فصلنامه علمی علوم حیاتی و عرصه های نوپدید، سال اول، شماره اول، تابستان ۱۴۰۲

نقش فناوری‌های نوظهور در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاهان زراعی

حجت اله لطیف منش*[۱]، حمید اله دادی[۲]، سمیه سلیمانی[۳]، اسد معصومی اصل[۴]، علی مرادی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۰۵/۲۸

چکیده:

قرارگیری ایران در کمربند بیابانی زمین، تأثیر معضل گرمایش جهانی و کمبود محتوای رطوبتی سامانه‌های بارش‌زا، بر اهمیت بهره‌وری مطلوب از آب برای گیاهان زراعی افزوده است؛ این وضعیت لزوم توجه بیشتر پژوهشگران به راهبردهای نوین در علوم کشاورزی را دوچندان کرده است. هدف تحقیق پیش‌رو، بررسی تأثیر فناوری‌های نوظهور از منظری تازه و دیدگاهی نوین برای مواجهه با مسئله کم‌آبی و تنش خشکی در جهت خودکفایی ملی است. قدم اولیه برای شناخت راهبردهای بنیادی تعیین سازوکارهای گیاه در مقابله با تنش خشکی شامل واکنش‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، سلولی و مولکولی در مسیر کاربرد فناوری‌های نوین، قدم اولیه برای شناخت راهبردهای بنیادی است. شناخت مرحله رشدی حساس به تنش نیز در زمان کاربرد و نوع فناوری اعمال شده اهمیت بسزایی دارد. پیشرفت‌های حاصل از فناوری در زمینه بهنژادی از طریق استفاده از هوش مصنوعی و همچنین دیدگاه‌های مولکولی و ژنومیک با تأکید ویژه بر تغییر فناوری اومیکس یعنی رویکردهای متابولومیکس، پروتئومیکس، ژنومیکس، ترانسکریپتومیکس و فنومیکس موجب بهبود تحمل تنش در گیاهان می‌شوند. علاوه بر این هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء، پرایمینگ بذر، استفاده از محافظت‌کننده‌های اسمزی، ریز جانداران، بیوچار، هیدروژل، کاربرد نانو ذرات و تکنیک‌های مهندسی متابولیک نیز از مواردی هستند که برای کاهش اثرات تنش خشکی مورداستفاده قرار می‌گیرند.

کلیدواژه‌ها: تنش خشکی، فناوری‌های نوین، گیاهان زراعی، مهندسی ژنتیک

[۱] استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج * h.latifmanesh@yu.ac.ir

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج

[۳] دکتری مخابرات و سیستم‌های ارتباطی، مدرس مدارس فنی و حرفه‌ای شهرستان بویر احمد

[۴] دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج

[۵] دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی دانشگاه یاسوج

مقدمه

باید این واقعیت را پذیرفت که افزایش دما در پی گرمایش جهانی و فعالیت‌های بشری، مسئله‌ای مهم و غیرقابل‌انکار است. این موضوع یکی از مهم‌ترین چالش‌های اساسی در جامعه علمی جهانی است. کشاورزی نیز ارتباط تنگاتنگی با شرایط آب‌وهوایی و محیطی دارد. بنابراین اگر تلاشی در جهت سازگاری و کاهش موانع پیش‌روی نظام‌های کشاورزی نشود، بهره‌برداری مطلوب از فرآورده‌های زراعی امکان‌پذیر نخواهد بود. ازجمله بنیادی‌ترین محدودیت‌های زیست‌محیطی که کشاورزی مدرن با آن مواجه شده، وجود تنش‌های غیرزنده‌ای مانند خشکی، شوری، دماهای شدید، آلاینده‌های شیمیایی، کمبود تغذیه‌ای و تنش اکسیداتیو است. مجموعه این عوامل، رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و بر فرآیندهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی گیاهان نیز تأثیر می‌گذارند (Zhang *et al.*, 2021). واکنش گیاه به این تنش‌های غیرزنده یکی از موضوعات موردعلاقه محققان در سراسر جهان بوده است. پژوهشگران ابتدا تحقیقات خود را در گیاهان مدل (مانند آرابیدوپسیس) و سپس در محصولات زراعی و اقتصادی چون ذرت، برنج، سویا، قهوه و غیره آغاز کردند. بااین‌وجود، بررسی‌های زراعی در جهت رهاسازی ارقام و فرآیند بهبود ژنتیکی کلاسیک، تمرکز بیشتری بر بهره‌وری دارد و از دیدگاه تاریخی مسئله تحمل به تنش‌های غیرزنده را در پس‌زمینه باقی می‌گذارد. با درنظرگرفتن جایگاه تأثیرگذاری تنش‌های غیرزنده در کشاورزی، راهبردهای نوین در برنامه‌های اصلاحی برای درک پاسخ‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی به اختلالات محیطی در گیاهان زراعی بررسی شده است. برای مثال با توجه به نیاز روزافزون به درک ژن‌های موجود در مسیرهای تنظیمی مهمی که می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی وارد شوند، به اقداماتی باهدف بهبود و کمک به گیاه در زمان تنش‌های غیر زیستی مختلف مواجه هستیم. علاوه بر این استفاده از تکنیک‌هایی مانند کشاورزی بدون خاک، کاربرد نانو ذرات و همچنین سوپر جاذب‌ها، استفاده از بیوچار، ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، پرایمینگ بذر، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی و مواد محافظ اسمزی و ... در راستای کاهش تنش خشکی در کشاورزی نوین مورداستفاده قرار می‌گیرند. بااینکه در مقالات مختلف به‌صورت مجزا و موضوعی تأثیر استفاده از فناوری‌های نوظهور بر شرایط گیاه و کاهش تنش خشکی بررسی شده است، اما تاکنون راهبردها و راهکارهای استفاده از فناوری‌های نوظهور که در کشاورزی نوین باهدف کاهش اثرات تنش خشکی در تولیدات کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد به‌صورت متمرکز بررسی نشده است. لذا در

این مقاله در تلاش هستیم تا فناوری‌های نوظهوری که تاکنون در راستای کاهش اثرات تنش خشکی بر گیاهان زراعی بررسی‌شده‌اند را مطرح نماییم.

۱. مبانی نظری

سازوکار واکنش گیاهان به تنش‌های غیر زنده: گیاهان غالباً در موقعیتی قرار می‌گیرند که به‌صورت ناگزیر با تنش‌های غیرزنده مواجه می‌شوند. در این میان گیاهان سازگار قادر خواهند بود سازوکار پاسخ را در جهت دفاع از خود ایجاد کنند تا با این تنش‌ها مقابله کنند و به حالت سوخت‌وساز طبیعی بازگردند. پاسخ گیاهان به محرک‌های ناشی از تنش، با ایجاد تغییراتی در رشد و فیزیولوژی نشان داده می‌شود. دراین‌رابطه واکنش‌های زیادی مانند فتوسنتز و تبادل گاز (Menezes-Silva *et al*., 2017; Bryant *et al*., 2021)، مرگ سلولی و تغییرات در ترکیب دیواره سلولی (Tenhaken, 2014)، جابه‌جایی مواد مغذی (Demidchik, 2015)، فعالیت رونویسی ژن‌ها، عناصر قابل‌انتقال (Makarevitch *et al*., 2015)، پیام‌رسانی لیپیدی (Hou *et al*., 2016). متابولیت‌ها، پروتئین‌ها (Nakabayashi and Saito, 2015) و فعالیت آنتی‌اکسیدانی (Choudhury *et al*., 2017) را می‌توان نام برد که در طول دوره تنش دچار تغییر می‌شوند. سازوکار واکنش فیزیولوژیکی گیاهان به تنش‌های غیرزنده از طریق مسیر پیچیده‌ای از پاسخ‌ها اتفاق می‌افتد که در ابتدا به‌واسطه درک تنش آغاز می‌شود، سپس مجموعه‌ای از رویدادهای مولکولی را به دنبال دارد و درنهایت به سطوح مختلف پاسخ‌های فیزیولوژیکی، متابولیکی و تکاملی ختم می‌شود (Bhargava and Sawant, 2013).

کمبود آب در گیاهان: باتوجه‌به پدیده تغییر اقلیم و نیز افزایش جمعیت انسانی، اطمینان از در دسترس بودن آب، موضوعی بنیادی برای کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین گروه مصرف‌کننده آب در جهان است (FAO, 2020). کشاورزی آبی، حدود ۲۰ درصد از زمین‌های زراعی را شامل می‌شود درحالی‌که حدود ۴۰ درصد از غذای تولیدشده در سطح جهان را به خود اختصاص داده است. میزان تولید کشاورزی آبی در هر واحد زمین به‌طور متوسط، حداقل دو برابر کشاورزی دیم است (FAO, ۲۰۲۰). معمولاً بین ۵۰ تا ۹۰ درصد وزن تازه گیاهان از آب تشکیل‌شده است و از این مقدار ۶۰ تا ۹۰ درصد داخل سلول‌ها و بقیه در دیواره سلولی و فضای بین سلولی است (Gimenez *et al*., ۲۰۰۵). بنابراین حفظ رشد و بهره‌وری محصول تحت شرایط نامطلوب محیطی مانند کمبود آب، از چالش‌های اصلی کشاورزی نوین است (Kabbadj *et al*., 2017). کمبود آب هنگامی اتفاق

می‌افتد که نیاز آبی گیاه به‌طور کامل تأمین نشود، به صورتی که عملکرد گیاه را به‌واسطه عواملی مانند رشد، سرعت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای تحت تأثیر قرار دهد. در تعریفی دیگر، کمبود آب زمانی رخ می‌دهد که میزان تعرق از سطح برگ بیشتر از جذب آب توسط ریشه باشد. این عدم تعادل بین جذب آب و از دست دادن آب به پتانسیل آب کمتر خاک نسبت به ریشه مربوط می‌شود (Salehi-Lisar *et al*., 2012). عوامل مختلفی مانند کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، بارش ناکافی، تبخیر زیاد و احتباس آب توسط ذرات خاک، باعث کمبود آب گیاه می‌شوند (Salehi-Lisar and Bakhshayeshan-Agdam, 2016). دوره آب‌وهوایی غیرعادی که منجر به کمبود محتوای رطوبتی گیاه می‌شود، تحت عنوان "خشکی" تعریف می‌شود؛ تنشی غیرزنده که بر عملکرد و تولید محصول تأثیر منفی دارد (Bray, 2007). تأثیر تنش خشکی در کشاورزی به جهت کمبود منابع آبی، افزایش تقاضای غذا و تغییرات آب‌وهوایی تشدید می‌شود (O'Connell, 2017) و به علت اینکه تبدیل به یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده بهره‌وری محصول و درنتیجه تهدیدی برای امنیت غذایی شده است، فشار را بر فرهنگ کشاورزی برای استفاده کارآمدتر از آب افزایش می‌دهد. بنابراین توسعه گیاهان مقاوم به خشکی، کاهش میزان مصرف آب کشاورزی و افزایش کارایی مصرف آب (WUE[1]) برای بهبود محصولات مهم هستند.

شکل ۱: اثرات تنش خشکی بر تغییرات ایجادشده در گیاه (Seleiman *et al*., 2021).

[1] Water Use Efficiency

راهکارهای مقابله با کمبود آب: کمبود آب می‌تواند تأثیر منفی بر رشد و نمو گیاه داشته باشد و عملکرد آن را به خطر بیندازد. گیاهان راهبردهای سازگاری و تطابق متعددی را در سطوح مختلف، از مورفولوژی و ساختارهای تشریحی گرفته تا واکنش‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، باهدف حفظ وضعیت آبی خود تکامل داده‌اند (Kapoor *et al.*, 2020). گسترش پاسخ گیاه به طول و شدت کمبود آب، گونه، سن و مرحله رشد آن بستگی دارد. صرف‌نظر از ماهیت موقت تنش، مجموعه خواص و عملکردهای حیاتی گیاه به‌تدریج با توجه به مدت آن کاهش می‌یابد (Larcher, 2005). کمبود آب متوسط باعث تغییرات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی قابل‌توجهی می‌شود، درحالی‌که کمبود شدید ممکن است منجر به مرگ گیاه شود (Zingaretti *et al.*, 2012). مقاومت به خشکی به توانایی گیاهان برای زنده‌ماندن یا رشد در یک محیط سخت ناشی از شرایط تنش خشکی اشاره دارد. این قابلیت یک ویژگی پیچیده مربوط به سازگاری در سطوح مختلف است که به گیاهان اجازه می‌دهد تا با زیستگاه‌های خاص به نفع رشد و توسعه خودسازگار شوند (Larcher, 2005). سازوکار مقاومت به خشکی در گیاهان را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد: اجتناب، تحمل، فرار و بازیابی (Fang and Xiong, 2015). اجتناب از خشکی با حفظ پتانسیل آبی گیاه در حضور محدودیت آب مشخص می‌شود. اجتناب از خشکی مسئول بازآرایی در مورفولوژی گیاه و همچنین در متابولیسم سلولی است به‌عنوان‌مثال می‌توان به توسعه سیستم‌های عمیق‌تر ریشه، بسته شدن روزنه‌ها، پیچاندن برگ و تجمع موم در سطح برگ اشاره داشت (Perlikowski and Kosmala, ۲۰۲۰). تحمل به خشکی به توانایی گیاهان برای حفظ فعالیت‌های فیزیولوژیکی تحت شرایط تنش شدید خشکی از طریق بازسازی، تنظیم ژن و مسیرهای متابولیکی برای کاهش یا ترمیم آسیب ناشی از تنش بستگی دارد (Fang and Xiong, 2015). فرار از خشکی به هماهنگی دوره رشد گیاه، چرخه زندگی یا زمان کاشت برای جلوگیری از مواجهه فصل رشد با تنش خشکی اشاره دارد (Perlikowski and Kosmala, 2020). بازیابی خشکی به ظرفیت گیاه برای احیای متابولیسم پس از توقف رشد در خشکی شدید اشاره دارد که باعث رشد مجدد پس از دوره خشکی و از بین رفتن پسابیدگی و خشک شدن برگ می‌شود (Luo, 2010). شرایط خشکی طولانی‌مدت با فرار یا اجتناب از خشکی همراه است، درحالی‌که دوره‌های کوتاه اما شدید خشکی باعث تحمل خشکی می‌شود (Perlikowski and Kosmala, 2020).

۲. راهبردهای تحمل به تنش خشکی

راهبردها و راهکارهایی که در حال حاضر در کشاورزی نوین با توجه به شرایط کشاورز، شرایط محیطی موجود و همچنین امکانات در دسترس باهدف کاهش اثرات تنش خشکی در تولیدات کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد به شرح ذیل می‌باشند:

۲-۱_ راهبردهای اگرونومیک: تاریخ کاشت و ساختار فیزیکی گیاه

مدیریت تاریخ کاشت می‌تواند بر مراحل حیاتی رشد گیاه مانند زمان گلدهی و پر شدن دانه تأثیر بگذارد، بنابراین اثرات مخرب تنش خشکی را در این مراحل کاهش می‌دهد (Kumar *et al.*, 2008). کاشت زودهنگام با افزایش تراکم گیاه می‌تواند یک راهکار مفید باشد زیرا استفاده از بارندگی زیاد یا کارایی مصرف آب را برای افزایش عملکرد بهبود می‌بخشد. گیاهان را می‌توان با تطبیق مراحل حیاتی رشد گیاه با دوره در دسترس بودن آب و کاهش تلفات عملکرد نهایی، با موفقیت در مناطق خشک کشت کرد. حفظ تراکم بهینه گیاه برای استفاده بهتر از منابع طبیعی مانند آب، نور، فضا و مواد مغذی حیاتی است. در مناطق دیم، تراکم کاشت بالا باعث کاهش رطوبت خاک قبل از بلوغ می‌شود و آب بیشتری در اثر تعرق از بین می‌رود، درحالی‌که تراکم کاشت کم باعث می‌شود رطوبت خاک استفاده‌نشده باقی بماند. برخی از دانشمندان مشاهده کرده‌اند که تراکم پایین بوته به دلیل دانه‌های فشرده‌تر به‌خصوص در محیط‌های مدیترانه‌ای منجر به کاهش عملکرد می‌شود (OConnell *et al.*, ۲۰۰۴). Matsuo *et al.* (۲۰۱۸) تأثیر تراکم بوته و فاصله ردیف بر رشد و عملکرد سویا را موردمطالعه قرار داد. آن‌ها گزارش دادند که گیاهان تولیدشده در تراکم‌های بالاتر، بلندتر، بیشتر، دارای شاخه‌های پراکنده‌تر، غلاف‌ها و دانه‌های کمتری نسبت به گیاهانی با تراکم پایین‌تر هستند. Agajie (۲۰۱۸) اثر فاصله‌گذاری بر اجزای عملکرد و عملکرد نخود را موردمطالعه قرار داد، ایشان توضیح دادند که فاصله ردیفی مناسب برای رشد، اجزای عملکرد و عملکرد نخود بسیار مهم است. بنابراین، تراکم ترجیحی بوته عامل مفیدی برای راندمان استفاده از بارندگی بالا و به دست آوردن حداکثر عملکرد در واحد سطح است.

۲_ فیلم فارمینگ، تکنیک کشاورزی بدون خاک

فیلم فارمینگ تکنیکی است که درآن از فیلم‌های هیدروژل برای رشد گیاهان استفاده می‌شود. هیدروژل یک پلیمر سه‌بعدی، یک لایه‌نازک از فیلم با عرض ۶۰ سانتی‌متر و ضخامت

۰/۰۶ میلی‌متر است که می‌تواند حجم زیادی از آب را در فضاهای بین‌مولکولی خود به دام بیندازد (Batista *et al.*, 2019) این تکنیک شامل استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای و راه‌اندازی گلخانه است. سیستم قطره‌ای در بالا و زیر غشای هیدرولیکی قرار می‌گیرد تا به‌طور یکنواخت مواد مغذی و آب را برای گیاهان بالای غشاء آبی تأمین کند. این سیستم مجهز به یک دستگاه کنترل است تا میزان آب پراکنده‌شده از طریق لوله‌ها را بررسی کند (Mori, ۲۰۱۵; Zhang *et al.*, 2021). گزارش‌شده است که ریشه‌های گیاهان بسیار نازک می‌شوند تا بتوانند از طریق منافذ ریز هیدروژل به سیستم قطره‌ای زیر لایه برسند. ازآنجایی‌که گیاهان آب را تحت‌فشار بالا می‌گیرند، می‌توانند مواد مغذی باکیفیت بالا را جذب کنند (Zhang *et al.*, 2021). فیلم فارمینگ به مقادیر ناچیزی خاک، آب، کود و انرژی نیاز دارد. عملکرد بالا و محصولات غنی از مواد مغذی درنتیجه استفاده از این روش مورد انتظار است. با اجرای این روش می‌توان تعداد زیادی محصول را حتی در بیابان‌ها کشت کرد (Mori, 2013). بااین‌حال، این فناوری به‌طور عمومی مورداستفاده قرار نمی‌گیرد زیرا بسیار وقت‌گیر، نیازمند کار فشرده و پرهزینه است که نیاز به راه‌اندازی گلخانه دارد همچنین به مساحت‌های زیاد زمین نیاز دارد، لذا توسط کشاورزان کوچک قابل‌اجرا نیست (Sardare and Admane, 2013).

۳_ ایجاد تحمل به خشکی با استفاده از نانو ذرات

نانو ذرات (NPs)[۱] دارای خواص فیزیکوشیمیایی بسیار خاص و متنوعی مانند مساحت و سطح بالا، واکنش‌پذیری بالا، اندازه منافذ قابل تنظیم و مورفولوژی ذرات متنوع هستند (Saxena *et al.*, 2016). استفاده از نانو ذرات برای مبارزه با تنش خشکی، جدید و موفق است. نانو ذرات سیلیکون، نقره، روی، دی‌اکسید تیتانیوم و آهن به بهبود میزان فتوسنتز، کاهش محتوای مالون دی آلدئید (شاخص آسیب چربی)، افزایش محتوای نسبی آب، تقویت سیستم ریشه و ساقه کمک می‌کنند و درنهایت به رشد و نمو کلی گیاه نیز کمک می‌کنند (Ashkavand *et al.*, 2018). سازوکار عمل نانو ذرات برای القای تحمل به خشکی پیچیده است و تا حد زیادی ناشناخته باقی‌مانده است. بااین‌حال، مطالعات مختلف گزارش کرده‌اند که نانو ذرات آکواپورین‌ها، پروتئین‌های کانال آب مسئول نفوذپذیری آب و جوانه‌زنی بذر را تنظیم می‌کنند، و تأمین آب و مواد مغذی بهتر را برای بذرهای جهت جوانه‌زنی تسهیل

[۱] Nano Particle Sensor

می‌کنند، بنابراین سرعت جوانه‌زنی را حتی در شرایط تنش خشکی افزایش می‌دهند (Li *et al.*, 2020)

TiO_2 بیشترین نانوذره موردمطالعه است که توانایی بهبود سرعت فتوسنتز را با فعالیت فتوکاتالیستی خود دارد که از طریق آن انتقال بار بین کمپلکس برداشت نور II و نانوذره TiO_2 انجام می‌شود. توانایی نانو ذرات TiO_2 برای بهبود سرعت فتوسنتز به این دلیل است که نانو ذرات در بسیاری از فرآیندهای کلیدی فتوسنتز مانند ارتقای توانایی جذب نور توسط کلروپلاست‌ها، تنظیم توزیع نور بین فتوسیستم‌های I و II، شتاب انتقال انرژی نور به انرژی الکتریکی و تولید آب و اکسیژن نقش مهمی دارند (Ze *et al.*, 2013).

ارتباط بین گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و نانو ذرات نیز می‌تواند نتایج متفاوتی داشته باشد. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که نانو ذرات، غلظت ROS را در گیاهان تحت تنش غیرزیستی تشدید می‌کنند که منجر به اثرات سمیت سلولی می‌شود (Khan *et al.*, ۲۰۱۷). بااین‌حال، زمانی که از غلظت‌های غیر سمی نانو ذرات استفاده می‌شود، گیاه را برای مقابله با تنش‌های غیرزیستی مانند خشکی آماده می‌کنند. نانو ذرات همچنین سطوح سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی را با کمک به تولید آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیر آنزیمی تقویت می‌کنند و در برخی موارد حتی نقش جذب‌کننده‌های ROS را تقلید می‌کنند، دانشمندان مشاهده کردند که نانو ذرات تجزیه‌کننده با افزایش قابل‌توجه تجمع آنزیم‌های پاک‌کننده (scavenge)، مقاومت به خشکی را در گندم و ذرت بهبود می‌بخشد (Ashkavand *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2017)

Sun *et al.* (۲۰۱۷) دریافتند که کاربرد نانو ذرات اکسید روی در گیاهان ذرت تحت تأثیر خشکی، سرعت خالص فتوسنتز را بهبود بخشید، به حرکت روزنه‌ها کمک کرد، محتوای آب و کلروفیل را افزایش داد و همچنین فعالیت آنزیم‌های دخیل در بیوسنتز نشاسته و ساکاروز و متابولیسم گلوکز در برگ را افزایش داد. علیرغم مزایای استفاده از نانو ذرات به‌عنوان یک جزء در کشاورزی پایدار، معایبی وجود دارد، ازجمله نانو ذرات می‌توانند اثرات سیتوتوکسیک را روی گیاهانی که با آن‌ها در تعامل هستند، ایجاد کنند. Martínez-Fernández *et al.* (۲۰۱۶) گزارش کردند که نانو ذرات به سلول‌های ریشه می‌چسبند و با مسدود کردن منافذ باعث عدم تعادل هیدرولیکی و درنهایت کم‌آبی گیاهان می‌شوند. آن‌ها همچنین باعث عدم

[۱] Reactive Oxygen Species

تعادل مواد مغذی و تولید بیش‌ازحد ROS می‌شوند. قسمت‌های مختلف یک گیاه زمانی که در معرض غلظت خاصی از نانو ذرات قرار می‌گیرند ممکن است اثرات متضادی از خود نشان دهند (Rawat *et al*., 2018). این مسائل ثابت می‌کند که استفاده از نانو ذرات هنوز در حال رشداست و برای درک و استفاده کامل از مزایا و پتانسیل نانو ذرات در بخش کشاورزی، تعامل آن‌ها با گیاهان باید در هر دو سطح سلولی و مولکولی به‌وضوح درک شود. علاوه بر این، تأثیر دقیق نانو ذرات بر محیط‌زیست هنوز شناخته‌نشده است. ممکن است استفاده مداوم از آن‌ها منجر به اثرات نامطلوب طولانی‌مدتی شود که فوراً شناسایی نمی‌شوند (Moulick *et al*., 2020) . بنابراین ارزیابی ریسک کاربرد نانو ذرات در کشاورزی هنوز ضروری است. برخی از نانو ذرات مورداستفاده در کشاورزی و سازوکار اثر آن‌ها در جدول شماره ۱ آمده است.

جدول ۱: برخی از نانو ذرات مورداستفاده در کشاورزی و سازوکار تأثیرگذاری آن‌ها

نانو ذرات	سازوکار	منبع
آهن	اثرات تنش خشکی بر اجزای عملکرد گلرنگ و درصد روغن از طریق محلول‌پاشی نانو ذرات آهن (Fe-NPs) کاهش یافت.	**Davar *et al*. (2013)**
سیلیس	Si-NPs تحمل به خشکی را در گیاهان افزایش داد.	**Ashkavand *et al*. (2015)**
سیلیس مزوپور دار با تیول	آزادسازی ABA محصورشده کنترل شد و بیان ژن AtGALK2 را تقویت کرد و درنتیجه مقاومت به خشکی را در جوانه‌های آرابیدوپسیس بهبود بخشید.	**Sun *et al*. (2018)**
روی و مس	تجمع مالون دی آلدهید با افزایش آنزیم‌های آنتی اکسیدانی و محتوای نسبی آب در شرایط کمبود آب در حضور کاربردهای نانو ذرات روی و مس کاهش یافت.	**Taran *et al*. (2017)**

۴_ هیدروژل سوپر جاذب به‌عنوان استراتژی تغییر خاک برای تحمل به خشکی

جدای از کاهش در بارندگی و درنتیجه دوره‌های خشک، عواملی مانند کاهش ظرفیت نگهداری آب، نفوذ مواد مغذی و آب به لایه‌های عمیق‌تر و نیز رواناب بیش‌ازحد سطحی مسئول شرایط خشکی هستند (Geng et al., 2015). هیدروژل‌های فوق جاذب

(SAHs)یک استراتژی هستند که با ایجاد تغییراتی در خاک، تحمل به خشکی را القاء می‌کنند. هیدروژل‌ها دسته‌ای از پلیمرها هستند که دارای ساختارهای سه‌بعدی بسیار متقابل هستند و توانایی جذب و حفظ مقادیر قابل‌توجهی مولکول‌های آب و املاح را دارند. مواد مورداستفاده برای ایجاد این هیدروژل‌ها غیر سمی، زیست‌تخریب‌پذیر، زیست سازگار و مقرون‌به‌صرفه هستند (Saha *et al*., 2020). گروه‌های آب‌دوست مختلف مانند کربوکسیل، هیدروکسیل، سولفونات‌ها، سولفات‌ها و فسفات‌ها به ستون فقرات پلیمری متصل می‌شوند و به هیدروژل توانایی متورم شدن و حفظ مقادیر زیادی آب را می‌دهند. SAH های موجود در خاک در طول دوره‌های بارندگی آب را جذب می‌کنند و در دوره خشکی متعاقب آن، آب موجود در هیدروژل جهت استفاده گیاهان برای زنده ماندن در شرایط خشکی آزاد می‌شود (Tomášková *et al*., 2020) هنگامی‌که SAH ها در خاک‌های مختلف اعمال می‌شوند، کارایی مصرف آب و نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد درحالی‌که نرخ رواناب سطحی و فرسایش خاک را کاهش می‌دهند. SAH ها برای بهبود محتوای آب موجود در گیاه نیز یافت می‌شوند (Yang *et al*., 2014).

Ahmad *et al.* (۲۰۱۵) گزارش دادند که با کاربرد SAHs در خاک افزایش قابل‌توجهی در رشد گیاه و عملکرد کل گیاهان لوبیا تحت تیمار خشکی به دست آمد. محتوای کلروفیل و پتانسیل آب خاک بالاتر و سطوح کم‌آبی کمتر در گیاهانی که در خاک تیمار شده رشد کرده بودند در مقایسه با شاهد گزارش شد. به‌طورکلی، SAH ها رشد و بهره‌وری گیاهان لوبیا را با ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی مثبت در خاک و گیاه بهبود بخشیدند. صرف‌نظر از تمام مزایای این تکنیک، تجاری‌سازی آن هنوز در مراحل اولیه خود است. این هیدروژل‌ها همچنین ظرفیت نگهداری خود را در طول زمان به دلیل چرخه‌های خشک شدن و خیس شدن متعدد و درنتیجه کهنه شدن پلیمر از دست می‌دهند. درعین‌حال برخی از مطالعات نشان می‌دهند که شبکه‌های پلیمری ممکن است آب جذب‌شده را چنان محکم ببندند که ریشه‌های گیاه نتوانند مقدار موردنیاز آب را استخراج کنند (Yang *et al*., 2015; Tomášková *et al*., 2020; Saha *et al*., 2020).

۵_ تنظیم خشکی با استفاده از بیوچار

بیوچار یک ماده غنی از کربن است که از تجزیه گاز محدود اکسیژن زیست‌توده تشکیل

[1] Superabsorbent hydrogels

می‌شود. اهمیت بیوچار به‌عنوان یک کاهش‌دهنده تنش گیاهی در چند سال گذشته به دلیل توانایی آن در افزایش حاصلخیزی خاک، جذب و رشد مواد مغذی و بهبود ظرفیت نگهداری آب در گیاهان تحت تنش به‌طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است (Semida *et al*., 2019; Haider *et al*., 2020). کاربرد بیوچار به‌عنوان یک تکنیک اصلاح خاک به ترکیب فیزیکی و شیمیایی آن ازجمله نوع ماده اولیه مصرفی، شرایط پیرولیز، سطح ویژه و تخلخل بستگی دارد (Afshar *et al*., 2016; Zhang *et al*., 2020). هنگامی‌که بیوچار وارد خاک می‌شود، به دلیل سطح بار منفی، مساحت بالا و خاصیت ترسیب کربن، به‌طور قابل‌توجهی بر سطح خاک، تخلخل، توزیع اندازه منافذ و ظرفیت نگهداری آب و همچنین بسیاری از جنبه‌های شیمیایی و بیولوژیکی دیگر تأثیر می‌گذارد (Zhang *et al*., 2020; Durukan *et al*., 2020). بهبود حاصلخیزی خاک، رشد و استقرار گیاه را در شرایط خشکی بسیار افزایش می‌دهد. بیوچار مواد مغذی را مستقیماً در خاک جذب و حفظ می‌کند و ریشه‌های گیاه متعاقباً آن‌ها را جذب می‌کنند، بدون اینکه نیازی به رشد بیشتر در زمین برای جذب آب داشته باشند. مطالعات، بهبود قابل‌توجهی را در میزان فتوسنتز گیاه، پتانسیل آب آوند چوبی، محتوای کلروفیل، تولید فیتوهورمون، جذب مواد مغذی ضروری مانند N، Si، P، K و زیست‌توده و رشد کلی با استفاده از بیوچار گزارش کرده‌اند (Ali *et al*., 2017; Semida *et al*., 2019). کاربرد ۰/۷۵ درصد بیوچار روی *Phragmites karka*، یک گیاه سوخت زیستی تحت تنش خشکی، به‌طور قابل‌توجهی زیست‌توده تازه و خشک، طول ریشه و اندام هوایی، محتوای کلروفیل و نرخ خالص فتوسنتز و ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش داد. گیاهان تحت تیمار بیوچار نیز به دلیل افزایش تولید آنزیم‌های مهارکننده و کارایی فتوسیستم II با تنش اکسیداتیو کمتری مواجه شدند (Abideen *et al*., 2019).

Haidar *et al*. (۲۰۲۰) نرخ تعرق، محتوای نسبی آب، طول ریشه و اندام هوایی، زیست‌توده گیاهی و سیستم دفاع اسمزی را در ذرت تحت تنش آبی در مقایسه با شاهد گزارش کرد.

اگرچه استفاده از بیوچار به‌عنوان ابزاری برای بهبود تنش خشکی ممکن است مطلوب به نظر برسد، اما خطرات این فناوری هنوز تا حد زیادی ناشناخته است. برخی از معایب عمده شناخته‌شده عبارت‌اند از: در دسترس نبودن مواد اولیه، استفاده ناکارآمد از انرژی در طول تولید بیوچار، اتصال و غیرفعال کردن عناصر غذایی، وجود علف‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها، افزایش pH خاک، انتشار مواد سمی و فلزات سنگین در خاک و تخریب فلور میکروبی طبیعی خاک

(Hussain *et al*., 2017; Kuppusamy *et al*., 2016; Oni *et al*., 2019). همچنین، بیوچار ممکن است برای برخی از گیاهان، مانند سایر گیاهان مزایای قابل‌توجهی نداشته باشد. به‌عنوان‌مثال، بیوچار هیچ بهبود قابل‌توجهی در وزن برگ، سرعت فتوسنتز، سطح برگ و ارتفاع گیاه در خارمریم (*Silybum marianum* L. Gaertn) تحت تنش خشکی نشان نداد (Afshar et al., 2016). تولید بیوچار یک فرآیند خسته‌کننده و پرهزینه برای کشاورزانی است که از بقایای گیاهی به‌عنوان خوراک دام استفاده می‌کنند. فناوری بیوچار نیاز به تحقیقات گسترده‌ای برای درک کامل اثرات آن بر محیط‌زیست دارد.

۶_ ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه، واسطه تحمل به خشکی

ریزوباکترهای محرک رشد گیاهی (PGPR) ریزجاندارانی هستند که در ریزوسفر یافت می‌شوند و فعالیت متابولیکی آن‌ها با حضور ترشحات ریشه تقویت می‌شود (Xiong *et al*.,2020; Wozńiak and Gałaz ka., 2019). تنوع زیاد PGPR ها در ریزوسفر به شرایط فیزیولوژیکی خاک و در دسترس بودن مواد مغذی بستگی دارد. این PGPR ها با اشغال ریشه‌ها، فواید تقویت‌کننده رشد مختلفی را به گیاه می‌دهند. کموتاکسی، تحرک، وجود پروتئین‌های غشایی مانند لیپوپلی ساکاریدها و اگزوپلی ساکاریدها، وجود زائده‌هایی مانند پیلی و فیمبریا و توانایی استفاده از ترشحات ریشه ازجمله ویژگی‌هایی است که کلونیزاسیون ریشه را امکان‌پذیر می‌کند (Kabiraj *et al*., 2020; Pathania *et al*., 2020) . PGPR ها به‌صورت همزیست یا غیرهمزیست در ریزوسفر رشد می‌کنند. تعدادی از آن‌ها می‌توانند وارد ریشه شوند و در ساقه، برگ‌ها و سایر قسمت‌های گیاه پیوندهای اندوفیتی ایجاد کنند (Kabiraj *et al*., 2020; Wozńiak and Gałaz ka., 2019). این باکتری‌ها عمدتاً مفید هستند و با مشارکت مستقیم یا غیرمستقیم در ترویج رشد و تولید گیاه به‌عنوان محرک زیستی عمل می‌کنند. برخی از نمونه‌های PGPR عبارت‌اند از: سودوموناس، باسیلوس، ریزوبیوم، برادیریزوبیوم، پانتوئا، آزوسپیریلوم، ازتوباکتر و بورکلدریا(Chiappero *et al*., 2019; Pathania *et al*., 2020) . برجسته‌ترین عملکردهای PGPR شامل تثبیت نیتروژن، حل کردن فسفات، سازگاری ریزمغذی‌ها، آزادسازی فیتوهورمون‌ها، حفظ ترکیب خاک، اصلاح زیستی خاک‌آلوده، مقاومت سیستمیک القایی در برابر آفات و بیمارگرهای قارچی و کاهش تنش‌های غیرزیستی مانند شوری و خشکی است (Novo *et*

[1] Plant Growth Promoting Rhizobacteria

(*al*., 2018; Pathania *et al*., 2020). وجود آنزیم نیتروژناز به PGPR ها اجازه می‌دهد تا نیتروژن اتمسفر را تثبیت کرده و آن را به‌صورت آمونیاک و نیترات در دسترس گیاهان قرار دهند (Hakim *et al*., 2021). به‌طور مشابه، PGPR ها حل شدن فسفات را از طریق تولید اسیدهای آلی انجام می‌دهند که با فسفات کمپلکس‌هایی را تشکیل می‌دهند و در دسترس بودن آن را برای گیاه افزایش می‌دهند (Kabiraj *et al*., 2020;.Pathania *et al*., 2020) همچنین با تولید سیدروفورها که وزن مولکولی پایین و کلاته‌های آهن با میل ترکیبی بالا دارند، دسترسی به ریزمغذی‌هایی مانند آهن را افزایش می‌دهند (Singh, 2020). در دسترس بودن هورمون‌های رشد گیاهی مانند اکسین‌ها و جیبرلین‌ها، کنترل بیمارگرها با تولید آنتی‌بیوتیک‌ها، سیانید هیدروژن و آنزیم‌های لیتیک و تصفیه زیستی خاک از طریق تولید آنزیم‌های تخریب‌کننده مختلف نیز از جذابیت‌های کلیدی PGPRs هستند (Pathania *et al*., 2020).

باکتری‌ها با به‌کارگیری سازوکارهای فیزیولوژیکی مختلف، ازجمله جمع‌آوری املاح سازگار، سنتز اگزوپلی ساکارید، تولید آنتی بیوتیک و تشکیل اسپور، در شرایط تنش غیرزیستی زنده می‌مانند. PGPR ها از تغییرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مشابهی در گیاهان برای کمک به بقا و شکوفایی آن‌ها در شرایط تنش ازجمله خشک‌سالی استفاده می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از آن‌ها مقرون‌به‌صرفه و کم زحمت است (Etesami and Maheshwari., ۲۰۱۸). بنابراین، PGPR ها می‌توانند مزایای بیشتری از تحمل به خشکی همراه با بهبود عملکرد گیاه ارائه دهند. خشکی گاهی به‌طور کامل مورفولوژی گیاه را تغییر می‌دهد. با کمک PGPR ها می‌توان تحمل گیاهان به خشکی را تا حد زیادی بهبود بخشید. PGPR ها نه‌تنها بر یک قسمت از گیاه تأثیر می‌گذارند، بلکه به کاهش اثرات خشک‌سالی در گیاه کمک می‌کنند. آن‌ها مورفولوژی ریشه و شاخساره را بهبود می‌بخشند، سازوکارهای آنتی‌اکسیدانی را به کار می‌گیرند، پایداری آب را افزایش می‌دهند، بیوفیلم‌هایی را برای بهبود دسترسی به آب برای گیاه تولید می‌کنند و متابولیت‌های ثانویه را به نفع گیاهان تولید می‌کنند (kumar *et al*., 2019; Li *et al*., 2020). در جدول ۲ تأثیر برخی از PGPR ها در گیاهان مختلف نشان داده شده است.

جدول ۲- تأثیر ریزوباکترهای محرک رشد در کاهش اثرات تنش خشکی

PGPR	گیاه تحت تنش خشکی	اثرات PGPRs	منبع
Pseudomonas spp., *Enterobacter* spp., *Bacillus sporothernoduran*	آفتابگردان	تولید سیدروفور، محتوای کلروفیل بهبودیافته، افزایش زیست‌توده گیاهی و در دسترس بودن مواد مغذی مانند نیتروژن، آهن	Pourbabaee *et al*. (2016)
Azospirillium spp.	ذرت	افزایش محتوای پرولین، افزایش وزن خشک ساقه، رشد گیاهچه و سرعت جوانه‌زنی را بهبود بخشید	García *et al*. (2017)
Pseudomonas fluorescens	ارزن دم‌روباهی	افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر	Niu *et al*. (2018)
Variovorax paradoxus, consortia of *Pseudomonas* spp.	گندم	بهبود غلظت مواد مغذی برگی، طول ریشه و اندام هوایی، خواص آنتی‌اکسیدانی و زیست توده کلی گیاه	Chandra *et al*. (2019)
Bacillus spp	ذرت	کاهش فعالیت آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز، افزایش محتوای پرولین، بهبود جذب مواد مغذی	Silva *et al*. (2020)
Pseudomonas azotoformans	گندم	سرعت جوانه‌زنی بذر، طول ریشه و طول ساقه چه بهبود یافته است	Ansari *et al*. (2021)

۷_ کاربرد محلول‌پاشی اتانول در شرایط تنش خشکی

استفاده محلول‌پاشی از متابولیت‌های گیاهی بر اساس گزارش‌ها، تحمل به تنش در گیاه را افزایش می‌دهد (Sako *et al*., 2021). اسید استیک تحمل به خشکی را افزایش می‌دهد، درحالی‌که اتانول می‌تواند اثرات مضر شوری و تنش گرمایی را کاهش دهد (Ogawa *et al*., ۲۰۲۱; Sako *et al*., 2021). در گیاهان، تخمیر اتانول تضمین می‌کند که انرژی در شرایط تنش حفظ شود. در مسیر تخمیر اتانول، برای تولید استالدئید پیروات توسط پیرووات دکربوکسیلاز دکربوکسیله می‌شود که به‌طور خاص در گیاهان، خزه‌ها و قارچ‌ها حفظ می‌شود

(Kim *et al.*, 2017). سپس استالدئید از طریق واکنش کاتالیز شده توسط الکل دهیدروژناز (ADH) به اتانول تبدیل می‌شود، که با اکسیداسیون نیکوتین آمید آدنین دی نوکلئوتید به NAD^+ همراه است این واکنش، که برگشت‌پذیر است، اتانول را قادر می‌سازد تا به‌آسانی از طریق واسطه استالدئید توسط آنزیم‌های آلدئید دهیدروژناز (ALDH[۲]) به اسید استیک تبدیل شود (Rasheed *et al.* 2018) ترکیب اسید استیک حاصل را می‌توان از طریق چرخه اسیدتری کربوکسیلیک (TCA[۳]) یا گلیوکسیلات متابولیزه کرد (Fu *et al.* ۲۰۲۰). پرایمینگ شیمیایی چندین مزیت کلیدی نسبت به فناوری ترا ریخته دارد، اما باید برای کشاورزان مقرون‌به‌صرفه، سازگار با محیط‌زیست و ایمن برای انسان، حیوانات و گیاهان باشد. پرایمینگ شیمیایی با اتانول (یک ماده شیمیایی ارزان‌قیمت و سازگار با محیط‌زیست) به‌طور قابل‌توجهی تحمل به خشکی را در *Arabidopsis thaliana*، برنج و گندم افزایش داد. تحمل به خشکی باواسطه اتانول ممکن است برای کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی مورداستفاده قرار گیرد و جایگزینی برای توسعه گیاهان ترا ریخته یا روش‌های پرزحمت اصلاحی کلاسیک باشد(bashir *et al.*, 2022) .

۸_ پرایمینگ بذر ابزاری برای کاهش اثرات خشکی

پرایمینگ بذر به‌عنوان مهم‌ترین رویکرد کوتاه‌مدت برای کاهش اثرات نامطلوب خشکی بر گیاهان (Khan *et al.*, 2019) عنوان شده است. هدف از این روش پیش‌کاشت، آغاز فرآیند جوانه‌زنی در ماشین‌های متابولیکی بذر و آماده‌سازی بذر برای خروج ریشه‌چه بدون ظهور ریشه‌چه در طول فرآیند است (Nawaz *et al.*, 2013). فرآیند جوانه‌زنی بذرهای پرایم کارآمدتر است که در مقایسه با بذرهای غیر پرایم‌شده سرعت جوانه‌زنی و یکنواختی بالاتری را به همراه دارد (Moosavi *et al.*, 2009). در محصولاتی مانند گندم، ذرت و نخود از پرایمینگ بذر برای کاهش اثرات نامطلوب تنش خشکی استفاده می‌شود (Khan *et al.*, 2019; Nawaz *et al.*, 2013; Moosavi *et al.*, 2009). اخیراً به دلیل افزایش شدت و فراوانی خشک‌سالی، روش کشت مستقیم بذر برنج (DSR[۴])در شرایط هوازی

[۱] Alcohol Dehydrogenase
[۲] Aldehyde Dehydrogenas
[۳] Tricarboxylic acid
[۴] Direct Seeding Rice

مورداستفاده قرار می‌گیرد (Farooq *et al*., 2013). در شرایط کم‌آبی، ترکیبات اسمزی مختلف برای DSR استفاده می‌شود که درنتیجه اسموپرایمینگ $CaHPO_4$ و KCL باعث افزایش عملکرد و بهره‌وری محصول شد. جوانه‌زنی و زیست‌توده بهتر در بذرهای پرایم شده در مناطق کم آب مشاهده شد ((Moosavi *et al*., 2009; Farooq *et al*., 2013. زیست‌توده بهینه، عملکرد بهتر، توانایی مقاومت در برابر خشکی، جوانه‌زنی زودهنگام و هماهنگ و به دنبال آن سبز شدن با پرایمینگ بذر مرتبط است. گزارش شده است که بذر پرایم‌شده در شرایط تنش آبی، WUE را ۴۴ درصد در محصول گندم نسبت به دانه‌های غیر پرایم‌شده افزایش داد. عملکرد دانه بالا با سبز شدن زودهنگام و تسریع گلدهی در اثر پرایم‌شدن بذرها در محیط‌های با کمبود آب مشاهده شد. به‌طور مشابه، اسموپرایمینگ با KNO_3 و هیدروپرایمینگ باعث افزایش عملکرد برخی محصولات در شرایط کمبود آب شد (Dela˘c *et al*., 2018). برخی از تأثیرات پرایمینگ بذر در گیاهان مختلف در جدول ۳ قابل‌مشاهده است.

جدول ۳- تأثیر پرایمینگ بذرها در گیاهان مختلف

تیمار پرایمینگ	گیاه	اثرگذاری	منبع
$Cacl_2$ Hydro- and Osmopriming	برنج	تجمع فنل‌ها و فلاوونوئیدها، افزایش سیستم آنتی اکسیدانی و استقرار	**Hussain *et al*. (2017)**
On-farm priming	ذرت	حفظ دمای مطلوب برای جوانه‌زنی و زمان سبز شدن کمتر	**Finch-Savage *et al*. (2017)**
Molecular priming	گیاهان	القای تحمل در برابر تنش اکسیداتیو	**Kerchev *et al*. (2020)**
Bio- and Osmopriming	جو	افزایش سطح برگ، فنل‌ها، محتویات کلروفیل، عملکرد و کیفیت دانه	**Tahira *et al*. (2018)**
$CaCl_2$ Osmopriming	گندم	کاهش پروکسیداسیون لیپیدی، تجمع اسمولیت، افزایش در سطح برگ، رطوبت نسبی آب و عملکرد دانه	**Tabassum *et al*. (2018)**

۹_ تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی و تنش خشکی

استفاده از تنظیم‌کننده‌های طبیعی و مصنوعی رشد گیاه می‌تواند تحمل به خشکی را در

گیاهـان بهبـود بخشـد (Ashraf *et al.*, 2011). کـاهش طـول و وزن هیپوکوتیـل در گیاهچه‌ها به دلیل تنش آبی را می‌توان با استفاده از اسید جیبرلیک کاهش داد کـه بـه حفـظ تعادل آب داخلی و سنتز پروتئین در گیاهان تحت تنش خشکی کمک مـی‌کنـد (Javid *et al.*, 2011). هدایت روزنه‌ای و همچنین فتوسنتز و نـرخ تـنفس در گنـدم و پنبـه و ذرت در مناطق کم آب به دنبال کاربرد GA افزایش یافـت و ایـن منجـر بـه عملکـرد دانـه بـالاتر در مقایسه با تیمارهایی شد که GA در آن‌ها استفاده نشـد (Nawaz *et al.*, 2017). کـاربرد بیرونی اسید آبسیزیک، یونیکونازول، براسینولید و اسید جاسـمونیک نیـز مـی‌توانـد بهـره‌وری محصـول را در شـرایط خشـک‌سـالی بهبـود بخشـد (Fahad *et al.*, 2015). یکـی از سیتوکینین‌های فعال بنزیل‌آدنین، هورمونی است که سازوکار مقاومت به خشکی را در گیاهان مختلف ازجمله ذرت، گندم، پنبه، جو نخود و برنج، از طریق تنظـیم محتـوای پـروتئین، قنـد محلول و فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز در گیاهان باعث مـی‌شـود. (Jan *et al.*, 2018). اسید سالیسیلیک نیز تحمل به خشکی را بهبود می‌بخشد و رشد و برداشـت نهایی گیاهان را در شرایط کم‌آبی افزایش مـی‌دهـد (Miura and Tada, 2014). افـزایش فعالیت کاتالاز گندم از طریق کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط کم آب مشاهده شد ۲۰۱۷ (Sedaghat *et al.*,). استفاده از اسید سالیسیلیک و مشتقات آن در کاربردهای محلول‌پاشـی و تیمار بذر سازوکار تحمل به خشکی را در محصول گندم تحـت تـنش خشـکی افـزایش داد. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از اسید سالیسیلیک در گندم بـه‌طـور غیرمسـتقیم باعـث افزایش تجمع پرولین از طریق افـزایش محتـوای اسـید آبسـیزیک مـی‌شـود (Miura and Tada, 2014; Sedaghat *et al.*, 2017). در ذرت (*Zea mays* L.)، محتـوای پلی‌آمین‌هـا در شـرایط تـنش خشـکی افـزایش مـی‌یابـد. فیتوهورمـون‌هـایی ماننـد اتـیلن و براسینولید (BR) برای مقابله با تنش‌های مختلف محیطی به‌ویـژه تـنش خشـکی از اهمیـت بالایی برخوردار هستند و از طریق یک مسیر پیچیده برای تنظیم سیستم دفاعی گیاه، با فعال کردن فاکتورهای رونویسی BZR1/BES1، تحمل گیاه را به تنش‌هـای زنـده و غیرزیسـتی افزایش می‌دهد. همچنین تولید گونه‌های فعال اکسـیژن (ROS) را در گیاهـان تحـت تـنش تنظیم می‌کند و عدم تعادل در مهار ROS منجر به انفجارهای اکسیداتیو می‌شود کـه اثـرات نامطلوبی بر گیاهان دارد (Tanveer *et al.*, 2019). تأثیر برخی از تنظیم‌کننده‌هـای رشـد گیاهی بر کاهش اثرات تنش خشکی در برخی از گیاهـان در جـدول شـماره ۴ قابـل‌مشـاهده است.

جدول ۴- تأثیر برخی از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی بر کاهش اثرات تنش خشکی

فیتوهورمون	گیاه تحت تنش	سازوکار	منبع
جیبرلیک اسید	برنج	طول ریشه و اندام هوایی افزایش، ازدست‌دادن آب کاهش یافت، دفاع گیاه و تنش اکسیداتیو تغییر کرد	**Lo *et al*. (2017)**
جیبرلیک اسید	برنج	حداکثر WUE، فتوسنتز، APX، CAT، محتویات پرولین، ریشه‌های منبسط‌شده و گیاه کوتوله	**Wu *et al*. (2016)**
آبسزیک اسید	کتان	SOD، CAT، کلروفیل و پرولین افزایش می‌یابد	**Liang *et al*. (2016)**
سایتوکینین	جو	گیاهان جو ترا ریخته تحمل بهتری به خشکی از طریق اجتناب بهتر از کم‌آبی نشان دادند.	**Pospíšilová *et al*. (2016)**

SOD= Super Oxide Dismutase, CAT= Catalase and APX= Ascorbate Peroxidase

۱۰_ نقش مواد محافظ اسمزی در کاهش اثرات خشکی

دامنه چندگانه تنش‌های گیاهی که باعث کاهش رشد و بهره‌وری گیاه می‌شوند توسط پیام‌رسانی از محافظ‌های اسمزی تنظیم می‌شوند. این مواد در زمانی که شرایط رشد برای رشد و نمو گیاه مناسب نیست تجمع می‌یابند و مسئول حفظ فرآیندهای فیزیولوژیکی داخلی هستند و بقای گیاه را در شرایطی مانند کمبود آب تضمین می‌کنند (Brito *et al*., ۲۰۱۹). تأثیر برخی از محافظت‌کننده‌های اسمزی در کاهش اثرات تنش خشکی در جدول ۵ ارائه‌شده است. محافظت‌کننده‌های اسمزی مهم در گیاهان تحت تنش آبی شامل پرولین، تری‌هالوز، مانیتول، فروتون و گلیسین بتائین می‌باشد (Zouari *et al*., 2019). این ترکیبات، که معمولاً برای تیمار بذر استفاده می‌شوند یا به‌صورت محلول‌پاشی در مراحل مختلف رشد محصولات به کار می‌روند، از ساختار درون‌سلولی محافظت می‌کنند، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را افزایش می‌دهند و نقش واسطه‌گری را جهت تعدیل اسمزی در گیاهان تحت تنش آبی ایفا می‌کنند (Elkelish *et al*., 2020). محلول‌پاشی پرولین

همچنین باعث افزایش پرولین آزاد داخلی در گیاهان می‌شود و درنتیجه تحمل آن‌ها به خشکی را افزایش می‌دهد (Semida *et al*., 2020). درنهایت، استفاده از پلی آمین‌هایی مانند اسپرمیدین نیز برای افزایش تحمل گیاه به تنش آبی در محصولاتی مانند جو و گندم کارآمد است (Sallam *et al*., 2019).

جدول ۵- تأثیر محافظت‌کننده‌های اسمزی در کاهش اثرات تنش خشکی

اسمولیت	گیاه	سازوکار گیاه	منبع
GA & ABA	تنباکو	تحمل تنش، حذف ROS و تعادل نیتروژن کربن را بهبود می‌بخشد	**Liu *et al*. (2011)**
مانیتول	ذرت	رادیکال‌های اکسیژن تحریک‌کننده تنش را از بین ببرید	**Kaya *et al*. (2013)**
دی-اونونیتول	آرابیدوپسیس	جلوگیری از هدر رفتن آب در گیاهان	**Ahn *et al*. (2011)**
ABA= Abscisic Acid and GA= Gibberellic Acid			

۱۱_ گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی و گیاهان ترا ریخته

گیاهان از استراتژی‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی مختلفی مانند تنظیم اسمزی، تولید هورمون گیاهی، کاهش نرخ تعرق و تولید اگزوپلی‌ساکارید برای مقابله با تنش خشکی استفاده می‌کنند (Sahoo *et al*., 2013). از طریق کشف و دست‌کاری ژن، صدها مکان صفت کمی (QTLs) شناسایی و نقشه‌برداری شده‌اند که درنتیجه عملکرد بسیاری از پروتئین‌ها و فاکتورهای رونویسی یا پیش‌ساز آنزیم‌های دخیل در مسیرهای نشانه‌گذاری یا تنظیمی می‌توانند به‌گونه‌ای اصلاح شوند که بتوانند به آن‌ها کمک کنند. در تحمل به خشکی از طریق اصلاح چنین پروتئین‌هایی، خروجی‌های تحمل به خشکی مانند افزایش تولید هورمون‌های گیاهی و تنظیمات اسمزی را می‌توان تا حد زیادی افزایش داد (Hu and Xiong, 2014). گیاهان ترا ریخته بهره‌وری و سازگاری بهتری با تنش غیرزیستی نشان داده‌اند (Fita *et al*., 2015; Nuccio *et al*.,2018). به‌عنوان‌مثال، Liang (۲۰۱۶) یک‌گونه گیاهی ترا ریخته بابیان

اسید آبسیزیک (یک هورمون تنش گیاهی) ایجاد کرد. ژن *NCED3* متعلق به خانواده سیتوکروم P450 CYP707 A و دارای عملکرد تنظیمی نسبت به آبسیزیک شناسایی و در *Arabidopsis thaliana* منتقل شد. انتقال این ژن کنترل بیان بیش‌ازحد آبسیزیک را

تسهیل و ازاین‌رو اثرات مضر آن را بر گیاهان تحت تنش خشکی تنظیم کرد. Lawlor (۲۰۱۲) تنباکوی ترا ریخته را برای تولید پرولین محافظت‌کننده‌های اسمزی توسعه داد و افزایش زیست‌توده ریشه را تحت تنش آبی مشاهده کرد. همه این پیشرفت‌ها به آینده گیاهان ترا ریخته کمک می‌کند. بااین‌حال، استفاده از گیاهان ترا ریخته برای مقابله با تنش خشکی دارای معایبی است. این رویکرد زمان‌بر و پرزحمت است، همچنین ممکن است منجر به از بین رفتن سایر ویژگی‌های مفید مخزن ژنی میزبان شود. گیاهان اصلاح‌شده ژنتیکی نیز استفاده از علف‌کش‌های اضافی را تشویق می‌کنند، می‌توانند علف‌های هرز ایجاد کنند، رشد جمعیت کنترل‌شده حشرات را تحریک کنند و ممکن است به مقاومت آنتی‌بیوتیکی منجر شوند (Key *et al*., 2008). علاوه بر این، ازآنجایی‌که اساس بیوشیمیایی و مولکولی درک خشکی، پیام‌رسانی و سازگاری با تنش تا حد زیادی ناشناخته باقی می‌ماند، دست‌کاری ژنتیکی برای مقاومت به خشکی دشوار می‌شود (Hu and Xiong, 2014). آلودگی متقابل یکی دیگر از معایب است. این گیاهان دارای ویژگی‌های مشابه گیاهان معمولی هستند و معمولاً از الگوهای گرده‌افشانی مشابهی پیروی می‌کنند. در شرایطی که دانه‌های گیاهان اصلاح‌شده ژنتیکی با گیاهان معمولی گرده‌افشانی متقابل می‌شوند، نتیجه برای هر دو مزرعه ممکن است نامشخص شود (Mathews and Campbell, 2000). بنابراین، باوجود مزایای آن، این رویکرد نیز به‌طور گسترده عمل نمی‌کند.

۱۲_ استراتژی‌های انتخاب و بهنژادی

روش‌های متعارف و سنتی بهنژادی که تاکنون استفاده‌شده‌اند، بر اساس انتخاب تجربی عملکرد بوده‌اند (Galaitsi *et al*., 2016). وراثت‌پذیری کم، از یک‌سو، و برهمکنش ژنوتیپ و محیط بالا از سوی دیگر، عوامل اصلی تعیین‌کننده صفت کمی عملکرد در محصولات اصلی هستند (Scopel *et al*., 2016). بنابراین، اصلاح متعارف در عمل برای بهبود عملکرد است (Aslam *et al*., 2015). آگاهی از فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه، پیش‌نیاز انتخاب جایگاه‌های صفت کمی، مکان‌یابی توالی‌های ژنی و ورود جایگاه‌های کمی صفت است (Medici *et al*., 2014). به دلیل پاسخ نامنظم، غیرقابل‌اعتماد و غیرقابل‌پیش‌بینی به خشکی، غربال ارقام مقاوم در شرایط باز امکان‌پذیر نیست، اما در شرایط کنترل‌شده این امر میسر است (Ali *et al*., 2017). برعکس، بررسی نتایج که به‌طور تصادفی برای بهبود تحمل به تنش خشکی در محیط‌های متنوع انتخاب‌شده، یک رویکرد

مؤثر است که به بهنژادی کلاسیک معروف است (Araujo *et al*., 2015). ارقام با نرخ تعرق کم و کارایی مصرف آب (WUE) بدون تغییر، در شرایط بدون تنش هیچ تأثیری بر برداشت نهایی ندارند (Tejero *et al*., 2018). دانشمندان روی تجزیه‌وتحلیل ژنتیکی ساختار ریشه، محتوای نسبی آب و پتانسیل اسمزی تحقیق می‌کنند (Bertolino *et al*., ۲۰۱۹). باید صفات کمک‌کننده عملکرد که بسیار قابل وراثت هستند و بر عملکرد دانه در شرایط خشکی تأثیر می‌گذارند، درحالی‌که در شرایط بهینه تأثیرگذاری چندانی ندارند، موردتوجه قرار گیرند (Shavrukov *et al*., 2017). بااین‌وجود، آن‌ها در سیستم‌های کشاورزی با محدودیت آب، وراثت‌پذیری بالایی را برای عملکرد نشان می‌دهند و اغلب هیچ تعاملی با عملکرد دانه ندارند (Curin *et al*., 2020). هنگامی‌که گیاهان در معرض تنش خشکی قرار می‌گیرند، مهم‌ترین عاملی که در چنین شرایطی برای اولین بار ظاهر می‌شود، کاهش WUE است که برای ارقام مختلف است (Vishwakarma *et al*., 2017). در این شرایط، گیاهان تراکم روزنه و اندازه برگ را کاهش می‌دهند و درنتیجه از دست دادن آب را به حداقل رسانده و تعادل آب داخلی را حفظ می‌کنند (Ding *et al*., 2021). ازاین‌رو ژنوتیپ‌ها و ارقام خاصی که حساس به خشکی هستند و قادر به تطبیق با شرایط محیطی نیستند، WUE پایین خواهند داشت (Tardieu *et al*., 2018). بنابراین، یک رویکرد بهنژادی می‌تواند در جهت تولید محصول و زیست‌توده پایدار نسبت به واحد آب مصرفی، WUE را افزایش دهد (Fang *et al*., 2017).

نشانگرهای مولکولی نزدیک به مکان‌های ژنی صفت کمی (QTL) یا ژن‌های مرتبط باصفت هدف خاص در انتخاب به کمک نشانگر دخیل هستند و می‌توانند فرد با آبل‌های مطلوب را شناسایی کنند (Varshney *et al*., 2014). رویکردهای گستره ژنومی برای انتخاب نشانگر مرتبط باصفت از طریق ارزیابی دقیق و قابل‌اعتماد صفت و نیز انتخاب نشانگرهای مولکولی متراکم برای نقشه‌برداری QTL صفات مرتبط با مقاومت به خشکی در محصولات مختلف قابل‌استفاده هستند. از طریق این روش‌ها، QTL های صفات مرتبط با مقاومت به خشکی در محصولات مختلف مانند گندم (Kollers *et al*., 2013)، ذرت (Brown *et al*., ۲۰۱۱)، سورگوم (Huang *et al*., 2010)، برنج (Morris *et al*., 2012)، سویا (Huang *et al*., 2014)و بسیاری از محصولات دیگر مبتنی‌بر انتخاب ژنومی از روی تمام نشانگرهای موجود برای جمعیتی از ارزش‌های اصلاحی تقریبی ژنوم یا GEBV[1]ها استفاده

[1] Genome Estimated Breeding Values

می‌شود و مدل‌های انتخاب ژنوم یا GS[۱] نیز برای انتخاب لاین‌های برتر بدون توجه به فنوتیپ استفاده می‌شود (Varshney *et al*., 2014). برخلاف MAS[۲] دانش QTL ها پیش‌نیاز GS نیست (Nakaya snd Isobe, 2001). بااین‌حال، GS نسبت به MAS به داده‌های نشانگری با چگالی بالاتر نیاز دارد. این امر از طریق در دسترس بودن روش‌های ایجاد ژنوتیپ کم‌هزینه و پوشش نشانگری گستره ژنومی امکان‌پذیر است (Meuwissen *et al*., 2001). GS برای اصلاح ایجاد مقاومت به خشکی در ذرت توسط مرکز بین‌المللی بهنژادی ذرت و گندم (CIMMYT[۳]) استفاده می‌شود (Crossa *et al*., 2014).

۱۳_ دیدگاه مولکولی و ژنومی

عوامل بیوشیمیایی و مولکولی دخیل در القای فرآیندها برای بهبود اثرات منفی تنش آبی شامل رونویسی، ژن‌های پاسخ‌دهنده به تنش (جدول ۶) و اسید آبسیزیک (Osakabe *et al*., 2020) است. هم‌زمان با افزایش تحمل به خشکی، برنامه‌های اصلاحی نیز در مسیر کنترل سایر تنش‌ها از طریق بیان ژن‌های مختلف پاسخ‌دهنده به تنش هستند (Rai and Rai., 2020; Lim *et al*., 2020). بااین‌حال، افزایش بیان این ژن‌ها اغلب با کاهش سرعت رشد گیاه همراه است که می‌تواند کاربرد عملی آن را محدود کند. بنابراین، پایه‌های مولکولی و ژنتیکی برای مقاومت به خشکی هنوز نیاز به توجه دارد تا با موفقیت با این شرایط مقابله کند (Hussain *et al*., 2018). از این نظر، ابزارهای فن‌آوری ژنومی می‌توانند ژن‌هایی را برجسته کنند که اثر تنش را کاهش می‌دهند، طوری که تلاش‌ها برای حفظ آن ژن‌ها در برنامه‌های اصلاحی متوالی دنبال می‌شود (Medina *et al*., 2016). سطح مولکولی ژن‌های مقاوم به تنش در مکان‌های صفات کمی (QTL) متقاطع است که برهمکنش و شبیه‌سازی ژن‌های مرتبط با استرس را نشان می‌دهد (Nakashima *et al*., ۲۰۱۴). به‌طورکلی، پذیرفته‌شده است که ترکیبی از انتخاب از طریق ارزیابی نشانگر، اصلاح مولکولی و سنتی به‌عنوان یک رویکرد یکپارچه بهترین جایگزین برای بهبود تحمل تنش غیرزیستی در مهندسی ژنتیک گیاهان است (Bhatnagar-Mathur *et al*., 2008).

---

[۱] Genomic Selection
[۲] Marker Assisted Selection
[۳] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo

جدول ۶- تأثیر ژن‌های مسئول در افزایش تحمل خشکی در گیاهان مختلف

ژن مسئول	گیاه	وظیفه	منبع
TaNAC69	گندم	افزایش تحمل به خشکی	**Budak and Kantar *et al*. (2013)**
NF-YB2	ذرت	در شرایط خشک‌سالی باعث افزایش عملکرد و سرعت فتوسنتز می‌شود	**Vandenbroucke and Metzlaff *et al*. (2013)**
AP37, OSNAC10	برنج	تحمل به خشکی و عملکرد دانه افزایش یافت	**Oh et al. (2013)**
P5C5	سویا	بهبود تحمل به خشکی	**Valliyodan and Nguyen *et al*. (2006)**
SodEFF3	نیشکر	تحمل به خشکی افزایش یافت	**Trujillo *et al*. (2008)**
HSP70-1	تنباکو	سازوکارهای تحمل به تنش خشکی افزایش یافت	**Cho and Hong *et al*. (2006)**

۱۴_ مهندسی متابولیک و استراتژی تحمل تنش

یکی از بهینه‌ترین راه‌حل‌ها برای مقابله با تنش خشکی، توسعه گیاهان زراعی متحمل به خشکی است (Ullah *et al*., 2018). بنابراین، یک چالش بزرگ افزایش تحمل به خشکی بدون تأثیر قابل‌توجه بر عملکرد دانه است. القای تحمل به خشکی در گیاهان از طریق مهندسی متابولیک، درنتیجه افزایش متابولیت‌های مرتبط با تنش، به‌عنوان یک استراتژی بهینه در نظر گرفته می‌شود (Naghshbandi *et al*., 2019). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بهنژادی موفق برای تحمل به خشکی از طریق مهندسی مسیر بیوسنتز رافینوز یکی از استراتژی‌های کلاسیک است. تجمع رافینوز و گالاکتینول در گیاهانی که در شرایط کمبود آب رشد می‌کنند از طریق ژن گالاکتینول سنتاز (*AtGolS*) با ژن اختصاصی *AtGolS2* تحریک می‌شود که به‌ویژه تحت تنش خشکی تحریک می‌شود (Salvi *et al*., ۲۰۲۰). بیان این ژن در گیاهان باعث افزایش سطح رافینوز و گالاکتینول می‌شود و درنتیجه تحمل به خشکی را در گیاهان افزایش می‌دهد که از آن‌ها در برابر تنش اکسیداتیو نیز محافظت می‌کند. رافینوز و گالاکتینول هر دو پتانسیل محافظت از سلول تحت تنش‌های محیطی از طریق جذب ROS و املاح سازگار را نشان می‌دهند (Salvi *et al*., 2020). در

این راستا، افزایش سطح رافینوز و گالاکتینول تحت آنالیز متابولوم برنج و سویا نشان‌دهنده پاسخ آن‌ها به تنش خشکی بود. ترا ریزش گیاه زراعی از طریق انتقال ژن *AtGolS2* مقاومت گیاهان را در برابر تنش در محیط‌های خشک فعال می‌کند. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که کاربرد *AtGolS2* به گیاهان ترا ریخته نه‌تنها تحمل به خشکی را افزایش می‌دهد، بلکه عملکرد دانه را نیز بهبود می‌بخشد (Selvaraj *et al*., 2017). بنابراین، مهندسی متابولیک AtGolS2 یک رویکرد مفید و یک ابزار مهم برای افزایش عملکرد دانه در شرایط کمبود آب در نظر گرفته می‌شود (Honna *et al*., 2016).

۱۵_ چالش‌ها و فرصت‌های رویکرد فضایی و زمانی در مواجهه با تنش خشکی

تهدید تغییرات آب‌وهوایی برای حفاظت از تنوع زیستی در بوم نظام‌ها منجر به نیاز فوری به توسعه روش‌های جدید برای تشخیص و پایش تنش خشکی شده است که می‌تواند در بوم نظام‌های طبیعی اعمال شود. تکنیک‌های سنجش‌ازدور اطلاعات شیمیایی و فیزیکی یک گیاه را در مقیاس بزرگ فراهم می‌کنند و به‌طور هم‌زمان نظارت مستمر وضعیت پوشش گیاهی را انجام می‌دهند. بنابراین، آن‌ها به‌طور گسترده‌ای در نظارت بر اکوسیستم مبتنی بر پوشش گیاهی استفاده می‌شوند (Galieni, 2021). سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS[۱]) برای رسیدگی به مسائل مختلف فضایی و زمانی در مدیریت منابع آب و آبیاری تکامل‌یافته‌اند. GIS قادر به گرفتن، ذخیره‌سازی، دست‌کاری، مدیریت و تجزیه‌وتحلیل مجموعه داده‌های جغرافیایی و تولید خروجی است. درنتیجه، این‌یک ابزار ضروری در تخصیص منابع، مدل‌سازی، بهینه‌سازی و فرآیندهای تصمیم‌گیری است. می‌توان سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور (RS[۲]) را به‌عنوان ابزارهای مؤثر و قدرتمند برای شناسایی پوشش زمین و تغییر کاربری زمین به رسمیت شناخت. در ترکیب با سایر ابزارها، GIS برای درک وضعیت سلامت گیاه، آلودگی، آفات، عملکرد بالقوه، شرایط خاک، شناسایی محصول، برآورد مساحت محصول و مدیریت آب کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد (Gebeyehu, 2019). روش‌های سنجش‌ازدور، فناوری خود را بر توانایی تشخیص تغییرات در رابطه بین تابش الکترومغناطیسی و گیاهان استوار می‌کنند. این روش‌ها شامل حسگرهای بازتابی [در طیف مرئی (۰٫۴-۰٫۷ میکرومتر)، مادون‌قرمز نزدیک (۰/۷-۱/۳ میکرومتر)، یا مادون‌قرمز موج‌کوتاه

[۱] Geographical Information Systems
[۲] Remote Sensing

(۲,۵-۱,۳ میکرومتر)]، سنسورهای حرارتی مادون‌قرمز ((TIRSو حسگرهای فلورسانس هستند. علاوه بر این، حسگرهای راه دور می‌توانند حسگرهای غیر تصویربرداری باشند که فقط داده‌های طیفی را ارائه می‌دهند، یا حسگرهای تصویربرداری که داده‌های طیفی را با اطلاعات مکانی تکمیل می‌کنند. وضوح اندازه‌گیری بسته به چند طیفی یا فرا طیفی بودن حسگرها متفاوت است و به ترتیب به حدود ۱ تا ۱۰ نانومتر متغیر است یا تا ۵۰ نانومتر می‌رسد. منطقه اندازه‌گیری تحت پوشش تا حد زیادی بسته به سرمایه‌گذاری اولیه در دستگاه متفاوت است (از تک‌برگ، به‌عنوان‌مثال با استفاده از کلروفیل‌متر SPAD، تا بررسی مناطق دارای پوشش گیاهی وسیع که توسط تجهیزاتی که دارای تصویربرداری‌های چند طیفی با وضوح‌بالا قابل‌بررسی هستند). رویکرد سنجش‌ازدور، شرایط تنش‌زا مانند تنش خشکی را به شیوه‌ای سریع و غیر مخرب تشخیص می‌دهد (Burnett *et al*., 2021). بااین‌حال، این تکنیک‌ها شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری بالایی هستند که از تنظیمات پلتفرم، سیستم‌های کالیبراسیون، و جمع‌آوری و پردازش داده‌ها ناشی می‌شود و ممکن است برای برخی از آزمایشگاه‌ها مقرون‌به‌صرفه نباشد. دسترسی آزاد به تحقیقات نه‌تنها باید شامل دانش، بلکه شامل تجهیزات و فناوری نیز باشد، زیرا آن‌ها منابع اطلاعاتی بسیار ارزشمندی هستند که اطلاعات مکانی و زمانی منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهند. داده‌های سنجش‌ازدور که در حال حاضر از مناطق وسیع پوشش گیاهی تحت پوشش ماهواره‌ها خبر می‌دهد، در برنامه‌های مختلف (مثلاً مأموریت Sentinel-2 آژانس فضایی اروپا) آزادانه در دسترس است، اما باید با داده‌های مکانی-زمانی دقیق‌تر تکمیل شود. علاوه بر این، متابولیسم گیاهی و ترانس‌کریپتومیکس که نشانگرهای زیستی تنش خاصی را اندازه‌گیری می‌کند این روش در مقیاس کاملاً متفاوتی اطلاع‌رسانی می‌کند، بدون شک پاسخ گیاه را به تنش‌های محیطی، ازجمله تنش خشکی به روشی بی‌سابقه روشن می‌کند (Obata and Fernie, 2012). درواقع، رشد تصاعدی در تعداد مطالعات "اومیکس" با توان عملیاتی بالا در مورد تشخیص عوامل تنش‌زای گیاهی در دهه گذشته وجود داشته که تا حدی باهدف بهبود تحمل به خشکی در محصولات تقویت‌شده است (Michaletti *et al*., 2018; Kumar *et al*., ۲۰۲۱). بااین‌حال، این نوع رویکردها در مطالعات پوشش گیاهی طبیعی به دلیل سرمایه‌گذاری زیاد، بسیار محدودتر است. علی‌رغم مزایای ارائه‌شده توسط تکنیک‌های Omics این رویکردها به دلیل گران بودن زیرساخت موردنیاز هنوز هم توسط اکثر

[۱] Thermal Infrared Sensor

آزمایشگاه‌های جهان قابل پرداخت نیست.

۱۶_ نقش کشاورزی هوشمند در کاهش تنش خشکی

در زمان کنونی در اثر افزایش جمعیت جهانی نیاز به تأمین غذا بیشتر شده و از طرف دیگر کمبود آب, انرژی و زمین‌های قابل‌کشت امکان پاسخ‌گویی به کشاورزی سنتی جهت تأمین نیاز غذایی بشر را نمی‌دهد. لذا کشاورزی هوشمند بیش‌ازپیش موردتوجه قرار گرفته است. یک فناوری نوین که توان ارائه راه‌حل‌های بسیاری جهت به‌روز نمودن کشاورزی را می‌دهد اینترنت اشیاء (IoT[۱]) است. این فناوری می‌تواند اطلاعات قابل‌اطمینانی در مورد بذوری که باید کشت شوند میزان بذور، بهترین تاریخ کاشت و برداشت و همچنین در خصوص پیش‌بینی میزان محصولی که برداشت می‌شود را به کشاورز ارائه می‌دهد (فرخی و گاپله، ۱۳۹۸). اینترنت اشیاء یک شبکه مشترک از اشیاء که از طریق اینترنت و بدون نیاز به عوامل انسانی می‌توانند باهم ارتباط برقرار کنند و از سه لایه تشکیل شده است که شامل لایه اول ادراک یا حسگر که در این لایه از فناوری‌هایی مانند شبه حسگرهای بی‌سیم (WSN[۲]) و شناسایی با استفاده از امواج رادیویی (RFID[۳]) استفاده می‌شود (فرخی و گاپله، ۱۳۹۸)، لایه انتقال داده و یا شبکه که وظیفه آن تأمین امکانات شبکه‌ای موردنیاز است که امکان مبادله حجم بالای داده را فراهم می‌کند (IoTworm.com, 2016). درنهایت لایه ذخیره و تجزیه‌وتحلیل داده یا لایه کاربرد است که مدل‌سازی فرآیندها و مدیریت سیستم، جریان داده‌ها و اطلاعات و همین‌طور تجمیع فرآیندهای دستیابی به اطلاعات وظیفه این لایه است (فرخی و گاپله، ۱۳۹۸).

آبیاری مناسب برای انجام فعالیت‌های کشاورزی امری ضروری است، در حالت کمبود آب و آبیاری بیش‌ازحد محصولات زراعی آسیب می‌بینند. لذا تأمین آب در زمان مناسب و به‌اندازه کافی برای رشد محصول حیاتی است در این میان فناوری اینترنت اشیاء راه‌حلی برای تأمین نیاز آبی و بهینه‌سازی مصرف آب فراهم نموده است. در این فناوری با استفاده از حسگرهای مستقر در خاک، آب موردنیاز برای محصول تجزیه‌وتحلیل می‌شود. هدف از پایش خاک، اندازه‌گیری رطوبت خاک از طریق استفاده از فناوری‌های مبتنی بر سیستم آبیاری هوشمند

---

[۱] Internet of Things
[۲] Wireless Sensor Network
[۳] Radio Frequency Identification

است. سنسورهای رطوبت خاک در منطقه ریشه درختان، درختچه‌ها یا گیاهان زراعی قرار داده می‌شوند که اقدام به اندازه‌گیری دقیق سطح رطوبت در خاک و انتقال اطلاعات به سرور می‌کنند. با استفاده از این روش، اطلاعات حیاتی برای درک چگونگی، طراحی و انجام فعالیت‌های مرتبط انجام می‌شود (Roy and Ansari, 2014). درعین‌حال که استفاده از اینترنت اشیاء در سیستم‌های آبیاری دارای محاسنی است اما معایبی نیز در استفاده از این فناوری وجود دارد که در جدول ۷ به منافع و در جدول ۸ موانع استفاده از اینترنت اشیاء در سیستم‌های آبیاری اشاره می‌شود (Obaideen *et al*., 2022).

جدول ۷- منافع استفاده از اینترنت اشیاء در سیستم‌های آبیاری

مدیریت بهتر محصولات زراعی	رشد بهینه برای محصولات	مانیتور کردن تولیدات در تمام اوقات	پیش‌بینی و انتخاب تصمیم مناسب	کاهش مصرف آب در طول دوره	ممانعت از بیماری‌ها	حفظ ساختمان و مواد غذایی خاک	کاهش استفاده از منابع	پروسه پاک‌تر و مؤثرتر

جدول ۸- موانع استفاده از اینترنت اشیاء در سیستم‌های آبیاری

هزینه بالای تجهیزات	تجهیزات سخت‌افزاری در معرض شرایط سخت محیطی قرار دارند	سیگنال‌های ارتباطی ضعیف	عدم وجود اینترنت قابل‌قبول در تمامی مناطق	فقر اطلاعاتی کشاورزان از اینترنت اشیاء و نرم‌افزارها	کمی امنیت برای تجهیزات و سرور	کمی طول عمر باطری تجهیزات

ربات‌ها به‌عنوان یکی از کارآمدترین راه‌های انجام فعالیت‌های مربوط به آبیاری شناخته‌شده‌اند و بسیاری از سازمان‌ها در شرایط کنونی از این فناوری استفاده می‌کنند. پیشرفت در فناوری ربات نیز همراه با ابزار و پیامدهای آن‌ها انجام می‌شود. کار ربات بی‌سیم شامل نظارت بر خاک و نظارت بر محیط‌زیست است تا بتواند وظایفی مانند پاشش آب، حرکت در مزرعه و فعالیت‌های دیگر را انجام دهد (Krishna *et al*., 2017).

اینترنت اشیاء و وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین: نظارت بر محصول، حس صحیح محدودیت‌های مختلف یک مزرعه را بیان می‌کند، مشاهده خودکار از ویژگی‌های اولیه کشاورزی هوشمند است. سنسورهایی که موقعیت مناسبی دارند ممکن است به‌صورت

خودکار داده‌ها را شناسایی کرده و به یک درگاه انتقال دهند. بررسی و کنترل تکمیلی شاخص سطح برگ، رنگ، ارتفاع بوته، شکل، اندازه برگ‌ها و غیره از طریق سنسورها برای تنظیم محدودیت‌های محصول استفاده می‌شود (Rao and Sridhar, 2018). علاوه بر این، اینترنت اشیا و پهپاد همچنین ممکن است برای مدیریت رطوبت خاک و محدودیت‌های آب کشاورزی مانند pH نیز استفاده شوند همچنین پارامترهای هواشناسی شامل سرعت باد، جهت باد، بارندگی، تشعشع، فشار هوا، دما، رطوبت نسبی و غیره از این طریق اندازه‌گیری می‌شوند. به دلیل سادگی سنسورها، پهپادهای ارتفاعی می‌توانند حسگرهای راه دور را به هم متصل کنند، بنابراین محصولات را به‌سرعت و مقرون‌به‌صرفه مدیریت کنند. درنتیجه می‌توانند، ضبط تصویرهای با وضوح‌بالا در اثر حذف انواع موقعیت‌های نابجا، مانند آب‌وهوا داشته باشند (Balaji *et al*. 2018). با توجه به اینکه پهپادهای کشاورزی با دوربین به‌خوبی قادر به نشان دادن نقاط دارای مشکل در مزرعه هستند. لذا کشاورزان ممکن است از این توانایی دوربین‌ها برای تنظیم مناطق کم رطوبت خاک، محصولات دچار تنش خشکی شده و مناطق پر از آب نیز استفاده کنند، علاوه بر این شناخت بهتری از سلامت کلی محصولات نصیب زارع می‌شود (Darshna *et al*. 2015). در کشاورزی سنتی، چنین نظارت دقیقی یا غیرممکن بود و یا به دلیل نیاز به استخدام متخصصان برای انجام کار و ارائه نتایج مناسب بسیار پرهزینه بود. بااین‌حال، در حال حاضر، پهپادها به کشاورزان کمک می‌کنند تا مزایای بیشتری را با اجازه دادن به آن‌ها برای سازمان‌دهی عملیات خود فراهم کنند.

۱۷_ استفاده از هوش مصنوعی در فنومیکس گیاهان جهت کاهش تنش خشکی

با افزایش جمعیت نیاز به تولید غذا برای مطابقت با رشد پیش‌بینی‌شده به‌منظور جلوگیری از ناامنی غذایی، توسعه فنوتیپ مطلوب گیاهی در مقایسه با توسعه ژنوتیپ در خط مقدم اصلاح نباتات قرار دارد (Costa *et al*., 2019). فنوتیپ گیاهی به‌عنوان عاملی جهت ارزیابی صفاتی مانند رشد، نمو، تحمل، مقاومت فیزیولوژی، اکولوژی، عملکرد و جهت اندازه‌گیری اولیه پارامترهای کمی فردی که مبنای ارزیابی صفات پیچیده را تشکیل می‌دهند، تعریف می‌شود. دانشمندان به‌طور فزاینده‌ای به استفاده از داده‌های فنوتیپی برای کمک به همبستگی بین ژنوتیپ و تنوع در عملکرد محصول و سلامت گیاه علاقه‌مند هستند (Arvidsson *et al*., 2011). به‌این‌ترتیب، توسعه فنوتیپ گیاهی به جنبه‌ای مهم در

بهبود محصول تبدیل‌شده است و از داده‌ها برای ارزیابی صفات برای انتخاب رقم به‌منظور شناسایی صفات مطلوب و حذف صفات نامطلوب در طول ارزیابی جمعیت‌های گیاهی استفاده می‌شود (Pauli, 2015). داده‌های بزرگ موردنیاز برای مطالعه مؤثر فنوتیپ‌ها منجر به توسعه و استفاده از فناوری‌های توسعه فنوتیپ با توان عملیاتی بالا جهت شناسایی تعداد زیادی از گیاهان در کسری از زمان شده است. تکنیک‌های سنتی قبلاً جهت اندازه‌گیری‌های به تخریب گیاه نیاز داشتند که به‌موجب آن محصولات در مراحل رشد خاصی برداشت می‌شدند تا آزمایش‌های ژنتیکی و نقشه‌برداری از صفات گیاهی انجام شود (Furbank and Tester, 2011). ازآنجایی‌که برنامه‌های اصلاحی محصولات به آزمایش‌های تجربی مکرر نیاز دارند، این فرآیند کند، پرهزینه و به‌طور قابل‌توجهی از فناوری‌های توالی‌یابی DNA که برای بهبود محصول ضروری هستند عقب مانده بود (Fahlgren *et al*., 2015). توسعه فنوتیپ با توان بالا توسط تکنیک‌های تصویربرداری بدون ضرر تقویت‌شده است، که تجسم ساختارهای سلولی گیاهی را در مقیاس وسیع‌تری ممکن می‌سازد. همان‌طور که این فناوری‌های تصویربرداری توسعه می‌یابند، تصاویر حاوی اطلاعات قابل‌استخراج مفیدتری هستند که از تفسیرهای بیولوژیکی رشد گیاه پشتیبانی می‌کنند (Chen *et al*., 2014). این تکنیک‌ها شامل تصویربرداری حرارتی (Oerke *et al*., 2006)، فلورسانس کلروفیل (Zarco-tejada *et al*., 2009)، تصویربرداری دیجیتال (Jensen *et al*., 2007) و تصویربرداری طیف‌سنجی (Montes *et al*., 2006) است. ادغام هوش مصنوعی در این فناوری‌ها به توسعه جنبه تصویربرداری غیرتهاجمی فنومیک کمک کرده است. فناوری‌های هوش مصنوعی در قالب بینایی رایانه‌ای و یادگیری ماشین به‌طور فزاینده‌ای برای به دست آوردن و تجزیه‌وتحلیل داده‌های تصویر گیاهی مورداستفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های بینایی رایانه‌ای، تصاویر دیجیتالی گیاهان را پردازش می‌کنند تا ویژگی‌های خاص را برای اهداف تشخیص اشیاء شناسایی کنند (Casanova *et al*., 2014). یادگیری ماشین، از ابزارها و رویکردهای مختلفی ازجمله مجموعه فنوتیپ‌های محصول به‌منظور طبقه‌بندی داده‌های منحصربه‌فرد، شناسایی الگوها و ویژگی‌های جدید و پیش‌بینی روندهای جدید جهت یادگیری استفاده می‌کند (Shakoor *et al*., 2017). پیشرفت‌های اخیر در یادگیری عمیق، زیرمجموعه‌ای از یادگیری ماشین، نتایج امیدوارکننده‌ای را برای تجزیه‌وتحلیل تصویر بلادرنگ ارائه کرده است.

به‌طور سنتی، اندازه‌گیری صفات گیاهی قابل‌مشاهده با نمونه‌برداری مخرب و به دنبال آن

ارزیابی‌های آزمایشگاهی برای مشخص کردن فنوتیپ‌ها بر اساس عملکرد ژنتیکی آن‌ها انجام می‌شود. با توجه به پیشرفت فناوری در هوش مصنوعی، تکنیک‌های تصویربرداری (نمای کلی در جدول ۹) به‌عنوان ابزار مهمی برای نمونه‌برداری غیر مخرب ظاهر شده‌اند که امکان ضبط تصویر، پردازش داده‌ها و تجزیه‌وتحلیل را برای تعیین صفات قابل‌مشاهده گیاه فراهم می‌کند. داده‌های مکانی یا زمانی بسیاری از کلاس‌های فنوتیپ مانند مورفولوژی و ویژگی‌های هندسی، رفتار، وضعیت فیزیولوژیکی و مکان‌های پروتئین و متابولیت‌ها را می‌توان با جزئیات دقیق با تصویربرداری ضبط کرد. به همین دلیل، تکنیک‌های تصویربرداری امکان غربالگری با توان بالا و تجزیه‌وتحلیل تصویر در زمان واقعی تغییرات فیزیولوژیکی در جمعیت‌های گیاهی را فراهم کرده است. در مقیاس آزمایشگاهی، روش‌های مختلف تصویربرداری به‌صورت جداگانه آزمایش می‌شوند. یکی، یا ترکیبی از بهترین روش‌های مناسب برای نظارت بر محصول، هم در محیط‌های کنترل‌شده و هم در محیط‌های مزرعه استفاده می‌شود (Houle *et al.*, 2010). هوش مصنوعی می‌تواند با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تصاویر ماهواره‌ای ثبت‌شده بر فراز زمین، وضعیت آب و هوایی را با دقت بالایی پیش‌بینی، پایداری محصولات کشاورزی را تحلیل و مقادیر بهینه آب، دما و سایر نهاده‌های تولید محصول را تعیین کند. بنابراین استفاده از فناوری هوش مصنوعی علاوه بر ارتقای بهره‌وری در بخش کشاورزی و تأمین امنیت غذایی می‌تواند بحران‌های آبی و تنش خشکی که در پی آن رخ می‌دهد را حداقل به تأخیر بیندازد و احتمال وقوع چنین بحران‌هایی را کاهش دهد.

جدول ۹- تکنیک‌های تصویربرداری مورداستفاده در هوش مصنوعی در بخش کشاورزی

تکنیک تصویربرداری	برنامه کاربردی	منبع
فلورسانس	ویژگی‌های فتوسنتز، ترکیب متابولیت و آلودگی پاتوژن	Cen *et al*. (2017)
تصویربرداری RGB	ویژگی‌های فتوسنتز، آلودگی پاتوژن و کمبودهای تغذیه‌ای	Zheng *et al*. (2020) Padmavathi et al. (2016)
ترموگرافی	مدیریت آب، ویژگی‌های تعرق، ساختار بافت و متابولیت‌ها، پایش فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی فرآیندهایی که درون گیاه رخ می‌دهند.	Wang *et al*. (2010) Urrestarazu (2013) Fittschen *et al*. (2017)
طیف‌سنجی	شناسایی پاسخ‌های فیزیولوژیکی، پاتوژن‌ها، آفات رشد، حرکات ساختار سطحی و محتوای رنگ‌دانه	Behman *et al*. 92014)

۴. نتیجه‌گیری

در اثر تغییرات آب‌وهوایی اخیر، هر دو تنش زیستی و غیرزیستی یک تهدید جدی برای امنیت غذایی جهانی و پایداری تولیدات گیاهی هستند. در میان تنش‌های غیرزیستی، تنش خشکی به دلیل تأثیر نامطلوب آن بر رشد و نمو گیاهان و کاهش قابل‌توجه عملکرد و زیست‌توده گیاهی که باعث ناامنی غذایی جهانی می‌شود، موردتوجه قرارگرفته است. تنش خشکی روی گیاهان در طول چرخه زندگی یعنی از جوانه‌زنی تا بلوغ تأثیر می‌گذارد. برخی از فرآیندهای فیزیولوژیکی، متابولیکی و بیوشیمیایی تحت تأثیر تنش خشکی قرار می‌گیرند که بهره‌وری گیاه را مختل می‌کنند. برای مقابله با اثرات نامطلوب تنش خشکی بر گیاهان، سازوکارهای خاصی توسط گیاهان اتخاذ می‌شود که تحمل به خشکی را افزایش می‌دهد. بنابراین، نیاز به بررسی ویژگی‌های سازگاری دست‌نخورده در گیاهان مختلف و ادغام آن‌ها با ژنوتیپ‌هایی است که ممکن است اثرات نامطلوب تنش خشکی را تحمل کنند یا بر بهره‌وری آن تأثیر نگذارند. فناوری‌های بهنژادی پتانسیل بیشتری برای افزایش عملکرد گیاه و تولید در شرایط کم‌آبی دارد. رویکردهای خاصی برای مقابله با خشک‌سالی در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. الگوی رشد و پویایی ساختاری، کاهش از دست دادن تعرق از طریق تغییر و توزیع رسانایی روزنه، پیچاندن برگ، دینامیک نسبت ریشه به اندام هوایی، افزایش طول ریشه، تجمع املاح سازگار، افزایش راندمان تعرق، تنظیم اسمزی و هورمونی و پیری تأخیری، راهکارهایی هستند که می‌توانند توسط گیاهانی که در شرایط کمبود آب رشد می‌کنند پذیرفته شود. برای بهبود تحمل به تنش خشکی در گیاهان، استراتژی‌های اصلاحی خاص، از طریق استفاده از هوش مصنوعی و همچنین دیدگاه‌های مولکولی و ژنومیک با تأکید ویژه بر تغییر فناوری اومیکس یعنی رویکردهای متابولومیکس، پروتئومیکس، ژنومیکس، گلایومیکس و فنومیکس از ارزش بالایی برخوردار هستند. روش‌های دیگری که شامل پرایمینگ بذر، هورمون‌های رشد، محافظت‌کننده‌های اسمزی می‌شود، ارزش استفاده در شرایط آب کم در گیاهان را دارند. باوجوداین، اثر مفید میکروب‌ها، هیدروژل، کاربردهای نانو ذرات و تکنیک‌های مهندسی متابولیک همچنین فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی را برای سازگاری با تنش خشکی در گیاهان تنظیم می‌کند، تحمل گیاه را از طریق نگهداری در هموستاز سلولی افزایش می‌دهد و اثرات نامطلوب تنش آبی در گیاهان را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این استفاده از فناوری هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء می‌تواند ما را در جهت استفاده بهینه از آب و جلوگیری از ایجاد تنش خشکی در مزرعه یاری نماید. این

استراتژی‌های نوآورانه درک بهتر و بالقوه افزایش بهره‌وری گیاه در محیط‌های خشک را به‌منظور کاهش تهدید امنیت غذایی جهانی ارائه می‌کنند.

فهرست منابع:

۱. فرخی، غلامرضا، و گاپله، محبوبه. (۱۳۹۸). کشاورزی هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء. رشد فناوری، ۱۵(۵۹)، ۳۶-۲۹.

۲. Abideen, Z., Koyro, H. W., Huchzermeyer, B., Ansari, R., Zulfiqar, F., & Gul, B. J. P. B. (2020). Ameliorating effects of biochar on photosynthetic efficiency and antioxidant defence of Phragmites karka under drought stress. *Plant Biology*, *22*(2), 259-266.

۳. Afshar, R., Hashemi, M., DaCosta, M., Spargo, J., & Sadeghpour, A. (2016). Biochar application and drought stress effects on physiological characteristics of Silybum marianum. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *47*(6), 743-752.

٤. Ahmed, E. M., El-Tohamy, W. A., El-Abagy, H. M. H., Aggor, F. S., & Nada, S. S. (2015). Response of snap bean plants to super absorbent hydrogel treatments under drought stress conditions. *Current Science International*, *4*(3), 467-472.

٥. Ahn, C., Park, U., & Park, P. B. (2011). Increased salt and drought tolerance by D-ononitol production in transgenic Arabidopsis thaliana. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *415*(4), 669-674.

٦. Ali, F., Ahsan, M., Ali, Q., & Kanwal, N. (2017). Phenotypic stability of Zea mays grain yield and its attributing traits under drought stress. *Frontiers in plant science*, *8*, 1397.

۷. Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Ibrahim, M., Riaz, M., & Shahzad, A. N. (2017). Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 12700-12712.

۸. Ansari, F. A., Jabeen, M., & Ahmad, I. (2021). Pseudomonas azotoformans FAP5, a novel biofilm-forming PGPR strain, alleviates drought stress in wheat plant. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *18*, 3855-3870.

۹. Araujo, S. S., Beebe, S., Crespi, M., Delbreil, B., Gonzalez, E. M., Gruber, V., ... & Patto, M. C. V. (2015). Abiotic stress responses in legumes: strategies used to cope with environmental challenges. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *34*(1-3), 237-280.

۱۰. Arvidsson, S., Pérez-Rodríguez, P., & Mueller-Roeber, B. (2011). A growth phenotyping pipeline for Arabidopsis thaliana integrating image analysis and rosette area modeling for robust quantification of genotype effects. *New Phytologist*, *191*(3), 895-907.

۱۱. Ashkavand, P., Tabari, M., Zarafshar, M., Tomásková, I., & Struve, D. (2015). Effect of SiO2 nanoparticles on drought resistance in hawthorn seedlings. *Leśne Prace Badawcze*, *76*(4).

۱۲. Ashraf, M., Akram, N. A., Al-Qurainy, F., & Foolad, M. R. (2011). Drought

tolerance: roles of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. *Advances in agronomy*, *111*, 249-296.

۱۳. Aslam, M., Maqbool, M. A., & Cengiz, R. (2015). Drought stress in maize (zea maysl.) Effects, resistance mechanisms, global achievements and. *Cham: Springer*.

۱٤. Balaji, G. N., Nandhini, V., Mithra, S., Priya, N., & Naveena, R. (2018). IoT based smart crop monitoring in farm land. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, *4*(1), 88-92.

۱٥. Bashir, K., Todaka, D., Rasheed, S., Matsui, A., Ahmad, Z., Sako, K., & Seki, M. (2022). Ethanol-mediated novel survival strategy against drought stress in plants. *Plant and Cell Physiology*, *63*(9), 1181-1192.

۱٦. Batista, R. A., Otoni, C. G., & Espitia, P. J. (2019). Fundamentals of chitosan-based hydrogels: elaboration and characterization techniques. *Materials for Biomedical Engineering*, 61-81.

۱۷. Behmann, J., Steinrücken, J., & Plümer, L. (2014). Detection of early plant stress responses in hyperspectral images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *93*, 98-111.

۱۸. Bertolino, L. T., Caine, R. S., & Gray, J. E. (2019). Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world. *Frontiers in plant science*, *10*, 225.

۱۹. Bhargava, S., & Sawant, K. (2013). Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression. *Plant breeding*, 132(1), 21-32.

۲۰. Bhatnagar-Mathur, P., Vadez, V., & Sharma, K. K. (2008). Transgenic approaches for abiotic stress tolerance in plants: retrospect and prospects. *Plant cell reports*, *27*, 411-424.

۲۱. Bray, E. (2007). Plant response to water deficit stress. In Encyclopedia of Life Sciences (ELS); John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, Volume 1, pp. 1–7.

۲۲. Brito, C., Dinis, L. T., Moutinho-Pereira, J., & Correia, C. M. (2019). Drought stress effects and olive tree acclimation under a changing climate. *Plants*, *8*(7), 232.

۲۳. Brown, P. J., Upadyayula, N., Mahone, G. S., Tian, F., Bradbury, P. J., Myles, S., ... & Rocheford, T. R. (2011). Distinct genetic architectures for male and female inflorescence traits of maize. *PLoS genetics*, *7*(11), e1002383.

۲٤. Bryant, C., Fuenzalida, T. I., Brothers, N., Mencuccini, M., Sack, L., Binks, O., & Ball, M. C. (2021). Shifting access to pools of shoot water sustains gas exchange and increases stem hydraulic safety during seasonal atmospheric drought. *Plant, Cell & Environment*, *44*(9), 2898-2911.

۲٥. Budak, H., Kantar, M., & Yucebilgili Kurtoglu, K. (2013). Drought tolerance in modern and wild wheat. *The Scientific World Journal*, *2013*.

۲٦. Burnett, A. C., Serbin, S. P., Davidson, K. J., Ely, K. S., & Rogers, A. (2021). Detection of the metabolic response to drought stress using hyperspectral reflectance. *Journal of Experimental Botany*, *72*(18), 6474-6489.

۲۷. Casanova, J. J., O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., & Rush, C. M. (2014). Development of a wireless computer vision instrument to detect biotic stress in wheat. *Sensors*, *14*(9), 17753-17769.

۲۸. Cen, H., Weng, H., Yao, J., He, M., Lv, J., Hua, S., ... & He, Y. (2017). Chlorophyll fluorescence imaging uncovers photosynthetic fingerprint of citrus

Huanglongbing. *Frontiers in plant science*, *8*, 1509.
۲۹. Chandra, D., Srivastava, R., Gupta, V. V., Franco, C. M., Paasricha, N., Saifi, S. K., & Sharma, A. K. (2019). Field performance of bacterial inoculants to alleviate water stress effects in wheat (Triticum aestivum L.). *Plant and soil*, *441*, 261-281.
۳۰. Chen, D., Neumann, K., Friedel, S., Kilian, B., Chen, M., Altmann, T., & Klukasa, C. Dissecting the Phenotypic Components of Crop Plant Growth and Drought Responses Based on High-Throughput Image AnalysisW OPEN.
۳۱. Chiappero, J., del Rosario Cappellari, L., Alderete, L. G. S., Palermo, T. B., & Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in Mentha piperita grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products*, *139*, 111553.
۳۲. Cho, E. K., & Hong, C. B. (2006). Over-expression of tobacco NtHSP70-1 contributes to drought-stress tolerance in plants. *Plant cell reports*, *25*, 349-358.
۳۳. Choudhury, F. K., Rivero, R. M., Blumwald, E., & Mittler, R. (2017). Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *The Plant Journal*, *90*(5), 856-867.
۳۴. Costa, C., Schurr, U., Loreto, F., Menesatti, P., & Carpentier, S. (2019). Plant phenotyping research trends, a science mapping approach. *Frontiers in plant science*, *9*, 1933.
۳۵. Crossa, J., Perez, P., Hickey, J., Burgueno, J., Ornella, L., Cerón-Rojas, J., & Mathews, K. (2014). Genomic prediction in CIMMYT maize and wheat breeding programs. *Heredity*, *112*(1), 48-60.
۳۶. Curin, F., Severini, A. D., Gonzalez, F. G., & Otegui, M. E. (2020). Water and radiation use efficiencies in maize: Breeding effects on single-cross Argentine hybrids released between 1980 and 2012. *Field Crops Research*, *246*, 107683.
۳۷. Darshna, S., Sangavi, T., Mohan, S., Soundharya, A., & Desikan, S. (2015). Smart irrigation system. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, *10*(3), 32-36.
۳۸. Davar, Z. F., Roozbahani, A., & Hosnamidi, A. (2014). Evaluation the effect of water stress and foliar application of Fe nanoparticles on yield, yield components and oil percentage of safflower (Carthamus tinctorious L.).1150-1159.
۳۹. Delač, D., Gršić, K., Ninčević, T., Carović-Stanko, K., Varga, F., & Grdiša, M. (2018). The influence of hydropriming and osmopriming with KNO3 on seed germination of dalmatian pyrethrum (Tanacetum cinerariifolium/Trevir./Sch. Bip.). *Agriculturae Conspectus Scientificus*, *83*(3), 205-211.
۴۰. Demidchik, V. (2015). Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. *Environmental and experimental botany*, *109*, 212-228.
۴۱. Ding, Z., Ali, E. F., Elmahdy, A. M., Ragab, K. E., Seleiman, M. F., & Kheir, A. M. (2021). Modeling the combined impacts of deficit irrigation, rising temperature and compost application on wheat yield and water productivity. *Agricultural Water Management*, *244*, 106626.
۴۲. Durukan, H., Demirbas, A., & Turkekul, I. (2020). Effects of biochar rates on yield and nutrient uptake of sugar beet plants grown under drought

stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *51*(21), 2735-2745.

٤٣. Elkelish, A., Qari, S. H., Mazrou, Y. S., Abdelaal, K. A., Hafez, Y. M., Abu-Elsaoud, A. M., ... & El Nahhas, N. (2020). Exogenous ascorbic acid induced chilling tolerance in tomato plants through modulating metabolism, osmolytes, antioxidants, and transcriptional regulation of catalase and heat shock proteins. *Plants*, *9*(4), 431.

٤٤. Etesami, H., & Maheshwari, D. K. (2018). Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and environmental safety*, *156*, 225-246.

٤٥. Fahad, S., Nie, L., Chen, Y., Wu, C., Xiong, D., Saud, S., & Huang, J. (2015). Crop plant hormones and environmental stress. *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 15*, 371-400.

٤٦. Fahlgren, N., Gehan, M. A., & Baxter, I. (2015). Lights, camera, action: high-throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Current opinion in plant biology*, *24*, 93-99.

٤٧. Fang, Y., & Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and molecular life sciences*, *72*, 673-689.

٤٨. Farooq, M. K. H. M., Siddique, K. H., Rehman, H., Aziz, T., Lee, D. J., & Wahid, A. (2011). Rice direct seeding: experiences, challenges and opportunities. *Soil and Tillage Research*, *111*(2), 87-98.

٤٩. Finch-Savage, W. E., Dent, K. C., & Clark, L. J. (2017). Soak conditions and temperature following sowing influence the response of maize (*Zea mays* L.) seeds to on-farm priming (pre-sowing seed soak). *Field Crops Research*, *90*(2-3), 361-374.

٥٠. Fita, A., Rodríguez-Burruezo, A., Boscaiu, M., Prohens, J., & Vicente, O. (2015). Breeding and domesticating crops adapted to drought and salinity: a new paradigm for increasing food production. *Frontiers in Plant Science*, *6*, 978.

٥١. Fittschen, U. E. A., Kunz, H. H., Höhner, R., Tyssebotn, I. M. B., & Fittschen, A. (2017). A new micro X-ray fluorescence spectrometer for in vivo elemental analysis in plants. *X-Ray Spectrometry*, *46*(5), 374-381.

٥٢. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). Overcoming water challenges in agriculture. In The State of Food and Agriculture; FAO, Rome, Italy, 2020.

٥٣. Fu, X., Yang, H., Pangestu, F., & Nikolau, B. J. (2020). Failure to maintain acetate homeostasis by acetate-activating enzymes impacts plant development. *Plant Physiology*, *182*(3), 1256-1271.

٥٤. Furbank, R. T., & Tester, M. (2011). Phenomics–technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in plant science*, *16*(12), 635-644.

٥٥. Galaitsi, S. E., Russell, R., Bishara, A., Durant, J. L., Bogle, J., & Huber-Lee, A. (2016). Intermittent domestic water supply: A critical review and analysis of causal-consequential pathways. *Water*, *8*(7), 274.

٥٦. Galieni, A., D'Ascenzo, N., Stagnari, F., Pagnani, G., Xie, Q., & Pisante, M. (2021). Past and future of plant stress detection: an overview from remote sensing to positron emission tomography. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 609155.

۵۷. García, J. E., Maroniche, G., Creus, C., Suárez-Rodríguez, R., Ramirez-Trujillo, J. A., & Groppa, M. D. (2017). In vitro PGPR properties and osmotic tolerance of different Azospirillum native strains and their effects on growth of maize under drought stress. *Microbiological Research*, *202*, 21-29.

۵۸. Gebeyehu, M. N. (2019). Remote sensing and GIS application in agriculture and natural resource management. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, *19*(2), 45-49.

۵۹. Geng, S. M., Yan, D. H., Zhang, T. X., Weng, B. S., Zhang, Z. B., & Qin, T. L. (2015). Effects of drought stress on agriculture soil. *Natural Hazards*, *75*, 1997-2011.

۶۰. Gimenez, C., Gallardo, M., & Thompson, R.B. (2005). Plant water relations. In Encyclopedia of Soils in the Environment; Hillel, D., Ed.;Elsevier: Oxford, UK, 2005; pp. 231–238.

۶۱. Haider, I., Raza, M. A. S., Iqbal, R., Aslam, M. U., Habib-ur-Rahman, M., Raja, S., & Ahmad, S. (2020). Potential effects of biochar application on mitigating the drought stress implications on wheat (Triticum aestivum L.) under various growth stages. *Journal of Saudi Chemical Society*, *24*(12), 974-981.

۶۲. Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., Laraib, I., Siddique, M. J., Zia, R., ... & Imran, A. (2021). Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *5*, 617157.

۶۳. Honna, P. T., Fuganti-Pagliarini, R., Ferreira, L. C., Molinari, M. D., Marin, S. R., de Oliveira, M. C., & Nepomuceno, A. L. (2016). Molecular, physiological, and agronomical characterization, in greenhouse and in field conditions, of soybean plants genetically modified with AtGolS2 gene for drought tolerance. *Molecular Breeding*, *36*, 1-17.

۶۴. Hou, Q., Ufer, G., & Bartels, D. (2016). Lipid signalling in plant responses to abiotic stress. *Plant, cell & environment*, *39*(5), 1029-1048.

۶۵. Houle, D., Govindaraju, D. R., & Omholt, S. (2010). Phenomics: the next challenge. *Nature reviews genetics*, *11*(12), 855-866.

۶۶. Hu, H., & Xiong, L. (2014). Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. *Annual review of plant biology*, *65*, 715-741.

۶۷. Huang, X., Wei, X., Sang, T., Zhao, Q., Feng, Q., Zhao, Y., & Han, B. (2010). Genome-wide association studies of 14 agronomic traits in rice landraces. *Nature Genetics*, *42*(11), 961-967.

۶۸. Hussain, H. A., Hussain, S., Khaliq, A., Ashraf, U., Anjum, S. A., Men, S., & Wang, L. (2018). Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. *Frontiers in plant science*, *9*, 393.

۶۹. Hussain, M., Farooq, M., & Lee, D. J. (2017). Evaluating the role of seed priming in improving drought tolerance of pigmented and non-pigmented rice. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *203*(4), 269-276.

۷۰. Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A. M., Solaiman, Z. M., Alghamdi, S. S., & Siddique, K. H. (2017). Biochar for crop production: potential benefits and risks. *Journal of Soils and Sediments*, *17*, 685-716.

۷۱. Hwang, E. Y., Song, Q., Jia, G., Specht, J. E., Hyten, D. L., Costa, J., & Cregan, P. B. (2014). A genome-wide association study of seed protein and oil content in

soybean. *BMC genomics*, *15*, 1-12.

۷۲. IoTworm.com. (2016). Agriculture Internet of Things (IoT) Technology Applications. Available: http:// IoTworm.com/agriculture-internet-of-things-IoT-technologyapplications.

۷۳. Jan, S., Abbas, N., Ashraf, M., & Ahmad, P. (2019). Roles of potential plant hormones and transcription factors in controlling leaf senescence and drought tolerance. *Protoplasma*, *256*, 313-329.

۷٤. Javid, M. G., Sorooshzadeh, A., Moradi, F., Modarres Sanavy, S. A. M., & Allahdadi, I. (2011). The role of phytohormones in alleviating salt stress in crop plants. *Australian Journal of Crop Science*, *5*(6), 726-734.

۷٥. Jensen, T., Apan, A., Young, F., & Zeller, L. (2007). Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform. *Computers and electronics in agriculture*, *59*(1-2), 66-77.

۷٦. Kabbadj, A., Makoudi, B., Mouradi, M., Pauly, N., Frendo, P., & Ghoulam, C. (2017). Physiological and biochemical responses involved in water deficit tolerance of nitrogen-fixing Vicia faba. *PLoS one*, *12*(12), e0190284.

۷۷. Kabiraj, A., Majhi, K., Halder, U., Let, M., & Bandopadhyay, R. (2020). Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) for crop stress management. *Sustainable agriculture in the era of climate change*, 367-389.

۷۸. Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The impact of drought in plant metabolism: How to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, *10*(16), 5692.

۷۹. Kaya, C., Sonmez, O., Aydemir, S., Ashraf, M., & Dikilitas, M. (2013). Exogenous application of mannitol and thiourea regulates plant growth and oxidative stress responses in salt-stressed maize (Zea mays L.). *Journal of plant interactions*, *8*(3), 234-241.

۸۰. Kerchev, P., van der Meer, T., Sujeeth, N., Verlee, A., Stevens, C. V., Van Breusegem, F., & Gechev, T. (2020). Molecular priming as an approach to induce tolerance against abiotic and oxidative stresses in crop plants. *Biotechnology advances*, *40*, 107503.

۸۱. Keshavarz Afshar, R., Hashemi, M., DaCosta, M., Spargo, J., & Sadeghpour, A. (2016). Biochar application and drought stress effects on physiological characteristics of Silybum marianum. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *47*(6), 743-752.

۸۲. Key, S., Ma, J. K., & Drake, P. M. (2008). Genetically modified plants and human health. *Journal of the Royal Society of Medicine*, *101*(6), 290-298.

۸۳. Khan, M. N., Mobin, M., Abbas, Z. K., AlMutairi, K. A., & Siddiqui, Z. H. (2017). Role of nanomaterials in plants under challenging environments. *Plant Physiology and Biochemistry*, *110*, 194-209.

۸٤. Khan, M. N., Zhang, J., Luo, T., Liu, J., Rizwan, M., Fahad, S., & Hu, L. (2019). Seed priming with melatonin coping drought stress in rapeseed by regulating reactive oxygen species detoxification: Antioxidant defense system, osmotic adjustment, stomatal traits and chloroplast ultrastructure perseveration. *Industrial Crops and Products*, *140*, 111597.

۸٥. Kim, J. M., To, T. K., Matsui, A., Tanoi, K., Kobayashi, N. I., Matsuda, F., & Seki, M. (2017). Acetate-mediated novel survival strategy against drought in plants. *Nature Plants*, *3*(7), 1-7.

۸۶. Kollers, S., Rodemann, B., Ling, J., Korzun, V., Ebmeyer, E., Argillier, O., & Röder, M. S. (2013). Whole genome association mapping of Fusarium head blight resistance in European winter wheat (Triticum aestivum L.). *PLoS One*, 8(2), e57500.

۸۷. Krishna, K. L., Silver, O., Malende, W. F., & Anuradha, K. (2017, February). Internet of Things application for implementation of smart agriculture system. In *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)* IEEE (pp. 54-59).

۸۸. Kumar, M., Kumar Patel, M., Kumar, N., Bajpai, A. B., & Siddique, K. H. (2021). Metabolomics and molecular approaches reveal drought stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(17), 9108.

۸۹. Kuppusamy, S., Thavamani, P., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., & Naidu, R. (2016). Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: current knowledge and future research directions. *Environment international*, *87*, 1-12.

۹۰. Larcher, W. (2005). Climatic constraints drive the evolution of low temperature resistance in woody plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, *61*(4), 189-202.

۹۱. Lawlor, D. W. (2013). Genetic engineering to improve plant performance under drought: physiological evaluation of achievements, limitations, and possibilities. *Journal of experimental botany*, *64*(1), 83-108.

۹۲. Li, H., Guo, Q., Jing, Y., Liu, Z., Zheng, Z., Sun, Y., & Lai, H. (2020). Application of Streptomyces pactum Act12 enhances drought resistance in wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, *39*, 122-132.

۹۳. Liang, C. (2016). Genetically modified crops with drought tolerance: achievements, challenges, and perspectives. *Drought stress tolerance in plants, Vol 2: Molecular and genetic perspectives*, 531-547.

۹۴. Liang, C., Meng, Z., Meng, Z., Malik, W., Yan, R., Lwin, K. M., & Zhang, R. (2016). GhABF2, a bZIP transcription factor, confers drought and salinity tolerance in cotton (Gossypium hirsutum L.). *Scientific reports*, *6*(1), 1-14.

۹۵. Lisar, S. Y., Motafakkerazad, R., Hossain, M. M., & Rahman, I. M. (2012). Causes, effects and responses. *Water stress*, *25*(1), 33.

۹۶. Liu, C., Zhao, L., & Yu, G. (2011). The dominant glutamic acid metabolic flux to produce γ-amino butyric acid over proline in Nicotiana tabacum leaves under water stress relates to its significant role in antioxidant activity. *Journal of Integrative Plant Biology*, *53*(8), 608-618.

۹۷. Liu, Y., Liu, X., Wang, X., Gao, K., Qi, W., Ren, H., & Zheng, S. (2020). Heterologous expression of heat stress-responsive AtPLC9 confers heat tolerance in transgenic rice. *BMC plant biology*, *20*(1), 1-11.

۹۸. Lo, S. F., Ho, T. H. D., Liu, Y. L., Jiang, M. J., Hsieh, K. T., Chen, K. T., & Yu, S. M. (2017). Ectopic expression of specific GA 2 oxidase mutants promotes yield and stress tolerance in rice. *Plant Biotechnology Journal*, *15*(7), 850-864.

۹۹. Luo, L. J. (2010). Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China. *Journal of experimental botany*, *61*(13), 3509-3517.

۱۰۰. Makarevitch, I., Waters, A. J., West, P. T., Stitzer, M., Hirsch, C. N., Ross-Ibarra, J., & Springer, N. M. (2015). Transposable elements contribute to activation of maize genes in response to abiotic stress. *PLoS genetics*, *11*(1),

e1004915.

۱۰۱. Mathews, J. H., & Campbell, M. M. (2000). The advantages and disadvantages of the application of genetic engineering to forest trees: a discussion. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, *73*(4), 371-380.

۱۰۲. Medici, L. O., Reinert, F., Carvalho, D. F., Kozak, M., & Azevedo, R. A. (2014). What about keeping plants well watered?. *Environmental and Experimental Botany*, *99*, 38-42.

۱۰۳. Medina, S., Vicente, R., Amador, A., & Araus, J. L. (2016). Interactive effects of elevated [CO2] and water stress on physiological traits and gene expression during vegetative growth in four durum wheat genotypes. *Frontiers in plant science*, *7*, 1738.

۱۰۴. Menezes-Silva, P. E., Sanglard, L. M., Ávila, R. T., Morais, L. E., Martins, S. C., Nobres, P., & DaMatta, F. M. (2017). Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. *Journal of Experimental Botany*, *68*(15), 4309-4322.

۱۰۵. Meuwissen, T. H., Hayes, B. J., & Goddard, M. (2001). Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *genetics*, *157*(4), 1819-1829.

۱۰۶. Michaletti, A., Naghavi, M. R., Toorchi, M., Zolla, L., & Rinalducci, S. (2018). Metabolomics and proteomics reveal drought-stress responses of leaf tissues from spring-wheat. *Scientific reports*, *8*(1), 5710.

۱۰۷. Miura, K., & Tada, Y. (2014). Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in plant science*, *5*, 4.

۱۰۸. Montes, J. M., Utz, H. F., Schipprack, W., Kusterer, B., Muminovic, J., Paul, C., & Melchinger, A. E. (2006). Near-infrared spectroscopy on combine harvesters to measure maize grain dry matter content and quality parameters. *Plant Breeding*, *125*(6), 591-595.

۱۰۹. Moosavi, A., Tavakkol Afshari, R., Sharif-Zadeh, F., & Aynehband, A. (2009). Effect of seed priming on germination characteristics, polyphenoloxidase, and peroxidase activities of four amaranth cultivars. *J. Food Agric. Environ*, *7*(3-4), 353-358.

۱۱۰. Mori, Y. (2013). New agro-technology (Imec) by hydrogel membrane. *Reactive and Functional Polymers*, *73*(7), 936-938.

۱۱۱. Mori, Y. (2015). Functional Polymeric Membrane in Agriculture. *Functional Polymers in Food Science: From Technology to Biology*, 33-45.

۱۱۲. Morris, G. P., Ramu, P., Deshpande, S. P., Hash, C. T., Shah, T., Upadhyaya, H. D., & Kresovich, S. (2013). Population genomic and genome-wide association studies of agroclimatic traits in sorghum. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(2), 453-458.

۱۱۳. Naghshbandi, M. P., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., Gupta, V. K., Sulaiman, A., Karimi, K., & Maleki, M. (2019). Progress toward improving ethanol production through decreased glycerol generation in Saccharomyces cerevisiae by metabolic and genetic engineering approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *115*, 109353.

۱۱۴. Nakabayashi, R., & Saito, K. (2015). Integrated metabolomics for abiotic stress responses in plants. *Current opinion in plant biology*, *24*, 10-16.

۱۱۵. Nakashima, K., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Shinozaki, K. (2014). The

transcriptional regulatory network in the drought response and its crosstalk in abiotic stress responses including drought, cold, and heat. *Frontiers in plant science*, *5*, 170.

۱۱۶. Nakaya, A., & Isobe, S. N. (2012). Will genomic selection be a practical method for plant breeding?. *Annals of botany*, *110*(6), 1303-1316.

۱۱۷. Nawaz, F., Naeem, M., Zulfiqar, B., Akram, A., Ashraf, M. Y., Raheel, M., ... & Aurangzaib, M. (2017). Understanding brassinosteroid-regulated mechanisms to improve stress tolerance in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 15959-15975.

۱۱۸. Nawaz, F., Naeem, M., Zulfiqar, B., Akram, A., Ashraf, M. Y., Raheel, M., & Aurangzaib, M. (2017). Understanding brassinosteroid-regulated mechanisms to improve stress tolerance in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*, 15959-15975.

۱۱۹. Nawaz, J., Hussain, M., Jabbar, A., Nadeem, G. A., Sajid, M., Subtain, M. U., & Shabbir, I. (2013). Seed priming a technique. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, *6*(20), 1373.

۱۲۰. Niu, X., Song, L., Xiao, Y., & Ge, W. (2018). Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. *Frontiers in microbiology*, *8*, 2580.

۱۲۱. Novo, L. A., Castro, P. M., Alvarenga, P., & da Silva, E. F. (2018). Plant growth–promoting rhizobacteria-assisted phytoremediation of mine soils. In *Bio-geotechnologies for mine site rehabilitation* (pp. 281-295).

۱۲۲. Nuccio, M. L., Paul, M., Bate, N. J., Cohn, J., & Cutler, S. R. (2018). Where are the drought tolerant crops? An assessment of more than two decades of plant biotechnology effort in crop improvement. *Plant science*, *273*, 110-119.

۱۲۳. O'Connell, E. (2017). Towards adaptation of water resource systems to climatic and socio-economic change. *Water Resources Management*, 31, 2965-2984.

۱۲۴. Obaideen, K., Yousef, B. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 100124.

۱۲۵. Obata, T., & Fernie, A. R. (2012). The use of metabolomics to dissect plant responses to abiotic stresses. *Cellular and Molecular Life Sciences*, *69*, 3225-3243.

۱۲۶. Oerke, E. C., Steiner, U., Dehne, H. W., & Lindenthal, M. (2006). Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. *Journal of experimental botany*, *57*(9), 2121-2132.

۱۲۷. Ogawa, D., Suzuki, Y., Yokoo, T., Katoh, E., Teruya, M., Muramatsu, M., & Habu, Y. (2021). Acetic-acid-induced jasmonate signaling in root enhances drought avoidance in rice. *Scientific reports*, *11*(1), 6280.

۱۲۸. Oh, S. J., Kim, Y. S., Kwon, C. W., Park, H. K., Jeong, J. S., & Kim, J. K. (2009). Overexpression of the transcription factor AP37 in rice improves grain yield under drought conditions. *Plant physiology*, *150*(3), 1368-1379.

۱۲۹. Oni, B. A., Oziegbe, O., & Olawole, O. O. (2019). Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*, *64*(2), 222-236.

۱۳۰. Osakabe, Y., Yamaguchi-Shinozaki, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2014). ABA control of plant macroelement membrane transport systems in response to water deficit and high salinity. *New Phytologist*, *202*(1), 35-49.

۱۳۱. Padmavathi, K., & Thangadurai, K. (2016). Implementation of RGB and grayscale images in plant leaves disease detection–comparative study. *Indian Journal of Science and Technology*, *9*(6), 1-6.

۱۳۲. Pathania, P., Rajta, A., Singh, P. C., & Bhatia, R. (2020). Role of plant growth-promoting bacteria in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *30*, 101842.

۱۳۳. Pauli, D. (2015). High-throughput phenotyping technologies in cotton and beyond. *Proceedings of the Advances in Field-Based High-Throughput Phenotyping and Data Management: Grains and Specialty Crops, Spokane, WA*, 1-11.

۱۳۴. Perlikowski, D., & Kosmala, A. (2020). Mechanisms of drought resistance in introgression forms of Lolium multiflorum/Festuca arundinacea. *Festulolium: From the Nature to Modern Breeding*, 146.

۱۳۵. Pospíšilová, H., Jiskrova, E., Vojta, P., Mrizova, K., Kokáš, F., Čudejková, M. M., & Galuszka, P. (2016). Transgenic barley overexpressing a cytokinin dehydrogenase gene shows greater tolerance to drought stress. *New biotechnology*, *33*(5), 692-705.

۱۳۶. Pourbabaee, A. A., Bahmani, E., Alikhani, H. A., & Emami, S. (2016). Promotion of wheat growth under salt stress by halotolerant bacteria containing ACC deaminase. 855-864.

۱۳۷. Rai, K. K., & Rai, A. C. (2020). Recent transgenic approaches for stress tolerance in crop plants. *Sustainable Agriculture in the Era of Climate Change*, 533-556.

۱۳۸. Rao, R. N., & Sridhar, B. (2018, January). IoT based smart crop-field monitoring and automation irrigation system. In *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)* (pp. 478-483)..

۱۳۹. Rasheed, S., Bashir, K., Kim, J. M., Ando, M., Tanaka, M., & Seki, M. (2018). The modulation of acetic acid pathway genes in Arabidopsis improves survival under drought stress. *Scientific Reports*, *8*(1), 7831.

۱۴۰. Roy, D. K., & Ansari, M. H. (2014). Smart irrigation control system. *International Journal of Environmental Research and Development*, *4*(4), 371-374.

۱۴۱. Saha, A., Sekharan, S., & Manna, U. (2020). Superabsorbent hydrogel (SAH) as a soil amendment for drought management: A review. *Soil and Tillage Research*, *204*, 104736.

۱۴۲. Sahoo, K. K., Tripathi, A. K., Pareek, A., & Singla-Pareek, S. L. (2013). Taming drought stress in rice through genetic engineering of transcription factors and protein kinases. *Plant Stress*, *7*(1), 60-72.

۱۴۳. Sako, K., Nguyen, H. M., & Seki, M. (2020). Advances in chemical priming to enhance abiotic stress tolerance in plants. *Plant and Cell Physiology*, *61*(12), 1995-2003.

۱۴۴. Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. *Drought Stress Tolerance in Plants, Vol 1: Physiology and Biochemistry*, 1-16.

۱٤٥. Sallam, A., Alqudah, A. M., Dawood, M. F., Baenziger, P. S., & Börner, A. (2019). Drought stress tolerance in wheat and barley: advances in physiology, breeding and genetics research. *International journal of molecular sciences*, *20*(13), 3137.

۱٤٦. Salvi, P., Kamble, N. U., & Majee, M. (2020). Ectopic over-expression of ABA-responsive Chickpea galactinol synthase (CaGolS) gene results in improved tolerance to dehydration stress by modulating ROS scavenging. *Environmental and Experimental Botany*, *171*, 103957.

۱٤۷. Sardare, M. D., & Admane, S. V. (2013). A review on plant without soil-hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, *2*(3), 299-304.

۱٤۸. Saxena, R., Tomar, R. S., & Kumar, M. (2016). Exploring nanobiotechnology to mitigate abiotic stress in crop plants. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, *8*(9), 974.

۱٤۹. Scopel, E., Triomphe, B., Affholder, F., Da Silva, F. A. M., Corbeels, M., Xavier, J. H. V., & De Tourdonnet, S. (2013). Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agronomy for sustainable development*, *33*, 113-130.

۱٥۰. Sedaghat, M., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Emam, Y., & Mokhtassi-Bidgoli, A. (2017). Physiological and antioxidant responses of winter wheat cultivars to strigolactone and salicylic acid in drought. *Plant Physiology and Biochemistry*, *119*, 59-69.

۱٥۱. Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., & Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, *10*(2), 259 - 283.

۱٥۲. Selvaraj, M. G., Ishizaki, T., Valencia, M., Ogawa, S., Dedicova, B., Ogata, T., & Ishitani, M. (2017). Overexpression of an Arabidopsis thaliana galactinol synthase gene improves drought tolerance in transgenic rice and increased grain yield in the field. *Plant biotechnology journal*, *15*(11), 1465-1477.

۱٥۳. Semida, W. M., Abdelkhalik, A., Rady, M. O., Marey, R. A., & Abd El-Mageed, T. A. (2020). Exogenously applied proline enhances growth and productivity of drought stressed onion by improving photosynthetic efficiency, water use efficiency and up-regulating osmoprotectants. *Scientia Horticulturae*, *272*, 109580.

۱٥٤. Semida, W. M., Beheiry, H. R., Sétamou, M., Simpson, C. R., Abd El-Mageed, T. A., Rady, M. M., & Nelson, S. D. (2019). Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review. *South African Journal of Botany*, *127*, 333-347.

۱٥٥. Shakoor, N., Lee, S., & Mockler, T. C. (2017). High throughput phenotyping to accelerate crop breeding and monitoring of diseases in the field. *Current opinion in plant biology*, *38*, 184-192.

۱٥٦. Shavrukov, Y., Kurishbayev, A., Jatayev, S., Shvidchenko, V., Zotova, L., Koekemoer, F., & Langridge, P. (2017). Early flowering as a drought escape mechanism in plants: how can it aid wheat production?. *Frontiers in plant science*, *8*, 1950.

۱٥۷. Silva, R., Filgueiras, L., Santos, B., Coelho, M., Silva, M., Estrada-Bonilla, G., &

Meneses, C. (2020). Gluconacetobacter diazotrophicus changes the molecular mechanisms of root development in Oryza sativa L. growing under water stress. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(1), 333.

۱۵۸. Singh, S. K. (2020). Microbes for iron chlorosis remediation in peach. In *Biostimulants in Plant Science*. London: IntechOpen.

۱۵۹. Sun, D., Hussain, H. I., Yi, Z., Rookes, J. E., Kong, L., & Cahill, D. M. (2018). Delivery of abscisic acid to plants using glutathione responsive mesoporous silica nanoparticles. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *18*(3), 1615-1625.

۱۶۰. Sun, L., Song, F., Zhu, X., Liu, S., Liu, F., Wang, Y., & Li, X. (2021). Nano-ZnO alleviates drought stress via modulating the plant water use and carbohydrate metabolism in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *67*(2), 245-259.

۱۶۱. Tabassum, T., Farooq, M., Ahmad, R., Zohaib, A., Wahid, A., & Shahid, M. (2018). Terminal drought and seed priming improves drought tolerance in wheat. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *24*, 845-856.

۱۶۲. Tahira, T., Riaz, A., Muhammad, F., & Basra, S. M. A. (2018). Improving the drought tolerance in barley by osmopriming and biopriming. *International Journal of Agriculture and Biology*, *20*(7), 1597-1606.

۱۶۳. Tanveer, M., Shahzad, B., Sharma, A., & Khan, E. A. (2019). 24-Epibrassinolide application in plants: An implication for improving drought stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *135*, 295-303.

۱۶۴. Taran, N., Storozhenko, V., Svietlova, N., Batsmanova, L., Shvartau, V., & Kovalenko, M. (2017). Effect of zinc and copper nanoparticles on drought resistance of wheat seedlings. *Nanoscale research letters*, *12*, 1-6.

۱۶۵. Tardieu, F., Simonneau, T., & Muller, B. (2018). The physiological basis of drought tolerance in crop plants: a scenario-dependent probabilistic approach. *Annual review of plant biology*, *69*, 733-759.

۱۶۶. Tejero, I. F. G., Moriana, A., Pleguezuelo, C. R. R., Zuazo, V. H. D., & Egea, G. (2018). Sustainable Deficit-Irrigation Management in Almonds (Prunus dulcis L.): Different Strategies to Assess the Crop Water Status. In *Water scarcity and sustainable agriculture in semiarid environment* Academic Press (pp. 271-298).

۱۶۷. Tenhaken, R. (2015). Cell wall remodeling under abiotic stress. *Frontiers in plant science*, 5, 771.

۱۶۸. Tomášková, I., Svatoš, M., Macků, J., Vanická, H., Resnerová, K., Čepl, J., ... & Dohrenbusch, A. (2020). Effect of different soil treatments with hydrogel on the performance of drought-sensitive and tolerant tree species in a semi-arid region. *Forests*, *11*(2), 211.

۱۶۹. Trujillo, L. E., Sotolongo, M., Menendez, C., Ochogavia, M. E., Coll, Y., Hernandez, I., & Hernandez, L. (2008). SodERF3, a novel sugarcane ethylene responsive factor (ERF), enhances salt and drought tolerance when overexpressed in tobacco plants. *Plant and cell physiology*, *49*(4), 512-525.

۱۷۰. Ullah, A., Manghwar, H., Shaban, M., Khan, A. H., Akbar, A., Ali, U., ... & Fahad, S. (2018). Phytohormones enhanced drought tolerance in plants: a coping strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*, 33103-33118.

۱۷۱. Urrestarazu, M. (2013). Infrared thermography used to diagnose the effects of salinity in a soilless culture. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, *10*(1),

1-8.

۱۷۲. Valliyodan, B., & Nguyen, H. T. (2006). Understanding regulatory networks and engineering for enhanced drought tolerance in plants. *Current opinion in plant biology*, *9*(2), 189-195.

۱۷۳. Vandenbroucke, K. O. R. N. E. E. L., & Metzlaff, M. I. C. H. A. E. L. (2013). Abiotic stress tolerant crops: genes, pathways and bottlenecks. *Sustainable food production*, 1-17.

۱۷٤. Varshney, R. K., Terauchi, R., & McCouch, S. R. (2014). Harvesting the promising fruits of genomics: applying genome sequencing technologies to crop breeding. *PLoS biology*, *12*(6), e1001883.

۱۷٥. Vishwakarma, K., Upadhyay, N., Kumar, N., Yadav, G., Singh, J., Mishra, R. K., & 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.

۱۷٦. Wang, X., Yang, W., Wheaton, A., Cooley, N., & Moran, B. (2010). Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: A first step towards automated plant water stress monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, *73*(1), 74-83.

۱۷۷. Woźniak, M., Gałązka, A., Tyśkiewicz, R., & Jaroszuk-Ściseł, J. (2019). Endophytic bacteria potentially promote plant growth by synthesizing different metabolites and their phenotypic/physiological profiles in the Biolog GEN III MicroPlateTM Test. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*(21), 5283.

۱۷۸. Wu, J., Kim, S. G., Kang, K. Y., Kim, J. G., Park, S. R., Gupta, R., & Kim, S. T. (2016). Overexpression of a pathogenesis-related protein 10 enhances biotic and abiotic stress tolerance in rice. *The plant pathology journal*, *32*(6), 552.

۱۷۹. Xiong, Y. W., Li, X. W., Wang, T. T., Gong, Y., Zhang, C. M., Xing, K., & Qin, S. (2020). Root exudates-driven rhizosphere recruitment of the plant growth-promoting rhizobacterium Bacillus flexus KLBMP 4941 and its growth-promoting effect on the coastal halophyte Limonium sinense under salt stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *194*, 110374.

۱۸۰. Yang, L., Han, Y., Yang, P., Wang, C., Yang, S., Kuang, S., & Xiao, C. (2015). Effects of superabsorbent polymers on infiltration and evaporation of soil moisture under point source drip irrigation. *Irrigation and Drainage*, *64*(2), 275-282.

۱۸۱. Yang, L., Yang, Y., Chen, Z., Guo, C., & Li, S. (2014). Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering. *Ecological Engineering*, *62*, 27-32.

۱۸۲. Zarco-Tejada, P. J., Berni, J. A., Suárez, L., Sepulcre-Cantó, G., Morales, F., & Miller, J. R. (2009). Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*, *113*(6), 1262-1275.

۱۸۳. Ze, Y., Zheng, L., Zhao, X., Gui, S., Sang, X., Su, J., & Hong, F. (2013). Molecular mechanism of titanium dioxide nanoparticles-induced oxidative injury in the brain of mice. *Chemosphere*, *92*(9), 1183-1189.

۱۸٤. Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z., & Zhu, J. K. (2022). Abiotic stress responses in plants. *Nature Reviews Genetics*, *23*(2), 104-119.

۱۸۵. Zhang, Y., Ding, J., Wang, H., Su, L., & Zhao, C. (2020). Biochar addition alleviate the negative effects of drought and salinity stress on soybean productivity and water use efficiency. *BMC Plant Biology*, *20*, 1-11.

۱۸۶. Zhang, Z., Rod, M., & Hosseinian, F. (2021). A comprehensive review on sustainable industrial vertical farming using film farming technology. *Sustainable Agriculture Research*, *10*(526-2021-496), 46-53.

۱۸۷. Zheng, H., Zhou, X., He, J., Yao, X., Cheng, T., Zhu, Y., ... & Tian, Y. (2020). Early season detection of rice plants using RGB, NIR-GB and multispectral images from unmanned aerial vehicle (UAV). *Computers and Electronics in Agriculture*, *169*, 105223.

۱۸۸. Zingaretti, S. M., Rodrigues, F. A., Graça, J. D., Pereira, L. D. M., Lourenço, M. V., & INTECH. (2012). Sugarcane responses at water deficit conditions. *Water stress*, 255-276.

۱۸۹. Zouari, M., Hassena, A. B., Trabelsi, L., Rouina, B. B., Decou, R., & Labrousse, P. (2019). Exogenous proline-mediated abiotic stress tolerance in plants: Possible mechanisms. *Osmoprotectant-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants: Recent Advances and Future Perspectives*, 99-121.