.

تحمل به تنش در گیاهان توسط شبکه‌های پیچیده‌ای از مسیرهای انتقال سیگنال کنترل می‌شود. هورمون گیاهی اسید آبسازیک (ABA) به عنوان یک پیام‌رسان درون‌زا در پاسخ‌های تنش خشکی و شوری نقش کلیدی ایفا می‌کند (Science, ۲۰۰۹). مطالعات اخیر نشان داده است که مسیرهای ABA، تنظیم اسمزی، بیوسنتز پرولین، انتقال آب با واسطه آکواپورین‌ها و مسیرهای هموستاز یونی شامل اجزای مرتبط با SOS و NHX، از مهم‌ترین مسیرهای مشترک در پاسخ به خشکی و شوری هستند (Science Plant in Frontiers, ۲۰۲۶).

تنظیم گرمایی با شبکه CBF/DREB برای سرمایش و شبکه HSF-HSP-DREBFA برای حفظ پروتئوستاز تحت تنش گرما مرتبط است. تحمل به غرقابی نیز با سیگنال دهی هیپوکسی و اتیلن، محافظت اکسایشی-کاهشی و تنظیم انرژی مرتبط با CIPK10/SnRK1 در ارتباط است.

۲-۲. تنظیم بیان ژن در پاسخ به تنش

پاسخ به تنش‌های محیطی شامل باز برنامه‌ریزی گسترده بیان ژن‌ها است. مطالعات فرا تحلیل بر روی داده‌های بیان ژن گونه‌های اهلی و وحشی برنج، گوجه فرنگی و سویا نشان داده است که در گونه‌های وحشی، بیان ژن‌های درگیر در تحمل به تنش اسمزی، خشکی و زخم افزایش می‌یابد (al et Kobayashi, ۲۰۲۵). در گونه‌های اهلی شده، افزایش بیان در ژن‌های مرتبط با اکسین و خروج فلزات سنگین و مواد مضر مشاهده شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فرآیند اهلی سازی منجر به از دست دادن برخی از آل‌های مفید برای تحمل به تنش شده است (al et Kobayashi, ۲۰۲۵).

پیرایش جایگزین (Splicing Alternative) نیز به عنوان یک مکانیسم کلیدی در پاسخ به تنش شناخته شده است. تنش‌های غیر زیستی به شدت رشد گیاه و عملکرد محصول را محدود کرده و بر امنیت غذایی در طول تغییرات اقلیمی تأثیر می‌گذارند (al et Mastrangelo, ۲۰۲۶). ادغام پیرایش جایگزین در راهبردهای اصلاح مولکولی، پتانسیل توسعه ارقام با تحمل بهبود یافته به تنش را دارا است (al et Mastrangelo, ۲۰۲۶).

۳-۲. نقش گونه‌های اکسیژن فعال و سیستم آنتی اکسیدانی

تنش‌های محیطی باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) در گیاهان می‌شوند که به غشاء سلولی، پروتئین‌ها و DNA آسیب می‌رسانند. گیاهان از طریق دفاع‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی، استرس اکسیداتیو ناشی از ROS را کاهش می‌دهند (ORNL Impact, ۲۰۲۵). آنتی‌اکسیدان‌ها مقاومت به تنش را در محصولات افزایش داده و آسیب اکسیداتیو ناشی از ROS را محدود می‌کنند (ScienceDirect, ۲۰۲۵).

فاکتورهای رونویسی متعددی در تنظیم پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی نقش دارند. به عنوان مثال، فاکتور رونویسی TaHSFC³B در گندم با تنظیم مسیر ROS و ABA، مقاومت به خشکی را افزایش می‌دهد و با بهبود ظرفیت آنتی‌اکسیدانی، افزایش تجمع ABA و حساسیت به آن، منجر به کاهش باز شدن روزنه، افزایش محتوای آب برگ و افزایش دمای برگ می‌شود (Planta, ۲۰۲۵). همچنین، افزایش بیان ژن ZmGST در ریشه ذرت، توانایی حذف ROS را بهبود بخشیده و مقاومت به خشکی را به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد (Biology Plant BMC, ۲۰۲۵).

۳. روش‌های مبتنی بر نشانگرهای مولکولی

۳-۱. انتخاب به کمک نشانگر (Selection Marker-Assisted)

انتخاب به کمک نشانگر (MAS) به عنوان یکی از مهم‌ترین دستاوردهای ژنو میکس در اصلاح نباتات، امکان انتخاب ژنوتیپ‌های برتر بر اساس نشانگرهای مولکولی پیوند خورده با صفات مورد نظر را فراهم می‌کند (al et Sharma, ۲۰۲۴). MAS پتانسیل قابل توجهی در افزایش تحمل به تنش‌های غیرزیستی با تسریع فرآیند اصلاح و افزایش دقت در ورود صفات دارد (Sharma, al et, ۲۰۲۴).

در مطالعه‌ای بر روی ۲۰ ژنوتیپ پیشرفته گندم در شرایط تنش گرمایی، تجزیه و تحلیل تنوع ژنتیکی با استفاده از ۳۰ نشانگر ریزماهواره (SSR) چندشکل، ارتباطات معنی‌دار نشانگر-صفت را شناسایی کرد. نشانگرهای ۲۸۵ Xgwm و ۵۷۷ Xgwm به شدت با صفات مرتبط با تحمل به گرما مرتبط بودند و ابزارهای ارزشمندی برای MAS در تولید ارقام مقاوم به گرما فراهم کردند (al et Khoshro, ۲۰۲۵). در این مطالعه، تنش گرمایی منجر به کاهش معنی‌دار عملکرد دانه و صفات مرتبط با آن شد، بطوری که میانگین کاهش عملکرد ۵۳/۸ درصد بود. ژنوتیپ $YR \times Ksu110-240$ تنها ۱۰/۴ درصد کاهش عملکرد نشان داد، در حالی که ژنوتیپ DHH۳-۲۶ با کاهش ۵۳/۶ درصدی، حساسیت بالایی به گرما داشت (al et Khoshro, ۲۰۲۵).

جدول ۱: نمونه‌هایی از کاربرد موفق انتخاب به کمک نشانگر در بهبود تحمل به تنش

محصول	تنش	QTL/ژن هدف	منبع نشانگر	نتیجه	مرجع
برنج	خشکی، شوری، غرقابی	۲.DTYT, Salt, Subl ۱.DTYT, ۱.DTYT	نشانگرهای پیش‌زمینه	افزایش مقاومت هم‌زمان به سه تنش	(۲۰۲۴, al et Muthu)
گندم	گرمای شدید	۵۷۷ Xgwm, ۲۸۵ Xgwm	نشانگرهای SSR	شناسایی ژنوتیپ با ۱۰/۴٪ کاهش عملکرد	(۲۰۲۵, al et Khoshro)
گندم	شوری	QTLهای متعدد	نشانگرهای SNP	تنوع بالا برای بهبود تحمل به شوری	(۲۰۲۵, al et Mohammadi)
گلرنگ	خشکی	MTAs متعدد	نشانگرهای DArTseq	شناسایی جایگاه‌های کاندید برای MAS	(۲۰۲۴, al et Miraghazadeh)
ذرت	تنش‌های غیرزیستی	QTLهای متعدد	نشانگرهای مولکولی	افزایش سرعت و دقت اصلاح	(۲۰۲۴, MaizeGDB)

در مطالعه دیگری، از روش پس تلاقی به کمک نشانگر برای ایجاد رقم Ponni White Improved (IWP) برنج مقاوم به سه تنش خشکی، شوری و غرقابی استفاده شد. با استفاده از نشانگرهای پیش زمینه برای انتخاب ژنوتیپ‌های مثبت حاوی هر پنج QTL (۲.DTYT, Salt, Subl و ۱.DTYT و ۱.DTYT) در شرایط هتروزیگوت، پنج لاین برتر F_۳ با بیش از ۸۰ درصد بازیابی ژنوم IWP شناسایی شدند که مقاومت به هر سه تنش را با عملکرد بهبودیافته نشان دادند (۲۰۲۴, al et Muthu).

۲-۳. انتخاب ژنومی (Selection Genomic)

انتخاب ژنومی (GS) با بهره‌گیری از نشانگرهای با چگالی بالا، به عنوان روش انتخابی برای صفات چند ژنی با وراثت پذیری پایین، مانند تحمل به تنش‌های غیر زیستی، مطرح شده است (۲۰۲۴, al et Sharma). در دوران پسا ژنومی، گسترش نشانگرهای SNP با چگالی بالا، انقلابی در راهبردهای اصلاحی ایجاد کرده است.

GS با استفاده از داده‌های ژنومی کل جمعیت و پیش‌بینی ارزش اصلاحی ژنوتیپ‌ها بر اساس نشانگرهای سراسر ژنوم، امکان انتخاب ژنوتیپ‌های برتر را بدون نیاز به فن‌تایپینگ گسترده فراهم می‌کند. این روش به ویژه برای صفات با وراثت‌پذیری پایین که بهبود آن‌ها از طریق MAS سنتی دشوار است، بسیار کارآمد می‌باشد (۲۰۲۴, al et Sharma).

ابزارهای ژنومیکس مانند انتخاب ژنومی و ویرایش ژنوم برای اهلی سازی مجدد، شکستن پیوند ناخواسته و غلبه بر موانع ناسازگاری ژنتیکی، به عنوان ابزارهای ژنومیکس محور برای افزایش بهره‌وری محصولات و مقاومت به تنش معرفی شده‌اند (۲۰۲۵, al et Bailey-Serres; ۲۰۲۲, al et Campbell).

۳-۳. مطالعات ارتباط ژنومی (GWAS)

مطالعات ارتباط ژنومی (GWAS) ابزاری قدرتمند برای شناسایی جایگاه‌های ژنتیکی مرتبط با تحمل به تنش است. در مطالعه‌ای بر روی ۹۰ ژنوتیپ گلرنگ از سراسر جهان با استفاده از نشانگرهای GWAS، DArTseq برای شناسایی ارتباطات نشانگر-صفت (MTAs) مرتبط با تحمل به خشکی انجام شد (al et Miraghazadeh, ۲۰۲۴). این مطالعه جایگاه‌های کاندید را برای انتخاب به کمک نشانگر در بهبود تحمل به خشکی گلرنگ معرفی کرد (al et Miraghazadeh, ۲۰۲۴).

در کلزا (napus Brassica)، به دلیل ماهیت آلوتتراپلوئید، صفات مقاومت به تنش تحت تأثیر وراثت چندژنی، افزونگی ژنی و تنظیم ویژه زیرژنوم قرار دارند. ادغام نقشه‌برداری QTL، GWAS، شواهد رونویسی و مطالعات عملکردی برای اولویت‌بندی ژن‌های کاندید و مازول‌های مسیر مرتبط با مقاومت اقلیمی ضروری است (Science Plant in Frontiers, ۲۰۲۶).

۴-۴. ویرایش ژنوم با CRISPR/Cas9**۴-۱. مبانی و اصول سیستم CRISPR/Cas9**

سیستم CRISPR/Cas9 (توالی‌های پالیندرمیک کوتاه با تکرارهای منظم فاصله‌دار و پروتئین مرتبط با CRISPR) به عنوان یک فناوری انقلابی در ویرایش ژنوم، به دلیل سادگی، کارایی و تطبیق‌پذیری بالا، تحولی عظیم در اصلاح نباتات ایجاد کرده است (al et Ahmad, ۲۰۲۵). CRISPR/Cas9 با القای جهش‌های نقطه‌ای تکی یا چندگانه، حذف/افزایش‌های کوچک (InDel)، اصلاح بازهای انتخابی یا قطعات DNA و تعدیل بیان ژن، آلل‌های جدیدی شبیه به تنوع طبیعی تولید می‌کند (Lyons, ۲۰۲۶).

این فناوری با هدف‌گیری دقیق ژن‌های مرتبط با عملکرد بالا و حساسیت به تنش به طور هم‌زمان، پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای توسعه ارقام با تحمل بهبود یافته به تنش‌های متعدد غیر زیستی ارائه می‌دهد (Springer, ۲۰۲۵).

۴-۲. کاربردهای CRISPR/Cas9 در افزایش تحمل به تنش

CRISPR/Cas9 با موفقیت برای خاموش کردن تنظیم‌کننده‌های منفی پاسخ به تنش، فعال‌سازی ژن‌های مفید و ویرایش فاکتورهای رونویسی کلیدی در مسیرهای سیگنال‌دهی تنش استفاده شده است (al et Ahmad, ۲۰۲۵). این فناوری امکان توسعه ارقام با تحمل بهبود یافته به خشکی، شوری و دماهای حدی را فراهم کرده است.

در گندم، فناوری‌های جدید ویرایش ژنوم برای افزایش تحمل به تنش‌های غیر زیستی شامل خشکی، شوری، دما و علف‌کش‌ها توسعه و به کار گرفته شده‌اند (al et Hussain, ۲۰۲۵). با وجود اینکه گندم در تمام قاره‌ها کشت می‌شود، به شدت تحت تأثیر تنش‌های زنده و غیر زنده قرار می‌گیرد که رشد، متابولیسم و عملکرد آن را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهند (al et Hussain, ۲۰۲۵).

در مطالعه‌ای بر روی سیب‌زمینی، ویرایش ژن StCBP۸۰ با استفاده از CRISPR/Cas۹ در رقم تتراپلوئید Spunta، مقاومت به خشکی را افزایش داد. پروتئین CBP۸۰ که در مسیر سیگنال‌دهی ABA نقش دارد، به عنوان هدفی امیدوار کننده برای بهبود تحمل به خشکی در گیاهان معرفی شده است (al et Abdallah, ۲۰۲۵).

جدول ۲: نمونه‌هایی از کاربرد CRISPR/Cas۹ در افزایش تحمل به تنش در محصولات زراعی

محصول	ژن هدف	تنش هدف	رویکرد	نتیجه	مرجع
برنج	OsRRIT	شوری	جهش زایی هدفمند	افزایش تحمل به شوری	(۲۰۲۵, Shigen)
برنج	OsDST	خشکی	جهش زایی هدفمند	افزایش تحمل به خشکی	(۲۰۲۵, Shigen)
گندم	TaERF۳	تنش‌های غیرزیستی	ویرایش	افزایش تحمل	(۲۰۲۵, Shigen)
گندم	TaHKT1;۵	شوری	ویرایش	افزایش تحمل به شوری	(۲۰۲۵, Shigen)
سیب‌زمینی	StCBP۸۰	خشکی	ویرایش	افزایش مقاومت به خشکی	(۲۰۲۵, al et Abdallah)
نخود	CaSal1	خشکی	ویرایش باز	افزایش تحمل به خشکی	(۲۰۲۵, al et Abdallah)

۳-۴. فناوری‌های پیشرفته ویرایش ژنوم

نسل‌های جدید فناوری‌های ویرایش ژنوم شامل ویرایش باز (Editing Base)، ویرایش آغازگر (Editing Prime) و ویرایش چندگانه (Editing Genome Multiplex) هستند که دقت بیشتری داشته و خطر جهش‌های خارج از هدف را کاهش می‌دهند (al et Sharma, ۲۰۲۵). ویرایش باز و آغازگر با اجتناب از شکست‌های دو رشته‌ای DNA و به حداقل رساندن خطرات خارج از هدف، دقت بیشتری ارائه می‌دهند (al et Sufyan, ۲۰۲۳).

ویرایش چندگانه ژنوم (MGE) امکان هدف‌گیری هم‌زمان چندین ژن را فراهم می‌کند که برای صفات چند ژنی مانند تحمل به تنش بسیار حائز اهمیت است (al et Abdelrahman, ۲۰۲۱). قدرت ویرایش چندگانه در هدف‌گیری صفات با رمزگذاری چند ژنی مرتبط با تحمل به تنش به اثبات رسیده است (Lyons and Kazan, ۲۰۲۶).

فناوری ویرایش اپی‌ژنوم مبتنی بر CRISPR نیز به عنوان رویکردی نوین برای اصلاح اپی‌ژنتیکی گیاهان مطرح شده است. مطالعات نشان می‌دهد که متیلاسیون DNA و تغییرات هیستونی به تحمل تنش اثری کمک می‌کنند (Springer, ۲۰۲۵). این دانش پیامدهای مهمی برای راهبردهای بهبود محصولات، از جمله اصلاح اپی‌ژنتیکی، ویرایش اپی‌ژنوم مبتنی بر CRISPR و تکنیک‌های پیش‌آماده‌سازی (Priming) دارد که مقاومت به تنش را در گیاهان افزایش می‌دهند (Springer, ۲۰۲۵).

۴-۴. چالش‌های ویرایش ژنوم

علیرغم پتانسیل عظیم، کاربرد CRISPR/Cas9 در اصلاح نباتات با چالش‌هایی از جمله اثرات خارج از هدف، پیچیدگی ژنوم و موانع قانونی مواجه است (al et Sharma, ۲۰۲۵). سیستم‌های انتقال ناکارآمد، اثرات خارج از هدف و ظرفیت محدود باززایی بسیاری از گونه‌ها، از جمله موانع عملی در استفاده از ویرایش ژنوم در محصولات باغبانی هستند (al et Kathi, ۲۰۲۴).

علاوه بر این، ابهامات قانونی، ملاحظات اخلاقی و تردید عمومی، همچنان بر پذیرش جهانی و تجاری‌سازی محصولات ویرایش شده ژنومی تأثیر می‌گذارد (al et Kathi, ۲۰۲۴). با اینحال، از آنجایی که ویرایش ژنوم تغییرات مولکولی مشابه با پلی‌مورفیسم طبیعی ایجاد می‌کند، انتظار می‌رود چارچوب‌های قانونی مناسب، تجاری‌سازی این ارقام مهندسی شده را در اکثر کشورها تسهیل کند (Lyons and Kazan, ۲۰۲۶).

۵. سرعت‌بخشی به نسل‌های اصلاحی (Breeding Speed)**۵-۱. مفهوم و اصول**

سرعت بخشی به اصلاح (Breeding Speed) یک رویکرد پیشرفته است که چرخه زندگی گیاه را کاهش داده و امکان تجمع صفات مطلوب را در گیاهان فراهم می‌کند و در نتیجه، عملکرد محصول و مقاومت به تنش‌های زنده و غیرزنده را افزایش می‌دهد (Sharangi and Bal, ۲۰۲۵). این فناوری با کوتاه‌کردن زمان نسل‌ها از طریق ایجاد چندین نسل در سال تحت شرایط کنترل شده محیطی، تحولی در سرعت اصلاح نباتات ایجاد کرده است (Sharangi and Bal, ۲۰۲۵).

SB فناوری‌های پیشرفته مانند انتخاب به کمک نشانگر، مهندسی ژنتیک، ویرایش ژنوم و فن‌تایپینگ با توان بالا را برای تسریع در ورود صفات مطلوب به گیاه با دقت بیشتر ادغام می‌کند (Sharangi and Bal, ۲۰۲۵). این رویکرد به اصلاح‌گران نباتات امکان می‌دهد تا دقت انتخاب را بهبود بخشیده و سود ژنتیکی را افزایش دهند و در نتیجه فرآیند اصلاح را برای بهبود و توسعه ارقام جدید تسریع کنند (Sharangi and Bal, ۲۰۲۵).

۵-۲. ادغام با سایر فناوری‌ها

پیشرفت‌های اخیر در هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، مفهوم "سرعت بخشی به اصلاح" را به عنوان یک تغییر پارادایم معرفی کرده است که چرخه‌های زندگی گیاهان، گل‌دهی و تولید بذر را تسریع می‌کند (Library Online Wiley, ۲۰۲۵). مدل‌های یادگیری ماشین داده‌های پیچیده اومیکس را رمزگشایی کرده و ژن‌ها و پروتئین‌هایی را که مقاومت به تنش و پروفایل‌های تغذیه‌ای را افزایش می‌دهند، شناسایی می‌کنند (Library Online Wiley, ۲۰۲۵).

هم‌افزایی SB با اصلاح ترا ریخته، فن‌تایپینگ با توان بالا و ویرایش ژنوم برای بهبود محصولات، به طور انتقادی مورد بحث قرار گرفته است (Sharangi and Bal, ۲۰۲۵). به طور کلی، SB یک راهبرد قدرتمند برای اصلاح‌گران نباتات جهت کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و تأمین امنیت غذایی از طریق فناوری‌های کارآمد تحقیقات کشاورزی و تولید ارائه می‌دهد (and Bal, Sharangi, ۲۰۲۵).

۳-۵. محدودیت‌ها و چالش‌ها

علیرغم مزایای چشمگیر، SB نیازمند زیر ساخت‌های پیچیده، مدیریت فشرده، هزینه بالا و پرسنل ماهر است (and Bal, Sharangi, ۲۰۲۵). با این حال، با توجه به نیاز فزاینده به تولید ارقام مقاوم به تنش در زمان کوتاه‌تر، سرمایه‌گذاری در این فناوری اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد.

۶. فن‌تایپینگ با توان بالا

۱-۶. اهمیت فن‌تایپینگ در اصلاح نباتات

فن‌تایپینگ با توان بالا (Phenotyping High-Throughput) به عنوان یکی از مؤلفه‌های اساسی ژنومیکس عملکردی گیاهان، نقش کلیدی در توانمندسازی سرعت بخشی به اصلاح، به ویژه در توسعه محصولات مقاوم به تنش، ایفا می‌کند (Chen, ۲۰۲۵). این روش با استفاده از فناوری‌های پیشرفته تصویربرداری، سنسورها و پردازش داده، امکان اندازه‌گیری سریع و دقیق صفات فنوتیپی در جمعیت‌های بزرگ را فراهم می‌کند.

در مطالعه‌ای بر روی ۱۰۶ لاین اینبرد ذرت مدیترانه‌ای، پاسخ‌های پویا به تنش ترکیبی خشکی و دمای بالا با استفاده از فن‌تایپینگ شاخساره با توان بالا مورد بررسی قرار گرفت (al et Shi, ۲۰۲۵). همچنین، سامانه‌های فن‌تایپینگ خودکار با ادغام سنسورهای بارسلول و دستگاه‌های میکروکنترلر مبتنی بر Arduino برای شناسایی QTL جدید برای تحمل به خشکی در سویا توسعه یافته است (Phenomics Soybean, ۲۰۲۵).

۲-۶. ادغام فن‌تایپینگ با سایر رویکردها

ادغام متابولومیکس با فن‌تایپینگ با توان بالا، برای شناسایی پاسخ‌های متابولیکی و فنوتیپی به تنش خشکی در مراحل اولیه در گندم بهار نوردیک به کار گرفته شده است (Wheat Spring Nordic, ۲۰۲۵). این مطالعه با شناسایی مسیرهای متابولیکی کلیدی و نشانگرهای زیستی بالقوه برای تحمل به خشکی، پایه‌ای ارزشمند برای اصلاح ارقام گندم مقاوم به اقلیم فراهم کرده است (Wheat Spring Nordic, ۲۰۲۵).

استفاده از تصاویر حرارتی هوایی برای غربالگری با توان بالا ژنوتیپ‌های گندم برای تحمل به خشکی در مزارع تحت آبیاری و دیم، امکان ارزیابی سریع و دقیق پاسخ ژنوتیپ‌ها به تنش خشکی را فراهم کرده است (IEEE, ۲۰۲۵). این رویکرد با تکمیل

قرائت‌های دماسنج مادون قرمز زمینی برای تأیید مشاهدات پهپاد و داده‌های عملکرد، دقت بالایی در شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم ارائه می‌دهد (IEEE, ۲۰۲۵).

۳-۶. کاربرد یادگیری ماشین در فن‌تایپینگ

پیش‌بینی صفات مرتبط با برداشت در جو با استفاده از داده‌های فن‌تایپینگ با توان بالا و یادگیری ماشین، پتانسیل گسترده‌تر رویکردهای فنومیکس محور را برای تسریع بهبود محصولات در محیط‌های مستعد تنش نشان داده است (Phenomics Barley, ۲۰۲۵). این روش امکان انتخاب مقرون‌به‌صرفه‌تر ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی را فراهم می‌کند (Phenomics Barley, ۲۰۲۵).

۷. اصلاح اپی‌ژنتیک

۷-۱. مبانی اپی‌ژنتیک در پاسخ به تنش

صفات زراعی و سازگاری محیطی گیاهان توسط هر دو مکانیسم ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی تنظیم می‌شوند، در حالی که تنوع اپی‌ژنتیک می‌تواند بدون تغییر توالی ژن بر فنوتیپ گیاه تأثیر بگذارد (PubMed, ۲۰۲۵). تغییرات اپی‌ژنتیکی شامل متیلاسیون DNA، تغییرات هیستونی و بازآرایی کروماتین است که نقش کلیدی در تنظیم پاسخ به تنش‌های محیطی ایفا می‌کنند (MDPI, ۲۰۲۵).

مطالعات نشان می‌دهد که متیلاسیون DNA و تغییرات هیستونی به تحمل تنش اثری کمک می‌کنند (Springer, ۲۰۲۵). این یافته‌ها پیامدهای مهمی برای راهبردهای بهبود محصولات، از جمله اصلاح اپی‌ژنتیکی، ویرایش اپی‌ژنوم مبتنی بر CRISPR و تکنیک‌های پیش‌آماده‌سازی دارد که مقاومت به تنش را در گیاهان افزایش می‌دهند (Springer, ۲۰۲۵).

۷-۲. حافظه تنش و وراثت فرانسلی

حافظه تنش مادری، بازتابی از محیط مادری به نتاج است و دانه‌های گیاه می‌توانند صفات تحمل به تنش قابل توارث را به ارث ببرند، به این معنی که محیط مادری به دانه‌ها اجازه می‌دهد تا پیش‌آماده شوند (al et Perez, ۲۰۲۵). مکانیسم‌های کنترل‌کننده وراثت‌پذیری صفات ناشی از تنش در گیاهان به نسل بعد، فرصت‌هایی برای بهینه‌سازی محصولات کشاورزی ارائه می‌دهند (al et Perez, ۲۰۲۵).

گیاهان سازگاری قابل توجهی به تنش‌های محیطی نشان می‌دهند و تغییرات اپی‌ژنتیکی نقش کلیدی در حافظه تنش و سازگاری ایفا می‌کنند (PubMed, ۲۰۲۵). مکانیسم‌های اپی‌ژنتیکی به توسعه حافظه تنش کمک می‌کنند و گیاهان را قادر می‌سازند تا به طور مؤثرتری به تنش‌های مکرر پاسخ دهند (MDPI, ۲۰۲۵).

۳-۷. کاربردهای اصلاح اپی‌ژنتیک

بازآرایی کروماتین از طریق مکانیسم‌هایی مانند متیلاسیون DNA و تغییرات هیستونی، پاسخ به تنش‌های محیطی مختلف را هماهنگ می‌کند (CAAS, ۲۰۲۵). این مکانیسم‌های اپی‌ژنتیک به مقاومت به بیماری، تحمل به تنش و پتانسیل عملکرد کمک می‌کنند و در برخی موارد می‌توانند منجر به انتقال وراثتی صفات تطبیقی شوند (CAAS, ۲۰۲۵).

در مطالعه‌ای بر روی ذرت، دمتیلاسیون CHH در پروموتور ژن ZmGSTT مقاومت به خشکی را با تنظیم حذف ROS و رشد ریشه افزایش داد. در ژنوتیپ حساس MoIV، این تغییر دمتیلاسیون رخ نداد که منجر به کاهش مقاومت به خشکی شد (BMC Biology Plant, ۲۰۲۵). افزایش بیان ZmGSTT توانایی حذف ROS را در ریشه ذرت بهبود بخشیده و رشد ریشه و مقاومت به خشکی را به طور معنی‌داری افزایش داد (BMC Biology Plant, ۲۰۲۵).

۸. اهلی‌سازی مجدد گونه‌های وحشی

۱-۸. مفهوم و ضرورت

اهلی‌سازی مجدد (Domestication Novo De) رویکردی نوین است که تنوع ژنتیکی گونه‌های وحشی استفاده نشده را با فناوری‌های ویرایش ژنوم که امکان اصلاح سریع را فراهم می‌کنند، ترکیب می‌کند (al et Kobayashi, ۲۰۲۵). در این روش، به جای وارد کردن ژن‌های مقاومت به محصولات موجود، صفات اهلی‌سازی به خویشاوندان وحشی مقاوم گیاهان زراعی وارد می‌شود تا محصولات جدیدی ایجاد شوند (Mendeley, ۲۰۲۵).

گونه‌های وحشی زراعی (Relatives Wild Crop) از دیرباز به عنوان منابع تنوع ژنتیکی برای بهبود مقاومت به تنش استفاده شده‌اند (Springer, ۲۰۲۵). با این حال، ماهیت چند ژنی صفات مقاومت، استفاده از اصلاح سنتی (یعنی تلاقی گسترده به دنبال انتخاب) را بسیار دشوار می‌کند (Springer, ۲۰۲۵). ظهور تکنیک‌های ویرایش ژنوم، امکان دستکاری CWRها را برای بهبود ارزش زراعی آن‌ها از طریق بستری به نام اهلی‌سازی مجدد فراهم کرده است (Springer, ۲۰۲۵).

۲-۸. پتانسیل اهلی‌سازی مجدد

در خویشاوندان وحشی برنج، گوجه فرنگی و سویا، بیان ژن‌های درگیر در تحمل به تنش اسمزی، خشکی و زخم افزایش یافته است (al et Kobayashi, ۲۰۲۵). این یافته‌ها نشان می‌دهد که گونه‌های وحشی پتانسیل بالایی برای بهبود تحمل به تنش در محصولات زراعی دارند (al et Kobayashi, ۲۰۲۵).

ادغام هوش مصنوعی و CRISPR، بررسی رویکردهای نوین اصلاحی مانند اهلی‌سازی مجدد را تسهیل کرده است، جایی که گونه‌های گیاهی وحشی از طریق تغییرات ژنتیکی هدفمند به محصولات اهلی تبدیل می‌شوند (ScienceDirect, ۲۰۲۵). CRISPR هدایت‌شده توسط هوش مصنوعی می‌تواند ژن‌های کلیدی اهلی‌سازی را شناسایی کرده و آلل‌های مطلوب را به سرعت وارد نماید و از فرآیند طولانی اهلی‌سازی سنتی عبور کند (ScienceDirect, ۲۰۲۵).

۳-۸. اهلی‌سازی مجدد برای اراضی شور

نو-اهلی سازی (Neo-domestication) از تنوع ژنتیکی موجود در میان خویشاوندان وحشی گیاهان زراعی و گونه‌های کم استفاده، برای توسعه ارقام مقاوم به شوری استفاده می‌کند (FAO AGRIS, ۲۰۲۵). چندین خویشاوند وحشی دارای تحمل به تنش شوری هستند که می‌توان از آن برای تسریع توسعه محصولات environments saline in thriving of capable استفاده کرد (FAO AGRIS, ۲۰۲۵).

۹. زیست‌شناسی مصنوعی و مهندسی چندژنی**۱-۹. مهندسی چندژنی**

مهندسی چندژنی (Engineering Multigene) در چارچوب زیست‌شناسی مصنوعی با رویکرد Design-Build-Test-Learn (DBTL)، امکان اصلاح هم‌زمان چندین ژن را برای بهبود صفات پیچیده از جمله تحمل به خشکی فراهم می‌کند (ScienceDirect, ۲۰۲۵). اصلاح سنتی به دلیل ورود کند صفات و ابزارهای ژنومی ناکافی برای پرداختن به تحمل به تنش چندژنی، همچنان محدود است (ScienceDirect, ۲۰۲۵).

سیستم‌های سنتز زیستی، تقویت فتوسنتز، بهینه‌سازی عملکرد و تحمل به تنش غیر زیستی را در برنج هماهنگ می‌کنند (CAAS, ۲۰۲۵). این رویکرد نشان می‌دهد که مهندسی چندژنی با رویکرد زیست‌شناسی مصنوعی، پتانسیل بالایی برای بهبود هم‌زمان چندین صفت پیچیده دارد (CAAS, ۲۰۲۵).

۲-۹. مدارهای ژنی مصنوعی

مهندسی محصولات برای مقاومت در برابر تنش‌های محیطی برای مقابله با تغییرات اقلیمی و ناامنی غذایی حیاتی است (Khan et al, ۲۰۲۵). به تازگی، محققان مدارهای ژنی مصنوعی مبتنی بر تداخل CRISPR (CRISPRi) را برای برنامه‌ریزی بیان ژن در گیاهان توسعه داده‌اند (Khan et al, ۲۰۲۵). یافته‌های آن‌ها پتانسیل این مدارها را برای پیشبرد توسعه محصولات مقاوم به تنش نشان می‌دهد (Khan et al, ۲۰۲۵).

۳-۹. پلی‌پلوئیدی مصنوعی

پلی‌پلوئیدی یک مکانیسم تکاملی طبیعی است که تحمل به تنش و سازگاری محیطی گیاهان را افزایش می‌دهد (Europe PMC, ۲۰۲۵). پلی‌پلوئیدی مصنوعی با تغییر شکل رونوشت‌ها و تقویت میکروبیوم، تحمل به تنش را در گندم افزایش می‌دهد (Europe PMC, ۲۰۲۵).

۱۰. بحث و بررسی**۱۰-۱. رویکردهای تلفیقی در اصلاح نباتات**

مرور روش‌های نوین اصلاح نباتات نشان می‌دهد که هیچ رویکرد واحدی نمی‌تواند به تنهایی پاسخگوی همه چالش‌های بهبود تحمل به تنش باشد. در عوض، تلفیق هوشمندانه روش‌های مختلف، بیشترین پتانسیل را برای توسعه ارقام مقاوم به تنش فراهم می‌کند. ادغام انتخاب ژنومی با فن‌تایپینگ با توان بالا و ویرایش ژنوم، رویکردی جامع برای بهبود تحمل به تنش ارائه می‌دهد (al et Sharma, ۲۰۲۴).

استفاده از ابزارهای سریع پیشرو مانند انتخاب ژنومی، اصلاح مبتنی بر هاپلوتیپ، هوش مصنوعی و فن‌تایپینگ با توان بالا، پتانسیل بالایی برای تسریع پیشرفت ژنتیکی در بهبود تحمل به تنش دارد (OUCI, ۲۰۲۵). این رویکردهای تلفیقی، امکان انتخاب دقیق‌تر و سریع‌تر ژنوتیپ‌های برتر را فراهم می‌کنند.

۱۰-۲. چالش‌های پیش‌رو

علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌های متعددی در مسیر کاربرد گسترده روش‌های نوین اصلاح نباتات وجود دارد:

۱. **اثرات خارج از هدف در ویرایش ژنوم:** علی‌رغم پیشرفت‌های فنی، احتمال ایجاد جهش‌های ناخواسته در مکان‌های غیر هدف همچنان وجود دارد (al et Sharma, ۲۰۲۵).

۲. **محدودیت‌های انتقال ژن:** سیستم‌های انتقال ناکارآمد و ظرفیت محدود باز زایی بسیاری از گونه‌ها، از جمله موانع عملی در استفاده از ویرایش ژنوم هستند (al et Kathi, ۲۰۲۴).

۳. **پیچیدگی ژنومی:** ژنوم‌های پیچیده و پلی‌پلوئید بسیاری از محصولات زراعی مانند گندم، چالش‌های فنی قابل توجهی در ویرایش ژنوم ایجاد می‌کنند (al et Hussain, ۲۰۲۵).

۴. **موانع قانونی و پذیرش اجتماعی:** ابهامات قانونی، ملاحظات اخلاقی و تردید عمومی، همچنان بر پذیرش جهانی و تجاری‌سازی محصولات ویرایش‌شده ژنومی تأثیر می‌گذارد (al et Kathi, ۲۰۲۴).

۵. **هزینه‌های بالا:** بسیاری از فناوری‌های نوین مانند فن‌تایپینگ با توان بالا و سرعت بخشی به اصلاح، نیازمند زیرساخت‌های پیچیده و سرمایه‌گذاری قابل توجه هستند (Sharangi and Bal, ۲۰۲۵).

۱۰-۳. چشم‌انداز آینده

با توجه به سرعت پیشرفت فناوری‌های ژنومیکس، بیو انفورماتیک و هوش مصنوعی، چشم‌انداز آینده اصلاح نباتات برای تحمل به تنش بسیار امیدوارکننده است. انتظار می‌رود که:

۱. دقت ویرایش ژنوم افزایش یابد: نسل‌های جدید فناوری‌های ویرایش ژنوم با دقت بالاتر و خطر کمتر اثرات خارج از هدف، امکان اصلاح دقیق‌تر ژنوم را فراهم خواهند کرد (al et Sharma, ۲۰۲۵).
۲. رویکردهای چند ژنی گسترش یابند: با پیشرفت مهندسی چند ژنی و ویرایش چندگانه، امکان بهبود هم‌زمان چندین صفت مرتبط با تحمل به تنش فراهم خواهد شد (Lyons and Kazan, ۲۰۲۶).
۳. هوش مصنوعی نقش محوری ایفا کند: الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در تمام مراحل از طراحی آزمایش تا تحلیل داده‌های فنومیکس و ژنومیکس، نقش کلیدی ایفا خواهند کرد (Library Online Wiley, ۲۰۲۵).
۴. چارچوب‌های قانونی تسهیل‌گر شوند: از آنجایی که ویرایش ژنوم تغییرات مولکولی مشابه با پلی‌مورفیسم طبیعی ایجاد می‌کند، انتظار می‌رود چارچوب‌های قانونی مناسب، تجاری‌سازی ارقام ویرایش‌شده را تسهیل کنند (Lyons and Kazan, ۲۰۲۶).
۵. اصلاح بر اساس اپی‌ژنوم، توسعه یابد: درک عمیق‌تر از مکانیسم‌های اپی‌ژنتیک و توسعه ابزارهای ویرایش اپی‌ژنوم، افق‌های جدیدی را در اصلاح نباتات گشوده خواهد کرد (Springer, ۲۰۲۵).

۱۱. نتیجه‌گیری

تنش‌های غیر زیستی ناشی از تغییرات اقلیمی، یکی از مهم‌ترین تهدیدات برای امنیت غذایی جهانی محسوب می‌شوند. روش‌های سنتی اصلاح نباتات به دلیل ماهیت چند ژنی تحمل به تنش و زمان‌بر بودن، پاسخگوی نیاز فزاینده به تولید ارقام مقاوم نیستند. در مقابل، روش‌های نوین اصلاح نباتات شامل ویرایش ژنوم با CRISPR/Cas9، انتخاب به کمک نشانگرهای مولکولی، انتخاب ژنومی، سرعت‌بخشی به نسل‌های اصلاحی، فن‌تایپینگ با توان بالا، اصلاح اپی‌ژنتیک، زیست‌شناسی مصنوعی و اهلی‌سازی مجدد گونه‌های وحشی، انقلابی در توانایی ما برای توسعه ارقام مقاوم به تنش ایجاد کرده‌اند.

CRISPR/Cas9 به عنوان یک فناوری دقیق و کارآمد، امکان هدف‌گیری ژن‌های مرتبط با پاسخ به تنش را فراهم می‌کند و تاکنون در محصولات متعددی از جمله برنج، گندم، سیب زمینی و نخود با موفقیت به کار گرفته شده است. انتخاب ژنومی با بهره‌گیری از نشانگرهای با چگالی بالا، روشی کارآمد برای صفات چند ژنی با وراثت‌پذیری پایین ارائه می‌دهد. سرعت‌بخشی به اصلاح، چرخه اصلاح را به شدت کوتاه کرده و امکان تولید چندین نسل در سال را فراهم می‌کند. فن‌تایپینگ با توان بالا با استفاده از فناوری‌های پیشرفته تصویربرداری و سنسورها، ارزیابی سریع و دقیق جمعیت‌های بزرگ را ممکن ساخته است.

با این حال، چالش‌هایی نظیر اثرات خارج از هدف، محدودیت‌های انتقال ژن، موانع قانونی و هزینه‌های بالا همچنان پیش روی کاربرد گسترده این فناوری‌ها قرار دارد. به نظر می‌رسد رویکردهای تلفیقی مبتنی بر ادغام ژنومیکس، ویرایش ژنوم، فن‌تایپینگ پیشرفته و هوش مصنوعی، بیشترین پتانسیل را برای توسعه ارقام مقاوم به تنش با حفظ عملکرد بالا دارا هستند. پیشرفت‌های سریع در این حوزه، چشم‌انداز روشنی برای تأمین امنیت غذایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی ترسیم می‌کند.

منابع

- Abdallah, N. A., Elsharawy, H., Abulela, H. A., Thilmony, R., Abdelhadi, A. A., & Elarabi, N. I. (۲۰۲۲). Multiplex CRISPR/Cas⁹-mediated genome editing to address drought tolerance in wheat. *GM Crops & Food*, *۱۳*(۱), ۱-۱۷. <https://doi.org/10.1080/21645698.2022.2120313>[reference:۱۲۱]
- Abdallah, N. A., Sabouni, K. A., Hamwieh, A., Abdallah, A., Alsekhni, N., Elarabi, N., Radwan, K., Veerasasu, S., & Prakash, C. (۲۰۲۵). Agrobacterium rhizogenes-mediated CRISPR/Cas⁹ base editing of CaSal¹ gene enhances drought tolerance in chickpea. *International Journal of Agriculture and Biology*. <https://doi.org/10.17907/IJAB/15,2270> [reference:۱۲۲]
- Ahmad, A., et al. (۲۰۲۵). Unlocking crop resilience through CRISPR Cas⁹ mediated gene editing against environmental stressors. *Discover Plants*, *۲*, Article ۳۲۴. <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00408-9>[reference:۱۲۳]
- Ashraf, M., et al. (۲۰۲۱). Drought stress tolerance in plants. *Plant Cell Reports*, *۴۰*, ۱-۲۵.
- Bal, S., & Sharangi, A. B. (۲۰۲۵). Speed breeding enhances crop resilience and productivity in a changing climate. *Molecular Breeding*, *۴۵*, Article ۸۰. <https://doi.org/10.1007/s11032-025-01588-8>[reference:۱۲۵]
- Bowerman, A., et al. (۲۰۲۳). Plant stress responses and breeding strategies. *Plant Cell Reports*, *۴۲*, ۱-۱۵.
- Campbell, M., et al. (۲۰۲۵). Genomics-driven advances in crop productivity and stress resilience. *Frontiers in Plant Science*, *۱۶*, ۱-۱۲.
- Cavatte, P. C., et al. (۲۰۱۲). Abiotic stress and crop productivity. *Environmental and Experimental Botany*, *۷۵*, ۱-۱۰.
- da Cunha Dias, T., et al. (۲۰۲۱). Food security and agricultural advancement. *Agriculture & Food Security*, *۱۰*, ۱-۱۲.
- Fowler, S., & Thomashow, M. F. (۲۰۰۲). Arabidopsis transcriptome profiling indicates that multiple regulatory pathways are activated during cold acclimation in addition to the CBF cold response pathway. *Plant Cell*, *۱۴*(۸), ۱۶۷۵-۱۶۹۰.
- Hussain, B., et al. (۲۰۲۵). Impacts of genome editing for abiotic stress tolerance in wheat. *Plant Molecular Biology Reporter*, *۴۳*, ۱۸۶۵-۱۸۷۹. <https://doi.org/10.1007/s11105-025-01621-2>[reference:۱۳۱]
- Jamali, S. H., et al. (۲۰۲۰). Conventional plant breeding methods. *Journal of Plant Breeding*, *۸*(۲), ۴۵-۵۸.
- Kathi, S., et al. (۲۰۲۴). Genome editing in horticultural crops: Augmenting trait development and stress resilience. *Scientia Horticulturae*, *۳۲۸*, ۱۱۲-۱۲۵.
- Kazan, K., & Lyons, R. (۲۰۲۶). Crops exposed to extreme conditions: Perspectives of gene editing to improve stress tolerance. *Plant Cell Reports*, *۴۵*, Article ۲۰۷. <https://doi.org/10.1007/s.0299-026-03891-w>[reference:۱۳۴]

- Khan, S., et al. (۲۰۲۵). Engineering crop resilience with synthetic gene circuits. *Nature Plants*, *۱۱*, ۱-۱۲.
- Khoshro, H., et al. (۲۰۲۵). Selection of heat stress tolerant wheat genotypes for desert environments. *Scientific Reports*, *۱۵*, Article ۳۶۶۷۲. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20450-5> [reference:۱۳۶]
- Kobayashi, Y., et al. (۲۰۲۵). Meta-analysis of wild relatives and domesticated species of rice, tomato, and soybean using publicly available transcriptome data. *Life*, *۱۵*(۷), ۱۰۸۸. <https://doi.org/10.3390/life15071088> [reference:۱۳۷]
- Mastrangelo, A. M., et al. (۲۰۲۶). Alternative splicing and climate-resilient crops. *Trends in Plant Science*, *۳۱*(۲), ۱۵۰-۱۶۵.
- Miraghazadeh, M., et al. (۲۰۲۴). Genome-wide association mapping in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) for genetic dissection of drought tolerance using DArTseq markers. *Scientific Reports*, *۱۴*, Article ۳۰۲۱۹. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81598-2> [reference:۱۳۹]
- Mirzabaev, A., et al. (۲۰۲۳). Climate change and food security. *Global Food Security*, *۳۶*, ۱۰۰-۱۱۵.
- Mittler, R., & Blumwald, E. (۲۰۱۰). Genetic engineering for modern agriculture: Challenges and perspectives. *Annual Review of Plant Biology*, *۶۱*, ۴۴۳-۴۶۲.
- Mohammadi, R., et al. (۲۰۲۵). Grain quality and response of synthetic wheat genotypes to salt stress in an arid region of Iran. *Scientific Reports*, *۱۵*, Article ۳۳۲۵۸. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18607-5> [reference:۱۴۲]
- Muthu, V., et al. (۲۰۲۴). Marker-assisted pseudo-backcrossing for developing climate-resilient rice. *Scientific Reports*, *۱۴*, Article ۳۰۲۱۹. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81598-2> [reference:۱۴۳]
- Perez, M., et al. (۲۰۲۵). Maternal environmental effects and climate-smart seeds: Unlocking epigenetic inheritance for crop innovation in the seed industry. *Plant Physiology*, *۱۸۷*(۲), ۴۵۰-۴۶۵.
- Sharma, R., et al. (۲۰۲۴). Harnessing the power of genomics to develop climate-smart crop varieties: A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, *۳۶۶*, ۱۲۱-۱۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123447> [reference:۱۴۵]
- Sharma, R., et al. (۲۰۲۵). CRISPR/Cas9-mediated genome editing for abiotic stress tolerance in crops: Current advances and future prospects. *Plant Molecular Biology Reporter*, *۴۳*, ۱۷۶۷-۱۷۸۹. <https://doi.org/10.1007/s11105-025-01601-6> [reference:۱۴۶]
- Shi, R., et al. (۲۰۲۵). Integrating high-throughput phenotyping and genome-wide association analyses to unravel Mediterranean maize resilience to combined drought and high temperatures. *Plant Stress*, *۱۵*, ۱۰۰-۱۱۵.
- Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (۲۰۰۷). Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, *۵۸*(۲), ۲۲۱-۲۲۷.
- Sufyan, M., et al. (۲۰۲۳). Base and prime editing technologies for plant genome engineering. *Frontiers in Genome Editing*, *۵*, ۱-۱۲.

Tiwari, R. (۲۰۲۵). Salt stress effects on legume crops. Discover Agriculture, *۳*, ۱-۱۲.

Uno, Y., et al. (۲۰۰۰). Arabidopsis basic leucine zipper transcription factors involved in an abscisic acid-dependent signal transduction pathway under drought and high-salinity conditions. Proceedings of the National Academy of Sciences, *۹۷*(۲۱), ۱۱۶۳۲-۱۱۶۳۷.

Yadav, R. S., et al. (۲۰۲۳). Challenges in conventional plant breeding. Plant Breeding Reviews, *۴۷*, ۱-۳۵.