

مدیریت کشاورزی پایدار در شرایط تغییر اقلیم و تنش خشکی

پیشگفتار مؤلفان

کشاورزی، به عنوان یکی از بنیادی‌ترین ارکان حیات انسانی، همواره نقشی تعیین‌کننده در امنیت غذایی، توسعه اقتصادی و پایداری جوامع ایفا کرده است. با این حال، چالش‌های نوظهوری چون تغییرات اقلیمی، کاهش منابع آب شیرین، تخریب خاک و افزایش جمعیت جهانی، فشار بی‌سابقه‌ای بر نظام‌های تولید کشاورزی وارد ساخته است. در چنین شرایطی، یافتن رویکردهایی که همزمان بتوانند بهره‌وری تولید را افزایش دهند و در عین حال منابع طبیعی و زیست‌بوم‌های شکننده را پاس بدارند، ضرورتی انکارناپذیر است.

یکی از پاسخ‌های علمی و عملی به این ضرورت، کشاورزی حفاظتی است؛ رویکردی که با تکیه بر اصولی همچون کاهش یا حذف شخم، کشت مستقیم، حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک و تنوع‌بخشی به تناوب‌های زراعی، تلاش دارد چرخه‌های طبیعی خاک و آب را بازسازی کند و ظرفیت ذخیره کربن را افزایش دهد. این نظام نه تنها به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییر اقلیم کمک می‌کند، بلکه با بهبود خصوصیات فیزیکی و زیستی خاک، نقش مهمی در افزایش بهره‌وری مصرف آب و تاب‌آوری مزارع در برابر خشکسالی و کم‌آبی ایفا می‌نماید.

این اثر حاصل سال‌ها مطالعه، گردآوری منابع علمی معتبر و بررسی یافته‌های پژوهشگران برجسته در حوزه کشاورزی، محیط‌زیست و علوم خاک است. هدف اصلی مؤلف آن بوده است که تصویری جامع و یکپارچه از نقش کشاورزی حفاظتی در کاهش اثرات تغییر اقلیم و مدیریت بحران کم‌آبی ارائه دهد و ضمن بررسی سازوکارها و مزایا، به چالش‌ها، خلأهای دانشی و مسیرهای تحقیقاتی آینده نیز بپردازد.

بی‌تردید این نوشته خالی از کاستی نیست و نیازمند نقد و نظر استادان، پژوهشگران و دانشجویان گرامی خواهد بود. امید است که این مجموعه بتواند گامی کوچک در جهت ارتقای دانش بومی و جهانی در زمینه کشاورزی پایدار بردارد و الهام‌بخش تلاش‌های آینده برای ایجاد نظام‌های تولیدی کارآمد، تاب‌آور و دوستدار محیط‌زیست باشد.

با احترام

مؤلفان

فصل اول

مقدمه‌ای بر تغییر اقلیم و کشاورزی پایدار

اقلیم واژه‌ای برگرفته از کلمه یونانی کلیما است. برخی از دانشمندان، اقلیم را مترادف با «آب‌وهوا» می‌دانند؛ اما گروهی دیگر بر این باورند که اقلیم به وضعیت آب‌وهوایی یک منطقه در بلندمدت اشاره دارد، در حالی که آب‌وهوا بیانگر شرایط متغیر و کوتاه‌مدت یک منطقه است (فهد و همکاران، ۲۰۲۴). به‌طور کلی، اقلیم مجموعه‌ای از شرایط جوی است که وضعیت هوا، میزان بارش و تغییرات آن را در یک ناحیه مشخص می‌سازد. بنابراین، دما و بارندگی دو عامل اصلی در تعیین اقلیم هر منطقه به شمار می‌آیند (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

از آغاز شکل‌گیری کره زمین تاکنون، جوّ و در نتیجه اقلیم همواره در حال تغییر بوده است. زمین در طول عمر چهار و نیم میلیارد ساله خود، اقلیم‌های گوناگونی را تجربه کرده است. شواهد متعددی نشان‌دهنده این تغییرات اقلیمی هستند؛ از جمله: فسیل‌ها، هوای محبوس در لایه‌های یخی، رسوبات زمین‌شناسی، حلقه‌های رشد درختان، رسوبات گلی، تغییر در ترکیب شیمیایی پوسته جانوران، نوسان سطح آب‌های آزاد و حتی تغییر در تاریخ شکوفه‌دادن درختان. انسان نیز به‌عنوان مسلط‌ترین موجود زنده روی زمین، همواره تلاش کرده است تا از شرایط مساعد اقلیمی بیشترین بهره را ببرد و عوامل اصلی مؤثر بر اقلیم مناطق مختلف را شناسایی کند (فهد و همکاران، ۲۰۲۴). نخستین نظریه درباره عوامل مؤثر بر تغییرات اقلیمی حدود ۲۵۰۰ سال پیش توسط یونانیان ارائه شد. آنان عرض جغرافیایی را مهم‌ترین عامل در ایجاد و کنترل اقلیم‌های مختلف معرفی کردند (فهد و همکاران، ۲۰۲۴). امروزه دانشمندان نظریه‌های گوناگونی درباره عوامل مؤثر بر تغییر اقلیم ارائه کرده‌اند.

مهم‌ترین این نظریه‌ها شامل افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، تغییرات شدت انرژی خورشیدی، وجود گرد و غبار ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی و در نهایت نازک‌شدن لایه ازن است. به‌طور کلی، جوّ زمین در جذب تشعشعات با طول موج بلند کارآمدتر عمل می‌کند. این تشعشعات هم به سوی فضا و هم به سوی سطح زمین بازتاب می‌شوند. بخشی که به سمت زمین برمی‌گردد، موجب گرم‌شدن سطح آن می‌شود. این پدیده که به دلیل بازتاب تشعشعات بلندموج از سوی جوّ رخ می‌دهد، «اثر گلخانه‌ای» نامیده می‌شود. میزان این بازتابش به ترکیب اجزای جوّ بستگی دارد؛ از جمله بخار آب، گرد و غبار و گازهایی که به «گازهای گلخانه‌ای» معروف‌اند. این گازها شامل بخار آب، دی‌اکسید کربن، متان، برخی کلروفلوئوروکربن‌ها و اکسید نیتروژن هستند که همگی قابلیت بالایی در جذب تشعشعات بلندموج دارند. اگر ترکیب جوّ تغییر کند، بخش زیادی از تشعشعات فروسرخ منتشرشده از سطح زمین توسط جوّ جذب می‌شود و به سطح بازمی‌گردد. این فرآیند موجب تغییر در توازن تشعشعی اقلیم و در نتیجه افزایش دمای میانگین سطح زمین خواهد شد. اثر گلخانه‌ای بخشی طبیعی از نظام اقلیمی زمین است. در واقع اگر جوّ و در پی آن اثر گلخانه‌ای وجود نداشت، میانگین دمای زمین حدود ۲۳ درجه سانتی‌گراد سردتر از وضعیت کنونی بود. جوّ زمین تشعشعات خورشیدی با طول موج کوتاه را جذب کرده و سپس آن‌ها را به صورت امواج بلند (فروسرخ) به فضا بازتاب می‌کند. بخشی از انرژی خورشید پیش از رسیدن به سطح زمین به وسیله ابرها و ذرات معلق در جوّ بازتاب می‌شود. مقدار کمی از این انرژی کوتاه‌موج نیز مستقیماً توسط جوّ جذب می‌گردد. به‌طور متوسط، حدود ۳۰ درصد از انرژی

خورشیدی از سطح زمین بازتاب می‌شود. میزان انرژی خورشیدی ورودی به زمین حدود ۳۴۲ وات بر مترمربع است که بخشی از آن توسط جو و ابرها یا در سطح زمین بازتاب می‌شود. قسمتی از گرمای جذب‌شده در سطح زمین نیز به شکل گرمای محسوس و نهان به جو بازمی‌گردد و باقی آن به صورت تشعشع فروسرخ منتشر می‌شود. بخش عمده این تشعشع فروسرخ دوباره توسط جو جذب شده و هم به سمت بالا و هم به سمت زمین منتشر می‌شود؛ فرآیندی که در مجموع «اثر گلخانه‌ای» را شکل می‌دهد.

اگرچه تا چند قرن پیش تغییرات اقلیمی عمدتاً ناشی از عوامل طبیعی بود، امروزه دخالت‌های انسانی نیز در کنار عوامل طبیعی موجب تغییرات گسترده‌تری در اقلیم شده است. به بیان دیگر، فعالیت‌های انسان سرعت دگرگونی‌های زیست‌بومی را افزایش داده و موجبات نگرانی جهانی را فراهم کرده است. امروزه این مداخله به‌عنوان مهم‌ترین عامل تهدیدکننده اقلیم جهان شناخته می‌شود. آنچه تغییرات اقلیمی سده حاضر را از دگرگونی‌های گذشته متمایز می‌سازد، سرعت و ماهیت آن‌هاست؛ به گونه‌ای که روند کنونی با شتابی فزاینده در حال وقوع بوده و کمتر قابل پیش‌بینی است (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

رشد جمعیت و افزایش فعالیت‌های مخرب صنعتی انسان، از جمله جنگل‌زدایی و مصرف فزاینده سوخت‌های فسیلی طی دو قرن اخیر، موجب ورود حجم قابل‌توجهی از گازهای دی‌اکسید کربن، متان، کلروفلوئوروکربن‌ها، اکسیدهای نیتروژن و ازن تروپوسفری به جو شده است. تغییر غلظت هر یک از این گازهای گلخانه‌ای بر غلظت سایر گازها نیز اثر می‌گذارد. برای نمونه، افزایش دی‌اکسید کربن می‌تواند به تغییر در غلظت بخار آب منجر شود و در نهایت تغییرات ترکیب کلی گازهای گلخانه‌ای در جو، میزان تشعشع ورودی و خروجی زمین را دستخوش تغییر سازد (یوان و همکاران، ۲۰۲۴).

دی‌اکسید کربن و دما دو متغیر محیطی کلیدی و اثرگذار بر رشد و نمو گیاهان هستند. بر اساس پیش‌بینی‌ها، تغییر اقلیم آینده سبب تغییر هر دوی این عوامل شده و در نتیجه رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار خواهد داد (یوان و همکاران، ۲۰۲۴). به احتمال زیاد، بسیاری از مناطق کشاورزی کنونی دچار تغییر خواهند شد و شکل رشد، بقا و تنوع گونه‌های موجود در زیست‌بوم‌ها دگرگون می‌شود. در چنین شرایطی، محدودیت توان سازگاری گیاهان و جانوران ممکن است ترکیب گونه‌ای زیست‌بوم‌ها را تغییر داده و به گسترش گونه‌های مهاجم و در مقابل به انقراض گونه‌های آسیب‌پذیر منجر شود. در نتیجه، تنوع زیستی کاهش یافته و زیستگاه‌های طبیعی دچار نابودی می‌شوند.

افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو واکنش‌های متفاوتی در گیاهان دارای مسیر فتوسنتزی سه‌کربنه (C3) و چهارکربنه (C4) ایجاد می‌کند. این تغییر، تعادل رقابتی بین گونه‌ها را بر هم زده و موجب دگرگونی در فرآیندهای زیست‌بومی همچون تبادل گازها، چرخه کربن و نیتروژن می‌شود. علاوه بر این، تغییرات اقلیمی می‌توانند دوره زیستی آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، سرعت معدنی شدن و دسترسی به عناصر غذایی، طول فصل رشد، فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه و کارکرد زیست‌بوم‌ها به‌ویژه در نظام‌های زراعی را تحت تأثیر قرار دهند (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

۲-۱- گاز های گلخانه‌ای و تغییر اقلیم

گازهای گلخانه‌ای شامل بخار آب، دی‌اکسید کربن، متان، اکسید نیتروژن، کلروفلوئوروکربن‌ها و ازن هستند که در ادامه به معرفی هر یک پرداخته می‌شود. بخار آب مؤثرترین گاز گلخانه‌ای به شمار می‌آید و نقش بسیار مهمی در ایجاد اثر گلخانه‌ای دارد. مولکول‌های آب به دلیل توانایی بالای خود در حبس انرژی گرمایی، سهم زیادی در افزایش دمای جو زمین دارند. با توجه به جرم مولکولی بالاتر بخار آب، عمده تمرکز آن در لایه‌های پایین جو است و هرچه ارتفاع افزایش یابد، سهم بخار آب در مقایسه با سایر گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد. بنابراین، بیشترین نقش گرمایی بخار آب مربوط به لایه‌های پایین جو است. بخار آب مهم‌ترین گاز گلخانه‌ای است و به‌تنهایی مسئول حدود ۱۰۰ وات از مجموع ۱۴۸ وات بر مترمربع گرمای ناشی از اثر گلخانه‌ای در سطح زمین است. البته منبع این گاز عمدتاً طبیعی بوده و تحت تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی قرار ندارد. دی‌اکسید کربن یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای با منشأ طبیعی و انسانی است. غلظت آن از حدود ۲۸۰ قسمت در میلیون (ppm) در دوران پیشاصنعتی به حدود ۳۵۸ قسمت در میلیون در سال ۱۹۹۵ افزایش یافته است. نرخ افزایش این گاز حدود ۶/۱ قسمت در میلیون در سال برآورد شده است. منابع طبیعی دی‌اکسید کربن شامل تنفس موجودات زنده، آتش‌سوزی‌های طبیعی و تجزیه بقایای زیستی است، در حالی که منابع انسانی آن بیشتر شامل مصرف سوخت‌های فسیلی و جنگل‌زدایی می‌شود (کوچکی و همکاران، ۱۳۹۱).

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای موجب بالا رفتن دمای زمین و در نتیجه «گرمایش جهانی» می‌شود. شواهد حاصل از اندازه‌گیری‌های بلندمدت نشان می‌دهد که با افزایش غلظت گازهای جوی، به‌ویژه دی‌اکسید کربن، دمای زمین به‌طور چشمگیری بالا رفته است. این افزایش که در نیمه دوم قرن بیستم آشکارتر از هر زمان دیگر بوده، پیامدهای اقلیمی گوناگونی به دنبال داشته و عامل اصلی تغییر اقلیم به شمار می‌رود.

متان در مقایسه با دی‌اکسید کربن توانایی بیشتری در افزایش دمای زمین دارد. میانگین غلظت کنونی متان در سطح جهان حدود ۷۲/۱ قسمت در میلیون است و سالانه با نرخ تقریبی یک درصد در حال افزایش است. منابع انسانی تولید متان شامل کشت برنج (حدود ۱۱ درصد)، تخمیر در نشخوارکنندگان (۱۵ تا ۳۵ درصد)، دفن زباله و استخراج زغال‌سنگ است. منابع طبیعی آن نیز بیشتر از تجزیه غیرهوازی مواد آلی در مرداب‌ها سرچشمه می‌گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حدود ۶۰ درصد از متان موجود در جو حاصل فعالیت‌های انسانی است (نصیری محلاتی و همکاران، ۱۳۸۵).

اکسید نیتروژن یکی دیگر از گازهای گلخانه‌ای است که در جذب تشعشعات بلندموج حتی کارآمدتر از متان عمل می‌کند. میانگین غلظت آن در سال ۱۹۹۰ حدود ۳۱۱ قسمت در میلیارد بود که با نرخ سالانه ۲/۰ تا ۳/۰ درصد افزایش یافته است. منابع انسانی تولید این گاز شامل مصرف کودهای شیمیایی، سوزاندن زیست‌توده گیاهی، فرآیندهای صنعتی و پرواربندی دام‌هاست؛ در حالی که منابع طبیعی آن به فرآیندهای نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون در خاک‌های خشکی و دریایی مربوط می‌شود (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۵).

کلروفلوئوروکربنها (CFCs) از گازهای گلخانه‌ای بسیار مؤثر با طول عمر زیاد (حدود ۱۰۰ سال) در جو هستند. شهرت این ترکیبات بیشتر به دلیل نقش آنها در تخریب لایه ازن در استراتوسفر است. منابع انسانی تولیدکننده این گازها بیشتر شامل مواد خنک‌کننده و برخی فرآورده‌های شیمیایی است، در حالی که تنها منبع طبیعی آن فعالیت‌های آتشفشانی است (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۷). هرچند غلظت این گازها در جو بسیار کمتر از دیگر گازهای گلخانه‌ای است، اما توانایی جذب انرژی آنها حدود ۱۱ هزار تا ۱۴ هزار برابر دی‌اکسید کربن است (جدول ۱).

ازن تروپوسفری نیز به‌عنوان یک گاز گلخانه‌ای عمل می‌کند و در عین حال آلاینده‌ای است که بر انسان، گیاهان و جانوران اثر می‌گذارد. افزایش غلظت این گاز برخلاف ازن استراتوسفری ناشی از فعالیت‌های صنعتی انسان است، به‌ویژه تولید اکسیدهای نیتروژن، هیدروکربنها و مونوکسید کربن. ازن تروپوسفری امواج بلندموج بازتاب‌شده از زمین را جذب کرده و موجب افزایش دمای سطح می‌شود؛ در حالی که ازن استراتوسفری امواج کوتاه‌موج خورشیدی را جذب کرده و از گرم‌شدن زمین جلوگیری می‌کند.

به‌طور کلی، از دیدگاه مولکولی توانایی هر مولکول متان، اکسید نیتروژن و کلروفلوئوروکربنها در حبس انرژی خورشیدی به‌ترتیب ۳۰، ۲۰۰ و ۱۲ هزار برابر یک مولکول دی‌اکسید کربن است (جدول ۱). با این حال، سهم این گازها در گرمایش جهانی متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که سهم دی‌اکسید کربن، کلروفلوئوروکربنها، متان و اکسید نیتروژن به‌ترتیب حدود ۵۵، ۲۴، ۱۵ و ۶ درصد برآورد می‌شود.

جدول ۱- مهمترین گازهای گلخانه‌ای، نقش، غلظت و منابع تولید آنها

دی‌اکسید کربن	متان	اکسید نیتروژن	
طول عمر در اتمسفر (سال)	۱۲۰	۱۴/۵	۱۲۰
اثر مستقیم بر گرمایش جهانی	۱	۲۴/۵	۳۲۰
غلظت پیش از انقلاب صنعتی (ppmv)	۲۸۰	۰/۸	۲۸۸
مقدار افزایش (درصد)	۰/۵	۰/۹	۰/۲۵
مهمترین منابع کشاورزی	جنگل زدایی	نشخوارکنندگان	کودهای شیمیایی
		سوزاندن بقایای گیاهی	نیتروژن
			فضولات دامی
			تثبیت بیولوژیکی
درصد تولید جهانی توسط کشاورزی	۳۰	۴۰	۲۵

۳-۱- اثرات تغییر اقلیم

جنبه‌های گوناگون تغییر اقلیم همچون افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن جوی، بالا رفتن دما و تغییر در الگوی بارش، تأثیرات متنوعی بر رشد و عملکرد محصولات زراعی خواهند داشت. مطالعات نشان می‌دهد که در آینده‌ای نزدیک، به دلیل افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و سایر گازهای گلخانه‌ای، دمای جهانی روندی افزایشی خواهد داشت و این مسئله پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم فراوانی در پی خواهد آورد (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

مهم‌ترین اثر مستقیم افزایش دما، بروز تنش گرمایی است و از جنبه غیرمستقیم، افزایش تبخیر و تفرق ناشی از گرما موجب بالا رفتن نیاز آبی گیاهان و در نتیجه کاهش تولید خواهد شد. البته این تأثیرات در مناطق مختلف متفاوت است؛ به گونه‌ای که در نواحی سرد و معتدل، افزایش دما می‌تواند به طولانی‌تر شدن دوره رشد، امکان کشت زود هنگام در بهار و استفاده از ارقام دیررس منجر شود و در نهایت، در صورت تأمین آب و مواد غذایی کافی، عملکرد محصول افزایش یابد. از سوی دیگر، کاهش شدت سرمای زمستانی در این مناطق، به‌ویژه با توجه به حساسیت آنزیم «پیرووات فسفات دی‌کیناز» به دمای پایین، می‌تواند برای گیاهان مسیر فتوسنتزی چهارکربنه (C4) مفید واقع شود.

در مقابل، در نواحی گرم افزایش دما اغلب اثرات منفی دارد. بالا رفتن دما در این مناطق موجب افزایش تنفس، کاهش فتوسنتز خالص، کوتاه‌تر شدن فصل رشد و در بیشتر موارد افت عملکرد خواهد شد. همچنین گرما سبب تسریع مراحل فنولوژیک و رسیدگی زودرس محصولات می‌شود که این امر نهایتاً کاهش عملکرد را به دنبال دارد (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

به طور کلی انتظار می‌رود که شدت افزایش دما در خشکی‌ها بیشتر از اقیانوس‌ها، در عرض‌های جغرافیایی بالا بیشتر از مناطق حاره‌ای، در زمستان بیشتر از تابستان و در شب بیش از روز باشد. در چنین شرایطی، بسیاری از مناطق زراعی جهان با تغییر در طول فصل رشد، افزایش رویدادهای حدی همچون خشکسالی و سیلاب، و کاهش بارندگی مواجه خواهند شد (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

۴-۱- اثرات اکولوژیکی تغییر اقلیم

بی‌تردید، غلظت گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر افزایش چشمگیر و نگران‌کننده‌ای داشته است که پیامدهای گسترده‌ای بر بوم‌نظام‌های طبیعی و کشاورزی برجای گذاشته است. مهم‌ترین این اثرات را می‌توان در چند محور اصلی خلاصه کرد: یکی از پیامدهای مهم تغییر اقلیم، انبساط حرارتی آب‌های اقیانوسی و ذوب یخ‌ها و برف‌های نواحی قطبی است که سبب بالا آمدن سطح آب دریاها می‌شود. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ سطح آب دریاها حدود ۱۵ تا ۵۰ سانتی‌متر افزایش خواهد یافت. این پدیده موجب آبگرفتگی زمین‌های زراعی پست و افزایش شوری آب‌های زیرزمینی در مناطق ساحلی شده و در نهایت، کشاورزی این نواحی را به شدت تحت تأثیر قرار خواهد داد (فهد و همکاران، ۲۰۲۴). یکی دیگر از آثار تغییر اقلیم، جابه‌جایی

پهنه‌های اکولوژیکی و تغییر در تنوع زیستی است. بر اساس مطالعات، افزایش دما می‌تواند محدوده‌های حرارتی کشاورزی را به سمت قطب‌ها منتقل کند. برای نمونه، افزایش تنها یک درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای سالانه، می‌تواند مرز کشت غلات را در عرض‌های میانی نیمکره شمالی حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر به سمت شمال جابه‌جا کرده و امکان کشت در ارتفاعات بالاتر (۱۵۰ تا ۳۰۰ متر بیشتر از سطح دریا) را فراهم سازد (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

به این ترتیب، انتظار می‌رود گونه‌های گرم‌پسند به عرض‌های بالاتر مهاجرت کنند. با توجه به روند تکاملی، گیاهان سه‌کربنه (C3) بیشتر با اقلیم‌های سرد و مرطوب و گیاهان چهارکربنه (C4) با اقلیم‌های گرم سازگار شده‌اند. تغییر اقلیم می‌تواند سبب گسترش گیاهان C3 به سمت عرض‌های پایین‌تر، به‌ویژه گونه‌های C3 گرم‌پسند شود. از سوی دیگر، افزایش دما، کاهش بارندگی و در نتیجه افزایش تبخیر و تعرق، می‌تواند جنگل‌های موجود را به علفزار و بوته‌زار تبدیل کند. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که سطح توندرا کاهش و در مقابل سطح علفزار و جنگل‌ها افزایش خواهد یافت، هرچند که نسبت افزایش در جنگل‌های مرطوب و خشک یکسان نخواهد بود. گرمایش جهانی موجب مهاجرت جنگل‌ها به سمت قطب‌ها می‌شود؛ به گونه‌ای که جنگل‌های شمالی به توندرا گسترش یافته و مرز جنوبی جنگل‌های باتلاقی کاهش می‌یابد و در نهایت، جنگل‌های مرطوب جای خود را به استپ‌های معتدل خواهند داد. با این حال، اگر سرعت نابودی گونه‌ها بیشتر از سرعت مهاجرت آنها باشد، ممکن است یک دوره تأخیری برای جایگزینی جنگل‌های جدید ایجاد شود. تغییر اقلیم احتمال افزایش رخداد پدیده‌های حدی را بالا می‌برد؛ از جمله طوفان‌ها و خشکسالی‌های شدید در برخی مناطق و بارندگی‌های سنگین در مناطقی دیگر. همچنین شدت و بسامد رویدادهایی مانند ال‌نینو و لانینو افزایش خواهد یافت. افزون بر این، تغییر اقلیم بر الگوی رشد و تولید محصولات زراعی نیز اثرگذار است؛ به گونه‌ای که طول فصل رشد، سرعت نمو، رقابت میان گونه‌های گیاهی، پراکنش علف‌های هرز، و نیز زمان و شدت شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی تغییر خواهد کرد.

۵-۱- سهم کشاورزی در ایجاد اقلیم و انتشار گازهای گلخانه‌ای

کشاورزی هم به‌عنوان منبع و هم به‌عنوان مخزن گازهای گلخانه‌ای عمل می‌کند. افزایش تولید غذا و ییاف، یکی از عوامل اصلی انتشار این گازهاست (کوچکی و همکاران، ۱۳۸۵). با توجه به اینکه بیش از ۹۷ درصد غذای بشر در بوم‌نظام‌های خشکی تولید می‌شود و کشاورزی در این زیست‌بوم‌ها نیازمند عملیات کشت، مصرف کود و چرای دام است، این فعالیت‌ها به‌طور مستقیم در انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثرند (چن و همکاران، ۱۹۹۶).

علاوه بر این، سایر فعالیت‌های کشاورزی مانند جنگل‌زدایی برای ایجاد مزارع و چراگاه‌ها، تبدیل خاک‌های بکر به زمین‌های زراعی، کشت غرقابی برنج، تولید نیشکر، سوزاندن بقایای گیاهی، پرورش دام‌هایی نظیر گاو و مصرف کودهای نیتروژنی همچون اوره، در انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش دارند. از آنجا که گیاهان توانایی فرار، پناه گرفتن یا مهاجرت مانند سایر موجودات زنده را ندارند، بیش از سایر جانداران تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرند. همچنین، با توجه به اینکه گیاهان در سطح اول زنجیره غذایی قرار دارند، تغییر در وضعیت آن‌ها

می‌تواند کیفیت زندگی و شرایط سایر موجودات را نیز تحت تأثیر قرار دهد (فهد و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، گیاهان در پاسخ به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن واکنش‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. این واکنش‌ها می‌توانند شامل تغییر در عملکرد، ویژگی‌های رشد، و نسبت اندام‌های مختلف به ریشه باشند؛ به عبارت دیگر، تخصیص مواد و منابع گیاه بین اندام‌ها دستخوش تغییر می‌شود.

به‌طور کلی، دو فرآیند اصلی فیزیولوژیکی گیاهان که تحت تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن قرار می‌گیرند، فتوسنتز و تعرق هستند. اثرات تغییر اقلیم بر این فرآیندهای فیزیولوژیکی باید در دو بعد کوتاه‌مدت و بلندمدت بررسی شوند، زیرا بیشتر گیاهان در بلندمدت احتمالاً واکنش‌های سازگاری و تطبیق‌پذیری از خود نشان خواهند داد.

۱-۵-۱- تغییر اقلیم و فتوسنتز

دی‌اکسیدکربن جو، منبع اصلی کربن برای گیاهان است. اثرات مستقیم افزایش دی‌اکسیدکربن در گیاهان احتمالاً به این دلیل است که غلظت فعلی این گاز در جو کمتر از حد مطلوب است و بنابراین افزایش آن، موجب تثبیت بیشتر کربن، به‌ویژه در گیاهان سه‌کربنه، خواهد شد. با این حال، افزایش فتوسنتز لزوماً به افزایش زیست‌توده یا عملکرد گیاه منجر نمی‌شود. در محصولات با رشد محدود مانند غلات، عملکرد دانه تنها به میزان فتوسنتز بستگی ندارد، بلکه طول دوره فعال فتوسنتزی برگ و ظرفیت مخزن دانه نیز تعیین‌کننده است.

اکثر مطالعات افزایش دی‌اکسیدکربن در شرایط بهینه رشد گیاه و بدون محدودیت عوامل دیگر انجام شده است. در چنین شرایطی، متوسط عملکرد گیاهان سه‌کربنه با دو برابر شدن غلظت دی‌اکسیدکربن در شرایط کنترل‌شده حدود ۳۰ درصد افزایش یافته است، حال آنکه در مزرعه و شرایط واقعی، این افزایش کمتر مشاهده می‌شود (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

به‌طور کلی پیش‌بینی می‌شود که با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن جوی، فتوسنتز در گیاهان سه‌کربنه و چهارکربنه افزایش یابد، اما میزان این افزایش در گیاهان سه‌کربنه بیشتر خواهد بود. دلیل این تفاوت، بهره‌گیری گیاهان چهارکربنه از آنزیم PEP کربوکسیلاز و کاهش تنفس نوری به دلیل افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در محل فعالیت آنزیم روبیسکو است. در نتیجه، گیاهان چهارکربنه حتی در شرایط کمبود دی‌اکسیدکربن، بازدهی بالاتری نسبت به گیاهان سه‌کربنه دارند. بنابراین انتظار می‌رود که افزایش فتوسنتز در گیاهان سه‌کربنه و چهارکربنه به ترتیب حدود ۳۴ و ۱۵ درصد باشد. با این حال، افزایش دما ناشی از تغییر اقلیم موجب تسریع نمو و کاهش طول فصل رشد می‌شود، که در نهایت، برآیند این دو عامل تعیین‌کننده اثر مثبت یا منفی تغییر اقلیم بر عملکرد گیاه خواهد بود (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

همچنین، همان‌طور که اشاره شد، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن به دلیل اثر گلخانه‌ای، موجب افزایش دمای هوا می‌شود که این امر سبب کاهش حلالیت اکسیژن و دی‌اکسیدکربن در آب می‌شود. نتایج نشان داده‌اند که شدت کاهش حلالیت دی‌اکسیدکربن بسیار بیشتر از اکسیژن است. بنابراین، اکسیژن برای تنفس نوری فراهم خواهد بود و این امر اثرات مثبت افزایش دی‌اکسیدکربن بر فتوسنتز خالص گیاهان سه‌کربنه را تا حدودی

کاهش می‌دهد. افزایش دما باعث کاهش میل ترکیبی آنزیم روبیسکو با دی‌اکسیدکربن شده و تنفس نوری افزایش می‌یابد، که اثر بازدارنده‌ای بر فتوسنتز دارد (شروود و ایدسو، ۲۰۰۷). برای نمونه، جدول ۲ نشان می‌دهد که با افزایش دما از ۵ درجه سانتی‌گراد به ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد، به تدریج ضریب و غلظت دی‌اکسیدکربن کاهش یافته و نسبت دی‌اکسیدکربن به اکسیژن کاهش می‌یابد، که این خود موجب افزایش تنفس نوری می‌شود.

جدول ۲- اثر افزایش درجه حرارت (سانتیگراد) بر ضریب حلالیت و غلظت دی‌اکسید کربن و اکسیژن

دما (درجه سانتی‌گراد)	ضریب دی اکسید کربن	غلظت دی اکسید کربن (میکرومول در محلول)	غلظت اکسیژن (میکرومول در محلول)	غلظت دی اکسید کربن به غلظت اکسیژن
۵	۱/۴۲۴	۲۱/۹۳	۰/۴۲۹	۰/۰۵۱۵
۱۵	۱/۰۱۹	۱۵/۶۹	۰/۰۳۴۲	۰/۰۴۶۲
۲۵	۰/۷۵۹	۱۱/۶۸	۰/۰۲۸۳	۰/۰۴۱۶
۳۵	۰/۰۵۹۲	۹/۱۱	۰/۰۲۴۴	۰/۰۳۷۶

بدون در نظر گرفتن افزایش دما، با افزایش فشار دی‌اکسیدکربن، نسبت فعالیت اکسیژنازی روبیسکو به فعالیت کربوکسیلازی روبیسکو در تمام غلظت‌های اکسیژن کاهش می‌یابد (شروود و ایدسو، ۲۰۰۷). نقطه جبران دی‌اکسیدکربن، نتیجه تعامل بین فتوسنتز و تنفس است و در شرایط عادی، برای گیاهان سه‌کربنه و چهارکربنه به ترتیب در غلظت‌های ۵۰ ppm و صفر رخ می‌دهد. افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن در گیاهان سه‌کربنه و چهارکربنه، به ترتیب موجب افزایش و کاهش نقطه جبران دی‌اکسیدکربن می‌شود. با این حال، به نظر می‌رسد که اثر مثبت افزایش دی‌اکسیدکربن بر کاهش تنفس نوری، نسبت به اثر افزایش دما بر تنفس، قوی‌تر باشد. بنابراین انتظار می‌رود که در آینده، تنفس نوری در گونه‌های سه‌کربنه کاهش یابد و در نتیجه حجم مواد تولیدی از طریق فتوسنتز افزایش یابد. همچنین احتمال دارد که نقطه جبران نور کاهش و نقطه اشباع نوری افزایش یابد (برنت سان و بازاز، ۱۹۹۶). در آزمایش‌های کوتاه‌مدت، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن به افزایش فتوسنتز منجر شده است، اما در برخی آزمایش‌های بلندمدت، میزان فتوسنتز در واحد سطح برگ پس از مدتی کاهش یافته است. دلایل این کاهش می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- افزایش دی‌اکسیدکربن موجب کاهش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه کاهش فتوسنتز می‌شود.

- افزایش دی اکسیدکربن باعث افزایش سطح برگ و سایه اندازی می شود که به کاهش تولید منجر می گردد.
- افزایش دی اکسیدکربن سبب تجمع نشاسته در برگ و کلروپلاست شده و در نتیجه تخریب کلروپلاست و کاهش فتوسنتز را به دنبال دارد.
- ازدیاد دی اکسیدکربن موجب تجمع کربوهیدرات ها شده و از طریق مکانیسم بازخورد منفی، کاهش فتوسنتز را ایجاد می کند.
- کاهش میزان روبیسکو یا ظرفیت گیاه در تولید این آنزیم در غلظت های معمول دی اکسیدکربن در چرخه تثبیت دی اکسیدکربن و اکسیژن همزمان عمل می کند؛ در دمای معمولی، میل ترکیبی روبیسکو با دی اکسیدکربن چهار برابر اکسیژن است (جونز و همکاران، ۱۹۸۵؛ رید و مورگان، ۱۹۹۶). به طور کلی، افزایش غلظت دی اکسیدکربن در شرایط تغییر اقلیم، شرایط رقابت بین دی اکسیدکربن و اکسیژن برای ترکیب با آنزیم روبیسکو را به نفع دی اکسیدکربن تغییر می دهد، در حالی که افزایش دما در همین شرایط، این رقابت را به نفع اکسیژن تغییر می دهد.

۲-۵-۱- تغییر اقلیم و تنفس

چگونگی واکنش و اثرات افزایش غلظت دی اکسیدکربن بر تنفس تاریکی هنوز به طور کامل مشخص نیست. واکنش میزان تنفس نسبت به دو برابر شدن غلظت دی اکسیدکربن بسته به گونه گیاهی و حتی اندام مورد مطالعه متفاوت بوده و ممکن است افزایش، کاهش یا بدون تغییر باشد. به طور کلی، تنفس شامل دو بخش تنفس نگهداری و تنفس رشد است (لامبرز و همکاران، ۱۹۹۶).

سرعت واکنش های تنفسی تحت تأثیر دما قرار دارد و از قانون Q_{10} تبعیت می کند؛ بنابراین افزایش دما موجب افزایش سرعت تنفس و حجم آزادسازی دی اکسیدکربن از طریق تنفس رشد می شود. مطالعات نشان داده اند که افزایش تنفس رشد ارتباط مستقیمی با فتوسنتز دارد، بنابراین افزایش دما، موجب افزایش تنفس رشد نیز می شود. از آنجا که افزایش غلظت دی اکسیدکربن باعث افزایش دمای هوا می شود و افزایش دما نیز تنفس را تسریع می کند، می توان نتیجه گرفت که افزایش غلظت دی اکسیدکربن به طور غیرمستقیم موجب افزایش تنفس گیاه خواهد شد. این افزایش تنفس، به نوبه خود سرعت متابولیسم سایر موجودات و فرآیند تجزیه بقایای آلی در بوم نظام ها را نیز افزایش می دهد (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

۳-۵-۱- تغییر اقلیم و تخصیص مواد فتوسنتزی

بررسی منابع مختلف نشان می دهد که گیاهان زراعی نسبت به افزایش غلظت دی اکسیدکربن واکنش نشان می دهند. بر اساس مطالعه ای روی ۱۵۶ گونه گیاهی، دو برابر شدن غلظت دی اکسیدکربن باعث افزایش حدود ۳۷ درصدی رشد گیاهان می شود که این افزایش برای گیاهان سه کربنه حدود ۴۱ درصد و برای گیاهان چهار کربنه حدود ۲۲ درصد گزارش شده است. افزایش غلظت دی اکسیدکربن، به ویژه در اوایل فصل رشد و در

شرایط تأمین آب کافی، موجب افزایش شاخص سطح برگ گیاه می‌شود؛ این امر ناشی از تولید سریع‌تر برگ‌ها در مرحله رویشی گیاه است و به‌ویژه در گونه‌های رشد نامحدود و در شرایط عدم محدودیت مواد غذایی صادق است (فهد و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعات نشان داده‌اند که تغییر در نسبت ریشه به اندام هوایی در شرایط افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بسیار متغیر است و دامنه‌ای از افزایش، کاهش تا عدم تغییر را شامل می‌شود که افزایش دی‌اکسیدکربن، نسبت اندام‌های زیرزمینی به اندام‌های هوایی را در گیاهانی مانند سیب‌زمینی که عملکرد اقتصادی آن‌ها در اندام زیرزمینی است، افزایش می‌دهد، در حالی که در گونه‌هایی که اندام هوایی عملکرد اقتصادی دارند، این نسبت بدون تغییر باقی می‌ماند (فهد و همکاران، ۲۰۲۴؛ جانی و همکاران، ۲۰۲۴؛ دینار، ۲۰۱۱).

با وجود این، افزایش دی‌اکسیدکربن موجب افزایش تخصیص زیست‌توده به ریشه می‌شود، اما این نتیجه در همه مطالعات صادق نیست. به عنوان مثال، تحقیقات روی گندم نشان داده است که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن می‌تواند باعث افزایش یا کاهش نسبت ریشه به اندام هوایی شود که این امر به مقادیر بهینه یا محدودیت مواد غذایی بستگی دارد. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن همچنین رشد ریشه در گیاهان زراعی را تحریک می‌کند و معمولاً رشد ریشه بیشتر از برگ، ساقه و اندام‌های زایشی افزایش می‌یابد. اثرات افزایش دی‌اکسیدکربن بر ریشه در طبیعت اغلب به‌صورت غیرمستقیم مشاهده می‌شود، مانند افزایش فعالیت‌های جذب مواد غذایی، فعالیت‌های مایکوریزایی و فعالیت فسفاتازی سطح ریشه.

دو برابر کردن غلظت دی‌اکسیدکربن عملکرد گیاهان را تا ۳۳ درصد افزایش می‌دهد. با این حال، تمام اندام‌های یک بوته به یک میزان از تأثیر جو غنی از دی‌اکسیدکربن بهره‌مند نمی‌شوند. برای نمونه، افزایش دی‌اکسیدکربن باعث افزایش نسبت ریشه به اندام هوایی می‌شود، اما در برخی موارد این نسبت بدون تغییر مانده و در حدود ۳۷٫۵ درصد از گیاهان کاهش یافته است. شایان ذکر است که نسبت ریشه به اندام هوایی نشان‌دهنده تقسیم ماده خشک بین اندام‌های زیرزمینی و هوایی است. افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در ۵۲ درصد از گیاهان زراعی مورد بررسی باعث افزایش نسبت ریشه به ساقه شده و در ۱۲ درصد از گونه‌ها نیز باعث کاهش این نسبت گردیده است. به‌طور کلی می‌توان گفت که در اثر تغییر اقلیم، مواد فتوسنتزی همواره به سمت اندامی حرکت می‌کنند که محدودیت اصلی برای گیاه ایجاد می‌کند، به گونه‌ای که تخصیص زیست‌توده به اندام‌های گیاه متناسب با نیاز برای بهبود رشد و عملکرد تنظیم می‌شود.

۷-۱- تغییر اقلیم و تنوع زیستی

تنوع زیستی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی کاهش می‌یابد. عواملی مانند تغییر پوشش گیاهی و کاربری اراضی، آلودگی‌ها، ورود گونه‌های مهاجم و تغییر اقلیم، تهدیدی جدی برای تنوع زیستی محسوب می‌شوند. نابودی گسترده جنگل‌ها در برخی مناطق موجب شده است که برخی گونه‌های وابسته به این زیستگاه‌ها در معرض انقراض قرار گیرند. از سوی دیگر، در برخی مناطق، گسترش جنگل‌ها و دیگر زیستگاه‌ها به دلیل تغییر اقلیم

می‌تواند اثرات مثبت و مفیدی بر تنوع زیستی داشته باشد. همچنین، وقوع سیلاب و غرقاب در برخی مناطق و خشکی در مناطق دیگر، جوامع زیستی موجود را تضعیف کرده است. کشاورزی فشرده نیز نقش مهمی در تغییر کاربری اراضی ایفا می‌کند؛ این امر منجر به از دست رفتن زیستگاه‌ها، جدایی گونه‌ها و کاهش تنوع زیستی در مناطق مختلف می‌شود (رانسول و همکاران، ۲۰۰۶). به طور کلی، اقدامات مرتبط با سازگاری با تغییر اقلیم را می‌توان در دو دسته کوتاه‌مدت و بلندمدت مورد بررسی قرار داد:

الف) اقدامات کوتاه‌مدت: این اقدامات شامل تغییر الگوی کشت به منظور استفاده بهینه از افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن برای افزایش تولید، اصلاح تاریخ کشت و سایر عملیات مدیریتی، به‌کارگیری ارقام دیررس در برخی مناطق و انجام عملیات خاکورزی و محافظتی می‌شود.

ب) اقدامات بلندمدت: این اقدامات شامل انتخاب ژرم‌پلاس‌های سازگار، شناسایی و انتخاب صفات مطلوب برای اصلاح گیاهان، افزایش توان بازیابی سیستم‌های تولید از طریق افزایش تنوع زیستی، کشت مخلوط و تناوب زراعی و همچنین مدیریت تلفیقی آفات می‌باشد (فهد و همکاران، ۲۰۲۴).

۸-۱- کشاورزی و اثرات گلخانه‌ای

کشاورزی به عنوان یکی از پایه‌های اصلی اقتصاد و تأمین غذای جهان، نقش مهمی در تولید و کاهش گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند. فعالیت‌های کشاورزی از جمله شخم خاک، استفاده گسترده از کودهای شیمیایی، سوخت‌های فسیلی و مدیریت نامطلوب منابع آبی، سهم قابل توجهی در انتشار دی‌اکسید کربن، متان و نیتروس اکسید دارند و به این ترتیب، در افزایش تغییرات اقلیمی نقش دارند. با این حال، کشاورزی ظرفیت بالقوه‌ای برای کاهش اثرات گلخانه‌ای و جذب کربن دارد که با بهره‌گیری از روش‌های پایدار می‌توان از آن استفاده کرد. استفاده از روش‌های مدیریت خاک، مانند کشت حفاظتی و پوشش گیاهی زمستانی، علاوه بر کاهش فرسایش، امکان ذخیره‌سازی کربن در خاک را فراهم می‌کند و به کاهش انتشار CO_2 کمک می‌نماید. اضافه کردن کودهای آلی و ترکیب آن‌ها با خاک نیز باعث افزایش ظرفیت نگهداری کربن می‌شود. در بخش دامداری، اصلاح رژیم غذایی دام‌ها، استفاده از مکمل‌های خوراکی کاهش‌دهنده متان و بهینه‌سازی مصرف کودهای نیتروژنه می‌تواند به میزان قابل توجهی انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد.

همچنین بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، ماشین‌آلات کم‌مصرف و سیستم‌های آبیاری بهینه، ضمن کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، موجب کاهش تولید CO_2 در مزارع می‌شود. کشت تنوع‌پذیر و اجرای تناوب زراعی مناسب، همراه با ادغام محصولات گیاهی و دامی، بهره‌وری خاک را افزایش داده و نیاز به کود و سموم شیمیایی را کاهش می‌دهد که این خود در کاهش گازهای گلخانه‌ای مؤثر است. فناوری‌های نوین کشاورزی، از جمله کشاورزی دقیق و استفاده از حسگرهای خاک و هوا، امکان مدیریت بهتر منابع و کاهش مصرف آب، انرژی و نهاده‌ها را فراهم می‌کند و بدین ترتیب، اثرات زیست‌محیطی منفی کاهش می‌یابد. ذخیره کربن در اکوسیستم‌های کشاورزی به دو صورت انجام می‌شود: ذخیره کربن در خاک و ذخیره کربن در گیاه. ذخیره کربن در خاک از طریق بقایای گیاهی و فرم‌های غیرآلی مانند کربنات کلسیم و دی‌اکسیدکربن محلول در

آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد و می‌تواند نقش مهمی در کاهش غلظت CO_2 در جو ایفا کند. ذخیره کربن در گیاه نیز شامل درختان، گیاهان و محصولات زراعی است که کربن را از طریق فرآیند فتوسنتز جذب کرده و در زیست‌توده خود نگه می‌دارند. بنابراین، با افزایش زیست‌توده گیاهی، خاک می‌تواند به عنوان مخزنی طبیعی برای دی‌اکسیدکربن عمل کند.

۹-۱- تغییر اقلیم و کشاورزی پایدار

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم است که تمامی ابعاد زندگی بشر را تحت تأثیر قرار داده است. شواهد علمی گسترده نشان می‌دهد که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه مصرف سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، موجب گرم‌تر شدن تدریجی جو زمین شده است. پیامدهای این پدیده صرفاً محدود به افزایش دما نیست، بلکه تغییر در الگوهای بارش، بروز خشکسالی‌های طولانی‌مدت، وقوع سیلاب‌های شدید، کاهش کیفیت خاک و افزایش آفات و بیماری‌های گیاهی را نیز دربر می‌گیرد. در این میان، بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین نظام‌های تولیدی، بیش از هر بخش دیگری در معرض تهدید قرار دارد. از آنجا که کشاورزی هم به تغییرات اقلیمی واکنش نشان می‌دهد و هم خود عاملی برای تشدید آن به شمار می‌رود، بررسی رابطه دوسویه بین این دو حوزه ضروری است. به بیان دیگر، کشاورزی هم قربانی تغییر اقلیم است و هم یکی از عوامل اصلی انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند متان (CH_4) و اکسید نیتروژن (N_2O) این چرخه پیچیده، ضرورت حرکت به سمت الگوهای تولید پایدار را بیش از پیش آشکار می‌سازد. کشاورزی پایدار مفهومی چندبُعدی است که در ادبیات علمی و سیاست‌گذاری تعاریف متنوعی برای آن ارائه شده است. به طور کلی، کشاورزی پایدار به شیوه‌ای از تولیدات کشاورزی اطلاق می‌شود که ضمن تأمین نیازهای غذایی نسل حاضر، توانایی نسل‌های آینده را در برآوردن نیازهایشان به خطر نیندازد. این نوع کشاورزی بر سه پایه اصلی استوار است:

- **پایداری زیست‌محیطی:** استفاده بهینه از منابع طبیعی، کاهش آلودگی و حفاظت از تنوع زیستی.
- **پایداری اقتصادی:** حفظ بهره‌وری در بلندمدت، کاهش هزینه‌های تولید و افزایش درآمد کشاورزان.
- **پایداری اجتماعی:** توجه به عدالت اجتماعی، امنیت غذایی و بهبود کیفیت زندگی روستاییان.

در چارچوب این رویکرد، روش‌هایی مانند مدیریت تلفیقی منابع، تناوب کشت، کشاورزی حفاظتی، استفاده از کودهای زیستی، آبیاری کارآمد و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین اهمیت ویژه‌ای دارند. این روش‌ها نه تنها از شدت اثرات تغییر اقلیم می‌کاهند بلکه سازگاری نظام‌های کشاورزی با شرایط متغیر اقلیمی را افزایش می‌دهند. رابطه تغییر اقلیم و کشاورزی پایدار رابطه‌ای دوسویه و پیچیده است. از یک سو، تغییر اقلیم سبب کاهش عملکرد محصولات زراعی، کاهش کیفیت خاک، افزایش نیاز آبی و تهدید امنیت غذایی جهانی می‌شود. به عنوان نمونه، افزایش دما می‌تواند چرخه رشد گیاهان را کوتاه کند و در نتیجه عملکرد دانه کاهش یابد. همچنین

تغییر در الگوهای بارندگی منجر به نوسانات تولید در مناطق دیم و افزایش هزینه‌های آبیاری در مناطق آبی می‌گردد.

از سوی دیگر، کشاورزی پایدار می‌تواند به‌عنوان راهکاری کلیدی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم عمل کند. به‌کارگیری شیوه‌های مدیریت پایدار خاک و آب، افزایش کارایی مصرف نهاده‌ها، گسترش سیستم‌های زراعی متنوع و کاهش اتکا به سوخت‌های فسیلی در فرآیند تولید، نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کند. همچنین استفاده از گیاهان مقاوم به خشکی و شوری، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین ژنتیکی و توسعه کشاورزی هوشمند از جمله راهکارهای اساسی در این زمینه است. با توجه به روند روبه‌رشد جمعیت جهان و افزایش تقاضا برای مواد غذایی، فشار بر منابع طبیعی بیش از هر زمان دیگری افزایش یافته است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به حدود ۱۰ میلیارد نفر خواهد رسید و برای تأمین نیاز غذایی این جمعیت، تولید کشاورزی باید دست‌کم ۵۰ درصد افزایش یابد. این هدف در شرایط تغییر اقلیم و محدودیت منابع آب و خاک تنها از طریق کشاورزی پایدار قابل تحقق خواهد بود. حرکت به سمت کشاورزی پایدار تنها یک انتخاب نیست، بلکه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای تضمین امنیت غذایی و حفظ محیط‌زیست است. این تحول نیازمند سیاست‌گذاری‌های کلان، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های کشاورزی، آموزش کشاورزان و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین است.

فصل دوم

کشاورزی تحت تغییر اقلیم و تنش خشکی

۱-۲- اثرات گرمایش جهانی بر کم‌آبی

گرمایش جهانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین جلوه‌های تغییر اقلیم، پدیده‌ای است که در چند دهه اخیر آثار گسترده‌ای بر نظام‌های طبیعی و انسانی بر جای گذاشته است. افزایش میانگین دمای زمین نه‌تنها به تغییرات آب‌وهوایی منجر می‌شود، بلکه به شکل مستقیم و غیرمستقیم بر چرخه آب و دسترسی به منابع آبی تأثیر می‌گذارد. کم‌آبی که امروزه به یکی از جدی‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده است، تا حد زیادی تحت تأثیر پیامدهای ناشی از گرمایش جهانی قرار دارد. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای و دگرگونی در تعادل انرژی زمین سبب شده است که میزان تبخیر و تعرق افزایش یابد و به‌تبع آن، فشار بیشتری بر منابع آبی سطحی و زیرزمینی وارد گردد. در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، که پیش‌تر نیز با محدودیت‌های آبی مواجه بودند، این پدیده موجب تشدید خشکسالی‌ها و کاهش ذخایر آبی شده است.

یکی از نخستین پیامدهای گرمایش جهانی بر کم‌آبی، تغییر در الگوهای بارش است. در شرایطی که برخی مناطق شاهد افزایش شدت بارش‌های کوتاه‌مدت و سیلابی هستند، بسیاری از مناطق دیگر با کاهش بارندگی‌های منظم و طولانی‌مدت روبه‌رو می‌شوند. چنین نوساناتی نه‌تنها موجب بی‌ثباتی در تأمین آب می‌شود، بلکه توانایی سدها، مخازن و سامانه‌های ذخیره‌سازی آب را در پاسخ‌گویی به نیازهای کشاورزی، شرب و صنعت با مشکل مواجه می‌کند. تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارش، خطر خشکسالی‌های مکرر و در عین حال سیلاب‌های مخرب را افزایش داده است. این وضعیت، مدیریت منابع آب را پیچیده‌تر کرده و برنامه‌ریزی بلندمدت برای بهره‌برداری پایدار از منابع آبی را دشوار می‌سازد.

افزایش دما و تشدید تبخیر از سطح آب‌ها یکی دیگر از مکانیزم‌های مهمی است که کم‌آبی را در اثر گرمایش جهانی برجسته‌تر کرده است. هنگامی که دمای هوا افزایش می‌یابد، میزان تبخیر از دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و حتی خاک‌های کشاورزی بیشتر می‌شود. این فرآیند، به‌ویژه در مناطق خشک، سبب کاهش سطح آب‌های سطحی و افت سریع ذخایر آبی می‌شود. علاوه بر آن، افزایش تعرق گیاهان نیز فشار مضاعفی بر منابع آبی وارد می‌کند؛ زیرا نیاز آبی محصولات زراعی و باغی افزایش یافته و کارایی سامانه‌های آبیاری کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات، امنیت غذایی را به‌شدت تهدید می‌کند، چرا که کمبود آب نه‌تنها سطح زیر کشت را محدود می‌سازد، بلکه کیفیت و کمیت محصول را نیز کاهش می‌دهد.

ذوب یخچال‌های طبیعی و کاهش پوشش برفی در مناطق کوهستانی نیز از پیامدهای مستقیم گرمایش جهانی است که تأثیر چشمگیری بر منابع آب شیرین دارد. یخچال‌های طبیعی و برف‌های کوهستانی در بسیاری از مناطق جهان به‌عنوان ذخایر استراتژیک آب عمل می‌کنند که در فصول گرم، ذوب شده و جریان رودخانه‌ها را تغذیه می‌کنند. با افزایش دما، ذوب سریع‌تر و نابهنگام این ذخایر موجب می‌شود که آب در زمان‌هایی در دسترس باشد که نیاز چندانی به آن وجود ندارد و در زمان اوج نیاز، منابع آبی تهی شده باشند. این وضعیت به‌ویژه در مناطق وابسته به رودخانه‌های تغذیه‌شده از برف و یخچال، کم‌آبی شدیدی ایجاد می‌کند.

از سوی دیگر، گرمایش جهانی تأثیر قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی دارد. کاهش بارش‌های نفوذی و افزایش برداشت آب در شرایط کم‌آبی باعث افت سطح آبخوان‌ها می‌شود. این افت نه‌تنها ذخایر آبی بلندمدت را تهدید می‌کند، بلکه موجب شور شدن خاک و آب در برخی مناطق نیز می‌گردد. شور شدن منابع آبی به‌ویژه در دشت‌های خشک و نیمه‌خشک، کیفیت آب را کاهش داده و امکان استفاده آن در کشاورزی و شرب را محدود می‌کند. این روند به نوبه خود موجب مهاجرت‌های اجباری، تنش‌های اجتماعی و رقابت بر سر منابع محدود آب خواهد شد.

افزایش دما و کاهش منابع آبی همچنین اثرات مستقیمی بر اکوسیستم‌ها دارد. تالاب‌ها، رودخانه‌ها و زیستگاه‌های آبی که نقش کلیدی در حفظ تنوع زیستی دارند، در معرض خطر خشک شدن و نابودی قرار گرفته‌اند. بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری که برای بقا به زیستگاه‌های آبی وابسته‌اند، با تهدید انقراض مواجه هستند. نابودی این اکوسیستم‌ها نه‌تنها به کاهش تنوع زیستی منجر می‌شود، بلکه خدمات زیست‌محیطی ارزشمندی مانند پالایش آب، تنظیم چرخه کربن و کنترل سیلاب‌ها نیز از بین می‌رود.

افزون بر جنبه‌های زیست‌محیطی، پیامدهای اجتماعی و اقتصادی گرمایش جهانی بر کم‌آبی بسیار گسترده است. کاهش منابع آبی می‌تواند امنیت غذایی و امنیت انسانی را به‌طور جدی به خطر اندازد. در مناطقی که کشاورزی معیشتی وابسته به بارش است، هرگونه کاهش یا نوسان بارندگی به کاهش محصول و در نتیجه به فقر و ناامنی غذایی منجر می‌شود. صنایع نیز که نیازمند منابع آبی پایدار هستند، با محدودیت‌های جدی مواجه می‌شوند و این امر رشد اقتصادی را کند می‌کند. از سوی دیگر، رقابت بر سر منابع محدود آب می‌تواند منجر به بروز مناقشات محلی و منطقه‌ای شود که ابعاد امنیتی و سیاسی نیز پیدا می‌کند. در چنین شرایطی، اهمیت مدیریت پایدار منابع آب و اتخاذ سیاست‌های سازگار با تغییرات اقلیمی بیش از پیش آشکار می‌شود.

راهکارهایی مانند افزایش بهره‌وری آب در بخش کشاورزی، توسعه فناوری‌های نوین آبیاری، بازچرخانی و تصفیه آب، حفاظت از اکوسیستم‌های آبی و مدیریت هوشمند منابع زیرزمینی، می‌توانند تا حدودی از شدت بحران بکاهند. با این حال، بدون اقدام جهانی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مهار روند گرمایش زمین، این اقدامات تنها نقش موقتی و محدود خواهند داشت. به‌طور کلی، گرمایش جهانی و کم‌آبی رابطه‌ای تنگاتنگ و پیچیده دارند که پیامدهای آن نه‌تنها محیط‌زیست، بلکه سلامت، اقتصاد و امنیت جوامع انسانی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. تداوم روند کنونی می‌تواند در دهه‌های آینده به یکی از بزرگ‌ترین بحران‌های جهانی تبدیل شود و حیات بشر را در ابعاد گوناگون تهدید کند. از این رو، مقابله با گرمایش جهانی و مدیریت پایدار منابع آب باید در اولویت سیاست‌گذاری‌های ملی و بین‌المللی قرار گیرد تا بتوان آینده‌ای مطمئن‌تر برای نسل‌های کنونی و آینده رقم زد.

۲-۲- فاکتورهای اقلیمی

گوناگونی و تنوع شرایط اقلیمی در مناطق نسبتاً کوچک به دلیل فاکتورهای زمین شناسی و یا فاکتورهای دیگر اتفاق می افتد اگرچه شرایط اقلیمی منطقه‌ای خاص در یک ناحیه‌ی وسیع کاملاً یکپارچه می باشد. این گوناگونی محلی محدود به مناطق کوچکی می باشد که آنها می توانند بصورت عمودی و افقی در آنها مرتب شوند. فاکتورهای جوی تأثیرگذار بر گیاه، فاکتورهای اقلیمی نامیده می شوند. میزان بارندگی، درجه حرارت، رطوبت جوی، اشعه‌ی خورشیدی، وزش باد، گازهای جوی (شکل ۱-۲).

۱-۲-۲- میزان بارندگی:

عرضه‌ی آب شیرین در دنیا تقریباً بصورت بارندگی بدست آمده است که در نتیجه‌ی تبخیر آب دریا و آب سطح زمین ایجاد می شود. این فرایند دربردارنده‌ی انتقال رطوبت از دریا به زمین و بازگشت دوباره به دریا از آنچه که ما به عنوان چرخه‌ی آب می شناسیم می باشد. مرحله‌ی اول در چرخه‌ی آب، تبخیر آب از اقیانوس ها می باشد. این بخار در سراسر قاره با حرکت توده‌ی هوای منتشر می شود. اگر بخار در نقطه‌ی شبنم خود سرد شده باشد، این بخار به صورت قطره‌های آب قابل مشاهده‌ای غلیظ می شود که از ابر یا مه می بارد. تحت شرایط مطلوب هواسنجی، قطره‌های کوچک آنقدر بزرگ می شوند تا جایی که بصورت باران به زمین می ریزند. میزان بارش یا بارندگی شامل تمام آبهایی می شود که از جو به سطح زمین می ریزد. بارندگی به شکل های گوناگونی صورت می گیرد از قبیل باران، برف، تگرگ و ... جدای از اینها، مه و شبنم در ایجاد رطوبت دخیل می باشند. مه از قطره‌های آب بسیار کوچکی تشکیل شده است که چگالش ریزش آنها ناچیز می باشد. ذرات مه که بر روی گیاهان قرار می گیرند بهم چسبیده می باشد، که با قطره‌های دیگر ترکیب می شود و سرانجام به صورت یک قطره‌ی به اندازه کافی بزرگ به زمین می ریزد. در شبهای روشن، با کاهش گرمای اشعه‌های خورشید از خاک، باعث سرد شدن سطح زمین می شود و هوا فوراً به بالا می رود. چگالی و غلظت بخار آب موجود در هوا منجر به شبنم می شود. رشد گیاهانی مانند جو و سرلکم در زمستان جمع کننده‌های مفید شبنم می باشند و می توانند در شرایط خشکی با میزان اندکی آب رشد یابند. میزان بارش سالیانه هم در میزان لکی و هم فصلی، تحت تأثیر انتخاب محصولات کشت شده در یک مکان می باشد بارش اندک و پراکنده از ویژگی های رایج زمین کشاورزی خشک می باشد که محصولات مقاوم در برابر خشکسالی مانند ذرت خوشه‌ای ارزان مرواریدی. ارزان ایتالیایی و ارزن های کوچک دیگر بطور رایج رشد می کنند. بارندگی یکی از مهمترین فاکتورهای تأثیرگذار در گیاهان منطقه می باشد. بسیاری از محصولات آب مورد نیاز خود را از آب باران بدست می آورد. آب باران منبع رطوبت زمین می باشد که برای زندگی و حیات گیاه ضروری است. تعامل بارندگی با درجه حرارت دارای تأثیر زیادی در پوشش گیاهی و خاک منطقه می باشد. بارش بسیار سنگین و درجه حرارت بالا در مناطق استوایی و گرمسیر باعث ایجاد پوشش گیاهی ارزشمند دنیا می شود (شکل ۱-۲).

۲-۲-۲-درجه حرارت

درجه حرارت بعنوان یک معیار شدت انرژی گرمایی قابل ملاحظه می‌باشد. حداکثر میزان درجه حرارت برای رشد بیشتر گیاهان کشاورزی بین ۱۵ تا ۴۰ درجه می‌باشد. درجه حرارت مکان با فاصله‌ی آن نقطه از خط استوا نشان داده می‌شود. طبق موارد ذکر شده در بالا، پوشش گیاهی به صورت زیر طبقه بندی شده‌اند، گرمسیری، معتدل، قطبی، شمالی و جنوبی. بعضی از محققان پوشش گیاهی دنیا را به ۴ طبقه براساس شرایط درجه حرارت متداول طبقه بندی کرده‌اند. هر مجموعه‌ی گیاهی دارای درجه حرارت حداکثر، متوسط، حداقل خود می‌باشد که به عنوان نقاط اصلی، آنها به حساب می‌آید. جدای از کاهش صدمات زیاد گیاه در مورد حاصلخیزی و تأثیرات معکوس در شرایط خاک در درجه حرارت شدید صورت می‌گیرد (شکل ۱-۲).
صدمات سرما:

گیاهان به دلیل درجه حرارت پائین یا سرما به روش‌های زیر آسیب می‌بینند:

(۱) **صدمات سرمازدگی:** گیاهانی که در شرایطی اقلیمی گرم رشد می‌یابند، اگر در معرض درجه حرارت پائین قرار بگیرند (یعنی کمتر از یخ زدگی) برای زمانی، به شدت صدمه می‌بینند و یا از بین می‌روند. بعضی از تأثیرات سرمازدگی شرایط زردشدن یا مسدودشدن رگه‌های برگه‌های نیشکر، ذرت خوشه ای، لوبیا در زمان قرار گرفتن بر مدت ۶۰ ساعت در درجه‌ی ۲ تا ۴ درجه سانتی گراد می‌باشد.

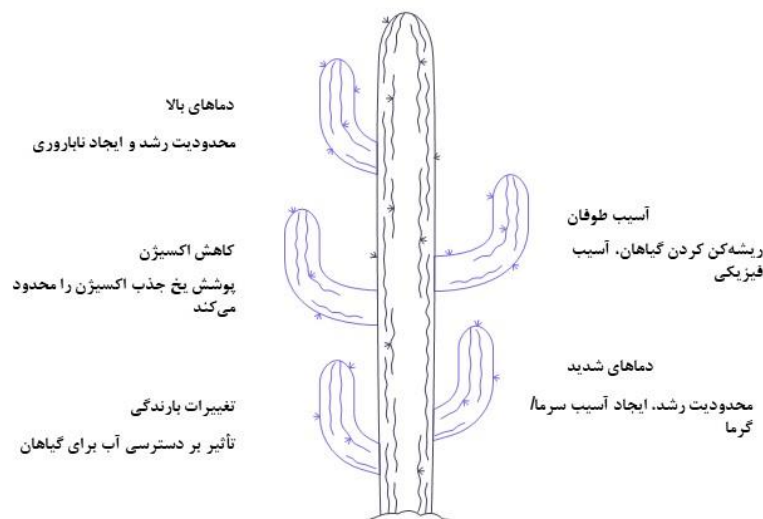
(۲) **صدمات یخ زدگی:** بطور کلی این در گیاهان رشد کننده در درجه حرارت منطقه ایجاد می‌شود. وقتی گیاهان در معرض درجه حرارت بسیار پائین قرار می‌گیرند، آب به تکه‌های یخ در فضا‌های بین سلولی تبدیل می‌شود. با افت شدید درجه حرارت، آب در جهت مخالف سلولها می‌باشد که باعث افزایش اندازه‌ی کریستالهای یعنی در فضا‌های بین سلولی می‌شود. پروتوپلاسم سلولی فاقد آب شده و خمیدگی مکانیکی اتفاق می‌افتد که باعث از بین رفتن سلولها می‌شود. آسیب سرمازدگی در سیب زمینی، چای و ... در زمستان در مناطق تپه‌ای مثل نیجریه یک نمونه‌ی خاص از صدمات یخ زدگی می‌باشد.

(۳) **خفگی:** در طول زمستان، یخ یا برف یک لایه‌ی ضخیم را روی زمین ایجاد می‌کند و محصولاً برای دریافت اکسیژن تحت فشار قرار می‌گیرند. یخ در ارتباط با ریشه‌ها مانع انتشار دی اکسید کربن می‌شود و فراورده‌های تنفسی به گیاه آسیب می‌رساند.

(۴) **طوفان:** آسیب به گیاهان توسط بالا رفتن گیاهان در راستای خاک از موقعیت طبیعی در مناطق معتدل ایجاد می‌شود که در آنها برف زیاد می‌بارد.

(۵) **صدمات گرما:** درجه حرارت بالا اغلب رشد گیاه را متوقف می‌کند. گیاه ابتدا با قحطی مواجه می‌شوند به دلیل میزان یا تبخیر صورت می‌گیرد. رشد این گیاه متوقف می‌شود و اگر این شرایط برای مدت طولانی ادامه یابد گیاه از بین خواهد رفت. تأثیرات مستقیم درجه حرارت در جوانه‌های جوان و گیاهان پیوند زده شده کاملاً قابل ملاحظه می‌باشد. درجه حرارت بالا باعث عقیمی گل‌ها می‌شود. تأثیرات کلی حرارت زیاد باعث برگریزی، افتادن میوه قبل از رسیدن و در موارد شدیدتر از بین رفتن و مرگ گیاه می‌شود.

عوامل اقلیمی تأثیر گذار بر رشد گیاه



شکل ۱-۲: عوامل اقلیمی مؤثر بر رشد و توسعه گیاهان

۳-۲-۲- تأثیر درجه حرارت در تولید محصول:

گیاهان تنها می‌توانند در درجه حرارت‌های خاصی رشد یابند برای هر گونه از گیاه نه تنها محدودیت‌های مناسب درجه حرارت وجود دارد بلکه درجه حرارت‌های بهینه و مناسب برای مداخل مختلف رشد و عملکردهای آن به اندازه محدودیت‌های مرگبار نوسانات درجه حرارت وجود دارد. در حالیکه نور تنها درگیر یک جنبه از فرایند فتوسنتز می‌باشد که منبع انرژی برای تبدیل دی اکسید کربن و آب به کربوهیدرات نام دارد، فرایند بیوشیمی خاصی قبل و بعد از کاهش دی اکسید کربن وجود دارد که تحت تأثیر درجه حرارت قرار دارند. تا آنجایی که نور محدود می‌شود. درجه حرارت تأثیر اندکی در میزان فتوسنتز دارد. با این وجود وقتی نور محدود نمی‌شود، فرایند بیوشیمی در ارتباط با فتوسنتز می‌باشد که یک فاکتور محدود کمتر می‌شود بطوریکه تأثیر درجه حرارت مطلوب در میزان فتوسنتز اندازه‌گیری شده است. کاهش رشد و مشکلات موجود در حاصلخیزی یا باروری حتی در محصولات گرما دوست مانند ذرت خوشه‌ای در درجه حرارتی اتفاق می‌افتد که اغلب زیر محدوده مرگبار می‌باشد. تأثیرات مخرب درجه حرارت بالا معمولاً با عدم وجود رطوبت بیشتر می‌شود. بادهای خشک و گرم این صدمات را افزایش می‌دهد. بطور کلی درجه حرارت بالا مربوط به فرایندهای رشد می‌باشد، به ندرت درجه حرارت‌های بالا در هر بخش دلیل مستقیم مرگ گیاهان می‌باشد و با این وجود

فراتر از محدوده خاص که وابسته به محصول، مرحله رشد و فرایندهای فیزیولوژیکی درگیر، درجه حرارت‌های بالا ممکن است تأثیرات مشخص در تولید محصول می‌باشد. فرایند فتوسنتز نشان می‌دهد که با افزایش درجه حرارت غیرفعال می‌شوند با این وجود مانع ریزش برگ نمی‌شود بطوریکه فتوسنتز ظاهری تحت چنین شرایطی به سرعت کاهش می‌یابد. در دشت‌های بزرگ ایالت متحده آمریکا مشاهده شده است که درجه حرارت‌های بالا در تابستان حتی تأثیرات بارش تابستان در حاصلخیزی محصولات را از بین می‌برد. از اینرو، تنوع و گوناگونی حاصلخیزی در گندم بهار مسلماً مربوط به گوناگونی میانگین حداکثر درجه حرارت در ماه جون می‌باشد و گوناگونی حاصلخیزی ذرت مسلماً مربوط به گوناگونی میانگین حداکثر درجه حرارت در ماه جولای می‌باشد. با افزایش درجه حرارت، تبخیر نیز افزایش می‌یابد. از اینرو رطوبت مورد نیازی که مناسب برای شرایط اقلیمی سردتر می‌باشد در منطقه گرمتر کم و اندک می‌باشد. موقعیتی که ممکن است با بادهای گرم افزایش یابد. نوسانات روزانه درجه حرارت تولید محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

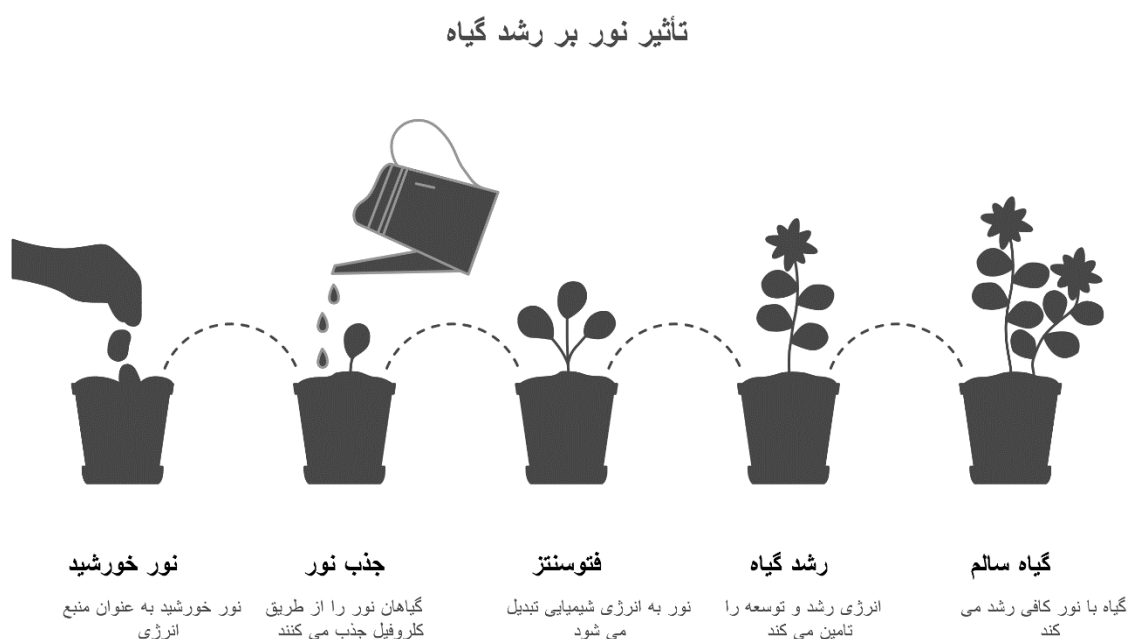
۴-۲-۲-رطوبت جوی

آب همیشه در جو در صورت بخار آب قابل مشاهده وجود دارد. این بطور طبیعی بعنوان رطوبت هوا نامیده می‌شود. وقتی جو یا اتمسفر حاوی حداکثر احتمال تبخیر آب می‌باشد گفته می‌شود که در درجه حرارت خاص و فشار خاص اشباع شده است. هر گونه افزایش در درجه حرارت، ثابت ماندن آب، هوا را غیر اشباع خواهد ساخت. در شرایط غیر اشباع، بخار آب موجود در هوا معمولاً رطوبت اشباع شده ممکن را در این درجه حرارت بروز می‌دهد. رطوبت نسبی مکان، جدای از اینکه تحت تأثیر درجه حرارت و فشار هوا قرار دارد، تحت تأثیر باد، پرتو نور، پوشش گیاهی و آب موجود در خاک قرار می‌گیرد. تبخیر آب از گیاهان یا یک عضو مستقیماً وابسته به رطوبت نسبی اتمسفر می‌باشد. برای پیش‌بینی بیشتر میزان ترشح مستقیماً متناسب با تفاوت بین میزان بخار آب موجود و میزانی که برای اشباع اتمسفر ضروری است می‌باشد. این اختلاف کاهش فشار بخار نامیده می‌شود و در مقایسه با رطوبت نسبی میزان پتانسیل تبخیر بسیار فعال‌تر می‌باشد. تراوش بخار گیاهان با درجه حرارت افزایش می‌یابد اما با رطوبت زیاد نسبی کاهش می‌یابد که تحت تأثیر میزان آب آبیاری می‌باشد. هوای مرطوب مناسب رشد بسیاری از قارچ‌ها و باکتری‌ها می‌باشد و این بطور جدی محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیماری‌های پژمردگی با زنگ زدگی سیب‌زمینی، چای نمونه‌های رایج بیماری‌های گسترده در شرایط آب و هوایی مرطوب می‌باشد. همچنین انواع زیادی از حشرات مانند شته در چنین شرایطی رشد می‌کنند.

۵-۲-۲-نور

نور یکی از مهمترین فاکتورهای اقلیمی برای فرایندهای بسیار حیاتی گیاه می‌باشد. این فاکتور برای سنتز رنگدانه‌های حائز اهمیت گیاه ضروری می‌باشد یعنی کلروفیل سبز، کلروفیل می‌تواند انرژی تابشی را جذب کند و به انرژی شیمیایی بالقوه کربوهیدرات تبدیل کند، کربوهیدرات تولید شده توسط گیاه در طول فرایند

فتوسنتز تنها ارتباط بین انرژی خورشیدی و حیات دنیا می‌باشد. این میزان تراوش را با کنترل همان باز یا بسته تنظیم می‌شود (شکل ۲-۲). گیاهان به ۴ روش تحت تأثیر نور قرار می‌گیرند. ۱- شدت نور ۲- کیفیت نور ۳- طول مدت تابش نور ۴- مسیر تابش نور.



شکل ۲-۲: نور خورشید و جذب گیاه

شدت نور: تفاوت‌های موجود در شدت نور همیشه همراه با تغییر درجه حرارت و رطوبت نسبی می‌باشد و علاوه بر این ارزیابی تأثیرات نور به تنهایی کار دشواری است.

در فتوسنتز حدود یک درصد انرژی نوری به انرژی شیمیایی بالقوه تبدیل شده است. میزان بسیار اندک نور میزان فتوسنتز را کاهش می‌دهد و حتی ممکن است به بسته شدن دهانه شود. این باعث کاهش رشد پوشش گیاهی گیاهان می‌شود. میزان بسیار زیاد نور از بسیاری جهات مضر و مخرب می‌باشد. در هواری ابری تولید مواد خشک محدود می‌شود. بسته به طبیعت و ماهیت محصولات از قبیل آفتاب دوست و سایه دوست، تولید مواد خشک تحت تأثیر قرار می‌گیرد. گونه‌های زیادی حداکثر مواد خشک را در نور زیاد تولید می‌کنند در صورتی که آب به وفور موجود باشد. با این وجود محصولاتی مانند برگ تنبول، گل آفتابگردان، گندم سیاه و تنباکو که در طول تابستان رشد می‌یابند مواد خشک زیادی را تولید می‌کند در صورتی که سایه وجود داشته باشد، به جز شرایط گل خانه‌ای یا شرایط سایه، شدت نور را نمی‌توان برای تولید محصولات کشاورزی کمتر کرد.

شدت نور و باروری محصول: نور یکی از مهمترین فاکتورهایی است که فعالیت فتوسنتز محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد بطوریکه این منبع انرژی برای کل فرایند می‌باشد. استفاده از نور توسط محصول دارای ۲ محدودیت می‌باشد:

۱- حداکثر میزان حاصلخیزی در تابش اندک نور

۲- اشباع نوری در تابش زیاد نور.

گوناگونی حاصلخیزی محصولات خصوصاً متغیرهای حساس به نور مانند برنج کوتاه در مناطقی تحت شرایط مدیریتی و مخارج یکسان مربوط به تأثیر نور خورشید و شرایط حرارتی مربوطه می‌باشد.

کیفیت نور: وقتی نور سفید از هوا عبور می‌کند، رنگهای متفاوتی منتشر می‌شود، ۴۳۵-۴۰۰ میلی میکرون بنفش، ۴۹۰-۴۳۵ میلی میکرون آبی، ۵۷۴-۴۹۰ سبز، ۵۹۵-۵۷۴ زرد، ۶۲۶-۵۹۵ نارنجی، ۷۵۰-۶۲۶ میلی میکرون قرمز. طول موجهای اصلی جذب شده در فرایند فتوسنتز در نواحی قرمز، نارنجی و آبی بنفش می‌باشند. از بین این اشعه‌های کوتاه فراتر از بنفش مانند اشعه X و اشعه‌های گاما و اشعه‌های بلندتر فراتر از قرمز مانند اشعه مادون قرمز برای رشد زیان‌آور می‌باشد. نور قرمز مطلوبترین نور برای رشد بعد از آبی و بنفش می‌باشد اشعه فرابنفش و طول موجهای کوتاهتر از نور قابل مشاهده پراکنده شده‌اند و اشعه مادون قرمز و طول موجهای بلندتر توسط رطوبت اتمسفر جذب شده است. در یک روز آفتابی چنین انتشار و جذبی ۱۵-۱ درصد از کل نور می‌باشد در حالیکه در یک ابری این به ۱۰۰ درصد می‌رسد. چنین نوری نور پراکنده یا نور آسمان نامیده می‌شود. اشعه فرابنفش و طول موجهای کوتاهتر باکتری‌ها و قارچهای زیادی از بین می‌روند.

طول مدت تابش نور: این از نقطه نظر کشاورز این مهمترین فاکتور در انتخاب گونه‌های محصولات می‌باشد. طول مدت تابش بیش از شدت نور و تابش تأثیرگذار می‌باشد. واکنش گیاهان به طول سنتی تابش نور در روز و شب بعنوان دوره نوری نامیده شده است. گیاهان که بطور طبیعی در زمان دوره نوری تولید شده و رشد می‌کند، بیش‌تر از حداکثر معیاری است که گیاهان با تابش طولانی مدت نامیده می‌شوند و آنهایی که در زمان دوره نوری بطور طبیعی رشد می‌کنند کمتر از معیار حداکثر به نام گیاهان با تابش کوتاه مدت می‌باشد. بعضی گیاهان زیاد تحت تأثیر دوره نوری قرار نمی‌گیرند که گیاهان خنثی به نور نامیده می‌شوند. ویژگی‌های گیاه مانند رشد گل، شروع گل دادن، شکل‌گیری پیاز گل تولید ریشه و غیر همه تحت تأثیر دوره نوری می‌باشد. اگر گیاه با تابش طولانی در معرض دوره تابش کوتاه مدت قرار گیرد. بندها کوتاه می‌شوند تا یک ظاهر انشعابی را نشان دهد و مرحله گل دادن یا شکوفایی اتفاق نمی‌افتد. به همین روش وقتی گیاه با تابش کوتاه مدت در معرض تابش بلند مدت قرار گیرد، رشد گیاه غیر طبیعی بوده و شکوفایی آغاز نمی‌شود. از بین گیاهان حاصلخیز، ذرت و ارزش نمونه‌هایی از گیاهان گل‌ده کوتاه مدت و چغندر قند، گندم نمونه‌هایی از گیاهان بلند مدت و بقیه متعادل می‌باشند یعنی آنها در هر میزان تابش روز گل می‌دهند.

مسیر تابش نور: ریشه و برگ‌های انشعابی جهت‌های متفاوتی را در مسیر نور نشان می‌دهند، در مناطق معتدل نقاط جنوبی رشد بهتر محصولات را نسبت به مناطق شمالی نشان می‌دهد که به این دلیل که مسیر نور، نور بیشتری از خورشید را به سمت جنوب هدایت می‌کند.

۶-۲-۲- ورزش باد

وزش باد در یک مکان وابسته به فاکتورهای مختلف از قبیل موقعیت جغرافیایی، زمین شناسی دامنه، فاصله از ساحل دریا، دشت های مسطح، پوشش گیاهی و غیره می باشد. فعالیت آن در گیاهان مستقیم یا غیرمستقیم می باشد. بعنوان تأثیر مستقیم، باد باعث پارگی مکانیکی و آسیب به بافت گیاهان می شود. وزش شدید باد باعث ریزش برگها می شود و گیاهان در خطر بالا آمدن ریشه و ورم ریشه می شوند. محل قرارگیری گیاهان در گندم، ذرت، چغندر و برنج و غیره با وزش باد ایجاد می شود. وزش شدید باد، شاخه های مرده و زنده درختان را می شکنند و حتی باعث درآمدن کامل ریشه آنها می شود. با این وجود این تأثیر زمانی کاهش می یابد که بادشکن وجود داشته باشد. در بیابان های سخت، وزش باد شدید باعث فرسایش دائمی خاک می شود و رشد گیاهان را با مشکل مواجه می کند. پوشش های گیاهی جهت مسدود کردن حرکت خاک به واسطه فرسایش افزایش یافته است. باد باعث بارندگی های شدید نیز می شود. در همه باد و باران های موسمی با الگوهای خاصی از حرکت باد مشخص شده است. باد دارای تأثیر شدیدی در رطوبت اتمسفر می باشد. یک عملکرد مهم باد به آلودگی گل ها و پراکندگی دانه ها، میوه و میکرو ارگانیسم ها کمک می کند. بطور غیر مستقیم وزش باد میزان تراوش در گیاه را تحت تأثیر قرار می دهد. بسیاری از آسیب های محصولات توسط وزش بادهای گرم و خشک در زمان شکوفایی می باشد. تعادل آب داخلی گیاهان تحت تأثیر قرار می دهد که در نتیجه باعث ضعیف شدن دانه می شود. آسیب دیگر، آسیب غنچه می باشد که با تبخیر ترشحات موجود از کلاله ایجاد می شود.

تأثیرات باد در تولید مثل: بادها رشد گیاه را از نظر مکانیکی و فیزیولوژیکی تحت تأثیر قرار می‌دهد. سنگ و ذرات گرد و غبار توسط باد به حرکت در می‌آیند باعث آسیب بافت گیاهان می‌شود. بیرون آمدن جوانه‌ها کاملاً پوشیده خواهند شد و یا ریشه‌های گیاهان جوان توسط بادهای شدید بیرون خواهد آمد. وزش باد باعث تلفات قابل ملاحظه‌ای می‌شود. تأثیرات فیزیولوژیکی بادها عمدتاً شامل افزایش تراوش به اندازه تبخیر از خاک می‌باشد. بادهای گرم و خشک تأثیر معکوسی در فتوسنتز دارد و از اینرو و باروری را تحت تأثیر قرار می‌دهد که موجب مسدود شدن دهانه می‌شود که حتی در زمانی که رطوبت خاک مناسب می‌باشد صورت می‌گیرد. بادهای گرم و خشک دارای تأثیرات مفید و مضر می‌باشد. دلیل اصلی برای شیوع پائین گرد و خاک‌های زرد رنگ خطرناک از گندم این است که در معرض پاتوژن‌هایی در درجه حرارت بالا قرار می‌گیرند که وقتی اتفاق می‌افتد که بادهای فصل شروع به وزیدن می‌کنند. بادهای ملایم دارای تأثیر مفید و مضر در فتوسنتز از طریق جایگزینی پی در پی دی اکسید کربن جذب شده توسط سطح برگ‌ها می‌باشد. تأثیر مطلوب باد در فتوسنتز تحت جریان ملایم باد در لایه‌های پائین‌تر برگ‌ها مشخص‌تر می‌باشد، که افزایش قدرت باد به لایه‌های عمیق‌تر برگ‌ها نفوذ می‌کند تا به حداکثر میزان فتوسنتز در میزان اشعه‌های دریافت شده نزدیک شود.

۷-۲-۲- گازهای اتمسفر

اتمسفری که زمین را احاطه کرده است حاوی ترکیبی از گازها مانند دی اکسید کربن، اکسیژن، نیتروژن، ارگون و گازهای مختلف با نسبت‌های ثابت می‌باشد. انواعی از این گازها در گیاهان صنعتی یافت شده است که میزان زیادی از گازهایی از قبیل CO , CO_2 , SO_2 را به اندازه بخار آب و ذرات معدنی آزاد می‌کند.

۱- دی اکسید کربن: CO_2 منبع اصلی کربن برای انواع مختلف عناصر ارگانیک در بدنه گیاهان می‌باشد این مواد خام عمده برای تولید کربوهیدرات از طریق فرایند فتوسنتز گیاهان سبز می‌باشد. فتوسنتز تقریباً متناسب با تجمع CO_2 در هوای اطراف شاخ و برگ محصولات می‌باشد. CO_2 که در عناصر ارگانیک گیاهان شرکت دارند توسط تجزیه تراوش این عناصر و مرگ، پوسیدن و سوختن گیاهان، به اتمسفر بر می‌گردد. افزایش رشد و باروری زیاد سبزیجات تحت شرایط گلخانه‌ای با افزایش CO_2 امکان پذیر می‌باشد. گازهای خاصی مانند HF , CO , SO_2 زمانی که به میزان مناسبی در هوا آزاد می‌شود برای گیاهان سمی می‌باشد. در اطراف کارخانه‌های تولید کننده آلومینیوم و فسفات گیاهان آسیب دیده گزارش شده است. در هر دو مورد، فلوزین آزاد شده و این باعث آسیب می‌شود. نزدیک کارخانه‌های سیمان، انتشار ذرات سیمان باعث آسیب محصولات می‌شود. CO_2 در آب حل نمی‌شود و سختی زیادی دارد. بنابراین، گیاهان آبی CO_2 را از آب بدست می‌آورند. در خاک، افزایش CO_2 باعث ریشه ضعیف می‌شود. این باعث تأثیر معکوس در فعالیت‌های متابولیک ریشه‌ها در گیاهان می‌شود.

۲- اکسیژن: هر موجود زنده‌ای خواه گیاه باشد یا حیوان، حیات‌شان وابسته به اکسیژن می‌باشد. اکسیژن جوی برای حیات و رشد طبیعی آن حیاتی می‌باشد. میزان اکسیژن بطور طبیعی در هوا ثابت می‌باشد زیرا گیاهان در طول فرایند فتوسنتز اکسیژن آزاد می‌کنند.

۳- نیتروژن: نیتروژن موجود در اتمسفر از طریق تابش نور، بارندگی و میکروارگانیسم‌های ثابت کننده نیتروژن در خاک موجود می‌باشد. باکتری‌های زنده آزاد، خزۀ دریایی آبی و غیره میزان مناسبی از نیتروژن را در خاک ثابت نگه می‌دارند. تجزیه پروتئین گیاهان و حیوانات مرده توسط میکروارگانیسم‌ها نیز به افزایش نیتروژن خاک کمک می‌کند. نیتروژن موجود در خاک در دسترس محصولات قرار می‌گیرد که توسط فعالیت باکتری‌های ترکیب شده با نیتروژن صورت می‌گیرد. بافت‌های گیاهان بطور وسیعی توسط حیوانات بعنوان غذا مصرف می‌شود. بخشی از نیتروژن این بافت‌ها بصورت محصولات حیوانی و یا لاشۀ حیوانات مرده دوباره به خاک باز می‌گردد.

۳-۲- پیامدهای اقتصادی و اجتماعی تنش خشکی در کشاورزی

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین چالش‌های اقلیمی است که آثار گسترده‌ای بر بخش کشاورزی بر جای می‌گذارد و پیامدهای آن فراتر از حوزه زیستی و تولیدی، ابعاد اقتصادی و اجتماعی جوامع انسانی را نیز تحت تأثیر قرار

می‌دهد. در طول تاریخ، بسیاری از تمدن‌های بشری به دلیل کمبود منابع آبی یا خشکسالی‌های پی‌درپی تضعیف یا حتی نابود شده‌اند. امروزه نیز با وجود پیشرفت فناوری‌ها و توسعه زیرساخت‌ها، همچنان بخش قابل توجهی از جمعیت جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با تهدیدهای ناشی از تنش خشکی روبه‌رو هستند. کشاورزی به‌عنوان اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب در سطح جهان، بیش از هر بخش دیگری در معرض آثار مستقیم و غیرمستقیم این پدیده قرار دارد و این امر به نوبه خود تبعات عمیقی برای اقتصاد روستایی، امنیت غذایی، رفاه اجتماعی و حتی ثبات سیاسی کشورها به همراه دارد.

از منظر اقتصادی، نخستین و آشکارترین پیامد تنش خشکی کاهش عملکرد محصولات کشاورزی است. خشکی موجب کاهش جوانه‌زنی بذر، اختلال در رشد رویشی و زایشی گیاه و در نهایت افت کمیت و کیفیت محصول می‌شود. این کاهش تولید مستقیماً درآمد کشاورزان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در مناطق دیم‌زار، که تولید کاملاً به بارش وابسته است، سال‌های خشکسالی می‌تواند به از دست رفتن کامل محصول منجر شود. در کشت‌های آبی نیز خشکی و کاهش دسترسی به منابع آب، هزینه‌های تولید را افزایش داده و پایداری اقتصادی مزارع را تهدید می‌کند. در چنین شرایطی، کشاورزان برای تأمین نیازهای آبی مزارع به استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی روی می‌آورند که این امر علاوه بر هزینه‌های سنگین پمپاژ و آبیاری، به افت سطح آبخوان‌ها و افزایش شوری خاک منجر می‌شود. در نتیجه، هزینه‌های تولید بالا رفته اما سود خالص کاهش می‌یابد و در برخی موارد کشاورزی به فعالیتی غیر اقتصادی تبدیل می‌شود (شکل ۳-۲).

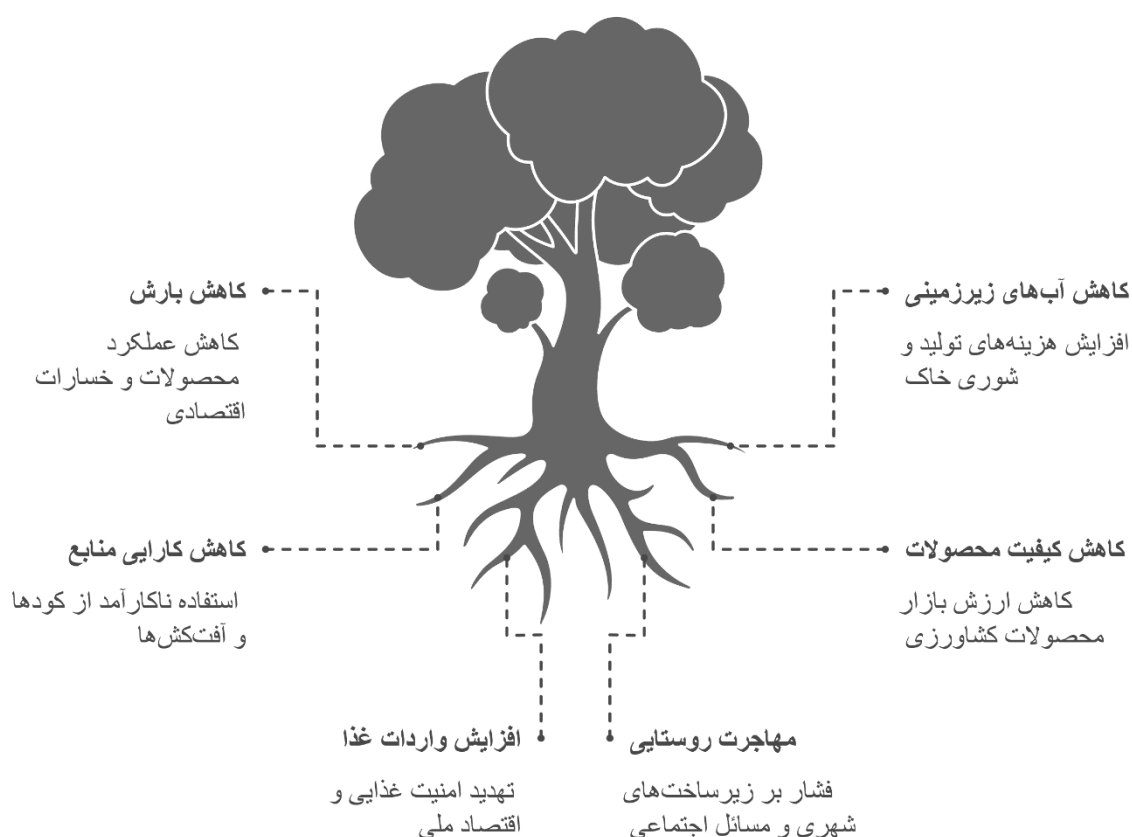
پیامد دیگر خشکی بر اقتصاد کشاورزی، کاهش بهره‌وری منابع است. هنگامی که آب به اندازه کافی در دسترس نباشد، کارایی مصرف سایر نهاده‌ها مانند کود و سم نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، نهاده‌هایی که کشاورز هزینه قابل توجهی برای خرید آن‌ها صرف کرده است، به دلیل محدودیت آب به‌طور کامل مورد استفاده گیاه قرار نمی‌گیرد. این مسأله به معنای هدررفت سرمایه و کاهش بازده اقتصادی کل مزرعه است. افزون بر این، کاهش کیفیت محصولات در اثر تنش خشکی موجب افت قیمت آن‌ها در بازار می‌شود. برای نمونه، در محصولات باغی خشکی می‌تواند اندازه میوه‌ها را کوچک‌تر کرده یا ظاهر آن‌ها را نامطلوب سازد و این امر ارزش بازاری محصول را کاهش می‌دهد (شکل ۳-۲).

در سطح کلان اقتصادی، خشکسالی و کم‌آبی ناشی از گرمایش جهانی و تغییر اقلیم، امنیت غذایی کشورها را تهدید می‌کند. کاهش تولید محصولات اساسی مانند گندم، برنج، ذرت و حبوبات به افزایش وابستگی کشورها به واردات منجر می‌شود. این وابستگی در شرایطی که بازارهای جهانی مواد غذایی ناپایدار و در معرض نوسانات قیمتی هستند، می‌تواند فشار مضاعفی بر اقتصاد ملی وارد کند. افزایش واردات مواد غذایی نه‌تنها ذخایر ارزی کشورها را کاهش می‌دهد، بلکه باعث می‌شود قیمت مواد غذایی در داخل کشور بالا برود و فشار بر اقشار کم‌درآمد جامعه افزایش یابد. در چنین شرایطی، شکاف طبقاتی و نابرابری‌های اجتماعی تشدید می‌شود و نارضایتی‌های عمومی شکل می‌گیرد.

از منظر اجتماعی، یکی از مهم‌ترین پیامدهای خشکی در کشاورزی، مهاجرت روستاییان است. کاهش درآمد کشاورزی و ناپایداری تولید سبب می‌شود بسیاری از خانواده‌های روستایی برای یافتن فرصت‌های شغلی بهتر

به شهرها مهاجرت کنند. این مهاجرت‌های اجباری پیامدهای اجتماعی متعددی به همراه دارد. از یک سو، مهاجرت بی‌رویه به شهرها فشار زیادی بر زیرساخت‌های شهری مانند مسکن، حمل‌ونقل و خدمات بهداشتی وارد می‌کند. از سوی دیگر، خالی شدن روستاها از نیروی کار فعال به تضعیف بخش کشاورزی و رکود اقتصادی در مناطق روستایی منجر می‌شود. همچنین مهاجران اغلب به دلیل کمبود مهارت‌های لازم در شهرها با مشکلات جدی اشتغال، فقر و حاشیه‌نشینی مواجه می‌شوند که این امر بستر بروز ناهنجاری‌های اجتماعی را فراهم می‌آورد.

کاهش تولیدات کشاورزی به دلیل خشکسالی



شکل ۳-۲: کاهش تولیدات کشاورزی ناشی از وقوع خشکسالی

یکی دیگر از جنبه‌های اجتماعی تنش خشکی، کاهش تاب‌آوری جوامع محلی است. روستاییانی که معیشت آن‌ها به کشاورزی وابسته است، در مواجهه با خشکی شدید نه تنها درآمد خود را از دست می‌دهند بلکه اعتماد به آینده و انگیزه فعالیت نیز در آن‌ها کاهش می‌یابد. این وضعیت به کاهش سرمایه اجتماعی، تضعیف همکاری‌های محلی و گسترش حس ناامنی و بی‌ثباتی منجر می‌شود. در برخی مناطق، رقابت بر سر منابع

محدود آب میان کشاورزان افزایش یافته و به مناقشات محلی و درگیری‌های اجتماعی دامن می‌زند. در سطح گسترده‌تر، کمبود منابع آبی می‌تواند به بروز تنش‌های بین منطقه‌ای و حتی بین‌المللی بر سر حقایق رودخانه‌ها و منابع مشترک منجر شود.

ابعاد اجتماعی بحران آب تنها به مهاجرت و تنش محدود نمی‌شود بلکه سلامت و رفاه جوامع انسانی را نیز تهدید می‌کند. کاهش دسترسی به آب سالم و کافی برای آشامیدن، پخت‌وپز و بهداشت فردی می‌تواند بیماری‌های ناشی از آب آلوده را افزایش دهد. علاوه بر آن، سوءتغذیه ناشی از کاهش تولید مواد غذایی سالم و متنوع، به‌ویژه در کودکان و گروه‌های آسیب‌پذیر، پیامد مستقیم خشکی و بحران آب در کشاورزی است. در بسیاری از مناطق کم‌آب، زنان و کودکان مجبورند مسافت‌های طولانی را برای تأمین آب طی کنند که این امر فرصت آموزش و مشارکت اجتماعی آن‌ها را محدود می‌سازد و چرخه فقر را بازتولید می‌کند.

از جنبه اقتصادی گسترده‌تر، تنش خشکی موجب کاهش سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی می‌شود. سرمایه‌گذاران به دلیل نااطمینانی از بازده تولید و ریسک بالای خشکسالی تمایلی به سرمایه‌گذاری در این بخش ندارند. این کاهش سرمایه‌گذاری نه تنها توسعه فناوری‌های نوین آبیاری و تولید را کند می‌کند، بلکه فرصت‌های شغلی در مناطق روستایی را نیز محدود می‌سازد. در مقابل، دولت‌ها ناگزیر می‌شوند برای جبران خسارت‌های ناشی از خشکسالی یارانه‌های سنگین و کمک‌های اضطراری پرداخت کنند. این سیاست‌ها در کوتاه‌مدت می‌تواند بخشی از خسارت‌ها را جبران کند اما در بلندمدت فشار زیادی بر بودجه عمومی وارد می‌کند و منابع مالی را از سایر بخش‌های توسعه‌ای منحرف می‌سازد. پیامدهای اقتصادی تنش خشکی تنها به کشاورزی محدود نمی‌شود بلکه سایر بخش‌های اقتصادی را نیز درگیر می‌کند. صنایع غذایی، نساجی و بسیاری از صنایع وابسته به محصولات کشاورزی به‌طور مستقیم از کاهش تولید کشاورزی آسیب می‌بینند. کاهش عرضه مواد اولیه موجب افزایش قیمت‌ها و کاهش سودآوری این صنایع می‌شود. همچنین کاهش درآمد روستاییان تقاضا برای کالاها و خدمات غیرکشاورزی را نیز کاهش می‌دهد و این امر رکود اقتصادی گسترده‌تری ایجاد می‌کند. در سطح ملی، کاهش تولید کشاورزی و افزایش واردات می‌تواند تراز تجاری کشور را منفی کند و در نهایت رشد اقتصادی را کاهش دهد.

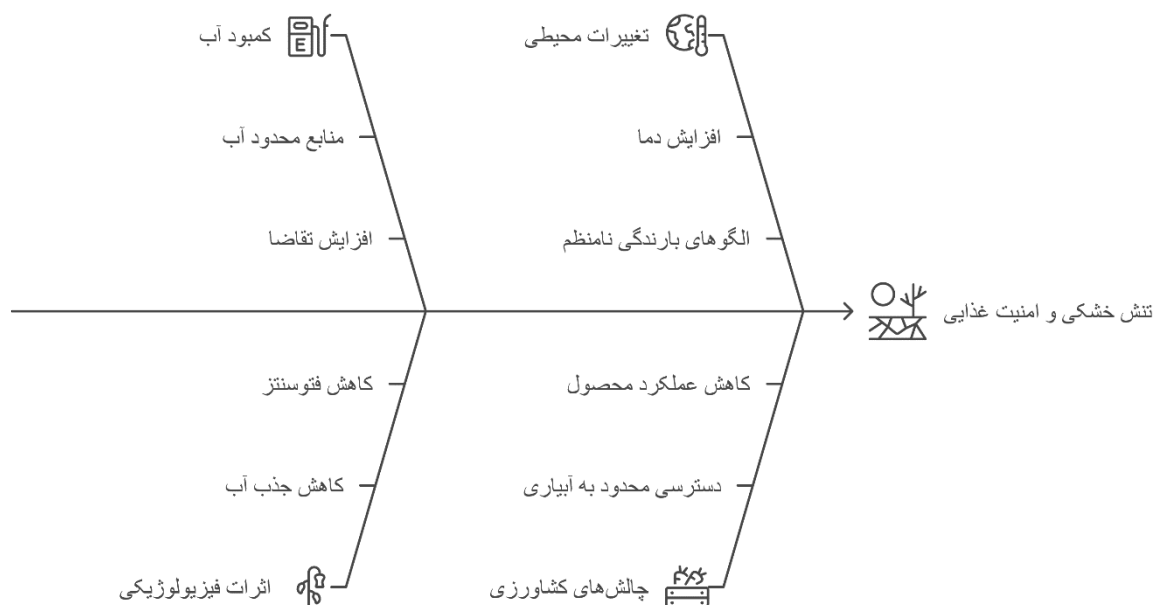
در کنار این پیامدها، اثرات غیرمستقیم خشکی بر ارزش زمین‌های کشاورزی نیز قابل توجه است. کاهش حاصلخیزی خاک، شوری و فرسایش ناشی از کم‌آبی ارزش اقتصادی زمین‌های زراعی را کاهش می‌دهد. این کاهش ارزش زمین سبب می‌شود دارایی کشاورزان که عمدتاً در زمین‌هایشان تجسم یافته است، تنزل پیدا کند و آن‌ها در معرض فقر مضاعف قرار گیرند. از دست دادن ارزش زمین همچنین توانایی کشاورزان برای دریافت وام و اعتبار از مؤسسات مالی را کاهش می‌دهد و در نتیجه امکان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سازگار با خشکسالی نیز محدود می‌شود.

فصل ۳: اثرات و مکانیسم گیاهان تحت تنش خشکی

۳-۱- تنش خشکی در گیاهان

کمبود آب و تنش خشکی عامل مهمی برای کاهش محصول و به چالش کشیدن امنیت غذایی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک است (شکل ۳-۱). یکی از مهمترین چالش‌های کشاورزی تنش خشکی می‌باشد (تاردیو و همکاران، ۲۰۱۴). منابع آب برای مصارف کشاورزی در جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک محدود می‌باشد که می‌تواند امنیت غذایی را تحت تاثیر قرار دهد (شکل ۳-۱). اثرات تنش خشکی در کشاورزی به دلیل کاهش منابع آب و رشد نگران کننده جمعیت جهان، افزایش نیاز به مواد غذایی را تشدید می‌کند (طاهری و همکاران، ۲۰۲۱؛ اوکانل و همکاران، ۲۰۱۹). از طرفی حدود ۹۵-۸۵ درصد زیست توده گیاه از آب تشکیل شده است، که در فرآیندهایی مختلف فیزیولوژیکی از جمله بسیاری از جنبه‌های رشد، نمو و متابولیسم گیاه نقش حیاتی دارد (شکل ۳-۱). تنش خشکی هنگامی رخ می‌دهد که آب موجود در خاک کاهش یابد و شرایط جوی نیز به خروج آب از طریق تعرق و تبخیر کمک کند. اگر این کمبود آب در گیاه با استفاده از آبیاری جبران شود گیاه به حالت نرمال خود ادامه می‌دهد و اگر در مدت زمانی بیشتر از حالت معمول، آبیاری صورت گیرد محققان آن را در پژوهش‌ها به صورت قطع آبیاری یا افزایش دور آبیاری بیان می‌کنند. این در حالی است که کشاورز به منابع آبی دسترسی ندارد و مدت زمان بیشتری طول می‌کشد که گیاه نیاز آبی خود را با استفاده از آبیاری تامین کند، در این مرحله تنش خشکی که در گیاه اتفاق می‌افتد عملکرد گیاه را تحت تاثیر قرار می‌دهد (صالحی لیثار و بخشایشان‌ا قدم، ۲۰۲۰؛ داریانتو و همکاران، ۲۰۱۷). کمبود آب در دسترس ریشه سبب می‌شود که گیاه پاسخ‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهد. اولین نشانه کمبود آب در گیاه در حالت و شکل ظاهری برگ‌ها اتفاق می‌افتد. در این مرحله با آبیاری، گیاه به حالت اولیه خود بر می‌گردد. اگر مدت زمان تنش خشکی طولانی تر شود گیاه تغییرات بیشتری در برگ‌ها از خود نشان می‌دهد از جمله زرد شدن برگ‌ها و پژمردگی دائم. در حالت پژمردگی دائم علاوه بر شکل ظاهری برگ‌ها مکانیسم‌های درونی آن نیز مختل شده و در نتیجه گیاه از بین می‌رود. تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان در مناطق مختلف جهان به‌شمار می‌رود. این تنش زمانی رخ می‌دهد که میزان آب موجود در خاک کمتر از نیاز فیزیولوژیکی گیاه باشد و گیاه نتواند آب کافی برای انجام فعالیت‌های حیاتی خود جذب کند. اثرات خشکی بر گیاهان بسیار گسترده و چندبعدی است و شامل تغییرات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، سلولی و مولکولی می‌شود. در شرایط خشکی، اولین واکنش گیاه کاهش جذب آب از خاک است که منجر به افت فشار تورژسانس سلولی می‌شود. این کاهش فشار باعث پژمردگی برگ‌ها، کاهش رشد سلولی و توقف تقسیم سلولی می‌گردد. همچنین خشکی موجب بسته شدن روزنه‌ها می‌شود که این امر باعث کاهش جذب دی‌اکسید کربن و در نتیجه کاهش نرخ فتوسنتز می‌شود. کاهش فتوسنتز نه تنها تولید انرژی و ترکیبات آلی را محدود می‌کند بلکه منجر به تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌ها می‌شود که می‌تواند به ساختارهای سلولی آسیب وارد کند.

درک اثرات تنش خشکی بر امنیت غذایی



شکل ۱-۳: تبیین اثرات تنش خشکی بر ابعاد امنیت غذایی

در شرایط خشکی، تهرق گیاه کاهش می‌یابد و این امر موجب افزایش دمای برگ‌ها می‌شود (شکل ۲-۳). افزایش دمای برگ ممکن است منجر به سوختگی بافت‌های گیاهی و اختلال در عملکرد آنزیم‌ها گردد. همچنین خشکی باعث کاهش سطح برگ‌ها و در نتیجه کاهش سطح فتوسنتزی گیاه می‌شود. در برخی موارد، خشکی موجب ریزش برگ‌ها و کاهش تعداد گل‌ها و میوه‌ها می‌شود که تأثیر مستقیم بر عملکرد نهایی گیاه دارد. در گیاهان حساس به خشکی، رشد ریشه محدود بوده و توانایی جذب آب از اعماق خاک کاهش می‌یابد، در حالی که گیاهان مقاوم دارای سیستم ریشه‌ای عمیق‌تر و گسترده‌تر هستند که به آن‌ها امکان جذب آب از لایه‌های پایین‌تر خاک را می‌دهد (شکل ۲-۳).

در سطح بیوشیمیایی، گیاهان تحت تنش خشکی اقدام به تولید و تجمع ترکیباتی مانند پرولین، گلیسین بتائین، قندهای محلول و سایر اسمولیت‌ها می‌کنند که نقش مهمی در حفظ فشار اسمزی و پایداری ساختارهای سلولی دارند. این ترکیبات باعث حفظ آب در سلول‌ها و جلوگیری از خشک شدن آن‌ها می‌شوند. همچنین فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز افزایش می‌یابد تا از آسیب‌های ناشی از گونه‌های فعال اکسیژن جلوگیری شود. تنش خشکی موجب تغییر در مسیرهای متابولیسم ثانویه نیز می‌شود و تولید ترکیبات فنولی، فلاونوئیدها و آلکالوئیدها افزایش می‌یابد که نقش

حفاظتی و دفاعی در برابر تنش دارند. این ترکیبات می‌توانند به‌عنوان آنتی‌اکسیدان عمل کرده و از آسیب به غشاهای سلولی جلوگیری کنند. در سطح مولکولی، تنش خشکی باعث تغییر در بیان ژن‌های مختلف می‌شود. ژن‌هایی که در تولید پروتئین‌های محافظتی مانند LEA، ترانسپورترهای آب مانند آکواپورین‌ها و فاکتورهای رونویسی مانند DREB، MYB و NAC نقش دارند، فعال می‌شوند. همچنین سطح هورمون آبسزیک اسید (ABA) به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که نقش کلیدی در تنظیم پاسخ‌های گیاه به خشکی دارد. مسیرهای سیگنال‌دهی وابسته به کلسیم، ROS و ABA نیز فعال شده و موجب تنظیم دقیق‌تر پاسخ‌های دفاعی گیاه می‌شوند. تنش خشکی موجب تغییر در ساختار غشای سلولی و افزایش نفوذپذیری آن می‌شود که می‌تواند منجر به نشت یون‌ها و اختلال در تعادل یونی سلول گردد. همچنین خشکی موجب اختلال در عملکرد میتوکندری و کلروپلاست‌ها می‌شود که نقش حیاتی در تولید انرژی و فتوسنتز دارند. در گیاهان زراعی، تنش خشکی اثرات شدیدی بر عملکرد دارد. کاهش تعداد و سطح برگ‌ها باعث محدود شدن فتوسنتز و کاهش تولید ماده خشک می‌شود. همچنین خشکی در مراحل حساس رشد مانند گلدهی، گرده‌افشانی و تشکیل میوه می‌تواند منجر به کاهش شدید عملکرد و کیفیت محصول گردد. در برخی موارد، خشکی موجب ریزش گل‌ها و میوه‌ها، کاهش اندازه بذر و کاهش محتوای مواد مغذی مانند پروتئین، روغن و قند در محصولات می‌شود. همچنین خشکی موجب کاهش جذب عناصر غذایی از خاک می‌شود که این امر می‌تواند منجر به کمبود عناصر ضروری مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاه گردد. در شرایط خشکی شدید، گیاهان ممکن است وارد مرحله پیری زودرس شوند و فرآیندهای متابولیکی آن‌ها به سمت حفظ بقا و کاهش مصرف انرژی هدایت شود.

تأثیرات تنش خشکی بر گیاهان



شکل ۲-۳: بررسی اثرات ناشی از تنش خشکی بر رشد و عملکرد گیاهان

در سطح سلولی، خشکی موجب تغییر در ساختار دیواره سلولی، کاهش انعطاف‌پذیری و افزایش شکنندگی آن می‌شود. همچنین تنش خشکی می‌تواند موجب اختلال در عملکرد اندامک‌هایی مانند ریبوزوم‌ها، میتوکندری‌ها و کلروپلاست‌ها گردد. در شرایط خشکی شدید، سلول‌ها ممکن است وارد فرآیند مرگ برنامه‌ریزی‌شده شوند تا از گسترش آسیب به سایر بخش‌های گیاه جلوگیری شود. در برخی گونه‌ها، خشکی موجب تحریک تولید ترکیبات فرار و سیگنال‌دهنده‌هایی می‌شود که به گیاهان مجاور هشدار داده و موجب فعال‌سازی پاسخ‌های دفاعی در آن‌ها می‌گردد. همچنین خشکی موجب کاهش سنتز پروتئین‌های ساختاری و آنزیمی می‌شود و ترجیحاً پروتئین‌هایی تولید می‌شوند که نقش حفاظتی دارند.

۲-۳- مقاومت به تنش خشکی

با توجه به کاهش نزولات جوی، قرار گرفتن گیاهان در معرض تنش خشکی اجتناب‌ناپذیر است. توانایی ادامه رشد و فتوسنتز در شرایط خشکی به پتانسیل ژنتیکی گیاه وابسته است که به صورت مکانیسم‌های فیزیولوژیکی و یا مولکولی بروز می‌یابد (ملکی و همکاران، ۲۰۲۰). مکانیسم‌هایی که باعث افزایش تحمل گیاهان در برابر اثرات تنش خشکی می‌شوند، در طی تکامل شکل گرفته‌اند (بتول و همکاران، ۲۰۲۰). پرهیز، فرار و تحمل به تنش سه استراتژی اصلی برای بقا هستند که گیاهان هنگام مواجهه با خشکی از آن‌ها استفاده می‌کنند (شکل ۳-۳). بنابراین، پاسخ گیاهان به تنش خشکی از سطح مولکولی تا سطح کل گیاه متفاوت است (گالیندو و همکاران، ۲۰۲۰؛ سلیمان و همکاران، ۲۰۲۱). مقاومت به خشکی عبارت است از توانایی یک گیاه که بتواند بدون اثر منفی بر فتوسنتز، تعرق کمتری داشته باشد؛ یا به بیان دیگر، قدرت رشدی که اجازه دهد گیاه آب را با مقداری مساوی یا بیشتر از تعرق از خاک جذب کند. در نتیجه، گیاهان مقاوم به خشکی آن‌هایی هستند که قادرند در شرایط تنش خشکی رشد کرده و محصول اقتصادی تولید کنند. مقاومت در گیاهان به دو صورت قابل ارزیابی است: نخست، رشد و نمو گیاهان در شرایط خشکی همچنان عملکرد نسبی و قابل قبولی نسبت به شرایط بدون تنش ارائه دهد؛ دوم، توانایی گیاه برای زنده ماندن در خشکی، حتی بدون تولید عملکرد اقتصادی. از این رو، حالت اول بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته و تمرکز اصلی بر یافتن راهکارهایی برای افزایش عملکرد در شرایط تنش خشکی است. مکانیسم‌های مقاومت به خشکسالی میان گونه‌های گیاهی متفاوت هستند (سلیمان و همکاران، ۲۰۲۱).

توانایی گیاهان برای مقابله با تنش‌های محیطی به نوع، شدت و مدت تنش، گونه گیاهی و همچنین مرحله‌ای که تنش در آن رخ می‌دهد بستگی دارد (ملکی و همکاران، ۲۰۱۱؛ گری و برادی، ۲۰۱۶). گیاهان با کاهش مصرف منابع خود قادرند با شرایط نامساعد محیطی مانند خشکی مقابله کنند (اوساکابه و همکاران، ۲۰۱۴؛ بیلاخ و همکاران، ۲۰۱۷). بین رشد گیاه و دسترسی به آب ارتباط نزدیکی وجود دارد. در شرایط تنش، رشد گیاه مختل شده و در نتیجه قابلیت گسترش دیواره سلولی و فشار تورژسانس کاهش می‌یابد. برای مقابله با کمبود آب، تنظیم فشار اسمزی از طریق افزایش غلظت قند در ریشه و برگ صورت می‌گیرد. همچنین در

گیاهان تحت تنش خشکی، رشد ریشه نسبت به شاخساره افزایش نشان می‌دهد (سلیمان و همکاران، ۲۰۱۹؛ میراندا و همکاران، ۲۰۲۱).

۱-۲-۳- مکانیسم فرار

برخی گیاهان برای گریز از اثرات مخرب تنش خشکی از مکانیزم‌هایی مانند رشد سریع و کوتاه کردن چرخه زندگی استفاده می‌کنند (آلوارز و همکاران، ۲۰۱۸). در میان این سازوکارها، گلدهی زودرس را می‌توان به‌عنوان یکی از مؤثرترین اشکال سازگاری با فرار از خشکی دانست (تکله و آلمو، ۲۰۱۶)، هرچند این ویژگی می‌تواند در مواردی به کاهش چشمگیر طول دوره رشد و در نهایت افت عملکرد منجر شود (بلوم، ۲۰۱۱). این نوع سازگاری بیشتر در مراتع و گیاهان علفی مشاهده می‌شود، جایی که گیاهان با بهره‌گیری از مکانیسم فرار، چرخه رشد و نمو خود را به سرعت تکمیل می‌کنند (شکل ۳-۳).

۲-۲-۳- مکانیسم اجتناب

در استراتژی اجتناب هنگام مواجهه با تنش خشکی، گیاه با کنترل هدایت روزنه‌ای و کاهش تلفات تعرق، همراه با افزایش جذب آب از طریق سیستم ریشه‌ای، توانایی خود را در حفظ پتانسیل آب بالا تقویت می‌کند (دوبرا و همکاران، ۲۰۱۰). افزون بر این، برخی ویژگی‌های گیاه‌شناسی مانند وجود برگ‌های دارای کرک یا سطح پوستی ضخیم می‌توانند به حفظ محتوای آب در بافت‌های گیاه کمک کنند (بولار و همکاران، ۲۰۱۷). مکانیسم اجتناب ماهیتی ژنتیکی دارد و در بسیاری از گیاهان زراعی دیده می‌شود. به عنوان نمونه، در ذرت تحت شرایط خشکی، این مکانیسم به صورت لوله‌ای شدن برگ‌ها برای کاهش سطح تعرق و نیز افزایش رشد ریشه بروز می‌یابد که در نهایت باعث افزایش مقاومت گیاه به کمبود آب می‌شود (شکل ۳-۳).

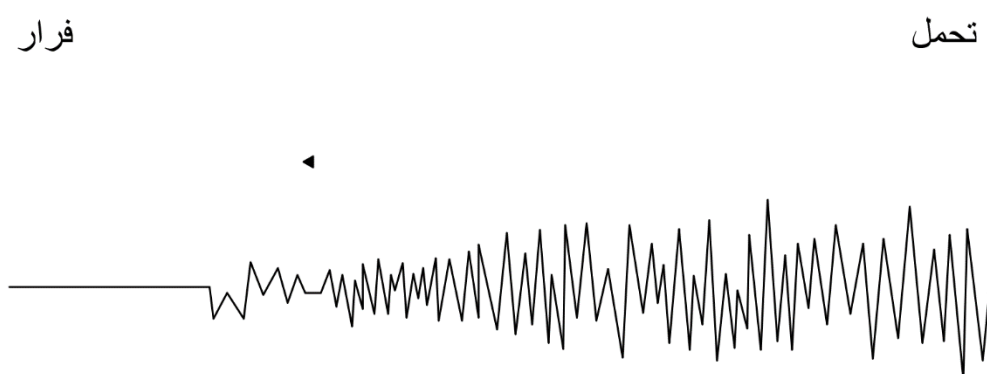
۳-۲-۳- مکانیسم تحمل

مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی معمولاً با کاهش سطح و تعداد برگ همراه است. این فرایند سبب کاهش تعرق، افزایش جذب آب از خاک و در نهایت افزایش مقاومت گیاه می‌شود. احتمالاً کاهش سطح برگ ناشی از کاهش تقسیم سلولی، پیری زودرس یا ریزش برگ‌ها است (ستایش‌مهر و گنجعلی، ۲۰۱۳؛ دا سیلوا لوباتو و همکاران، ۲۰۰۸؛ اوساگوو و همکاران، ۲۰۱۰). کمبود آب اغلب به دلیل کاهش رطوبت یا نبود بارندگی رخ می‌دهد که در نتیجه آن، محتوای رطوبتی خاک کاهش یافته یا پتانسیل آب در اندام‌های هوایی مانند برگ و ساقه افت می‌کند (ریستوی و همکاران، ۲۰۱۹). در چنین شرایطی، میزان از دست دادن آب از طریق تعرق برگ‌ها بیشتر از مقدار جذب آب توسط ریشه در محیط‌های خشک است (گوچه و همکاران، ۲۰۲۰).

در این وضعیت، ریشه با گسترش و توسعه خود می‌کوشد آب بیشتری جذب کند و این موضوع یکی از ویژگی‌های سازگاری گیاهان برای به حداقل رساندن از دست دادن آب در شرایط خشکی است (مارتینز-ویلاتا

و همکاران، ۲۰۱۷). یکی از سازوکارهای تحمل گیاه در سطح فتوسنتز، کاهش سطح برگ و محدود کردن رشد برگ‌های جدید است؛ بدین ترتیب گیاه قادر خواهد بود کمبود آب را در محیط‌های خشک تحمل کند (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۹). این تغییرات ساختاری همچنین با افزایش بازتاب نور در سطح برگ موجب کاهش دمای برگ می‌شوند (سلیمان و همکاران، ۲۰۱۹) و در نهایت میزان تعرق برگ‌ها کاهش می‌یابد (تیواری و همکاران، ۲۰۲۱). با این حال، به طور کلی پذیرفته شده است که تغییرات در سیستم ریشه، از جمله افزایش اندازه، تراکم، سرعت گسترش و طول ریشه‌ها، یکی از مهم‌ترین استراتژی‌های گیاهان متحمل به خشکی برای مقابله با کمبود آب به شمار می‌آید (تزورتزاکیس و همکاران، ۲۰۲۰). علاوه بر این، سازوکارهایی همچون تنظیم اسمزی، فعال شدن سیستم دفاعی آنتی‌اکسیدانی، تجمع املاح، تغییرات متابولیکی و بیوشیمیایی، بسته شدن روزنه‌ها و افزایش نسبت ریشه به شاخساره از جمله دیگر راهبردهای رایج هستند که به گیاهان کمک می‌کنند اثرات منفی تنش خشکی را تا حد زیادی تحمل کنند (لوپز-گالیانو و همکاران، ۲۰۱۹).

استراتژی‌های گیاهان برای مقابله با تنش خشکی، از فرار تا تحمل



فرار	اجتناب	تحمل
چرخه زندگی را تسریع می‌کند، از تنش دوری می‌کند	تلفات آب را کاهش می‌دهد، جذب آب را افزایش می‌دهد	با کاهش تعرق، زنده می‌ماند

شکل ۳-۳: راهبردهای سازگاری گیاهان با تنش خشکی؛ از مکانیزم‌های فرار تا تحمل

۳-۳- اثر تنش خشکی بر رشد گیاه

ریشه نخستین اندام گیاه است که در معرض تنش خشکی (کمبود آب) قرار می‌گیرد، زیرا تنش آبی در اثر کمبود یا تجمع بیش از حد آب در خاک ایجاد می‌شود (کیم و همکاران، ۲۰۲۰). وظیفه اصلی ریشه در خاک، جذب آب و مواد غذایی و نیز تثبیت گیاه است. از این رو، شناخت ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی ریشه برای رشد مناسب ساقه و در نهایت تولید محصول اهمیت فراوانی دارد (قوش و شو، ۲۰۱۴). در شرایط تنش خشکی، نسبت ریشه به ساقه افزایش می‌یابد که علت اصلی آن کاهش رشد اندام‌های هوایی در مقایسه با ریشه است. اهمیت سیستم ریشه‌ای در جذب آب بسیار زیاد است. ریشه‌های عمیق و گسترده می‌توانند رطوبت را از لایه‌های زیرین خاک استخراج کنند؛ بنابراین توسعه سیستم ریشه‌ای در شرایط خشکی موجب افزایش کارایی گیاه در جذب آب از خاک می‌شود (ستایش‌مهر و گنجعلی، ۲۰۱۳). با وجود این، در شرایط تنش خشکی، جذب مواد غذایی توسط ریشه و انتقال آن‌ها به ساقه کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل محدود شدن تعرق، افت نفوذپذیری غشایی و اختلال در انتقال فعال مواد رخ می‌دهد. همچنین جذب عناصر غذایی وابسته به میزان رطوبت خاک است، به گونه‌ای که کاهش رطوبت منجر به کاهش جریان انتشار مواد غذایی از خاک به سطح ریشه‌ها می‌شود (آرندت و همکاران، ۲۰۰۱). افزایش نسبت ریشه به ساقه و کاهش سطح برگ از مهم‌ترین واکنش‌های گیاه به خشکی به شمار می‌رود. دسترسی به آب تأثیر مستقیمی بر ساختار برگ دارد و در نتیجه در شرایط خشکی، پاسخ سطح برگ نسبت به ریشه و ساقه حساس‌تر است (ستایش‌مهر و گنجعلی، ۲۰۱۳). تنش خشکی بر رشد، ویژگی‌های فنولوژیکی، میزان فتوسنتز، روابط تغذیه‌ای و آبی گیاه اثر گذاشته و باعث کاهش تنفس در گیاه می‌شود (عبید و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این، خشکی منجر به تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن شده که با افزایش پراکسیداسیون چربی، تنش اکسیداتیو در گیاه ایجاد می‌کند. اثرات این پدیده در صفاتی همچون تغییر ظاهر برگ و کاهش ارتفاع گیاه قابل مشاهده است (داس و همکاران، ۲۰۲۱). پژمردگی، ریزش و پیچ‌خوردگی برگ‌ها، بسته شدن روزنه‌ها و محدودیت در توسعه سلول‌ها از پیامدهای مهم خشکی بر سطح برگ است. در مراحل آغازین تنش، کمبود آب مانع طویل شدن سلول‌های برگ می‌شود. سطح کوچک‌تر برگ نیز جذب آب از خاک را کاهش داده و به دنبال آن تعرق کاهش می‌یابد (تینلی و دورجی، ۲۰۲۱؛ فتحی و طاری، ۲۰۱۶). برخی از اثرات تنش خشکی بر گیاهان در جدول ۱-۳ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳. اثرات مورفولوژیکی تنش خشکی بر بخش‌های مختلف گیاه

بخش گیاه	اثرات مورفولوژیکی تنش خشکی	توضیح
(Root) ریشه	افزایش رشد طولی و عمقی ریشه	ریشه‌ها به سمت مناطق عمیق‌تر خاک رشد می‌کنند تا آب جذب کنند.
(Stem) ساقه	کاهش رشد جانبی ریشه‌ها افزایش نسبت ریشه به ساقه کاهش طول ساقه کاهش ضخامت ساقه	کاهش شاخه‌های جانبی به حفظ انرژی و منابع کمک می‌کند. گیاه منابع بیشتری به جذب آب اختصاص می‌دهد. کاهش رشد طولی برای صرفه‌جویی در انرژی و آب. کاهش ذخیره آب و کاهش تولید سلول‌های پارانشیمی.
(Leaf) برگ	کوتاه شدن بین‌گره‌ها کاهش مساحت برگ پیچ خوردگی یا رول شدن برگ کاهش تعداد برگ	کاهش فاصله بین برگ‌ها برای کاهش تبخیر. کاهش سطح تبخیر و کاهش مصرف آب. جلوگیری از تبخیر بیش از حد از سطح برگ. گیاه برگ‌های جوان کمتر تولید می‌کند تا مصرف آب را کاهش دهد.
گل و اندام تولید مثلی	زرد شدن یا کلروز ضخیم شدن اپیدرم و کوتیکول کاهش طول و عرض برگ کاهش تشکیل گل	کاهش فتوسنتز به دلیل کمبود آب. افزایش مقاومت به تبخیر و کاهش از دست دادن آب. برگ‌های کوچک‌تر برای کاهش سطح تبخیر تولید می‌شوند. انرژی و منابع صرف زنده ماندن می‌شوند نه تولید گل.
(Seed) بذری	ریزش گل و میوه کوچک شدن میوه و دانه کاهش وزن بذر کاهش قدرت جوانه‌زنی	کاهش تولید میوه برای صرفه‌جویی در منابع. کاهش اندازه میوه‌ها به دلیل محدودیت آب. کاهش منابع ذخیره‌شده در بذر به دلیل محدودیت فتوسنتز. کیفیت بذر تحت تأثیر کم‌آبی قرار می‌گیرد.

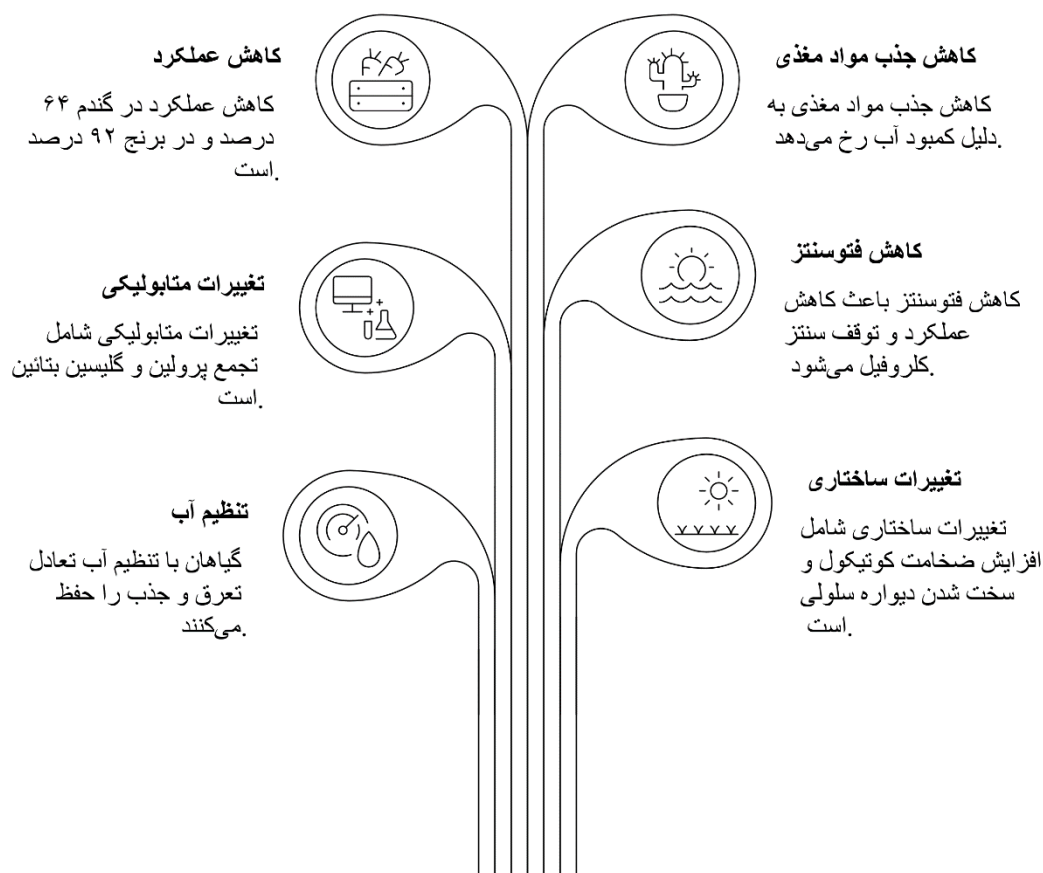
۳-۴- اثرات تنش خشکی بر فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه

بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی تعیین‌کننده عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی به گونه‌ای پیچیده تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرند (شکل ۴-۳). بنابراین، تفسیر نحوه تجمع، ترکیب و عملکرد گیاهان در این فرآیندهای فیزیولوژیکی که در طول چرخه زندگی محصولات زراعی در حال تغییر و نامحدود هستند، کار دشواری است (فاروق و همکاران، ۲۰۰۹).

گیاه هنگام مواجهه با تنش خشکی ابتدا با تنظیم جذب آب و تغییر پتانسیل آب، تعادل بین تعرق و جذب آب را برقرار می‌کند. با ادامه تنش، تغییرات بیشتری در رشد ریشه و افزایش نسبت ریشه به ساقه رخ می‌دهد، ظرفیت نگهداری آب در بافت‌ها افزایش می‌یابد، نفوذپذیری ریشه نسبت به آب بالا می‌رود و ضخامت کوتیکول برگ‌ها افزایش می‌یابد تا میزان آب حفظ شود. همچنین، تغییراتی در ساختمان سلولی و متابولیت‌ها از جمله

سخت شدن دیواره سلولی، تجمع ترکیباتی مانند پرولین و گلیسین بتائین و ثابت نگه داشتن فشار تورژر رخ می‌دهد تا سلول‌ها بتوانند آب خود را حفظ کنند (ورسلو و همکاران، ۲۰۰۶).

برگ‌ها اندام اصلی فتوسنتز در گیاه هستند، بنابراین افزایش شاخص سطح برگ باعث ایجاد ظرفیت فیزیولوژیکی مناسب برای استفاده هرچه بیشتر از نور و تأمین مواد مغذی مورد نیاز برای پر شدن دانه و افزایش عملکرد می‌شود. کاهش شدید عملکرد و اجزای آن در شرایط تنش خشکی شدید عمدتاً به دلیل کاهش فتوسنتز، توقف سنتز کلروفیل، کاهش فعالیت آنزیم‌های احیاکننده نیترات و افزایش فعالیت آنزیم‌های هیدرولیز کننده رخ می‌دهد (ملکی و همکاران، ۲۰۲۰). کمبود آب یک تنش بحرانی است که رشد گیاه را محدود کرده و در نهایت عملکرد محصول را کاهش می‌دهد (نازیم و همکاران، ۲۰۲۱؛ فتحی و کردونی، ۲۰۲۰). تنش خشکی می‌تواند روند رشد، اجزای عملکرد، ماده خشک و عملکرد کمی و کیفی انواع مختلف محصولات زراعی را به طور قابل توجهی کاهش دهد. گزارش‌ها نشان داده‌اند که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد در محصولات مختلف به این ترتیب می‌شود: گندم ۶۴ درصد، جو ۵۰ درصد، ذرت ۶۳ تا ۸۷ درصد، برنج ۵۳ تا ۹۲ درصد، سویا ۴۶ تا ۷۱ درصد، نخود ۵۵ تا ۶۵ درصد و آفتابگردان ۶۰ درصد (حسین و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین، دسترسی به عناصر غذایی در خاک تحت تأثیر تنش خشکی کاهش می‌یابد. بنابراین، تأثیر تنش خشکی بر هر یک از اجزای عملکرد گیاه زراعی می‌تواند منجر به کاهش کلی عملکرد شود و در صورت نبود آب کافی، نه تنها رشد گیاه به دلیل کمبود آب محدود می‌شود بلکه جذب عناصر غذایی قابل دسترس نیز کاهش می‌یابد (عزتی و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۴-۳: ابعاد چندوجهی اثرات تنش خشکی بر گیاهان

۳-۵- اثرات تنش خشکی بر فرآیندهای بیوشیمیایی گیاه

تنش خشکی بسیاری از فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاهان را مختل می‌کند. این تنش باعث ایجاد آسیب‌های اکسیداتیو توسط گونه‌های فعال اکسیژن، شامل رادیکال هیدروکسیل، پراکسید هیدروژن و رادیکال سوپراکسید می‌شود (خیری‌سیس و همکاران، ۲۰۲۱). تولید گونه‌های فعال اکسیژن منجر به تخریب کلروفیل از طریق جدا شدن زنجیره فیتولی از حلقه پورفیرین، پراکسیداسیون لیپیدهای غشا و تخریب پروتئین‌ها می‌شود (لی‌پینگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ کوواسیک و همکاران، ۲۰۱۴). مطالعات نشان داده‌اند که تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌ها تحت تنش خشکی می‌تواند به لیپیدهای غشا، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک آسیب برساند (خیری‌سیس و همکاران، ۲۰۲۱).

در طول فتوسنتز در شرایط کم‌آبی، نشت بالای الکترون به سمت O_2 رخ می‌دهد و انواع مختلف رادیکال‌های آزاد از جمله پراکسید هیدروژن، سوپراکسید و رادیکال هیدروکسیل تولید می‌شوند. گیاهان برای مقابله با

تنش اکسیداتیو ناشی از این گونه‌ها، دارای سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیرآنزیمی هستند (میلر و همکاران، ۲۰۱۰). سیستم آنزیمی شامل آنزیم‌های سوپراکساید دیسموتاز، گلوتاتیون ردوکتاز، پراکسیداز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز است که در پاک‌سازی مولکول‌های پراکسید هیدروژن تولید شده نقش دارند (اریانو و همکاران، ۲۰۰۵).

گیاهان نمی‌توانند از تنش‌های محیطی فرار کنند و بنابراین به مکانیسم‌هایی نیاز دارند که تنش‌ها را شناسایی و به آن‌ها پاسخ دهند (رانجان و همکاران، ۲۰۰۱). یکی از این مکانیسم‌ها، تنظیم اسمزی است؛ نوعی سازگاری به خشکی که از طریق تجمع مواد محلول در سلول، تورژسانس سلولی و فرآیندهای وابسته به آن را در پتانسیل‌های پایین آب حفظ می‌کند (تورکان، ۲۰۱۱). پرولین یکی از اسیدآمین‌های فعال در تنظیم اسمزی است و نقش مهمی در محافظت از ساختارهای سلولی و پایداری آنزیم‌ها دارد (محمدی و همکاران، ۲۰۱۱؛ کاوی‌کیشور و همکاران، ۲۰۰۵). همچنین، قندهای محلول از دیگر محافظت‌کننده‌های اسمزی در سلول هستند (پتگر و همکاران، ۲۰۰۵).

مطالعات نشان داده‌اند که در گیاه جو تحت تنش خشکی، میزان پرولین، قندهای محلول و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، پلی‌فنل اکسیداز و پراکسیداز افزایش می‌یابد (موولودی و همکاران، ۲۰۱۴). کمبود آب باعث تغییر در محتوای کلروفیل نیز می‌شود؛ به طوری که در گیاه شوید، شدت تنش خشکی میزان کلروفیل a و b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدهای اندام هوایی را به طور معنی‌داری کاهش داده است (مارچینسکا و همکاران، ۲۰۱۳).

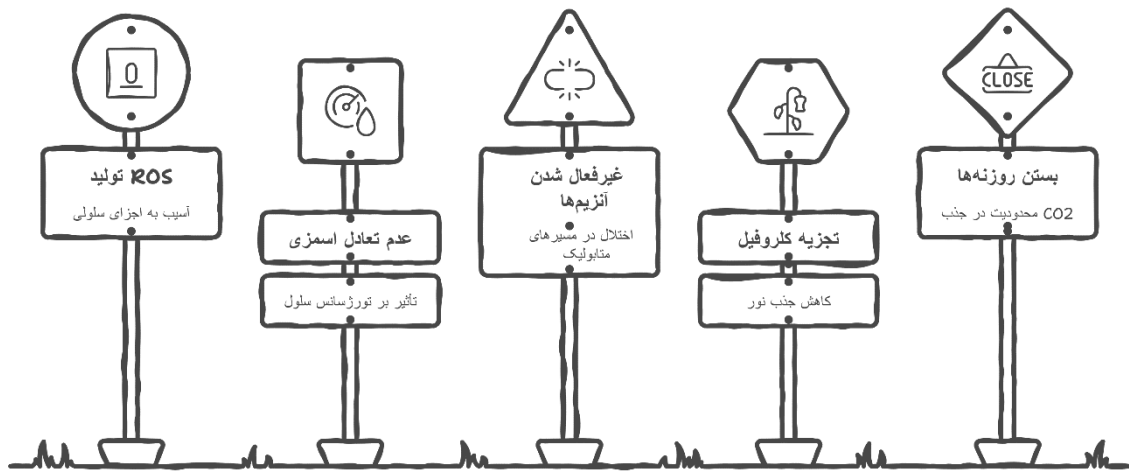
تحت شرایط خشکی، فعالیت گونه‌های فعال اکسیژن موجب غیرفعال شدن آنزیم‌ها، تغییر ساختار پروتئین‌ها و از بین رفتن رنگدانه‌های کلروفیل می‌شود (خیری‌سیس و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین، میزان پروتئین برگ و غلظت کلروفیل کاهش می‌یابد که احتمالاً ناشی از کاهش سنتز یا تجزیه پروتئین‌ها به دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های پروتئاز است. حفظ غلظت بالای پروتئین و کلروفیل برگ باعث دوام فتوسنتز و افزایش مقاومت گیاه به خشکی می‌شود (فاروق و همکاران، ۲۰۰۹؛ خیری‌سیس و همکاران، ۲۰۲۱؛ ملکی و همکاران، ۲۰۲۰). فتوسنتز گیاهان تحت تأثیر شرایط محیطی، به ویژه تنش خشکی، قرار می‌گیرد. توانایی گیاه برای ادامه رشد و حفظ فعالیت فتوسنتزی در شرایط خشکی به پتانسیل ژنتیکی آن وابسته است و این پتانسیل به صورت واکنش‌هایی در سطح فیزیولوژیکی و مولکولی در گیاه بروز می‌کند. تنش خشکی با کاهش آب واکوئل و اندازه سلول، باعث کاهش محتوای آب برگ می‌شود. علت این کاهش، باز شدن روزنه‌ها و خروج آب از گیاه به صورت تعرق است و با توجه به کمبود رطوبت در خاک و ریشه‌ها، رشد ریشه‌ها افزایش می‌یابد تا جذب آب جبران شود، اما به دلیل کمبود رطوبت خاک، این مکانیسم نمی‌تواند آب از دست رفته را تأمین کند و در نتیجه، آب برگ کاهش می‌یابد. این فرآیندها مانع فتوسنتز شده، باعث تغییر در محتوای کلروفیل و آسیب به ساختارهای فتوسنتزی گیاه می‌شوند (شکل ۵-۳).

تنظیم تعرق برگ از طریق بسته شدن روزنه‌ها می‌تواند به عنوان یک مکانیسم مقاومت به خشکی عمل کند، اما اجتناب از تنش که از این طریق حاصل می‌شود، ممکن است منجر به توقف فتوسنتز شود و برای گیاه نامطلوب باشد. کاهش کارایی دستگاه فتوسنتزی و آسیب به آن در اثر کمبود آب، موجب مصرف نشدن

دی اکسیدکربن و افزایش غلظت آن در برگ می شود. در شرایطی که تعرق روزه‌ای بالا باشد، احتمالاً جذب و تثبیت دی اکسیدکربن افزایش یافته و در نهایت تولید بیوماس و عملکرد گیاه بهبود می یابد. با افزایش شدت تنش، هدایت مزوفیلی بیشتر از هدایت روزه‌ای تحت تأثیر قرار می گیرد؛ بنابراین، حتی با کاهش هدایت روزه‌ای و محدود شدن ورود دی اکسیدکربن به روزه‌ها، به دلیل افت کارایی کربوکسیلاسیون و کاهش مصرف دی اکسیدکربن، غلظت آن در زیر اتاقک روزه‌ای افزایش می یابد.

کلروفیل بخش اصلی کلروپلاست است و نقش بسیار مهمی در فتوسنتز دارد. رنگدانه‌های کلروفیل برای جذب نور و استفاده در عملکرد فتوسنتزی ضروری هستند. کلروفیل از مهم‌ترین ماکرومولکول‌ها و رنگدانه‌های جذب کننده نور در غشاهای تیلاکوئیدی به شمار می آید که تحت تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری، دمای بالا و فلزات سنگین آسیب می بیند. در شرایط خشکی، محتوای کلروفیل برگ کاهش یافته و فعالیت آنزیم‌های چرخه کالوین نیز مختل می شود. کاهش کلروفیل معمولاً ناشی از آسیب غشاهای سلولی و تیلاکوئیدی و حساسیت برگ‌ها به شرایط تنش است و اثر خشکی بر غشای تیلاکوئیدی باعث کاهش غلظت کلروفیل a و b در گیاهان می شود. تنش‌های کم آبی همچنین بر بخش نوری فتوسنتز و سیستم رنگدانه‌ای گیاه تأثیر می گذارد. با افزایش شدت تنش یا کاهش پتانسیل آب خاک، روند تخریب رنگدانه‌های کلروفیل با سرعت بیشتری انجام می شود. برای حفظ آب سلولی در اندام‌های مختلف گیاه تحت تنش خشکی، روزه‌ها بسته می شوند و میزان فتوسنتز به دلیل محدودیت ورود دی اکسیدکربن کاهش می یابد. در این شرایط، تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن، به ویژه رادیکال‌های سوپراکسید در کلروپلاست برگ، به طور قابل توجهی افزایش می یابد. این رادیکال‌های آزاد باعث تخریب ماکرومولکول‌ها و پراکسیداسیون لیپیدهای غشا می شوند. یکی از مهم‌ترین علل کاهش رشد و توانایی فتوسنتزی گیاه در شرایط تنش محیطی، به ویژه خشکی، اختلال در تعادل میان تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن و مکانیسم‌های دفاعی خنثی کننده آن‌ها است. این اختلال باعث تجمع گونه‌های فعال اکسیژن و القای تنش اکسیداتیو می شود و در نهایت به لیپیدهای غشا، پروتئین‌ها و سایر اجزای سلولی آسیب وارد می کند. محتوای نسبی آب، پتانسیل آب برگ، مقاومت روزه‌ای، میزان تعرق و دمای برگ از ویژگی‌های مهمی هستند که بر وضعیت آبی گیاه تأثیر می گذارند. محتوای نسبی آب به عنوان معیاری برای وضعیت آبی گیاه شناخته می شود و نشان‌دهنده فعالیت متابولیکی بافت‌های گیاه است. این شاخص به عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها برای سنجش تحمل به کم آبی در گیاهان استفاده می شود و کاهش آن در پاسخ به تنش خشکی در طیف وسیعی از گونه‌های گیاهی مشاهده شده است.

فتوسنتز در شرایط کم‌آبی: یک زنجیره از چالش‌ها



شکل ۵-۳: فرایند فتوسنتز در شرایط کم‌آبی به‌عنوان زنجیره‌ای از چالش‌های فیزیولوژیک

گیاه در مواجهه با تنش خشکی ابتدا با تنظیم جذب آب و تغییر پتانسیل آب، تعادل بین تعرق و جذب آب را برقرار می‌کند (شکل ۵-۳). با ادامه تنش، تغییراتی در رشد ریشه و افزایش نسبت ریشه به ساقه رخ می‌دهد، ظرفیت نگهداری آب در بافت‌ها افزایش می‌یابد، نفوذپذیری ریشه نسبت به آب بیشتر می‌شود و ضخامت کوتیکول برگ افزایش می‌یابد تا میزان آب در گیاه کنترل شود (جدول ۲-۳). علاوه بر این، تغییراتی در ساختمان سلولی و متابولیت‌ها، مانند سخت شدن دیواره سلولی، تجمع ترکیباتی مانند پرولین و گلیسین بتائین و ثابت نگه داشتن فشار تورژر، به حفظ آب در سلول‌ها کمک می‌کند. در شرایط کم‌آبی، گیاه برای جلوگیری از هدررفت بیشتر آب، روزنه‌های خود را می‌بندد. این کار باعث کاهش یا توقف جریان آب از خاک به گیاه و در پی آن کاهش فشار تورژر و محتوای رطوبت نسبی برگ می‌شود. به طور کلی، کاهش آب در شرایط تنش خشکی باعث محدود شدن جذب مواد غذایی و کاهش غلظت آن‌ها در بافت گیاهان زراعی می‌شود. یکی از اثرات مهم کمبود آب، کاهش توانایی ریشه در جذب مواد غذایی و انتقال آن‌ها به شاخساره است. کاهش جذب مواد معدنی می‌تواند ناشی از تداخل در مکانیسم جذب، کاهش جریان تعرق و محدودیت‌های انتقال در گیاه باشد. با این حال، واکنش گونه‌ها و ژنوتیپ‌های مختلف نسبت به جذب عناصر معدنی در شرایط خشکی متفاوت است. به طور معمول، تنش رطوبتی باعث افزایش جذب نیتروژن، کاهش میزان فسفر و اثر نامشخص بر جذب پتاسیم می‌شود. کاهش جذب و انتقال عناصر پرمصرف در گونه‌های مختلف احتمالاً به دلیل کاهش حجم ریشه در خاک‌های خشک است. همچنین، کاهش رطوبت خاک باعث کاهش تحرک فسفر و در نتیجه کاهش جذب آن در گیاه می‌شود. از آنجا که نیاز گیاه به آب و مواد مغذی ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند، استفاده از کود می‌تواند کارایی استفاده از آب موجود در محصولات را افزایش دهد. این موضوع نشان‌دهنده تعامل قابل توجهی بین کمبود رطوبت خاک و جذب مواد مغذی است. مطالعات

نشان داده‌اند که محصولات کشاورزی در خاک‌های اصلاح شده و مناطق خشک و نیمه‌خشک به باروری پاسخ مثبت می‌دهند. در نتیجه، افزایش کارایی استفاده از مواد غذایی توسط گیاهان تحت تنش خشکی می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد محصول را بهبود بخشد. به طور خلاصه، تنش خشکی باعث کاهش دسترسی، جذب، جایجایی و متابولیسم مواد غذایی می‌شود و کاهش تعرق ناشی از کمبود آب، بهره‌وری استفاده از مواد مغذی را در گیاهان زراعی محدود می‌کند (جدول ۲-۳).

جدول ۲-۳. اثرات فیزیولوژیکی تنش خشکی بر گیاه		
فرآیند بیوشیمیایی	تغییرات ناشی از تنش خشکی	پیامدهای فیزیولوژیکی
فتوسنتز و کلروفیل	کاهش کلروفیل (Chl a و Chl b)، تخریب رنگیزه‌ها	کاهش کارایی فتوسنتزی، کاهش رشد و عملکرد
فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی	↑ سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، ↑ کاتالاز (CAT)، ↑ پراکسیداز (POD)	مهار آسیب اکسیداتیو ناشی از ROS
بیوسنتز پروتئین	کاهش سنتز پروتئین‌های غیر استرسی، ↑ پروتئین‌های تنش‌زا (HSPs)	محافظت از پروتئین‌ها و ساختار سلولی
تجمع سازگارکننده‌های اسمزی (Osmolytes)	↑ پروتئین‌های محلول، ↑ پرولین، ↑ قندهای احیاکننده (Sucrose, Trehalose)	حفظ تورژسانس سلول و تعادل آب
فعالیت آنزیم‌های فتوفسفاتیازی و کربوهیدرات	کاهش فعالیت Rubisco و آنزیم‌های Calvin cycle	کاهش تثبیت کربن و تولید انرژی
تولید رادیکال‌های آزاد (ROS)	↑ سوپراکسید، ↑ هیدروژن پراکسید، ↑ رادیکال هیدروکسیل	آسیب به غشا، پروتئین و DNA
بیوسنتز هورمون‌ها	ABA (Absciscic Acid) ↑، گبرلین ↓، سیتوکینین	بستن روزنه‌ها، کاهش رشد طولی، افزایش مقاومت
متابولیسم لیپید	↑ پراکسیداسیون لیپید (MDA)، تغییر ترکیب اسیدهای چرب	آسیب غشای سلولی، کاهش سیالیت غشاء
فعالیت آنزیم‌های C و N متابولیسم	کاهش نیتрат رداکتاز (NR) و گلوکز-۶-فسفات دهیدروژناز	کاهش جذب نیتروژن و تولید انرژی
تولید ترکیبات فنولیک و فلاونوئیدها	↑ فنول‌ها، ↑ فلاونوئیدها، ↑ لیگنین	محافظت آنتی‌اکسیدانی و تقویت دیواره سلولی
فعالیت پلی‌آمین‌ها	↑ اسپرمیدین، ↑ اسپرمین، ↑ پوترسین	تثبیت غشاء، حفاظت از DNA و پروتئین

فصل چهارم

راهبردهای مزرعه‌ای برای مدیریت

تنش خشکی

۱-۴- مدیریت بهینه مصرف آب

مدیریت منابع آب یکی از اساسی‌ترین چالش‌های قرن حاضر است. جمعیت جهان به‌طور پیوسته در حال افزایش است و به همراه آن تقاضا برای تولیدات کشاورزی نیز رشد می‌کند. برآوردها نشان می‌دهد که تا میانه قرن بیست‌ویکم، تولید مواد غذایی باید دست‌کم پنجاه درصد افزایش یابد تا نیازهای جمعیتی حدود ده میلیارد نفر تأمین شود. این در حالی است که منابع آب شیرین محدود بوده و در بسیاری از مناطق جهان با کاهش محسوس دسترسی به آب مواجه هستیم. کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آبی جهان، نقشی کلیدی در بحران کم‌آبی دارد و در عین حال بیشترین آسیب را نیز از این بحران متحمل می‌شود. بنابراین، مدیریت بهینه مصرف آب در کشاورزی نه‌تنها ضرورتی برای افزایش بهره‌وری تولید است، بلکه شرط اساسی پایداری زیست‌محیطی و امنیت غذایی آینده به شمار می‌رود (جیان و سینک، ۲۰۲۳).

یکی از راهبردهای اصلی در مدیریت آب، به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری و تغییر الگوی مصرف است. روش‌های سنتی آبیاری، همچون غرقابی، اگرچه سادگی و هزینه اولیه کمتری دارند، اما بهره‌وری آن‌ها بسیار پایین بوده و بخش عمده‌ای از آب مصرفی از طریق تبخیر، نفوذ عمقی یا رواناب هدر می‌رود. در چنین شرایطی، رویکردهایی مانند آبیاری قطره‌ای و کم‌آبیاری هوشمند به‌عنوان راهکارهای مؤثر مطرح شده‌اند که می‌توانند مصرف آب را کاهش داده و کارایی آن را به شکل چشمگیری افزایش دهند.

آبیاری قطره‌ای یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های آبیاری موضعی است که طی آن آب به‌طور مستقیم و با دبی کم در نزدیکی ریشه گیاهان تأمین می‌شود. مزیت اصلی آبیاری قطره‌ای، کاهش چشمگیر هدررفت آب است. در این روش، آب تنها در محل ریشه گیاه مرطوب می‌شود و سطح تبخیر به حداقل می‌رسد. علاوه بر این، امکان تنظیم دقیق میزان آبرسانی بر اساس نیاز هر گیاه وجود دارد که این امر باعث بهبود رشد گیاه، افزایش عملکرد و کاهش مصرف نهاده‌ها می‌شود. در مقایسه با آبیاری سطحی، راندمان مصرف آب در سیستم‌های قطره‌ای می‌تواند تا دو برابر افزایش یابد.

یکی از ویژگی‌های مهم آبیاری قطره‌ای، قابلیت ترکیب آن با تغذیه گیاهی است. در این روش، کودهای محلول می‌توانند همراه با آب آبیاری مستقیماً به ناحیه ریشه منتقل شوند. این فرآیند که به «کودآبیاری» معروف است، موجب افزایش کارایی مصرف کود و کاهش آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌شود. همچنین با کاهش رطوبت سطحی خاک، رشد علف‌های هرز محدود می‌گردد و نیاز به مصرف علف‌کش‌ها کاهش می‌یابد. به همین دلیل، آبیاری قطره‌ای نه‌تنها از منظر مدیریت آب، بلکه از نظر مدیریت کلی نهاده‌ها در کشاورزی پایدار اهمیت ویژه‌ای دارد.

با وجود مزایای فراوان، آبیاری قطره‌ای نیز چالش‌هایی دارد. هزینه اولیه نصب تجهیزات، نیاز به نگهداری منظم و خطر گرفتگی قطره‌چکان‌ها از جمله موانع توسعه این روش در برخی مناطق است. در کشورهایی که کشاورزان خرده‌مالک هستند و منابع مالی محدودی دارند، سرمایه‌گذاری اولیه برای راه‌اندازی سیستم قطره‌ای دشوار است. همچنین در مناطق با کیفیت آب پایین، به‌ویژه آب‌های دارای املاح زیاد، احتمال انسداد

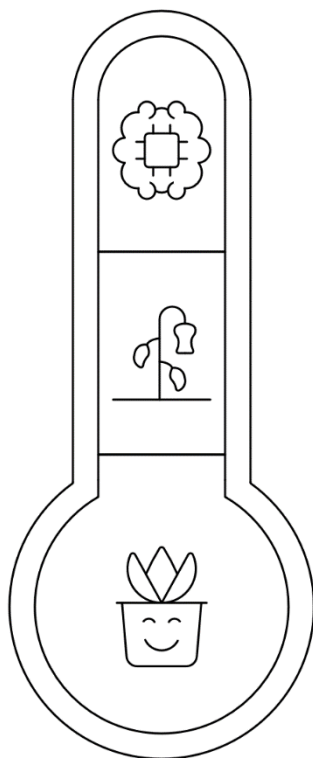
قطره‌چکان‌ها بالاست و این امر نیازمند استفاده از فیلترها و عملیات شست‌وشوی دوره‌ای است. با این حال، در بلندمدت مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی آبیاری قطره‌ای به‌طور چشمگیری بر معایب آن غلبه می‌کند. در کنار آبیاری قطره‌ای، مفهوم کم‌آبیاری هوشمند به‌عنوان رویکردی نوین در مدیریت منابع آب مطرح است. کم‌آبیاری به معنای آبیاری کمتر از نیاز کامل گیاه است، به‌گونه‌ای که مقدار آب دریافتی کمتر از تبخیر و تعرق بالقوه باشد. در نگاه نخست ممکن است این رویکرد غیرمنطقی به نظر برسد، اما تحقیقات نشان داده است که گیاهان در برابر تنش خفیف آبی سازوکارهای فیزیولوژیکی متنوعی برای سازگاری دارند. با اعمال کم‌آبیاری کنترل‌شده و هدفمند، می‌توان ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب، کیفیت محصول را نیز در برخی موارد بهبود بخشید (جیان و سینک، ۲۰۲۳).

کم‌آبیاری هوشمند زمانی معنا پیدا می‌کند که بر پایه دانش دقیق از نیاز آبی گیاه، مرحله رشدی حساس و شرایط محیطی انجام گیرد. برای مثال، در برخی محصولات باغی مانند انگور یا زیتون، محدود کردن آبیاری در مراحل خاص رشد می‌تواند نه تنها عملکرد کلی را به‌طور چشمگیری کاهش ندهد، بلکه کیفیت میوه را نیز ارتقا بخشد. در گندم، کاهش آبیاری در مراحل پایانی رشد رویشی و تمرکز بر تأمین آب در دوره پر شدن دانه می‌تواند کارایی مصرف آب را به حداکثر برساند. این استراتژی نیازمند بهره‌گیری از داده‌های هواشناسی، سنسورهای رطوبت خاک و مدل‌های پیش‌بینی رشد گیاه است تا بتوان در زمان مناسب و با دقت بالا تصمیم‌گیری کرد (شکل ۱-۴).

یکی از ابزارهای کلیدی در اجرای کم‌آبیاری هوشمند، فناوری‌های دیجیتال و کشاورزی هوشمند اقلیمی است. امروزه استفاده از حسگرهای رطوبت، تصاویر ماهواره‌ای و پهپادها امکان پایش دقیق وضعیت رطوبتی خاک و سلامت گیاه را فراهم کرده است. با اتصال این داده‌ها به سامانه‌های هوش مصنوعی و مدل‌های پیش‌بینی، می‌توان برنامه‌های آبیاری را به‌طور خودکار تنظیم کرد. این نوآوری‌ها سبب می‌شود که آب تنها در زمان و مکانی مصرف شود که بیشترین بازدهی را داشته باشد. در نتیجه، منابع آبی صرفه‌جویی شده و عملکرد محصول نیز در حد مطلوب حفظ می‌شود (شکل ۱-۴).

طیف آبیاری از آبیاری کامل تا آبیاری محدود

آبیاری محدود



کم آبیاری هوشمند

آبیاری بر اساس نیاز گیاه و شرایط محیطی

کم آبیاری

آبیاری کمتر از نیاز کامل گیاه

آبیاری قطره‌ای

آب و کود را مستقیماً به ریشه می‌رساند

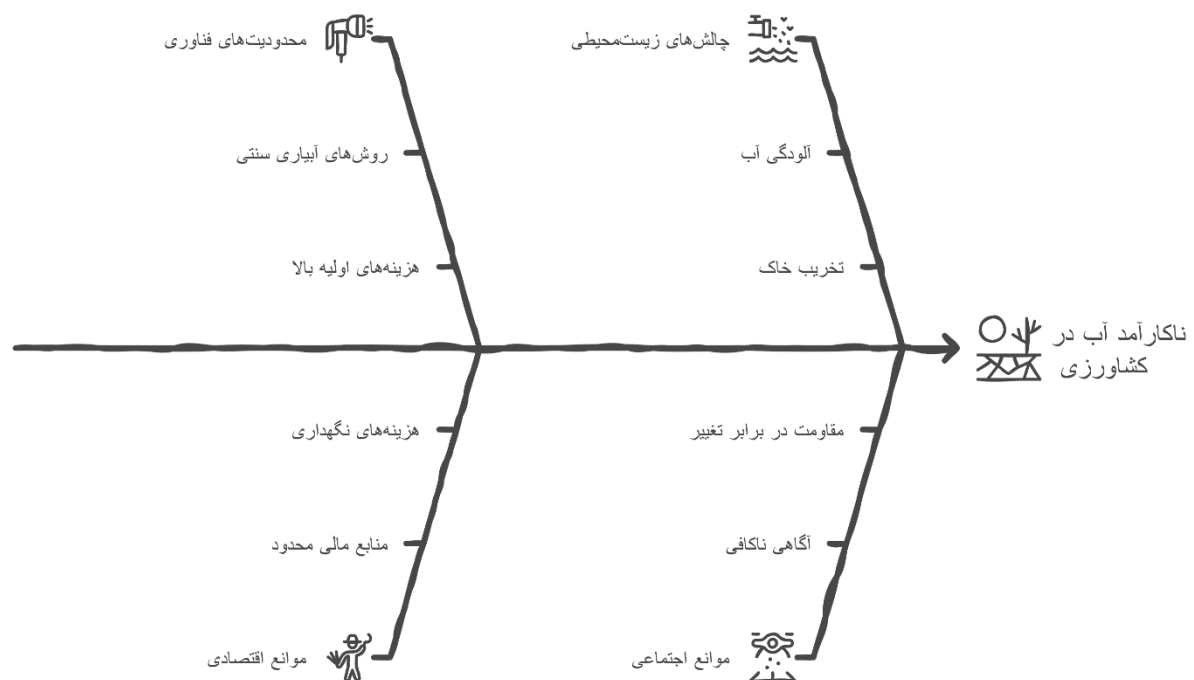
آبیاری کامل

شکل ۴-۱: طیف مدیریت آبیاری؛ از آبیاری کامل تا آبیاری محدود

پیامدهای اقتصادی مدیریت بهینه مصرف آب از طریق آبیاری قطره‌ای و کم آبیاری هوشمند بسیار چشمگیر است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این روش‌ها می‌توانند بهره‌وری آب را بین ۳۰ تا ۷۰ درصد افزایش دهند. این افزایش بهره‌وری به معنای کاهش هزینه تولید در واحد محصول و افزایش سودآوری کشاورزان است. علاوه بر آن، کاهش مصرف آب موجب کاهش هزینه‌های انرژی برای پمپاژ و انتقال آب نیز می‌شود. از سوی دیگر، کیفیت بالاتر محصولات به دست آمده از این روش‌ها می‌تواند ارزش اقتصادی آن‌ها را در بازار افزایش دهد. به همین دلیل، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین آبیاری در بلندمدت بازدهی بالایی دارد و به توسعه پایدار بخش کشاورزی کمک می‌کند (شکل ۲-۴).

از منظر اجتماعی و زیست‌محیطی، مدیریت بهینه مصرف آب تأثیرات مثبتی دارد. کاهش برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از افت سطح آبخوان‌ها و شور شدن خاک جلوگیری می‌کند. این امر به حفظ سلامت اکوسیستم‌ها و پایداری تولید در بلندمدت منجر می‌شود. همچنین با افزایش بهره‌وری آب، فشار بر منابع آبی مشترک میان بخش‌های مختلف جامعه کاهش می‌یابد و احتمال مناقشه بر سر آب کمتر می‌شود. در سطح خانوار روستایی، افزایش درآمد ناشی از بهبود کارایی آبیاری می‌تواند کیفیت زندگی را ارتقا دهد و از مهاجرت‌های اجباری ناشی از کم‌آبی جلوگیری کند (شکل ۲-۴). یکی دیگر از مزایای غیرمستقیم آبیاری قطره‌ای و کم‌آبیاری هوشمند، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. هنگامی که مصرف آب و انرژی کاهش یابد، به‌طور غیرمستقیم انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی نیز کمتر می‌شود. از این رو، مدیریت بهینه آب در کشاورزی با اهداف جهانی کاهش تغییر اقلیم نیز همسو است.

چالش‌های مدیریت آب در کشاورزی



شکل ۲-۴: چالش‌ها و محدودیت‌های مدیریت منابع آب در نظام‌های کشاورزی

با وجود مزایا، تحقق کامل مدیریت بهینه مصرف آب نیازمند رفع موانع متعددی است. آموزش و آگاهی‌رسانی به کشاورزان درباره مزایای این روش‌ها اهمیت فراوان دارد. بسیاری از کشاورزان به دلیل آشنایی ناکافی با فناوری‌های نوین یا نگرانی از ریسک‌های احتمالی، از پذیرش این روش‌ها خودداری می‌کنند. همچنین

حمایت‌های مالی و تسهیلات اعتباری برای تأمین هزینه‌های اولیه سیستم‌های نوین ضروری است. سیاست‌گذاری‌های کلان در زمینه قیمت‌گذاری واقعی آب، ارائه یارانه‌های هدمند برای تجهیزات آبیاری نوین و توسعه شبکه‌های تحقیق و ترویج می‌تواند مسیر گسترش این فناوری‌ها را هموار سازد.

۲-۴- انتخاب و معرفی ارقام متحمل به خشکی

تنش خشکی یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تولید کشاورزی در جهان به شمار می‌رود و هر ساله میلیون‌ها هکتار از اراضی زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش دما، تغییرات الگوی بارش و فشار روزافزون بر منابع آبی باعث شده است که مسئله خشکی به بحرانی جهانی تبدیل شود. در چنین شرایطی، بهره‌گیری از ارقام گیاهی متحمل به خشکی به‌عنوان راهبردی اساسی برای تضمین پایداری تولید و امنیت غذایی اهمیت یافته است. انتخاب و معرفی این ارقام نه‌تنها موجب کاهش خسارت‌های ناشی از کم‌آبی می‌شود بلکه می‌تواند در افزایش بهره‌وری منابع آب و خاک و ارتقای درآمد کشاورزان نیز نقش بسزایی داشته باشد.

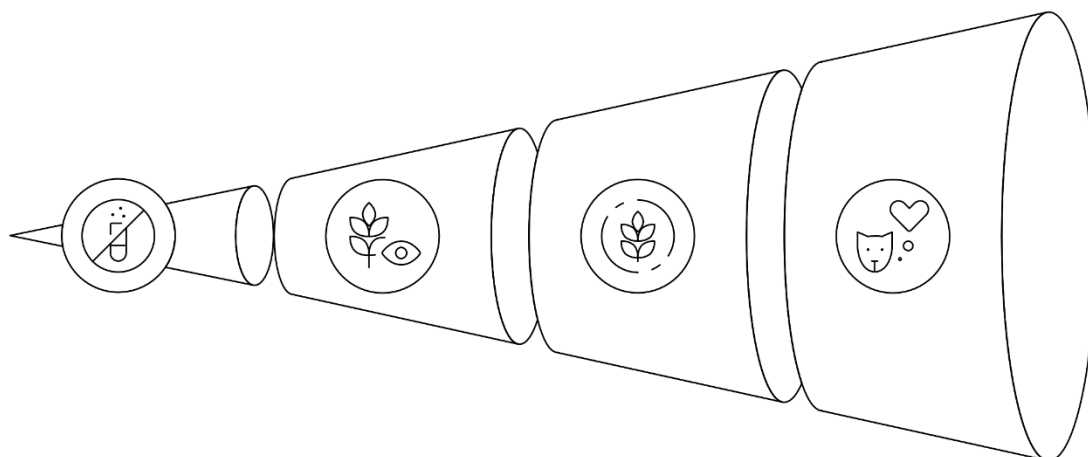
مفهوم تحمل به خشکی در گیاهان پدیده‌ای پیچیده و چندبعدی است. گیاهان برای بقا در شرایط کم‌آبی مجموعه‌ای از سازوکارهای مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و مولکولی را به کار می‌گیرند. برخی از این سازوکارها شامل کاهش سطح برگ برای کاهش تعرق، توسعه ریشه‌های عمیق‌تر برای دسترسی به منابع آب زیرزمینی، افزایش تجمع اسمولیت‌هایی مانند پرولین و قندهای محلول، تغییر در ترکیب پروتئین‌ها و بیان ژن‌های خاص مرتبط با تنش خشکی است. این ویژگی‌ها سبب می‌شود که برخی ارقام گیاهی بتوانند در شرایطی که رطوبت خاک به‌شدت محدود است نیز رشد و تولید خود را حفظ کنند.

انتخاب ارقام متحمل به خشکی نیازمند شناخت دقیق سازوکارهای سازگاری و تنوع ژنتیکی موجود در گیاهان است (شکل ۳-۴). در بسیاری از محصولات زراعی، ذخایر ژرم‌پلاسمی متنوعی وجود دارد که شامل گونه‌های وحشی، بومی و محلی است. این ذخایر حاوی ژن‌هایی ارزشمند برای تحمل به خشکی هستند که می‌توانند در برنامه‌های اصلاحی مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال، در گندم گونه‌های وحشی نزدیک مانند *Triticum dicoccoides* در برنج گونه‌های بومی مناطق خشک آسیا منبعی غنی از ژن‌های تحمل خشکی هستند. استفاده از این منابع ژنتیکی در برنامه‌های تلاقی و اصلاح می‌تواند ارقامی را پدید آورد که ضمن حفظ عملکرد مناسب، نیاز آبی کمتری دارند.

فرآیند انتخاب ارقام متحمل به خشکی عموماً با ارزیابی صفات مورفوفیزیولوژیکی در شرایط کنترل‌شده و مزرعه آغاز می‌شود (شکل ۳-۴). محققان گیاهان مختلف را تحت سطوح متفاوت تنش آبی قرار داده و صفاتی چون شاخص برداشت، کارایی مصرف آب، نسبت ریشه به اندام هوایی، محتوای نسبی آب برگ، پایداری غشا و میزان فتوسنتز را اندازه‌گیری می‌کنند. این صفات به‌عنوان شاخص‌های کلیدی برای شناسایی ژنوتیپ‌های برتر عمل می‌کنند. در کنار روش‌های کلاسیک، ابزارهای نوین مولکولی نیز نقش مهمی در شتاب بخشیدن به

این فرآیند دارند. استفاده از نشانگرهای مولکولی) مانند SSR و SNP و نقشه‌های پیوستگی ژنی امکان ردیابی دقیق ژن‌ها و نواحی کروموزومی مرتبط با تحمل خشکی را فراهم می‌آورد.

فرآیند انتخاب ارقام متحمل به خشکی



ارزیابی
مورفوفیزیولوژیکی

صفات گیاهان را در
شرایط کنترل‌شده
ارزیابی کنید

ارزیابی مزرعه

عملکرد گیاهان را در
شرایط مزرعه
ارزیابی کنید

نشانگرهای مولکولی

از نشانگرهای
مولکولی برای
شناسایی ژن‌های
تحمل خشکی استفاده
کنید

برنامه‌های اصلاحی

ژن‌های تحمل خشکی
را در برنامه‌های
اصلاحی ادغام کنید

شکل ۳-۴: مراحل به‌نژادی ارقام متحمل به تنش خشکی

در دهه‌های اخیر، فناوری‌های زیست‌فناوری و مهندسی ژنتیک افق‌های تازه‌ای را برای معرفی ارقام متحمل به خشکی گشوده‌اند. انتقال ژن‌های مسئول سنتز اسمولیت‌ها، پروتئین‌های محافظ غشا و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی به گیاهان زراعی موجب شده است که عملکرد آن‌ها در شرایط خشکی بهبود یابد. برای نمونه، بیان بیش‌ازحد ژن‌های مرتبط با سنتز ترهالوز یا پرولین توانسته است تحمل خشکی را در برخی محصولات افزایش دهد. همچنین ویرایش ژنومی با ابزارهایی همچون CRISPR/Cas9 امکان حذف یا تغییر ژن‌های بازدارنده و افزایش بیان ژن‌های مطلوب را فراهم کرده است. این رویکردها می‌توانند به معرفی سریع‌تر و دقیق‌تر ارقام جدید منجر شوند.

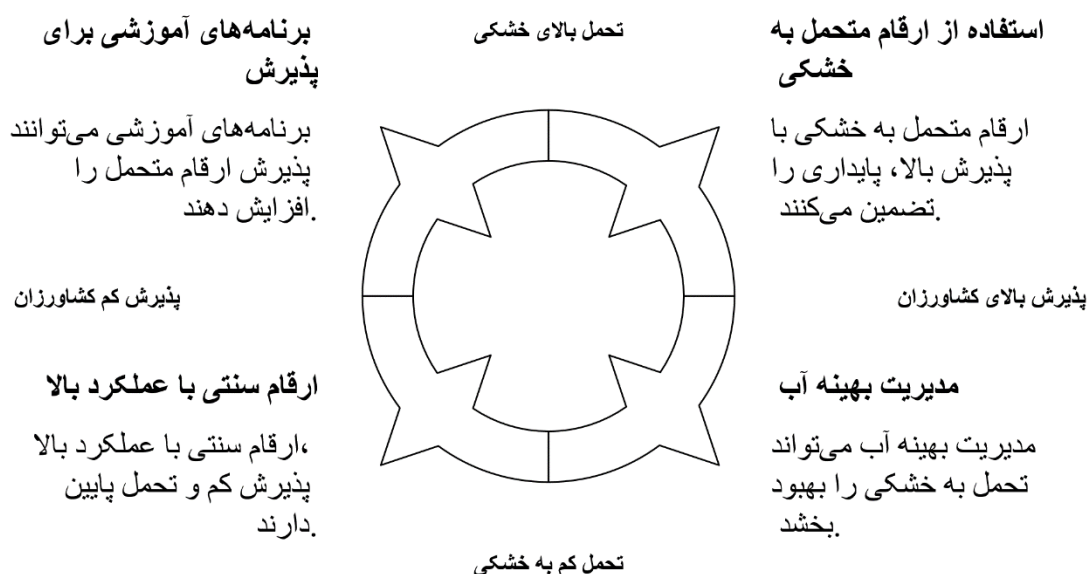
یکی از نمونه‌های موفق معرفی ارقام متحمل به خشکی، برنامه‌های اصلاحی در گندم است. گندم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین غلات جهان، بخش قابل توجهی از کالری روزانه بشر را تأمین می‌کند. در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک، ارقام جدیدی معرفی شده‌اند که با بهره‌وری بالاتر آب، عملکرد بهتری در شرایط تنش نشان می‌دهند. برای مثال، ارقام حاصل از تلاقی‌های بین‌گونه‌ای با گونه‌های وحشی توانسته‌اند سیستم ریشه‌ای قوی‌تر و کارایی مصرف آب بالاتری داشته باشند. در برنج نیز ارقام موسوم به «برنج خشکی‌دوست» معرفی شده‌اند که قادرند در اراضی با بارندگی اندک رشد کنند. این ارقام به‌ویژه در مناطق جنوب و جنوب شرق آسیا نقشی کلیدی در کاهش فقر و بهبود امنیت غذایی داشته‌اند.

حبوبات نیز به دلیل نقش مهم در تغذیه و تثبیت بیولوژیک نیتروژن، از هدف‌های اصلی برنامه‌های اصلاحی خشکی محسوب می‌شوند. ارقام جدید نخود، عدس و لوبیا چشم‌ببری با تحمل بالاتر به خشکی معرفی شده‌اند که می‌توانند در مناطق دیم عملکرد مناسبی ارائه دهند. این ارقام به دلیل چرخه رشد کوتاه‌تر، توانایی فرار از خشکی انتهای فصل را دارند و در نتیجه عملکرد دانه را حفظ می‌کنند.

معرفی ارقام متحمل به خشکی علاوه بر ابعاد فنی و ژنتیکی، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی مهمی دارد. استفاده از این ارقام می‌تواند درآمد کشاورزان مناطق کم‌آب را بهبود بخشد و پایداری تولید در این مناطق را افزایش دهد. همچنین کاهش وابستگی به منابع آبی پرهزینه، امکان کشت پایدار در مناطق نیمه‌خشک را فراهم می‌سازد. از دیدگاه اجتماعی، این امر می‌تواند از مهاجرت‌های ناشی از کم‌آبی جلوگیری کند و امنیت غذایی جوامع محلی را تضمین نماید.

با این حال، معرفی و گسترش ارقام متحمل به خشکی با چالش‌هایی نیز همراه است. یکی از چالش‌ها پذیرش کشاورزان است؛ زیرا آنان معمولاً به کشت ارقام سنتی عادت دارند و نسبت به تغییر رقم تردید نشان می‌دهند. علاوه بر آن، برخی از ارقام متحمل ممکن است عملکردی اندکی پایین‌تر از ارقام پرمحصول داشته باشند و این موضوع انگیزه کشاورزان را کاهش دهد. بنابراین، لازم است برنامه‌های حمایتی، ترویجی و آموزشی برای تشویق کشاورزان به استفاده از این ارقام اجرا شود. همچنین وجود بذره‌های اصلاح‌شده با کیفیت و دسترسی آسان به آن‌ها شرطی اساسی برای موفقیت این رویکرد است (شکل ۴-۴).

از سوی دیگر، تحمل به خشکی ویژگی‌ای مطلق نیست، بلکه بستگی به شدت و مدت زمان تنش دارد. ارقامی که در شرایط خشکی متوسط عملکرد مناسبی دارند، ممکن است در شرایط خشکی شدید به‌شدت آسیب ببینند. بنابراین، راهبرد مناسب آن است که ترکیبی از روش‌ها به کار گرفته شود؛ از جمله استفاده از ارقام متحمل، مدیریت بهینه مصرف آب، تناوب کشت، اصلاح خاک و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین کشاورزی. تنها در چنین شرایطی می‌توان پایداری تولید را در برابر خشکی تضمین کرد.



شکل ۴-۴: فرایند انتخاب و پذیرش ارقام متحمل به تنش خشکی توسط کشاورزان

بهبود مقاومت در برابر تنش خشکی در گونه‌های زراعی از طریق اصلاح نباتات یکی از استراتژی‌های اثبات‌شده محسوب می‌شود و انتظار می‌رود همچنان روش اصلی برای ارتقای عملکرد محصولات باقی بماند (فاروک و همکاران، ۲۰۱۴). با این حال، روند اصلاح نباتات اغلب به دلیل ماهیت ژنتیک کمی صفات و همچنین درک ناقص از مبانی فیزیولوژیکی محدود می‌شود و این امر مانع از افزایش پایدار عملکرد محصول در شرایط تنش خشکی می‌گردد (توررس و همکاران، ۲۰۱۰). مقاومت نسبت به خشکی یک صفت کمی به شمار می‌آید و روش مستقیم و دقیقی برای اندازه‌گیری آن وجود ندارد، از این رو شناسایی ژنوتیپ‌های متحمل به خشکی با دشواری همراه است (تاکدا و ماتسوکا، ۲۰۰۸).

غربالگری و انتخاب انبوه می‌تواند برای دستیابی به ویژگی‌های فنوتیپی مطلوب بر اساس صفات مرتبط با عملکرد مفید باشد. با این وجود، اغلب ارزیابی دقیق فنوتیپ گیاهان زراعی برای یک صفت هدف به دلیل پیچیدگی‌های فیزیولوژیکی دشوار است. بسیاری از صفاتی که ارتباط قوی با آستانه تحمل خشکی دارند، نیازمند تکنیک‌های پیچیده بوده و تنها در گروه محدودی از ژنوتیپ‌ها قابل بررسی هستند (فاروک و همکاران، ۲۰۱۷). تحمل به خشکی از طریق شناسایی یک یا چند صفت کلیدی امکان‌پذیر است که بتواند به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری اثر تنش خشکی بر گیاهان عمل کند. با این حال، اصلاح نژادی در این زمینه مستلزم

تغییرات بنیادین در مجموعه‌ای از ویژگی‌های گیاهی است که در نهایت به شکل بروز مقاومت به خشکی ظاهر می‌شود (سلام و همکاران، ۲۰۱۹؛ ملکی و همکاران، ۲۰۱۳).

تنش خشکی می‌تواند در هر مرحله از رشد گیاه رخ دهد و شدت آن به شرایط محیطی بستگی دارد. بنابراین، ژنوتیپ‌ها ممکن است در مراحل رشدی مختلف واکنش‌های متفاوتی نسبت به خشکی نشان دهند؛ به عنوان مثال، برخی از ژنوتیپ‌ها در مرحله جوانه‌زنی تحمل بالایی دارند اما در مرحله گلدهی حساسیت شدیدی نشان می‌دهند، یا برعکس. این موضوع اهمیت تمایز میان ژنوتیپ‌های متحمل و حساس را آشکار می‌سازد. به همین دلیل، در هر آزمایش علمی انتخاب و تعریف دقیق صفات مناسب برای تشخیص ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی اهمیت بالایی دارد. در نهایت، باید توجه داشت که بهبود تحمل به خشکی باید همزمان با افزایش عملکرد پیش رود، زیرا هدف اصلی کشاورزان تولید سودآور محصولات زراعی حتی در شرایط تنش خشکی است (سلام و همکاران، ۲۰۱۹).

۳-۴- تناوب زراعی

تناوب زراعی یکی از اصول اساسی کشاورزی پایدار است که از دیرباز به عنوان راهکاری مهم برای افزایش حاصلخیزی خاک، کنترل آفات و بیماری‌ها، بهبود کیفیت محصول و مدیریت منابع طبیعی مورد توجه کشاورزان و پژوهشگران قرار گرفته است. در ساده‌ترین تعریف، تناوب زراعی به کشت متوالی گیاهان مختلف در یک زمین زراعی در طول فصل‌ها یا سال‌های متوالی اطلاق می‌شود، به گونه‌ای که ترکیب و ترتیب گیاهان بتواند به بهبود شرایط اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی کشاورزی کمک کند. برخلاف کشت مداوم یک محصول، تناوب زراعی فرصت بازیابی منابع خاک، کاهش فشار آفات و افزایش تنوع زیستی مزرعه را فراهم می‌سازد و از این طریق نقشی اساسی در افزایش پایداری تولید دارد (شکل ۴-۵).

تاریخچه استفاده از تناوب زراعی به هزاران سال پیش بازمی‌گردد، زمانی که کشاورزان با مشاهده کاهش عملکرد در اثر کشت مداوم، به طور تجربی به تغییر محصولات در زمین‌های خود اقدام کردند. در بسیاری از تمدن‌های باستانی مانند مصر، یونان و چین، سیستم‌های ابتدایی تناوب مورد استفاده قرار می‌گرفت. بعدها با پیشرفت دانش کشاورزی در اروپا و سایر مناطق، تناوب زراعی به صورت علمی تر طراحی شد. یکی از مشهورترین نمونه‌های تاریخی، تناوب چهارساله نورفولک در انگلستان بود که شامل کشت نوبتی گندم، جو، شلغم و شبدر می‌شد. این سیستم موجب بهبود چشمگیر باروری خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی گردید و مبنایی برای توسعه کشاورزی نوین فراهم آورد.

اهمیت تناوب زراعی را می‌توان در چند محور اصلی بررسی کرد. نخستین محور، تأثیر تناوب بر حاصلخیزی خاک است (شکل ۴-۵). گیاهان مختلف نیازهای غذایی متفاوتی دارند و از لایه‌های گوناگون خاک بهره‌برداری می‌کنند. به عنوان مثال، غلات معمولاً از لایه‌های سطحی خاک مواد غذایی جذب می‌کنند، در حالی که گیاهان عمیق‌ریشه مانند یونجه یا شبدر قادرند از ذخایر عمیق‌تر خاک بهره‌مند شوند. تناوب بین این گروه‌ها سبب می‌شود که تعادل تغذیه‌ای خاک حفظ گردد. افزون بر این، حضور گیاهان لگومینه یا حبوبات در تناوب نقش

کلیدی در تثبیت بیولوژیک نیتروژن دارد. این گیاهان به کمک همزیستی با باکتری‌های ریزوبیوم می‌توانند نیتروژن اتمسفری را به شکل قابل استفاده برای گیاهان تبدیل کنند و از این طریق محتوای نیتروژن خاک را افزایش دهند. در نتیجه، نیاز به کودهای شیمیایی کاهش یافته و پایداری سیستم افزایش می‌یابد.

افزایش پایداری کشاورزی از طریق تناوب زراعی



شکل ۴-۵: نقش تناوب زراعی در ارتقای پایداری نظام‌های کشاورزی

تناوب زراعی همچنین نقش بسزایی در مدیریت آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز دارد. کشت مداوم یک محصول زمینه‌ساز تجمع جمعیت آفات اختصاصی و گسترش بیماری‌های خاک‌زاد می‌شود. تغییر گیاه میزبان در یک تناوب مناسب می‌تواند چرخه زندگی آفات و پاتوژن‌ها را مختل کند و از شدت خسارت آن‌ها بکاهد. به عنوان نمونه، تناوب غلات با حبوبات یا گیاهان صنعتی مانند کلزا و کنجد موجب کاهش تراکم نماتدهای ریشه‌گره‌ای و بیماری‌های قارچی خاک‌زاد می‌شود. در مورد علف‌های هرز نیز، تغییر الگوی کشت و زمان کاشت می‌تواند ترکیب و تراکم علف‌های هرز را تحت کنترل درآورد و نیاز به مصرف علف‌کش‌ها را کاهش دهد. بدین ترتیب، تناوب زراعی ابزاری مؤثر برای مدیریت تلفیقی آفات و بیماری‌ها محسوب می‌شود.

از منظر فیزیولوژیکی و اکولوژیکی، تناوب زراعی اثرات مثبتی بر خصوصیات فیزیکی خاک دارد. کشت متناوب گیاهان با سیستم‌های ریشه‌ای مختلف می‌تواند به بهبود ساختمان خاک، افزایش تخلخل، نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آب کمک کند. ریشه‌های عمیق گیاهانی مانند شبدر و یونجه ضمن شکستن لایه‌های سخت خاک، نفوذ آب را تسهیل می‌کنند و باعث بهبود هوادهی خاک می‌شوند. همچنین، افزایش ماده آلی از طریق بقایای گیاهی موجب بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌گردد. این فرآیندها در نهایت سبب افزایش بهره‌وری مصرف آب و کود در مزرعه می‌شوند.

تناوب زراعی تنها از جنبه‌های اکولوژیکی اهمیت ندارد، بلکه آثار اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای نیز به همراه دارد. کشاورزانی که از تناوب بهره می‌گیرند، معمولاً با تنوع بیشتری در تولید مواجه‌اند و این امر ریسک اقتصادی آن‌ها را کاهش می‌دهد. در شرایطی که یک محصول به دلیل خشکسالی، بیماری یا نوسانات بازار دچار افت عملکرد یا کاهش قیمت می‌شود، وجود محصولات جایگزین در سیستم تناوبی می‌تواند زیان‌های اقتصادی را جبران کند. افزون بر این، برخی از محصولات تناوبی ارزش افزوده بالایی دارند و می‌توانند درآمد کشاورزان را بهبود بخشند. برای مثال، قرار دادن گیاهان دارویی یا صنعتی در تناوب غلات، نه تنها به بهبود خاک کمک می‌کند بلکه منبع درآمد جدیدی برای کشاورزان ایجاد می‌نماید.

از نظر اجتماعی نیز، تناوب زراعی می‌تواند به پایداری جوامع روستایی کمک کند. افزایش بهره‌وری و پایداری تولید سبب می‌شود که کشاورزان انگیزه بیشتری برای ادامه فعالیت در روستا داشته باشند و مهاجرت به شهرها کاهش یابد. علاوه بر این، کاهش وابستگی به نهاده‌های شیمیایی در سیستم‌های تناوبی می‌تواند سلامت انسان و محیط‌زیست را ارتقا بخشد. کاهش مصرف کود و سموم موجب کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی و حفظ تنوع زیستی می‌شود. به این ترتیب، تناوب زراعی ابزاری برای تحقق اهداف توسعه پایدار کشاورزی و حفاظت از منابع طبیعی محسوب می‌گردد.

در انتخاب تناوب‌های مناسب، چند اصل اساسی باید رعایت شود. نخست آنکه گیاهان متوالی باید از نظر نیاز غذایی و الگوی ریشه تفاوت داشته باشند تا فشار بر یک منبع خاص خاک کاهش یابد. دوم آنکه تناوب باید شامل گیاهان تثبیت‌کننده نیتروژن باشد تا چرخه مواد غذایی تکمیل گردد. سوم، تناوب باید از نظر اقتصادی برای کشاورز توجیه‌پذیر باشد و بازار مناسبی برای محصولات فراهم باشد. در نهایت، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های منطقه‌ای باید در طراحی تناوب در نظر گرفته شود، زیرا موفقیت یک تناوب در مناطق مختلف متفاوت خواهد بود.

در کشورهای مختلف جهان، الگوهای متنوعی از تناوب زراعی اجرا می‌شود. برای مثال، در مناطق معتدل اروپا تناوب گندم-کلزا-جو بسیار رایج است. در آسیای جنوبی، تناوب برنج-گندم ستون فقرات امنیت غذایی را تشکیل می‌دهد. در مناطق خشک آفریقا نیز تناوب ذرت-لوبیا یا سورگوم-لوبیا چشم‌ببری برای حفظ حاصلخیزی خاک و تأمین پروتئین غذایی کاربرد دارد. در ایران نیز تناوب‌های متعددی پیشنهاد و اجرا می‌شود، از جمله تناوب گندم-نخود، گندم-کلزا، گندم-کنجد و گندم-لوبیا چشم‌ببری که هر یک متناسب با اقلیم و

شرایط محلی طراحی شده‌اند. این تناوب‌ها علاوه بر بهبود عملکرد، به کاهش آفات و بیماری‌ها و افزایش بهره‌وری منابع کمک می‌کنند.

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تناوب زراعی اثرات قابل‌توجهی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز دارد (فتحی و همکاران، ۲۰۲۰). با کاهش مصرف کودهای شیمیایی و افزایش کربن آلی خاک، تناوب می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد برای کاهش اثرات تغییر اقلیم در نظر گرفته شود. علاوه بر آن، تناوب با گیاهان علوفه‌ای و پوششی به کاهش فرسایش خاک و افزایش ذخیره کربن کمک می‌کند. بدین ترتیب، تناوب زراعی نقشی دوگانه در سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم ایفا می‌کند.

با وجود مزایای متعدد، اجرای تناوب زراعی با چالش‌هایی نیز مواجه است. یکی از چالش‌ها، نبود آگاهی کافی در میان برخی کشاورزان است که همچنان به کشت مداوم یک محصول عادت دارند. عامل دیگر، محدودیت‌های بازار و سیاست‌های حمایتی است که در برخی موارد سبب می‌شود کشاورزان ترجیح دهند تنها محصولی خاص را کشت کنند. کمبود بذر و نهاده‌های مناسب برای برخی محصولات تناوبی نیز مانعی در این مسیر است. از سوی دیگر، طراحی تناوب‌های بهینه نیازمند پژوهش‌های محلی و توجه به شرایط اکولوژیکی هر منطقه است که گاهی با کمبود منابع پژوهشی مواجه می‌شود.

راهکارهایی برای رفع این چالش‌ها وجود دارد. یکی از مهم‌ترین آن‌ها آموزش و ترویج کشاورزان در مورد مزایا و روش‌های اجرای تناوب است. همچنین سیاست‌گذاران باید مشوق‌های اقتصادی مانند یارانه یا تضمین خرید برای محصولات تناوبی فراهم کنند تا کشاورزان انگیزه بیشتری برای اجرای آن داشته باشند. سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه برای معرفی ارقام مناسب محصولات تناوبی نیز ضروری است. علاوه بر این، توسعه زنجیره ارزش و بازاریابی محصولات می‌تواند به اقتصادی‌بودن سیستم‌های تناوبی کمک کند.

جدول ۱-۴: اثر تناوب زراعی بر کاهش تنش خشکی در شرایط تغییر اقلیم

جنبه تناوب زراعی	تغییر/مکانیسم ایجادشده	پیامد در کاهش تنش خشکی	مثال‌های زراعی
بهبود خصوصیات خاک	افزایش ماده آلی، بهبود ساختمان افزایش ظرفیت نگهداری آب و گندم-نخود، ذرت-خاک، افزایش پایداری خاکدانه‌ها	کاهش تبخیر	سویا
افزایش فعالیت میکروبی و قارچ‌های همزیست (AMF)	تقویت همزیستی با میکوریز و بهبود جذب آب و عناصر غذایی، گندم-عدس، ذرت-باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن	افزایش مقاومت به خشکی	لوبیا
تنوع ریشه‌ای	ریشه‌های عمیق‌تر حبوبات و گیاهان روغنی در تناوب	افزایش نفوذپذیری خاک و دسترسی به رطوبت لایه‌های عمیق	گندم-کنجد، ذرت-شبدر
بهبود چرخه عناصر غذایی	افزایش تثبیت زیستی نیتروژن، بهبود کاهش نیاز به کودهای شیمیایی گندم-نخود، برنج-دسترسی فسفر و پتاسیم	دسترس تغذیه‌ای	لوبیا

جدول ۱-۴: اثر تناوب زراعی بر کاهش تنش خشکی در شرایط تغییر اقلیم

جنبه تناوب زراعی	تغییر/مکانیسم ایجادشده	پیامد در کاهش تنش خشکی	مثال های زراعی
کاهش تراکم آفات و بیماری ها	شکستن چرخه زندگی بیماری ها و علف های هرز	عوامل کاهش رقابت برای آب و مواد تناوب	گندم-کلزا، گندم-ماش
افزایش تنوع فنولوژیک و تحمل اقلیمی	استفاده از گونه های مقاوم تر در تناوب	کاهش خطر خشکی در مراحل گندم-ارزن، ذرت-لوبیا چشم بلبلی	
کاهش تبخیر سطحی و بهبود سایه اندازی	پوشش بهتر سطح خاک توسط گیاهان کاهش پوششی تناوبی	دست رفتن رطوبت تناوب ذرت-شبدرد، جو-یونجه	
افزایش بازده مصرف آب (WUE)	افزایش کارایی فتوسنتز و مصرف آب در گیاهان تناوبی	کارایی افزایش عملکرد در واحد مصرف گندم-لوبیا، ذرت-سویا	
بهبود کیفیت خاک در درازمدت	افزایش کربن آلی و ذخایر غذایی افزایش پایداری	تاب آوری اکوسیستم گندم-کنجد، جو-کشاورزی در برابر تغییر اقلیم	

۴-۴- تاریخ کاشت

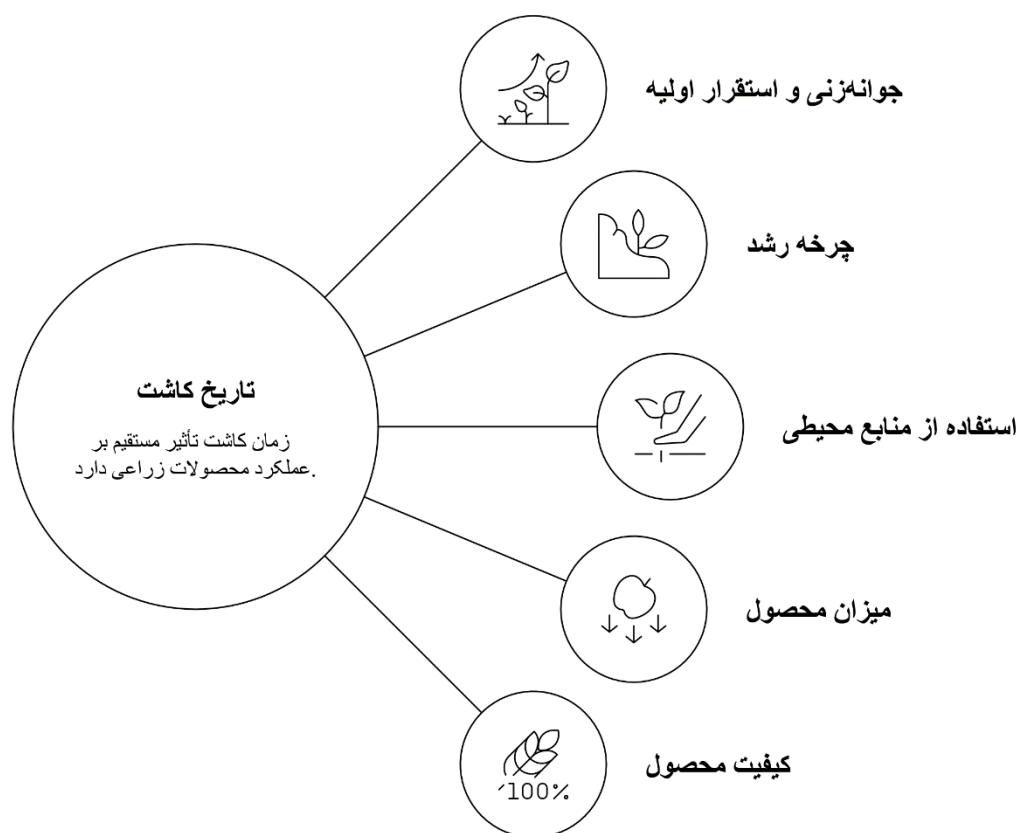
تاریخ کاشت یکی از مهم ترین عوامل مدیریتی در تولید محصولات زراعی است که می تواند نقش تعیین کننده ای در عملکرد و بهره وری داشته باشد. انتخاب زمان مناسب برای کاشت نه تنها بر جوانه زنی و استقرار اولیه گیاه اثر می گذارد، بلکه بر کل چرخه رشد، استفاده از منابع محیطی، میزان محصول نهایی و حتی کیفیت آن نیز تأثیر مستقیم دارد. در شرایط تغییر اقلیم و بروز کم آبی، اهمیت مدیریت تاریخ کاشت بیش از گذشته آشکار شده است. تغییرات اقلیمی باعث دگرگونی در الگوهای بارش، افزایش میانگین دما، وقوع خشکسالی های متناوب و افزایش تبخیر و تعرق شده است. این شرایط سبب می شود که انتخاب تاریخ کاشت به یکی از مهم ترین ابزارها برای سازگاری کشاورزی با اقلیم جدید تبدیل شود (شکل ۴-۶).

تغییر اقلیم به طور مستقیم بر دسترسی گیاه به منابع آب تأثیر می گذارد. در بسیاری از مناطق جهان از جمله ایران، بارش های سالانه کاهش یافته و توزیع زمانی آن ها نیز به هم خورده است. بارش هایی که پیش تر به صورت ملایم و طولانی مدت رخ می داد، اکنون در قالب بارش های سنگین و کوتاه مدت ظاهر می شود که بخش عمده ای از آن به دلیل رواناب و تبخیر از دسترس خارج می گردد. در چنین شرایطی، کاشت محصول در زمانی که بیشترین تطابق با الگوی بارش و رطوبت خاک وجود داشته باشد، از اهمیت زیادی برخوردار است. اگر تاریخ کاشت به درستی تنظیم نشود، گیاه در مراحل حساس رشد مانند گل دهی یا پرشدن دانه با کمبود آب مواجه خواهد شد که در نهایت به کاهش عملکرد می انجامد.

مطالعات متعدد نشان داده است که تغییر تاریخ کاشت می تواند تفاوت چشمگیری در عملکرد محصولات ایجاد کند. برای مثال، کاشت زودهنگام در برخی مناطق ممکن است موجب شود گیاه در مرحله گل دهی با تنش

گرما یا خشکی انتهای فصل مواجه شود، در حالی که کاشت دیر هنگام می تواند باعث کاهش دوره رشد رویشی و کاهش سطح برگ شود که فتوسنتز و تولید ماده خشک را محدود می کند. بنابراین، انتخاب تاریخ کاشت بهینه نیازمند در نظر گرفتن چندین عامل از جمله دمای هوا، بارش های فصلی، نوع محصول، طول دوره رشد، و شرایط خاک است.

تأثیر تاریخ کاشت بر تولید محصولات زراعی



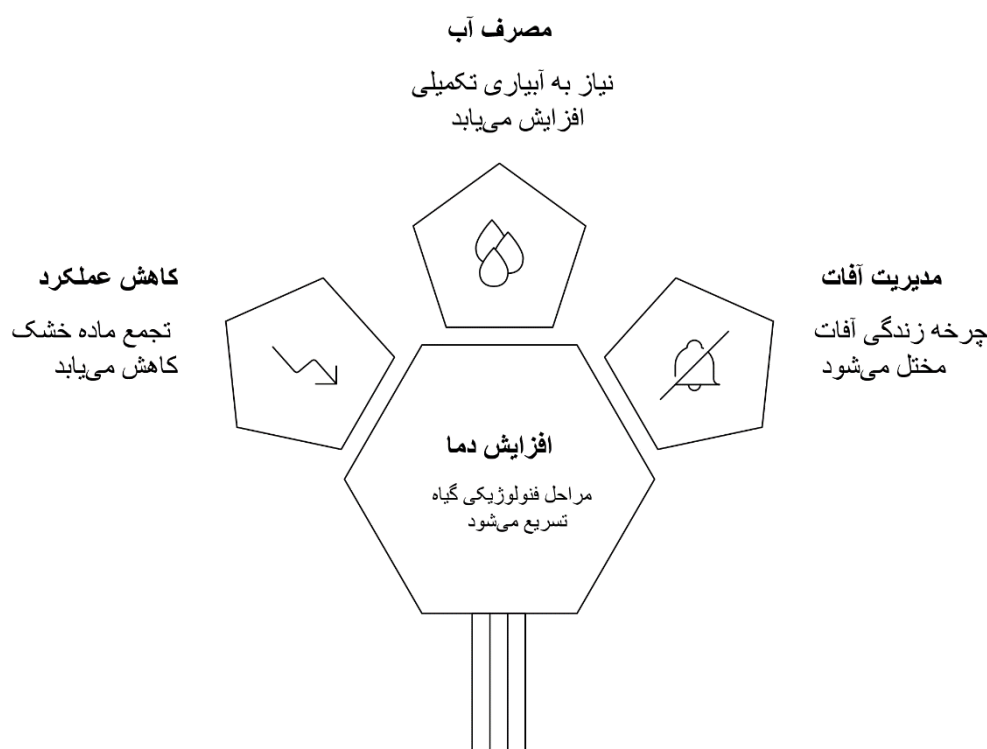
شکل ۶-۴: نقش زمان کاشت در بهبود عملکرد و تولید محصولات زراعی

در شرایط کم آبی، تاریخ کاشت نقش ویژه ای در مدیریت مصرف آب دارد. کاشت در زمانی که خاک هنوز رطوبت کافی از بارش های زمستانی یا اوایل بهار در خود دارد، می تواند استقرار اولیه گیاه را تضمین کند و نیاز به آبیاری های اضافی را کاهش دهد. از سوی دیگر، هماهنگی مراحل حساس رشد گیاه با دوره هایی که احتمال بارش بیشتر است، می تواند بخشی از نیاز آبی را تأمین نماید. به عنوان مثال، در مناطق دیم کشور، کشاورزان سنتی معمولاً بر اساس تجربه و با توجه به رطوبت خاک و الگوی بارش اقدام به تعیین تاریخ کاشت می کنند.

این دانش بومی نشان‌دهنده اهمیت بالای زمان‌بندی کاشت در شرایط محدودیت منابع آبی است (شکل ۷-۴).

افزایش دما به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم، تأثیر قابل‌توجهی بر ضرورت بازنگری در تاریخ کاشت دارد. با افزایش دما، مراحل فنولوژیکی گیاه تسریع می‌شود و چرخه رشد کوتاه‌تر می‌گردد. این مسئله اگرچه ممکن است در برخی موارد باعث فرار گیاه از خشکی انتهای فصل شود، اما در عین حال می‌تواند منجر به کاهش تجمع ماده خشک و عملکرد گردد. بنابراین، انتخاب تاریخ کاشت باید به‌گونه‌ای باشد که گیاه از یک‌سو بتواند از بارش‌های طبیعی و رطوبت ذخیره‌شده در خاک حداکثر استفاده را ببرد و از سوی دیگر از قرار گرفتن در معرض تنش گرمایی یا خشکی در مراحل بحرانی رشد اجتناب کند (شکل ۷-۴).

تأثیر تغییر اقلیم بر تاریخ کاشت



شکل ۷-۴: تأثیر تغییر اقلیم در تاریخ کاشت محصولات

در برخی مناطق، تغییر اقلیم سبب شده است که کشاورزان به تغییر اساسی در الگوی کاشت و حتی تغییر گونه‌های زراعی روی آورند. برای نمونه، در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، تاریخ کاشت گندم دیم به‌طور سنتی در پاییز تنظیم می‌شد. اما کاهش بارش‌های پاییزی و افزایش دمای زمستان سبب شده است که کاشت

زودتر از موعد یا در برخی مناطق به تأخیر افتد تا بیشترین هم‌پوشانی با بارش‌های مؤثر به دست آید. همچنین در مناطق جنوبی کشور، به دلیل گرمای زودرس در بهار، تاریخ کاشت باید به گونه‌ای تغییر کند که محصول بتواند پیش از رسیدن به دماهای بحرانی به مرحله برداشت برسد.

یکی از جنبه‌های مهم اثر تاریخ کاشت، تأثیر آن بر کارایی مصرف آب است. اگر گیاه در زمانی کاشته شود که رطوبت کافی خاک در دسترس باشد و مراحل کلیدی رشد با بارش‌های طبیعی هم‌زمان شود، راندمان مصرف آب افزایش می‌یابد. در مقابل، اگر کاشت در زمانی نامناسب انجام گیرد، نیاز به آبیاری‌های تکمیلی بیشتر خواهد شد و فشار بر منابع آب محدود افزایش می‌یابد. این مسئله در شرایط کنونی که بسیاری از آبخوان‌ها با افت شدید سطح آب روبه‌رو هستند، اهمیتی دوچندان پیدا می‌کند.

افزون بر جنبه‌های فیزیولوژیکی و اکولوژیکی، تاریخ کاشت بر جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی نیز اثرگذار است. انتخاب زمان مناسب می‌تواند عملکرد و درآمد کشاورز را افزایش دهد، در حالی که انتخاب نادرست منجر به کاهش محصول و زیان اقتصادی خواهد شد. در بسیاری از مناطق خشک، کشاورزان بر اساس تجربه شخصی تاریخ کاشت را تنظیم می‌کنند. با این حال، تغییرات شدید اقلیمی باعث شده است که این تجربیات سنتی در برخی موارد ناکافی باشد و نیاز به استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی اقلیم بیشتر احساس شود. مدل‌های رایانه‌ای می‌توانند بر اساس داده‌های آب‌وهوایی گذشته و پیش‌بینی آینده، بهترین تاریخ کاشت را برای هر منطقه مشخص کنند.

یکی دیگر از ابعاد مهم تاریخ کاشت، تأثیر آن بر مدیریت آفات و بیماری‌هاست. تغییر زمان کاشت می‌تواند چرخه زندگی آفات را مختل کند یا شدت بیماری‌های خاص را کاهش دهد. برای مثال، کاشت زود هنگام یا دیر هنگام می‌تواند باعث شود که گیاه از هم‌زمانی با اوج جمعیت برخی آفات مانند شته‌ها یا سنها اجتناب کند. همچنین برخی بیماری‌های قارچی که نیازمند رطوبت خاصی هستند، ممکن است در نتیجه تغییر تاریخ کاشت کاهش یابند. به این ترتیب، مدیریت تاریخ کاشت نه تنها ابزاری برای سازگاری با تغییر اقلیم و کم‌آبی است، بلکه می‌تواند در مدیریت تلفیقی آفات و بیماری‌ها نیز مؤثر باشد.

فصل پنجم

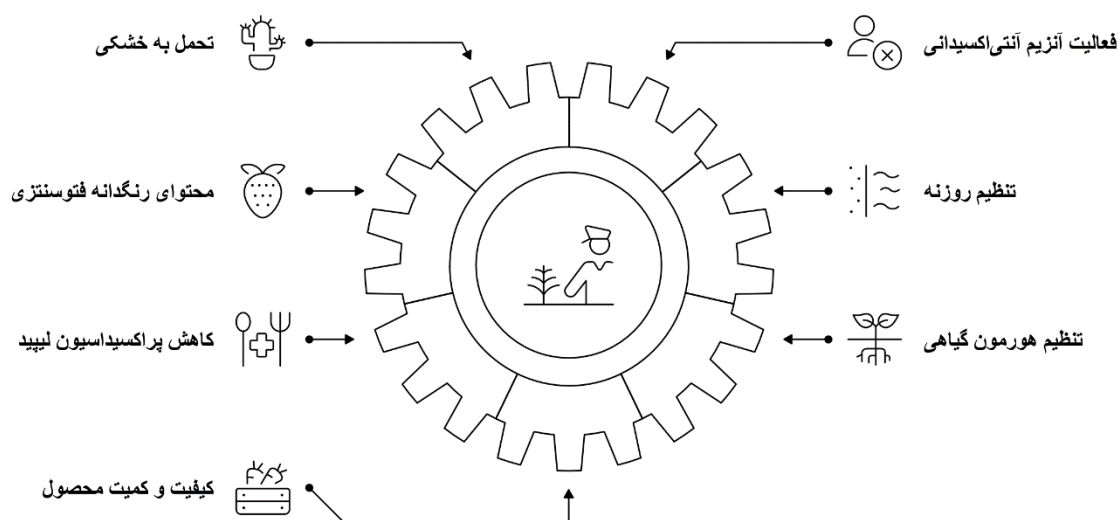
مداخلات زیستی و فناورانه در کاهش

اثرات تنش خشکی

۱-۵- اسید سالیسیلیک

اسید سالیسیلیک به عنوان یکی از ترکیبات شبه هورمونی و فنلی، جایگاه ویژه‌ای در سازوکارهای دفاعی گیاهان دارد و در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران علوم کشاورزی و زیست‌شناسی را به خود جلب کرده است. این ترکیب در سلول‌های ریشه بسیاری از گیاهان تولید می‌شود و علاوه بر نقش در فرایندهای طبیعی رشد و نمو، به عنوان یک تنظیم‌کننده مهم پاسخ‌های گیاهی در برابر شرایط تنش‌زا از جمله خشکی عمل می‌کند (شرما و همکاران، ۲۰۲۰؛ کایا و همکاران، ۲۰۲۰؛ ملکی و فتحی، ۲۰۱۹). تغییر اقلیم و دگرگونی الگوهای بارش و افزایش دما سبب شده است که گیاهان در معرض خشکسالی‌های متوالی و طولانی مدت قرار گیرند و کارایی آن‌ها در استفاده از آب کاهش یابد. در چنین شرایطی، ترکیباتی مانند اسید سالیسیلیک می‌توانند در تقویت سازوکارهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه نقش حیاتی ایفا کنند (شکل ۱-۵).

نقش اسید سالیسیلیک در سازگاری گیاهان



شکل ۱-۵: کارکرد اسید سالیسیلیک در بهبود سازگاری گیاهان با شرایط تنش

اسید سالیسیلیک از طریق مسیرهای گوناگون باعث افزایش تحمل گیاه به خشکی می‌شود. یکی از مهم‌ترین این مسیرها، تنظیم فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی است که در پاک‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن نقش دارند. در شرایط کم‌آبی، غلظت رادیکال‌های آزاد در سلول به شدت افزایش می‌یابد و در صورت عدم کنترل، منجر به آسیب به پروتئین‌ها، لیپیدها و ساختار کلروپلاست می‌شود. اسید سالیسیلیک با تحریک فعالیت آنزیم‌هایی نظیر سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز، توانایی گیاه در مهار این گونه‌های مضر را بالا می‌برد.

و از تخریب غشاها و کاهش کارایی فتوسنتز جلوگیری می‌کند (فهد و همکاران، ۲۰۱۵). به همین دلیل، پژوهشگران معتقدند که مصرف اسید سالیسیلیک می‌تواند به‌طور معنی‌داری مقاومت گیاهان زراعی را در برابر کم‌آبی افزایش دهد و به تثبیت تولید در شرایط تغییر اقلیم کمک کند (شرما و همکاران، ۲۰۱۷؛ صحرایی و همکاران، ۲۰۱۸).

اسید سالیسیلیک همچنین ویژگی‌های فیزیولوژیک متعددی را در گیاهان تحت تنش تغییر می‌دهد. یکی از این ویژگی‌ها افزایش میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی است (شکل ۱-۵). تحت شرایط خشکی، کلروفیل و کاروتنوئیدها اغلب دچار تخریب می‌شوند که این امر به کاهش راندمان فتوسنتزی و افت عملکرد محصول منجر می‌گردد. در مطالعات مختلف نشان داده شده است که محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک منجر به افزایش محتوای رنگیزه‌ها و بهبود فرآیند فتوسنتز در گیاهان تحت تنش شده است (غیی و همکاران، ۲۰۰۲؛ کرمی چمه و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این، اسید سالیسیلیک بر باز و بسته شدن روزنه‌ها اثرگذار است و از طریق ایجاد تعادل میان کاهش اتلاف آب و حفظ فتوسنتز، امکان استفاده بهینه از منابع آبی محدود را فراهم می‌سازد.

یکی دیگر از جنبه‌های مهم اثر اسید سالیسیلیک، کاهش پراکسیداسیون لیپیدهاست. شاخص‌هایی مانند مالون‌دی‌آلدئید (MDA) و پراکسید هیدروژن به‌عنوان نشانگرهای آسیب اکسیداتیو در شرایط خشکی به‌شدت افزایش می‌یابند. پژوهش‌های متعددی ثابت کرده‌اند که استفاده از اسید سالیسیلیک سبب کاهش چشمگیر این ترکیبات می‌شود و در نتیجه پایداری غشاهای سلولی و فعالیت متابولیک گیاه حفظ می‌گردد (عبادی و همکاران، ۲۰۱۵). در واقع این ویژگی یکی از کلیدی‌ترین مکانیسم‌های دفاعی گیاه در مقابل تغییر اقلیم و افزایش وقوع خشکسالی‌های شدید است.

با توجه به تغییرات اقلیمی که با افزایش دما و تغییر الگوهای بارش همراه است، استفاده از ترکیباتی مانند اسید سالیسیلیک می‌تواند در سازگاری گیاهان با این شرایط نقش محوری داشته باشد. تحقیقات نشان داده‌اند که محلول‌پاشی یا بذرمالی با اسید سالیسیلیک در مراحل حساس رشد گیاه، مانند جوانه‌زنی، گلدهی یا پر شدن دانه، می‌تواند از کاهش شدید عملکرد جلوگیری کند و کارایی مصرف آب را افزایش دهد. بدین ترتیب، گیاه قادر خواهد بود با مصرف آب کمتر، زیست‌توده بیشتری تولید کند و بهره‌وری آبیاری در سطح مزرعه بهبود یابد.

علاوه بر این، اسید سالیسیلیک توانایی قابل‌توجهی در تغییر غلظت هورمون‌های گیاهی دارد. این ترکیب با اثرگذاری بر سطح هورمون‌هایی نظیر آبسزیک‌اسید، سیتوکینین‌ها و جیبرلین‌ها، موجب تنظیم مسیرهای دفاعی و رشد گیاه در شرایط تنش می‌شود. به‌ویژه افزایش سطح آبسزیک‌اسید که نقش کلیدی در بسته شدن روزنه‌ها و کاهش تعرق دارد، یکی از سازوکارهایی است که به واسطه اسید سالیسیلیک تقویت می‌شود. هم‌زمان، افزایش تجمع ترکیبات اسمزی مانند پرولین، قندهای محلول و گلیسین‌بتائین به گیاه کمک می‌کند تا تعادل اسمزی سلول‌ها را حفظ کند و از پژمردگی جلوگیری شود.

اثرات مثبت اسید سالیسیلیک تنها به افزایش مقاومت فیزیولوژیک گیاه محدود نمی‌شود، بلکه کیفیت و کمیت محصول را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای مثال در گندم، مصرف این ترکیب باعث افزایش محتوای پروتئین دانه و بهبود شاخص برداشت شده است. در محصولات باغی نظیر گوجه‌فرنگی، افزایش محتوای ویتامین C، ترکیبات فنلی و آنتی‌اکسیدان‌ها گزارش شده است. این ویژگی‌ها نه تنها از نظر تغذیه‌ای برای مصرف‌کنندگان اهمیت دارد، بلکه ارزش افزوده اقتصادی نیز ایجاد می‌کند و به افزایش پایداری امنیت غذایی در شرایط تغییر اقلیم کمک می‌نماید. در جدول ۱-۵ اثرات اسید سالیسیلیک بر سازوکارهای فیزیولوژیک نشان داده شده است.

جدول ۱-۵: اثرات اسید سالیسیلیک بر سازوکارهای فیزیولوژیک و کیفیت محصول گیاهان تحت تنش خشکی

مکانیزم/ویژگی	اثر اسید سالیسیلیک	نتیجه/مزیت برای گیاه
فعالیت آنتی‌اکسیدانی	افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز	مهار گونه‌های فعال اکسیژن، کاهش آسیب پروتئین‌ها و لیپیدها، حفظ کارایی فتوسنتز
رنگیزه‌های فتوسنتزی	افزایش محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها	بهبود فرآیند فتوسنتز، افزایش مقاومت به خشکی
تنظیم روزه‌ها	تعدیل باز و بسته شدن روزه‌ها	کاهش اتلاف آب و حفظ فتوسنتز، استفاده بهینه از منابع آبی
کاهش پراکسیداسیون لیپیدها	کاهش MDA و پراکسید هیدروژن	حفظ پایداری غشاهای سلولی و فعالیت متابولیک
تنظیم هورمون‌های گیاهی	افزایش آبسزیک‌اسید، تنظیم سیتوکینین‌ها و جیبرلین‌ها	بسته شدن روزه‌ها، کاهش تعرق، تقویت مسیرهای دفاعی و رشد
افزایش ترکیبات اسمزی	تجمع پرولین، قندهای محلول، گلیسین‌بتائین	حفظ تعادل اسمزی سلولی، جلوگیری از پژمردگی
اثر بر عملکرد و کیفیت محصول	افزایش پروتئین دانه، ویتامین C، ترکیبات فنلی و آنتی‌اکسیدان‌ها	افزایش کمیت و کیفیت محصول، ارزش غذایی و اقتصادی، پایداری امنیت غذایی

از سوی دیگر، مدیریت کاربرد اسید سالیسیلیک در کشاورزی پایدار نیازمند توجه ویژه به غلظت، زمان و روش مصرف است. مطالعات نشان داده‌اند که غلظت‌های پایین تا متوسط اثرات مثبت قابل توجهی بر رشد و تحمل گیاهان دارند، در حالی که مصرف بیش‌ازحد می‌تواند اثرات بازدارنده داشته باشد. همچنین مرحله مصرف اهمیت زیادی دارد؛ به‌طور مثال بذرمالی پیش از کاشت و محلول‌پاشی در مراحل بحرانی مانند گلدهی بیشترین اثرگذاری را نشان داده‌اند. این نکته بیانگر آن است که برای بهره‌گیری مؤثر از مزایای اسید سالیسیلیک، نیاز به تحقیقات دقیق‌تر در سطح محصولات مختلف و شرایط اقلیمی گوناگون وجود دارد.

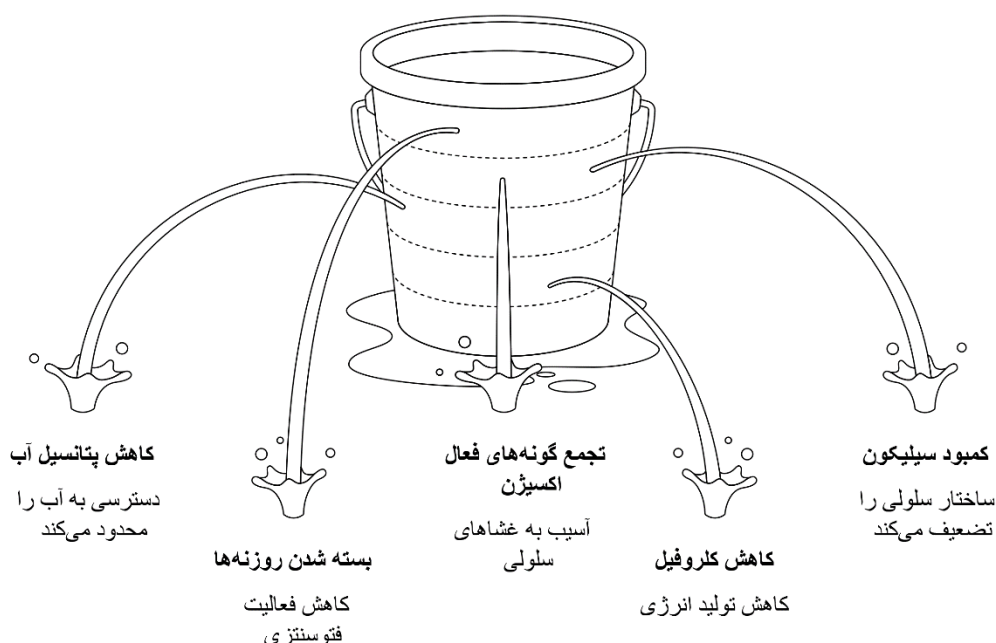
در نهایت می‌توان گفت اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک ترکیب کلیدی در افزایش مقاومت گیاهان به خشکی، در شرایط تغییر اقلیم و کمبود منابع آبی نقشی بی‌بدیل دارد. این ترکیب با تنظیم فرآیندهای بیوشیمیایی و

فیزیولوژیکی، کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، بهبود راندمان مصرف آب و تقویت سیستم دفاعی گیاه، زمینه را برای پایداری عملکرد و تولید فراهم می‌سازد. در آینده، استفاده گسترده و هدفمند از اسید سالیسیلیک می‌تواند بخشی از راهکارهای کلان برای مدیریت تنش خشکی در کشاورزی باشد و به تحقق اهداف کشاورزی پایدار و امنیت غذایی جهانی کمک کند.

۲-۵- سیلیکون

سیلیکون به عنوان یکی از عناصر فراوان پوسته زمین و خاک، در ردیف دوم پس از اکسیژن از نظر میزان حضور در ترکیبات خاک قرار دارد. اگرچه این عنصر در طبقه‌بندی عناصر ضروری برای رشد گیاهان گنجانده نشده است، اما تحقیقات سه دهه اخیر نشان داده‌اند که سیلیکون نقشی اساسی در افزایش پایداری گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی، به‌ویژه خشکی، ایفا می‌کند. همه گیاهان ریشه‌دار که در خاک رشد می‌کنند به‌طور طبیعی مقداری سیلیکون را از محیط جذب می‌کنند و آن را در سلول‌ها و بافت‌های خود ذخیره می‌سازند. این عنصر معدنی به شکل سیلیس یا اسید سیلیسیک در بافت‌های گیاهی تجمع می‌یابد و حضور فراوان آن باعث استحکام مکانیکی بیشتر دیواره سلولی و بافت‌های اپیدرمی می‌شود. همین ویژگی به گیاه کمک می‌کند تا در برابر تنش‌های محیطی از جمله کم‌آبی مقاومت بیشتری نشان دهد. با وجود این که نقش زیستی سیلیکون در گیاهان به اندازه عناصر ضروری مانند نیتروژن، فسفر یا پتاسیم شناخته شده نیست، اما شواهد علمی نشان می‌دهد که این عنصر توانسته است در شرایط تغییر اقلیم که با تشدید خشکی، گرما و تغییرات بارشی همراه است، جایگاه مهمی در مدیریت زراعی و افزایش مقاومت گیاهان پیدا کند (اعتصامی و جونگ، ۲۰۱۸؛ انجی و همکاران، ۲۰۰۸). امروزه تغییر اقلیم به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تهدیدهای تولید پایدار کشاورزی مطرح است. افزایش دما و تغییر الگوی بارش سبب کاهش منابع آب شیرین و تشدید بروز خشکسالی‌های مکرر شده است. در چنین شرایطی استفاده از نهاده‌هایی مانند سیلیکون می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاهان عمل کند. تنش خشکی سبب بروز تغییرات گسترده‌ای در گیاهان می‌شود. کاهش پتانسیل آب خاک، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فتوسنتز، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن، تخریب غشاهای سلولی، کاهش سنتز کلروفیل و در نهایت کاهش عملکرد، بخشی از پیامدهای خشکی است (ایجاز و همکاران، ۲۰۱۷). گیاهان برای مقابله با این شرایط، مکانیسم‌های پیچیده‌ای شامل تجمع اسمولیت‌ها، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تغییر در الگوهای رشد ریشه و ساقه را تکامل داده‌اند. با این حال، این مکانیسم‌های درونی به تنهایی کافی نیستند و اغلب نیاز است با تأمین مواد معدنی و تغذیه‌ای خاص، اثرات منفی خشکی کاهش یابد. سیلیکون در این میان نقشی ویژه دارد، زیرا علاوه بر اثرات فیزیکی بر ساختار بافتی، در فرآیندهای بیوشیمیایی و تنظیمی نیز فعال است (وارایش و همکاران، ۲۰۱۱). در شکل ۲-۵ تأثیر کمبود سیلیکون بر کاهش تاب‌آوری گیاهان در شرایط تنش خشکی نشان داده شده است.

کمبود سیلیکون باعث کاهش تاب‌آوری گیاه می‌شود



شکل ۲-۵: تأثیر کمبود سیلیکون بر کاهش تاب‌آوری گیاهان در شرایط تنش خشکی

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که کاربرد سیلیکون در محصولات زراعی مختلف منجر به بهبود مقاومت به خشکی شده است. در گندم، استفاده از سیلیکون موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز شده است. این آنزیم‌ها نقش کلیدی در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد دارند و مانع از تجمع بیش از حد پراکسید هیدروژن می‌شوند. در شرایط خشکی، معمولاً سطح پراکسید هیدروژن در سلول‌ها بالا می‌رود و این موضوع به پراکسیداسیون لیپیدها و تخریب غشاهای منجر می‌شود. سیلیکون با فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی آنتی‌اکسیدانی این آسیب را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (گنگ و همکاران، ۲۰۰۵). در نتیجه، گیاهانی که تحت تیمار سیلیکون قرار گرفته‌اند، پایداری بیشتری در غشاهای سلولی نشان می‌دهند و راندمان فتوسنتزی بالاتری دارند (چن و همکاران، ۲۰۱۱).

یکی از جنبه‌های مهم نقش سیلیکون در شرایط تغییر اقلیم، افزایش کارایی مصرف آب است. گیاهانی که سیلیکون دریافت می‌کنند، معمولاً با افزایش ضخامت کوتیکول و استحکام دیواره‌های سلولی در بافت برگ، میزان تعرق را کاهش می‌دهند. این امر سبب می‌شود گیاه در عین حفظ فرآیند فتوسنتز، آب کمتری از دست بدهد و راندمان مصرف آب بالاتر برود (امین و همکاران، ۲۰۱۶). در ذرت و برنج گزارش شده است که تیمار با سیلیکون منجر به بهبود وضعیت آبی برگ، افزایش محتوای نسبی آب و پایداری بهتر فتوسنتز در شرایط

کم آبی شده است (نولا و همکاران، ۲۰۱۲). در جدول ۲-۵ اثرات زیستی سیلیکون بر سازوکارهای فیزیولوژیک گیاهان تحت تنش خشکی و تغییر اقلیم نشان داده شده است.

جدول ۲-۵: اثرات زیستی سیلیکون بر سازوکارهای فیزیولوژیک گیاهان تحت تنش خشکی و تغییر اقلیم

مکانیزم/ویژگی	اثر سیلیکون	نتیجه/مزیت برای گیاه	منابع
فعالیت آنتی اکسیدانی	افزایش فعالیت کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز	خنثی سازی رادیکال های آزاد، کاهش پراکسید هیدروژن، حفظ غشاهای و فتوسنتز	گنگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۱
کارایی مصرف آب	افزایش ضخامت کوتیکول، استحکام دیواره سلولی، کاهش تعرق	حفظ فتوسنتز، مصرف بهینه آب، افزایش راندمان مصرف آب	امین و همکاران، ۲۰۱۶؛ نولا و همکاران، ۲۰۱۲
تعادل یونی و کاهش سمیت	کاهش جذب یون های مضر (سدیم)، افزایش جذب پتاسیم و کلسیم	حفظ تعادل یونی، تقویت فرآیندهای متابولیک	گنگ و همکاران، ۲۰۰۸
تجمع ترکیبات اسمولیت	افزایش پرولین، قندهای محلول، گلیسین بتائین	حفظ تعادل اسمزی، جلوگیری از پژمردگی بافت ها	وارایش و همکاران، ۲۰۱۱
تنظیم هورمون های ضد تنش	افزایش سطح آبسزیک اسید	بسته شدن روزنه ها، کاهش تعرق، کنترل مصرف آب	وارایش و همکاران، ۲۰۱۱
رشد ریشه	افزایش طول ریشه های جانبی و عمق سیستم ریشه ای	جذب آب بهتر از لایه های عمیق خاک، تحمل کم آبی سطحی	اعتمامی و جونگ، ۲۰۱۸
عملکرد و کیفیت محصول	افزایش عملکرد دانه، بهبود C پروتئین، نشاسته، قند، ویتامین و ترکیبات فنلی	افزایش کمیت و کیفیت محصول، ارتقای ارزش غذایی و اقتصادی	چن و همکاران، ۲۰۱۱؛ علی نژاد و همکاران، ۱۳۹۷
مدیریت مصرف	تأثیر غلظت، زمان و روش کاربرد	بهینه سازی اثرات مثبت و جلوگیری از تجمع بیش از حد سیلیس	امین و همکاران، ۲۰۱۶

سیلیکون همچنین در تنظیم تعادل یون ها و کاهش سمیت ناشی از تجمع یون های مضر در شرایط خشکی نقش دارد. خشکی اغلب همراه با افزایش غلظت املاح محلول در خاک است که می تواند اثرات منفی شوری را نیز به همراه داشته باشد. سیلیکون با رسوب در دیواره سلولی و تغییر در ویژگی های فیزیولوژیک غشاهای جذب یون های مضر مانند سدیم را کاهش می دهد و در مقابل، جذب پتاسیم و کلسیم را تقویت می کند. این ویژگی به گیاه کمک می کند تا تعادل یونی بهتری داشته باشد و فرآیندهای متابولیک حیاتی خود را حفظ نماید (گنگ و همکاران، ۲۰۰۸).

از منظر بیوشیمیایی، سیلیکون باعث افزایش تجمع ترکیبات اسمولیت مانند پرولین، قندهای محلول و گلیسین بتائین می شود. این ترکیبات به عنوان تنظیم کننده های اسمزی شناخته می شوند و به گیاه کمک

می‌کنند تا در شرایط کاهش پتانسیل آب، تعادل اسمزی سلول‌ها را حفظ کنند و از پژمردگی بافت‌ها جلوگیری شود (وارایش و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین سیلیکون در افزایش سطح هورمون‌های ضد تنش نظیر آبسزیک‌اسید نقش دارد. این هورمون از طریق بسته شدن روزنه‌ها و تنظیم تعرق به گیاه امکان می‌دهد تا مصرف آب را در شرایط بحرانی کنترل کند.

افزون بر این، سیلیکون نقش مهمی در بهبود رشد ریشه در شرایط کم‌آبی ایفا می‌کند. در بسیاری از مطالعات گزارش شده است که تیمار گیاهان با سیلیکون منجر به افزایش طول ریشه‌های جانبی و عمق‌گیری بیشتر سیستم ریشه‌ای شده است. این ویژگی باعث می‌شود گیاه بتواند آب بیشتری از لایه‌های عمیق‌تر خاک جذب کند و اثرات کم‌آبی سطحی را بهتر تحمل نماید (اعتصامی و جونگ، ۲۰۱۸). چنین مکانیسمی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بارش محدود است، ارزش ویژه‌ای دارد.

کاربرد سیلیکون نه تنها اثرات مثبت فیزیولوژیک دارد، بلکه عملکرد و کیفیت محصول را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در گندم و جو گزارش شده است که محلول‌پاشی سیلیکون باعث افزایش عملکرد دانه و بهبود کیفیت پروتئین و نشاسته شده است (چن و همکاران، ۲۰۱۱). در محصولات باغی مانند خیار و گوجه‌فرنگی نیز مصرف سیلیکون سبب افزایش کیفیت میوه‌ها از نظر میزان قند، ویتامین C و ترکیبات فنلی گردیده است (علی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۷). این ویژگی‌ها به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم که امنیت غذایی جهانی را تهدید می‌کند، بسیار حائز اهمیت هستند.

مدیریت کاربرد سیلیکون در کشاورزی نیازمند توجه به غلظت، زمان و روش مصرف است. در برخی مطالعات مشخص شده است که غلظت‌های پایین تا متوسط اثرات مثبت قابل‌توجهی بر گیاهان دارند، اما مصرف بیش‌ازحد می‌تواند باعث تجمع بیش از اندازه سیلیس در بافت‌ها و کاهش کارایی فتوسنتز شود (امین و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین زمان مصرف اهمیت زیادی دارد؛ برای مثال کاربرد سیلیکون در مراحل حساس مانند گلدهی و پر شدن دانه بیشترین اثر را در بهبود عملکرد نشان داده است. روش‌های مختلفی مانند بذرمالی، محلول‌پاشی و افزودن به خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند و هر کدام بسته به نوع گیاه و شرایط محیطی مزایای خاص خود را دارند.

در مجموع می‌توان گفت اسید سیلیکون در شرایط تغییر اقلیم و محدودیت منابع آبی به‌عنوان یک ترکیب معدنی ارزشمند عمل می‌کند. این عنصر با تقویت مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش تجمع اسمولیت‌ها، بهبود تعادل یونی، تقویت رشد ریشه و کاهش تعرق، توانایی گیاهان را در مقابله با خشکی افزایش می‌دهد. افزون بر آن، بهبود کیفیت و کمیت محصول سبب می‌شود که سیلیکون نه تنها ابزاری برای افزایش پایداری تولید در مزرعه باشد، بلکه به ارتقای امنیت غذایی نیز کمک کند. در آینده، تحقیقات گسترده‌تر در زمینه تعیین بهترین روش‌ها و زمان‌های کاربرد سیلیکون می‌تواند به توسعه فناوری‌های نوین در مدیریت تنش خشکی منجر شود و کشاورزی پایدار را در عصر تغییر اقلیم تضمین نماید.

۳-۵- میکوریزا و باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه

تغییر اقلیم یکی از جدی‌ترین چالش‌های قرن حاضر است که تأثیرات گسترده‌ای بر تولید محصولات کشاورزی گذاشته و امنیت غذایی را در بسیاری از نقاط جهان تهدید کرده است. افزایش دما، تغییر الگوی بارندگی، بروز خشکسالی‌های مکرر و کاهش منابع آب شیرین از جمله مهم‌ترین پیامدهای این پدیده جهانی است. در چنین شرایطی، استفاده از فناوری‌ها و راهکارهای زیستی نوین برای افزایش تحمل گیاهان به خشکی و حفظ عملکرد محصولات کشاورزی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. از جمله این راهکارها می‌توان به کاربرد قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه اشاره کرد که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند. این میکروارگانیسم‌ها با برقراری رابطه همزیستی با گیاهان، از طریق مکانیسم‌های گوناگون، کارایی مصرف آب و مواد غذایی را افزایش داده، مقاومت گیاهان به تنش خشکی را بهبود می‌بخشند و در نهایت سبب پایداری عملکرد محصولات در شرایط اقلیمی متغیر می‌شوند.

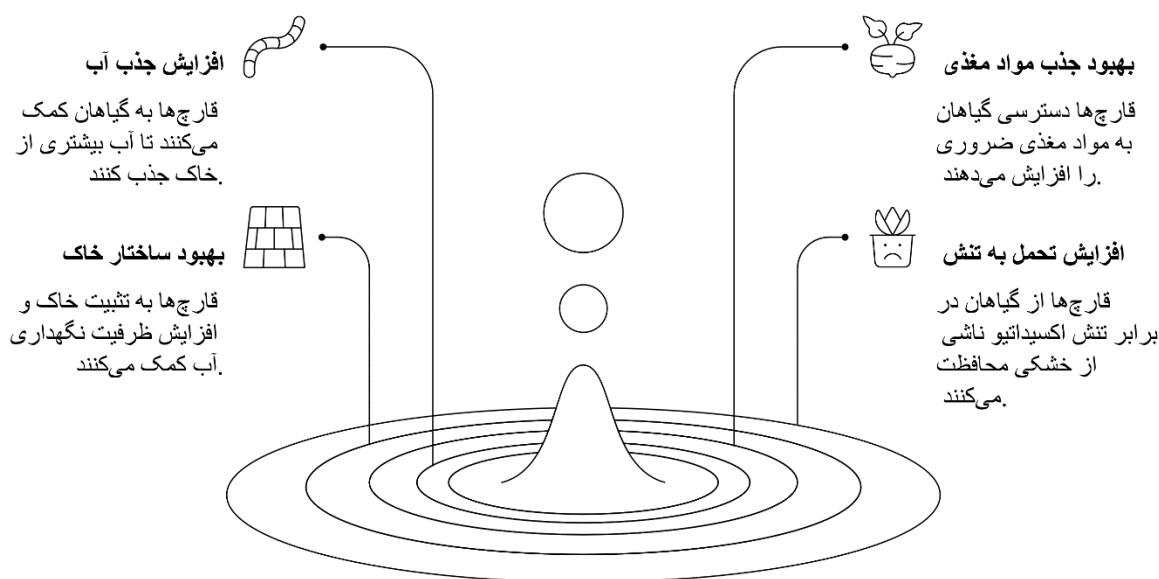
قارچ‌های میکوریز آربوسکولار یکی از مهم‌ترین گروه‌های قارچی همزیست با گیاه هستند که با کلونیزه کردن ریشه‌ها، شبکه گسترده‌ای از هیف‌ها و میسلیم‌ها را در خاک تشکیل می‌دهند. این شبکه‌ها سطح وسیعی از خاک را پوشش داده و به گیاه اجازه می‌دهند تا حجم بیشتری از خاک را برای جذب آب و مواد غذایی مورد استفاده قرار دهد. این ویژگی در شرایط خشکی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا در شرایط کاهش رطوبت خاک، توانایی گیاه برای دستیابی به آب کاهش می‌یابد و میکوریزا با گسترش سطح جذب، این محدودیت را تا حدی جبران می‌کند (شکل ۳-۵). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که قارچ‌های میکوریز آربوسکولار باعث افزایش جذب عناصر غذایی به‌ویژه فسفر و نیتروژن می‌شوند که نقش اساسی در متابولیسم گیاه دارند و در بهبود عملکرد گیاه تحت خشکی مؤثرند (فروغ و همکاران، ۲۰۱۷؛ کرمی و همکاران، ۲۰۱۸).

یکی دیگر از جنبه‌های مهم عملکرد میکوریزا، بهبود خصوصیات فیزیکی خاک است. هیف‌های قارچ موجب به‌دام افتادن ذرات خاک و تشکیل خاکدانه‌های پایدار می‌شوند. این فرآیند علاوه بر بهبود نفوذپذیری خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب، سبب کاهش فرسایش خاک نیز می‌شود. نقش پروتئینی به نام گلومالین که توسط قارچ‌های میکوریز تولید می‌شود در این فرآیند بسیار برجسته است. گلومالین با اتصال ذرات خاک به یکدیگر به پایداری خاکدانه‌ها کمک کرده و ساختار خاک را بهبود می‌بخشد. در نتیجه، خاک قادر خواهد بود آب بیشتری ذخیره کند و این ویژگی در شرایط کم‌آبی برای گیاهان بسیار حیاتی است (فروغ و همکاران، ۲۰۱۷).

از منظر فیزیولوژیک، گیاهان همزیست با میکوریزا معمولاً وضعیت آبی بهتری در بافت‌های خود دارند (شکل ۳-۵). افزایش محتوای نسبی آب برگ، حفظ فشار پتانسیل آب و کاهش پژمردگی گیاهان از جمله اثرات این همزیستی است که به‌عنوان مکانیسم اجتناب از خشکی شناخته می‌شود (حبیب‌زاده، ۱۳۹۴). افزون بر آن، قارچ‌های میکوریز توانایی گیاه را در مقابله با تنش اکسیداتیو ناشی از خشکی افزایش می‌دهند. تحقیقات نشان داده است که تلقیح گیاهان با میکوریز موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نظیر کاتالاز،

سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز می‌شود. این آنزیم‌ها با خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی، پایداری غشاهای سلولی را حفظ کرده و از تخریب ساختارهای حیاتی جلوگیری می‌کنند. در نتیجه گیاهان تحت تیمار میکوریزا در مقایسه با گیاهان غیرهمزیست، توانایی بالاتری در تحمل خشکی و تولید محصول دارند (سهرابی و همکاران، ۲۰۱۲).

نقش قارچ‌های میکوریزا در تحمل خشکی



شکل ۳-۵: کارکرد قارچ‌های میکوریزا در ارتقای مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی

از سوی دیگر، باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه (PGPR) نیز در کاهش اثرات خشکی نقش مهمی دارند. این گروه از باکتری‌ها با کلونیزه کردن ریشه‌ها و ناحیه ریزوسفر، به طرق مستقیم و غیرمستقیم بر رشد گیاه اثر می‌گذارند. از مکانیسم‌های مستقیم می‌توان به تثبیت نیتروژن اتمسفری، حل کردن فسفات‌های نامحلول خاک، تولید سیدروفورها و ترشح اسیدهای آلی اشاره کرد که همگی سبب افزایش دسترسی گیاه به عناصر غذایی می‌شوند (فروغ و همکاران، ۲۰۱۷؛ ناصری و همکاران، ۲۰۲۰). به عنوان نمونه، باکتری‌های حل‌کننده فسفات از طریق ترشح اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفاتاز، فسفر نامحلول خاک را به شکل قابل جذب تبدیل می‌کنند و این موضوع به‌ویژه در شرایط خشکی که دسترسی به عناصر غذایی محدود می‌شود، اهمیت دارد (فتحی و همکاران، ۲۰۱۶).

در حوزه مکانیسم‌های غیرمستقیم، PGPRها با تولید ترکیبات ضد میکروبی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها، سیدروفورها و آنزیم‌هایی نظیر کیتیناز و گلوکاناز مانع از رشد عوامل بیماری‌زا در ریزوسفر می‌شوند و به این ترتیب از گیاه

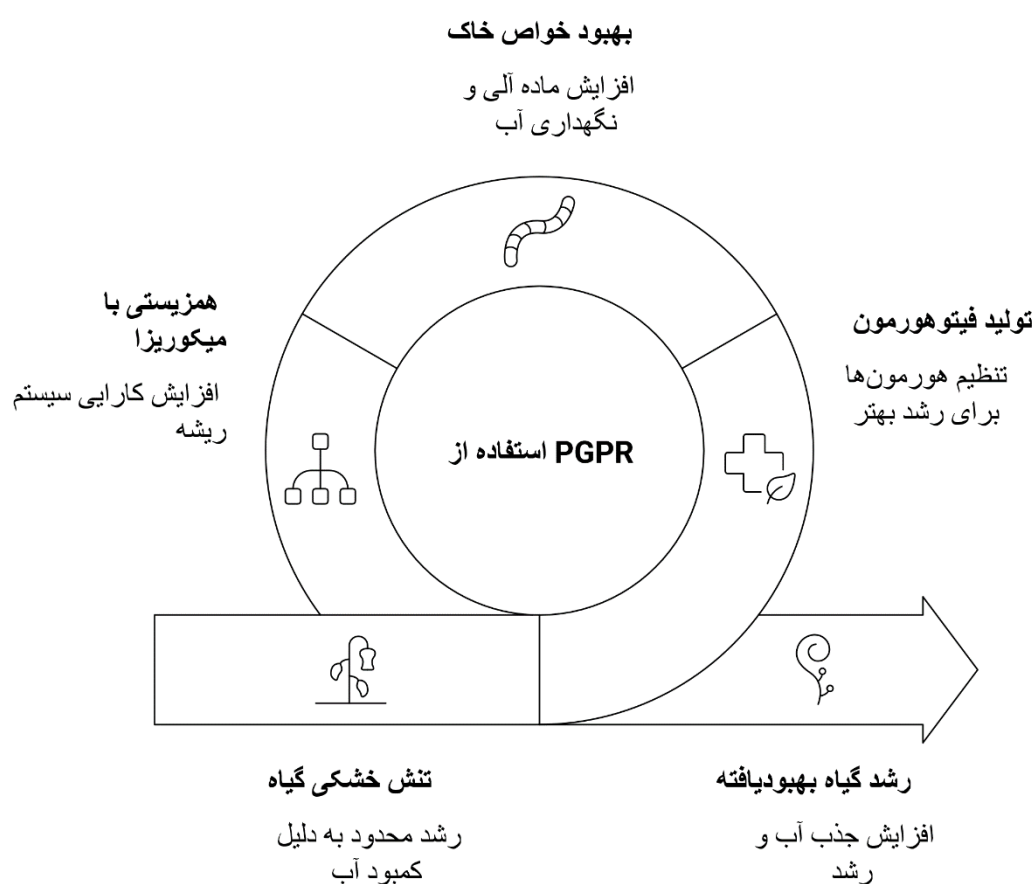
در برابر استرس‌های زیستی نیز محافظت می‌کنند. این ویژگی در شرایط تغییر اقلیم که گیاهان هم‌زمان با تنش‌های زیستی و غیرزیستی مواجه‌اند، اهمیت دوچندان دارد (فتحی و همکاران، ۲۰۱۶). در جدول ۳-۵ نقش قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد در کاهش تنش خشکی تحت شرایط تغییر اقلیم نشان داده شده است.

جدول ۳-۵: نقش قارچ‌های میکوریزا و باکتری‌های محرک رشد در کاهش تنش خشکی تحت شرایط تغییر اقلیم

گروه میکروارگانیسم	گونه/جنس مهم	مکانیسم‌های اصلی در کاهش تنش خشکی	پیامدهای مثبت برای گیاه
قارچ‌های میکوریز (AMF) آربوسکولار	<i>Glomus, Rhizophagus, Claroideoglomus, Funneliformis</i>	P ، افزایش جذب آب و عناصر غذایی ، ترشح گلیکوپروتئین «گلومالین» (Zn) برای بهبود خاک، تنظیم بیان ژن‌های تنش‌پذیر، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی	بهبود رشد ریشه و ساقه، افزایش بازده مصرف آب ، افزایش (WUE) مقاومت به خشکی
قارچ‌های اکتومیکوریزا (ECM)	<i>Pisolithus, Laccaria, Suillus</i>	افزایش سطح ریشه، بهبود دسترسی به رطوبت عمیق خاک، افزایش تحمل اسمزی	افزایش بقاء گیاهان در شرایط خشکی طولانی‌مدت
باکتری‌های محرک (PGPR) رشد گیاه	<i>Azospirillum, Azotobacter, Bacillus, Pseudomonas</i>	IAA ، تولید هورمون‌های رشد ، تثبیت نیتروژن، افزایش (سیتوکینین) فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، تولید دآمیناز (کاهش اتیلن استرسی) ACC	بهبود فتوسنتز، افزایش رشد ریشه، کاهش اثرات خشکی
باکتری‌های حل‌کننده فسفات (PSB)	<i>Bacillus megaterium, Pseudomonas fluorescens</i>	افزایش قابلیت دسترسی فسفر و عناصر غذایی کم‌مصرف در خشکی	افزایش کارایی مصرف کود و عملکرد در شرایط تنش
باکتری‌های تولیدکننده پلی‌ساکارید خارج سلولی (EPS)	<i>Rhizobium, Enterobacter, Bacillus subtilis</i>	و بهبود رطوبت خاک اطراف EPS تولید ریشه (ریزوسفر)	حفظ رطوبت ریشه و کاهش تنش آبی
همزیستی با حبوبات (ریزوبیا)	<i>Rhizobium leguminosarum, Bradyrhizobium</i>	تثبیت زیستی نیتروژن، بهبود هم‌افزایی با میکوریزا، افزایش متابولیت‌های سازگارکننده (پرولین، گلیسین بتائین)	افزایش تولید بیوماس و عملکرد دانه در خشکی
قارچ‌های اندوفیت	<i>Piriformospora indica, Trichoderma spp.</i>	تحریک سیستم دفاعی گیاه، افزایش محتوای آنتی‌اکسیدانی، بهبود جذب مواد غذایی	افزایش تحمل به تنش خشکی و تغییر اقلیم

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های اثرگذاری باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه، توانایی آن‌ها در تولید و تنظیم فیتوهورمون‌ها است (شکل ۴-۵). این باکتری‌ها قادرند هورمون‌هایی مانند اکسین، جیبرلین، سیتوکینین و

آبسزیک اسید را تولید یا متابولیزه کنند. برای مثال، تولید اکسین باعث تحریک تقسیم سلولی و افزایش طول سلول‌های ریشه می‌شود که به توسعه سیستم ریشه‌ای و افزایش سطح جذب منجر می‌گردد (سبکیا و همکاران، ۲۰۲۱). رشد بهتر ریشه‌ها به گیاه امکان می‌دهد تا در شرایط خشکی، آب بیشتری از لایه‌های عمیق‌تر خاک جذب نماید و اثرات کم‌آبی را کاهش دهد. همچنین، تولید آنزیم ACC دآمیناز توسط برخی باکتری‌ها، سطح اتیلن را که در شرایط تنش افزایش می‌یابد و رشد گیاه را محدود می‌کند، کاهش می‌دهد. بدین ترتیب، گیاه در شرایط تنش خشکی رشد بهتری خواهد داشت (ناصری و همکاران، ۲۰۲۰).



شکل ۴-۵: افزایش رشد گیاه با استفاده از باکتری‌های محرک رشد

باکتری‌های PGPR علاوه بر اثرات ذکر شده، نقش مهمی در بهبود خواص فیزیکی خاک ایفا می‌کنند. افزایش ترشحات ریشه‌ای و ترکیبات آلی توسط این باکتری‌ها سبب بهبود فعالیت میکروبی خاک، افزایش ماده آلی و بهبود ساختمان خاک می‌شود (شکل ۴-۵). این ویژگی‌ها با افزایش ظرفیت نگهداری آب و نفوذپذیری خاک

همراه هستند و سبب می‌شوند گیاهان در شرایط خشکی از آب بیشتری بهره‌مند شوند (میرزایی و همکاران، ۲۰۱۸؛ زیدالی و همکاران، ۲۰۱۸).

تأثیر توأم قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و باکتری‌های افزاینده رشد گیاه بسیار چشمگیرتر از کاربرد منفرد هر کدام است. همزیستی سه‌جانبه گیاه-قارچ-باکتری سبب افزایش کارایی سیستم ریشه، تنظیم بهتر تعادل هورمونی و افزایش توانایی گیاه در مقابله با تنش‌های محیطی می‌شود. در مطالعات متعددی نشان داده شده است که تلقیح هم‌زمان گیاهان با میکوریزا و PGPR به‌طور قابل توجهی محتوای کلروفیل، کارایی فتوسنتزی، پایداری غشا و عملکرد دانه را در شرایط کم‌آبی افزایش داده است (کرمی و همکاران، ۲۰۱۸). این اثر هم‌افزایی سبب می‌شود که استفاده از این میکروارگانیسم‌ها به‌عنوان یک راهبرد زیست‌فناورانه در مدیریت کشاورزی پایدار در شرایط تغییر اقلیم مطرح گردد.

جمع‌بندی نتایج تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که کاربرد قارچ‌های میکوریز آربوسکولار و باکتری‌های افزاینده رشد گیاه نه تنها به بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاهان در شرایط خشکی کمک می‌کند، بلکه از طریق افزایش فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی، بهبود تعادل اسمزی، افزایش رشد ریشه و ارتقای خصوصیات فیزیکی خاک، توانایی گیاهان در تحمل تنش خشکی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. در شرایطی که تغییر اقلیم موجب افزایش شدت و فراوانی دوره‌های خشکسالی شده است، استفاده از این میکروارگانیسم‌های سودمند می‌تواند رویکردی پایدار برای افزایش امنیت غذایی و بهره‌وری کشاورزی به شمار آید.

۴-۵- پاکلوبوترازول

پاکلوبوترازول به عنوان یکی از مهم‌ترین بازدارنده‌های رشد گیاهی از گروه تری‌آزول‌ها شناخته می‌شود که نقش بسیار قابل توجهی در تنظیم رشد و افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش‌های غیرزیستی از جمله خشکی دارد. این ترکیب نخستین بار به عنوان یک مهارکننده سنتز جیبرلین معرفی شد و بعدها مشخص شد که علاوه بر اثر بر کوتاه شدن میان‌گره‌ها و افزایش استحکام ساقه، توانایی ایجاد تغییرات متابولیکی و فیزیولوژیکی عمیقی در گیاه دارد که می‌تواند در شرایط اقلیمی نامساعد از جمله تغییر اقلیم و کاهش منابع آبی به عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت کشاورزی پایدار به کار گرفته شود. تغییر اقلیم که با افزایش دما، کاهش بارندگی، نامنظم شدن الگوهای بارش و شدت گرفتن وقوع خشکسالی‌ها همراه است، چالشی جدی برای امنیت غذایی در سطح جهان ایجاد کرده است. در چنین شرایطی، استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد مانند پاکلوبوترازول می‌تواند به عنوان یک استراتژی علمی و کاربردی برای افزایش پایداری تولید در کشاورزی مطرح شود.

مکانیسم عمل پاکلوبوترازول در گیاهان بر اساس مهار مسیر بیوسنتزی جیبرلین‌هاست. این ترکیب با مهار آنزیم‌های کلیدی در مسیر سنتز جیبرلین مانع از کشیده شدن بیش از حد میان‌گره‌ها می‌شود و در نتیجه موجب کوتاه شدن ساقه و افزایش پایداری مکانیکی گیاه می‌گردد. این تغییر در شکل رشدی سبب می‌شود گیاه در شرایط کم‌آبی نیاز تبخیری کمتری داشته باشد و تعادل آبی آن بهتر حفظ شود. کوتاه‌تر شدن ساقه

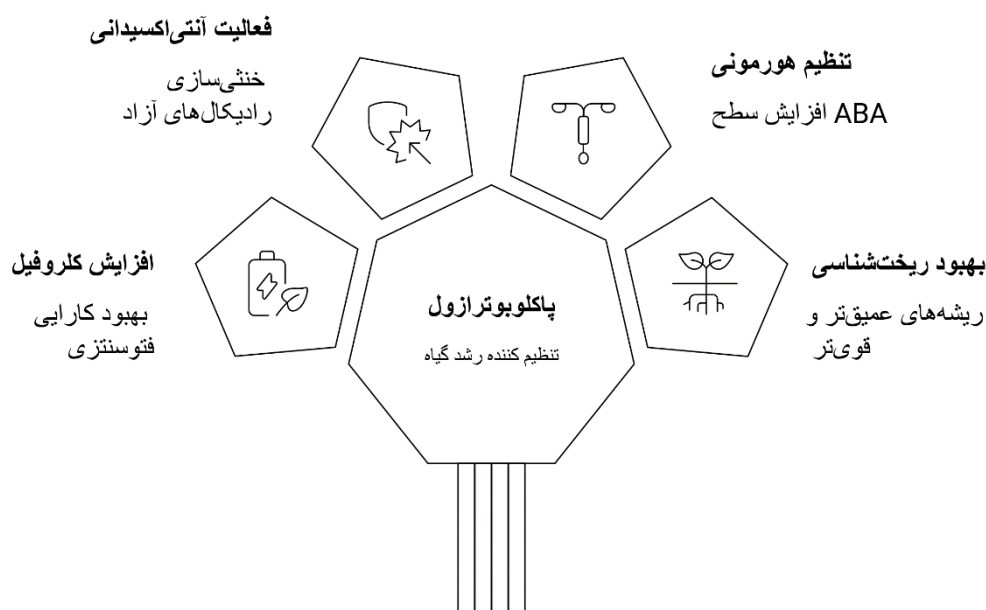
و افزایش تراکم برگ‌ها در نتیجه مصرف پاکلوبوترازول به کاهش سطح تعرق و افزایش کارایی مصرف آب منجر می‌شود. علاوه بر این، پاکلوبوترازول با افزایش توسعه ریشه‌ها، حجم جذب آب و مواد غذایی را بالا می‌برد که در شرایط محدودیت آبی یک مزیت بزرگ برای گیاه به شمار می‌رود. در جدول ۴-۵ اثرات پاکلوبوترازول بر سازوکارهای فیزیولوژیک و عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی و تغییر اقلیم نشان داده شده است.

جدول ۴-۵: اثرات پاکلوبوترازول بر سازوکارهای فیزیولوژیک، بیوشیمیایی، ریخت‌شناسی و عملکرد گیاهان تحت تنش خشکی و تغییر اقلیم

مکانیزم/ویژگی	اثر پاکلوبوترازول	نتیجه/مزیت برای گیاه
مه‌ار رشد میان‌گره‌ها	کاهش سنتز جیبرلین، کوتاه شدن ساقه و افزایش تراکم برگ	کاهش نیاز تبخیری، حفظ آب، افزایش پایداری مکانیکی گیاه
فعالیت آن‌تی‌اکسیدانی	افزایش فعالیت سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز	خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد، کاهش پراکسیداسیون لیپیدی، حفاظت غشاهای سلولی
کلروفیل و فتوسنتز	افزایش غلظت کلروفیل، تثبیت ساختار کلروپلاست	حفظ کارایی فتوسنتزی، کاهش تخریب رنگیزه‌ها در خشکی
تنظیم هورمونی	کاهش جیبرلین، افزایش آبسزیک اسید (ABA) و سیتوکینین‌ها	بسته شدن سریع روزنه‌ها، حفظ فشار اسمزی، بهبود تحمل سلولی
تجمع ترکیبات سازگار اسمزی	افزایش پرولین، قندهای محلول و سایر ترکیبات اسمزی	بهبود تنظیم اسمزی سلولی، حفظ تعادل متابولیکی در شرایط خشکی
رشد ریشه و استحکام ساقه	افزایش طول و انشعاب ریشه، ضخامت و استحکام ساقه	دسترسی بهتر به آب و عناصر غذایی، مقاومت مکانیکی بیشتر
کاهش اثرات ترکیبی گرما و خشکی	کاهش تولید اتیلن، تأخیر زردی و ریزش برگ‌ها	حفظ سطح فتوسنتزی و کیفیت رشد در شرایط تغییر اقلیم
کارایی مصرف کود و عناصر غذایی	افزایش جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم	افزایش بهره‌وری کود و پایداری تولید
عملکرد و شاخص برداشت	بهبود عملکرد دانه و شاخص برداشت	افزایش کمیت و کیفیت محصول در شرایط کم‌آبی

تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که کاربرد پاکلوبوترازول موجب افزایش غلظت کلروفیل، بهبود کارایی فتوسنتزی و کاهش تخریب رنگیزه‌ها در اثر تنش خشکی می‌شود. این ترکیب با تثبیت ساختار کلروپلاست و حفاظت از غشاهای سلولی، مانع از اکسیداسیون شدید و تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط کم‌آبی می‌گردد. یکی از مهم‌ترین اثرات پاکلوبوترازول، افزایش فعالیت آنزیم‌های آن‌تی‌اکسیدانی همچون سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و پراکسیداز است. این آنزیم‌ها نقش کلیدی در خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد و کاهش پراکسیداسیون لیپیدی دارند که معمولاً در زمان بروز تنش‌های زیستی و غیرزیستی شدت می‌یابد. کاهش

میزان مالون دی‌آلدئید و پراکسید هیدروژن در بافت‌های گیاهی تیمار شده با پاکلوبوترازول یکی از نشانه‌های بارز افزایش تحمل به خشکی است که در مطالعات متعددی به اثبات رسیده است. از دیدگاه فیزیولوژیکی، پاکلوبوترازول با تنظیم تعادل هورمونی گیاه نقش مهمی در افزایش مقاومت به خشکی ایفا می‌کند (شکل ۵-۵). این ماده با کاهش سطح جیبرلین و در مقابل افزایش غلظت آبسزیک اسید (ABA) و سیتوکینین‌ها در بافت‌های گیاهی، موجب می‌شود گیاه به سرعت روزه‌های خود را در شرایط کم‌آبی ببندد و از هدررفت آب جلوگیری کند. افزایش سطح ABA از سوی دیگر به بهبود تحمل سلولی در برابر کمبود آب و حفظ فشار اسمزی کمک می‌کند. علاوه بر آن، پاکلوبوترازول با افزایش تجمع پرولین، قندهای محلول و سایر ترکیبات سازگار اسمزی، موجب بهبود تنظیم اسمزی سلول‌ها می‌شود. این تغییرات به گیاه امکان می‌دهند تا در شرایط خشکی تعادل متابولیکی خود را حفظ کرده و فرآیندهای زیستی مهم مانند فتوسنتز و تنفس با اختلال کمتری ادامه یابند.



شکل ۵-۵: نقش پاکلوبوترازول در افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش خشکی

در شرایط تغییر اقلیم، یکی از مهم‌ترین چالش‌ها کاهش بازده محصولات زراعی به دلیل هم‌زمانی گرما و خشکی است. مطالعات نشان داده است که پاکلوبوترازول می‌تواند در کاهش اثرات ترکیبی این دو تنش نیز مؤثر باشد. گیاهانی که با پاکلوبوترازول تیمار شده‌اند، ظرفیت بیشتری برای حفظ تعادل دمایی برگ‌ها و جلوگیری از پیری زودرس نشان داده‌اند. این ترکیب از طریق کاهش تولید اتیلن که هورمون پیری در گیاه است، روند زردی برگ‌ها و ریزش زود هنگام آن‌ها را به تأخیر می‌اندازد و در نتیجه سطح فتوسنتزی گیاه در

طول دوره رشد حفظ می‌شود. در بسیاری از محصولات زراعی مانند گندم، برنج، ذرت و سویا گزارش شده است که مصرف پاکلوبوترازول عملکرد دانه و شاخص برداشت را در شرایط کم‌آبی به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد.

کاربرد پاکلوبوترازول نه تنها از نظر فیزیولوژیکی بلکه از نظر ریخت‌شناسی گیاه نیز تغییرات مثبتی ایجاد می‌کند. ریشه‌های گیاه تیمار شده با این ترکیب عمیق‌تر و منشعب‌تر می‌شوند که این موضوع امکان دسترسی بیشتر به ذخایر آب و عناصر غذایی در لایه‌های عمیق خاک را فراهم می‌آورد. همچنین ساقه‌های ضخیم‌تر و محکم‌تر باعث افزایش مقاومت مکانیکی گیاه در برابر خوابیدگی و شکستگی می‌شوند که در شرایط تغییر اقلیم و بروز بادهای شدید و باران‌های نامنظم اهمیت ویژه‌ای دارد.

تأثیر مثبت پاکلوبوترازول در شرایط تغییر اقلیم فقط به افزایش مقاومت به خشکی محدود نمی‌شود بلکه اثرات مهمی در بهبود کارایی مصرف کود نیز دارد. این ترکیب با افزایش جذب عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم، موجب افزایش کارایی کودهای مصرفی می‌شود و به کشاورزی پایدار کمک می‌کند. در شرایطی که منابع آبی محدود و هزینه‌های تولید بالا رفته است، استفاده از پاکلوبوترازول به عنوان یک ابزار مدیریت مزرعه می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کمک کند.

در کنار تمام مزایای ذکر شده، باید توجه داشت که اثرات پاکلوبوترازول به شدت وابسته به میزان مصرف، زمان کاربرد و گونه گیاهی است. مصرف بیش از حد این ترکیب می‌تواند منجر به کاهش شدید رشد رویشی، کاهش سطح برگ و در نتیجه کاهش فتوسنتز گردد که در نهایت عملکرد محصول را محدود می‌سازد. بنابراین، تعیین دوز مناسب و استفاده صحیح از پاکلوبوترازول در شرایط اقلیمی مختلف یک موضوع کلیدی برای دستیابی به نتایج مطلوب است. تحقیقات نشان داده‌اند که مصرف در مراحل اولیه رشد و در دوزهای متعادل بیشترین تأثیر را بر افزایش تحمل خشکی و بهبود عملکرد دارد.

با توجه به پیش‌بینی‌ها مبنی بر افزایش دمای جهانی و کاهش منابع آبی در آینده، نقش پاکلوبوترازول به عنوان یک تنظیم‌کننده رشد در کشاورزی آینده بیش از پیش مورد توجه قرار خواهد گرفت. این ترکیب با ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، توانایی گیاهان را برای سازگاری با شرایط سخت افزایش می‌دهد و در کنار سایر راهکارهای مدیریتی همچون انتخاب ارقام متحمل، بهبود روش‌های آبیاری و استفاده از نهاده‌های زیستی می‌تواند بخشی از راهکار جامع برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم بر کشاورزی باشد.

فصل ششم

نقش کشاورزی حفاظتی در تغییر اقلیم

۱-۶- تعریف و اصول کشاورزی حفاظتی

کشاورزی در طول تاریخ بشر همواره به عنوان یکی از مهم‌ترین پایه‌های حیات انسانی مطرح بوده است. با افزایش جمعیت جهانی و نیاز روزافزون به تولید مواد غذایی، نظام‌های کشاورزی متعارف به شدت گسترش یافتند و به مرور زمان فشار سنگینی بر منابع طبیعی از جمله خاک، آب و تنوع زیستی وارد کردند. استفاده بیش از حد از ماشین‌آلات، کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات از یک‌سو و کشت مداوم و یکنواخت محصولات از سوی دیگر باعث کاهش حاصلخیزی خاک، فرسایش شدید، آلودگی آب‌ها و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای گردید. این شرایط ضرورت حرکت به سمت نظام‌های کشاورزی پایدارتر را برجسته ساخت و در این میان کشاورزی حفاظتی به عنوان یک رویکرد جامع و علمی برای مدیریت پایدار منابع پایه کشاورزی مورد توجه قرار گرفت. کشاورزی حفاظتی در واقع نظامی مدیریتی است که هدف آن دستیابی همزمان به افزایش بهره‌وری و حفاظت بلندمدت از منابع خاک و آب می‌باشد. این شیوه بر پایه درک خاک به عنوان موجودی زنده و پویا شکل گرفته و معتقد است که باید خاک را همچون یک اکوسیستم پیچیده مدیریت کرد، نه صرفاً بستری بی‌جان برای رشد گیاه. سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد کشاورزی حفاظتی را مجموعه‌ای از اقدامات مدیریتی تعریف کرده است که بر سه اصل اساسی استوار است: حداقل‌سازی عملیات خاک‌ورزی، پوشش دائمی سطح خاک و تنوع در تناوب محصولات (شکل ۱-۶).

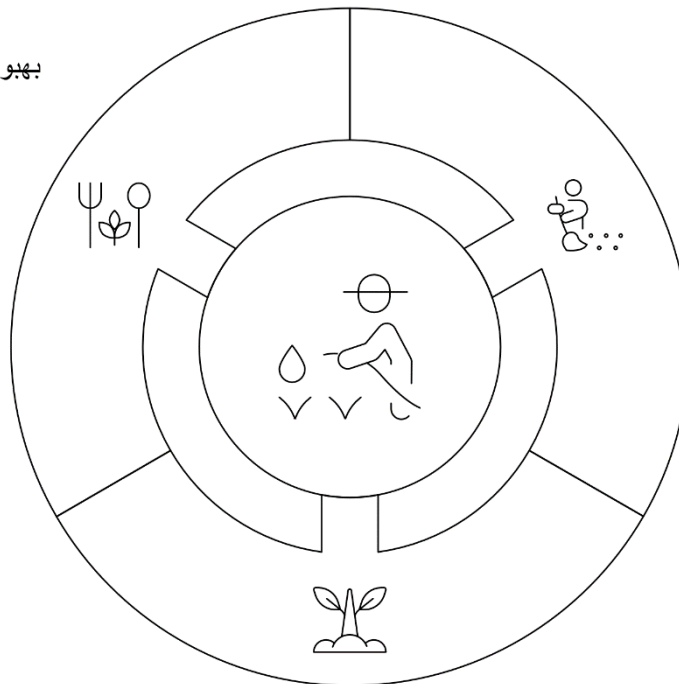
اصل نخست کشاورزی حفاظتی تأکید دارد که باید عملیات خاک‌ورزی به حداقل برسد یا حتی حذف شود. شخم‌های مکرر و عمیق در کشاورزی متعارف معمولاً موجب تخریب ساختار خاک، کاهش ماده آلی، افزایش تراکم و در نتیجه تشدید فرسایش می‌شود. در کشاورزی حفاظتی از روش‌های کشت بدون شخم یا کشت مستقیم استفاده می‌شود. در این روش بذر مستقیماً در زمین قرار داده می‌شود بدون آن‌که ساختار طبیعی خاک بر هم بخورد. این شیوه نه تنها مانع از تخریب ساختمان خاک می‌شود، بلکه باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های مکانیزاسیون نیز خواهد شد. همچنین در چنین شرایطی رطوبت خاک بیشتر حفظ می‌شود و فعالیت میکروبی خاک تقویت می‌گردد.

اصل دوم کشاورزی حفاظتی بر ضرورت پوشش دائمی سطح خاک با بقایای گیاهی یا گیاهان زنده تأکید دارد. در زمین‌های فاقد پوشش، خاک در معرض ضربه مستقیم قطرات باران و جریان باد قرار می‌گیرد و به سرعت دچار فرسایش می‌شود. اما زمانی که بقایای محصول قبلی یا گیاهان پوششی سطح خاک را می‌پوشانند، علاوه بر کاهش فرسایش، تبخیر سطحی آب نیز کاهش می‌یابد و رطوبت برای مدت بیشتری در اختیار گیاهان قرار می‌گیرد. بقایای گیاهی همچون یک لایه محافظ عمل می‌کنند و مانع از تغییرات شدید دمایی در خاک می‌شوند. این شرایط محیطی مطلوبی برای ریشه گیاهان و موجودات زنده خاک فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، تجزیه تدریجی بقایای گیاهی مواد آلی و عناصر غذایی ارزشمندی را به خاک بازمی‌گرداند و حاصلخیزی آن را افزایش می‌دهد.

اصول کشاورزی حفاظتی

تنوع در تناوب
محصولات
بهبود حاصلخیزی خاک و
کاهش آفات

حداقل سازی عملیات
خاکورزی
هش اختلال در خاک
رای حفظ ساختار و
رطوبت



پوشش دائمی سطح خاک

محافظت از خاک در
برابر فرسایش و حفظ
رطوبت

شکل ۱-۶: مبانی و اصول کشاورزی حفاظتی در مدیریت پایدار منابع خاک و آب

اصل سوم کشاورزی حفاظتی بر تنوع در تناوب و کشت محصولات استوار است. کشت مداوم یک محصول واحد علاوه بر کاهش حاصلخیزی خاک، به تجمع آفات و بیماری‌های اختصاصی منجر می‌شود و وابستگی شدید به نهاده‌های شیمیایی را به دنبال دارد. اما زمانی که در یک مزرعه از تناوب زراعی و ترکیب متنوعی از گیاهان استفاده شود، چرخه عناصر غذایی بهبود یافته و نیاز به کود شیمیایی کاهش پیدا می‌کند. به عنوان نمونه، کشت غلات به همراه حبوبات موجب تثبیت بیولوژیک نیتروژن در خاک شده و حاصلخیزی آن را افزایش می‌دهد. همچنین تنوع گیاهی موجب اختلال در چرخه زندگی آفات و بیماری‌ها و کاهش فشار آن‌ها بر محصول اصلی می‌گردد. در نتیجه، مصرف سموم شیمیایی کاهش یافته و سلامت اکوسیستم ارتقا می‌یابد (شکل ۱-۶).

اجرای این سه اصل آثار گسترده‌ای بر خاک، منابع آب، عملکرد محصولات و محیط زیست دارد. در سطح خاک، کشاورزی حفاظتی موجب افزایش ماده آلی، بهبود ساختمان و افزایش تخلخل می‌شود. چنین خاکی ظرفیت بیشتری برای ذخیره و نگهداری آب و عناصر غذایی دارد و پایداری بیشتری در برابر عوامل فرسایشی از خود نشان می‌دهد. همچنین فعالیت میکروبی و زیستی خاک افزایش یافته و چرخه‌های طبیعی مواد غذایی کارآمدتر عمل می‌کنند.

در ارتباط با منابع آب، کاهش عملیات خاک‌ورزی و پوشش سطح خاک باعث کاهش تبخیر و افزایش نفوذ آب می‌شود. بارندگی یا آب آبیاری به جای رواناب سطحی، به درون خاک نفوذ کرده و در دسترس ریشه گیاهان قرار می‌گیرد. این موضوع علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب، خطر سیلاب و هدررفت خاک و کود را نیز کاهش می‌دهد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک که محدودیت منابع آبی یک چالش اساسی محسوب می‌شود، کشاورزی حفاظتی می‌تواند نقش بسیار مهمی در افزایش بهره‌وری آب ایفا کند.

از نظر عملکرد محصول، کشاورزی حفاظتی ممکن است در سال‌های نخست منجر به کاهش نسبی عملکرد شود، زیرا خاک و اکوسیستم آن نیازمند زمان برای رسیدن به تعادل جدید هستند. اما در بلندمدت، معمولاً عملکرد محصولات بهبود می‌یابد و از ثبات بیشتری برخوردار می‌شود. دلیل این امر بهبود شرایط خاک، کاهش خسارت ناشی از آفات و بیماری‌ها، و افزایش دسترسی گیاهان به آب و عناصر غذایی است. علاوه بر این، هزینه‌های تولید نیز کاهش یافته و سود اقتصادی برای کشاورزان افزایش می‌یابد (شکل ۲-۶).

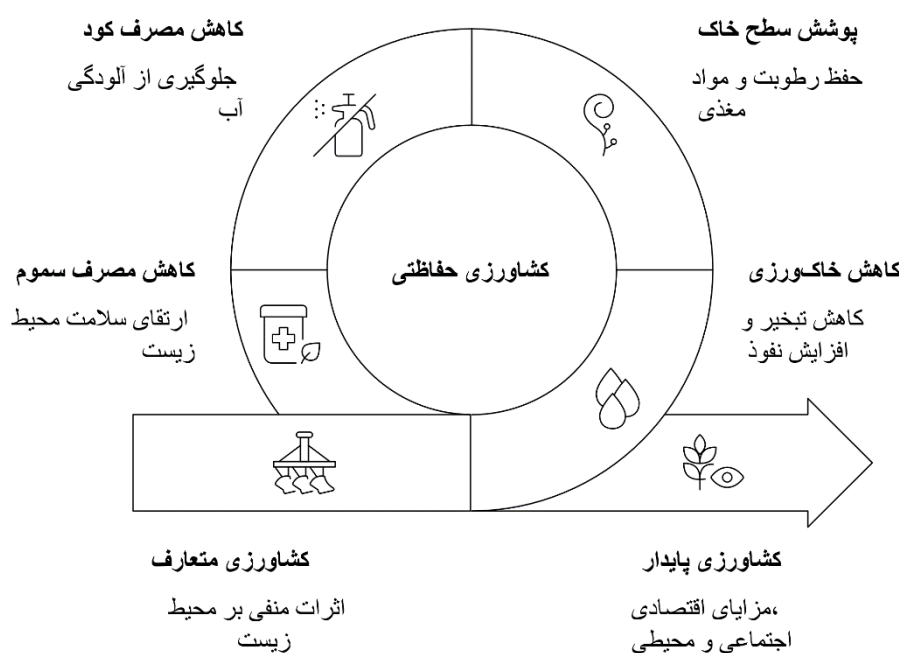
از منظر زیست‌محیطی، کشاورزی حفاظتی نقش مهمی در کاهش اثرات منفی کشاورزی متعارف ایفا می‌کند. کاهش مصرف سوخت در عملیات شخم و ذخیره کربن در خاک باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. همچنین تنوع گیاهی و حفظ بقایای گیاهی موجب ارتقای تنوع زیستی در مزرعه و حاشیه‌های آن می‌گردد. از سوی دیگر، کاهش مصرف کود و سموم شیمیایی مانع از آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود و سلامت محیط زیست را ارتقا می‌دهد (شکل ۲-۶).

کشاورزی حفاظتی مزایای اقتصادی، اجتماعی و محیطی متعددی دارد، اما در عین حال با محدودیت‌هایی نیز روبه‌رو است. از جمله مزایای آن می‌توان به حفظ و افزایش حاصلخیزی خاک، صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش هزینه‌های تولید، افزایش تنوع زیستی و بهبود پایداری کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی اشاره کرد. در مقابل، محدودیت‌هایی همچون نیاز به آموزش کشاورزان، هزینه اولیه تهیه تجهیزات کشت مستقیم، دشواری کنترل علف‌های هرز در سال‌های ابتدایی و کاهش احتمالی عملکرد در کوتاه‌مدت وجود دارد. رفع این محدودیت‌ها نیازمند سیاست‌های حمایتی، ترویج و آموزش گسترده، و انجام تحقیقات کاربردی در شرایط بومی هر منطقه است (شکل ۲-۶).

تجربه کشورهای مختلف جهان نشان می‌دهد که توسعه کشاورزی حفاظتی می‌تواند سطح وسیعی از اراضی را تحت پوشش قرار دهد و آثار چشمگیری بر تولید پایدار بر جای گذارد. برزیل، آرژانتین، ایالات متحده و استرالیا از پیشگامان این رویکرد بوده‌اند و میلیون‌ها هکتار از زمین‌های کشاورزی خود را به شیوه حفاظتی مدیریت می‌کنند. در ایران نیز طی سال‌های اخیر برنامه‌هایی برای ترویج کشت مستقیم و حفظ بقایای گیاهی

آغاز شده است. هرچند چالش‌هایی مانند کمبود تجهیزات، فرهنگ سنتی کشاورزی و ضعف آگاهی هنوز مانع از گسترش سریع این رویکرد می‌شود، اما تجربه‌های موفق داخلی نشان می‌دهد که با برنامه‌ریزی دقیق و حمایت دولتی می‌توان کشاورزی حفاظتی را به عنوان راهبردی پایدار برای مدیریت منابع طبیعی کشور توسعه داد.

کشاورزی حفاظتی: راهی پایدار برای کشاورزی



شکل ۲-۶: کشاورزی حفاظتی به عنوان رویکردی پایدار در مدیریت نظام‌های کشاورزی

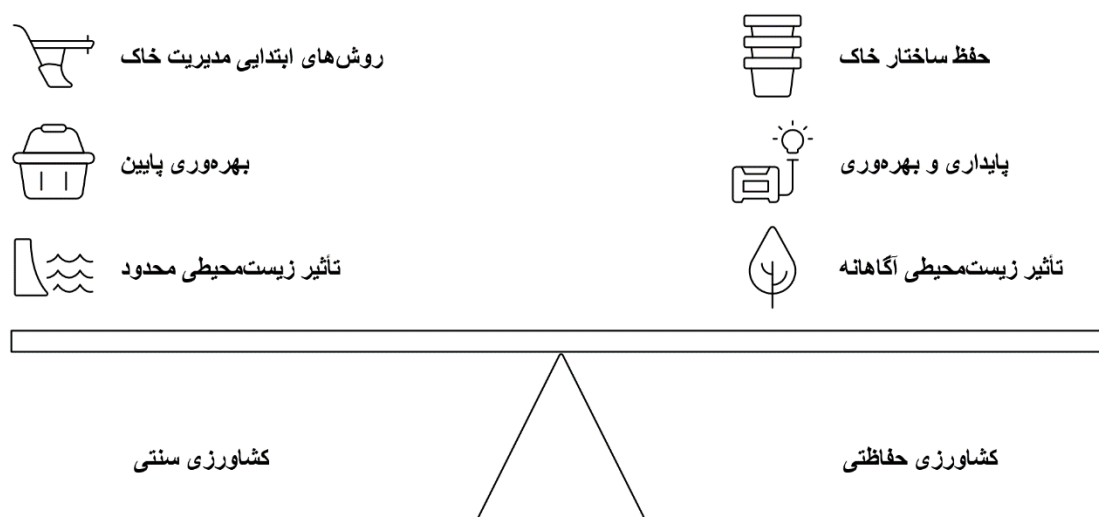
در نهایت، کشاورزی حفاظتی فراتر از یک روش فنی صرف، یک فلسفه مدیریتی است که به همزیستی پایدار انسان با طبیعت می‌پردازد. این نظام با تکیه بر اصول ساده اما بنیادین خود، می‌تواند ضامن پایداری تولیدات کشاورزی، حفاظت از منابع خاک و آب، کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی و افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی باشد. در شرایطی که جهان با بحران‌های زیست‌محیطی و محدودیت منابع مواجه است، توسعه کشاورزی حفاظتی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود. برای تحقق این هدف، همکاری میان سیاست‌گذاران، پژوهشگران، کشاورزان و نهادهای بین‌المللی ضروری است تا بتوان نظامی پایدار، کارآمد و همسو با محیط زیست را در بخش کشاورزی نهادینه ساخت و نسل‌های آینده را از امنیت غذایی پایدار برخوردار کرد.

۱-۶- تفاوت کشاورزی حفاظتی با کشاورزی سنتی و پایدار

کشاورزی به عنوان فعالیتی حیاتی برای تأمین نیازهای غذایی بشر، همواره با تحولات مختلفی در طول تاریخ روبه‌رو بوده است. از نخستین روزهایی که انسان از مرحله شکار و جمع‌آوری خوراک عبور کرد و به کشت و زرع روی آورد، روش‌های گوناگونی برای مدیریت خاک و گیاهان به وجود آمد. در ابتدا کشاورزی به صورت بسیار ابتدایی و سنتی انجام می‌شد، اما به مرور زمان با گسترش دانش بشری و افزایش جمعیت، این فعالیت پیچیده‌تر گردید و به شکل امروزی خود رسید. با وجود این، هر یک از شیوه‌های کشاورزی دارای پیامدها، مزایا و معایب خاص خود بوده‌اند و همین امر ضرورت بررسی دقیق‌تر آن‌ها را ایجاب می‌کند. سه الگوی اصلی که امروزه بیشتر مورد بحث و مقایسه قرار می‌گیرند عبارت‌اند از کشاورزی سنتی، کشاورزی پایدار و کشاورزی حفاظتی. هر یک از این نظام‌ها تعاریف، اصول و اهداف متفاوتی دارند و شناخت تفاوت‌های آن‌ها برای برنامه‌ریزی آینده بخش کشاورزی بسیار ضروری است (شکل ۳-۶).

کشاورزی سنتی را می‌توان کهن‌ترین شکل کشاورزی دانست که عمدتاً بر تجربه‌های نسل به نسل و دانش بومی استوار بوده است. در این نظام، ابزارها و روش‌های ابتدایی به کار گرفته می‌شود و دخالت‌های انسان در محیط زیست نسبتاً محدود است. کشاورزی سنتی معمولاً با کشت متنوع محصولات، استفاده از بذرهای بومی و اتکا بر کودهای حیوانی و بقایای گیاهی همراه است. در بسیاری از مناطق روستایی جهان هنوز هم کشاورزی سنتی رایج است و به عنوان بخشی از فرهنگ و معیشت مردم شناخته می‌شود. این نوع کشاورزی از یک سو موجب حفظ تنوع ژنتیکی محصولات و سازگاری نسبی با شرایط محیطی می‌شود، اما از سوی دیگر بهره‌وری آن پایین است و پاسخ‌گوی نیازهای جمعیت رو به رشد جهانی نیست. در کشاورزی سنتی به دلیل نبود ماشین‌آلات پیشرفته، مقیاس تولید کوچک است و معمولاً برای تأمین نیازهای خانوار یا جامعه محلی کفایت می‌کند. همچنین استفاده محدود از نهاده‌های شیمیایی موجب می‌شود فشار کمتری بر محیط‌زیست وارد گردد، اما در عوض عملکرد پایین، ناپایداری اقتصادی و آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی یا آفات، از ضعف‌های مهم این نظام به شمار می‌رود (شکل ۳-۶).

با ورود انقلاب سبز در نیمه دوم قرن بیستم، کشاورزی از شکل سنتی فاصله گرفت و به سمت افزایش تولید انبوه با اتکا بر نهاده‌های شیمیایی و مکانیزاسیون حرکت کرد. اگرچه این تغییر باعث افزایش چشمگیر تولید مواد غذایی شد، اما در بلندمدت پیامدهای زیست‌محیطی جدی همچون فرسایش خاک، آلودگی آب‌ها، کاهش تنوع زیستی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به همراه داشت. همین مسائل موجب شد مفهوم کشاورزی پایدار در اواخر قرن بیستم مطرح شود. کشاورزی پایدار رویکردی است که می‌کوشد نیازهای غذایی نسل کنونی را بدون به خطر انداختن توانایی نسل‌های آینده برای تأمین نیازهای خود برآورده سازد. در این نظام تأکید بر مدیریت کارآمد منابع، کاهش استفاده از نهاده‌های شیمیایی، توجه به عدالت اجتماعی و حفظ محیط‌زیست است. کشاورزی پایدار در واقع پاسخی به بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از کشاورزی مدرن است و می‌کوشد تعادلی میان بهره‌وری اقتصادی، عدالت اجتماعی و حفاظت از منابع طبیعی برقرار سازد.



شکل ۳-۶: مقایسه کشاورزی حفاظتی با رویکردهای سنتی و پایدار در نظام‌های زراعی

کشاورزی حفاظتی نیز به عنوان یکی از زیرشاخه‌ها و در عین حال مکمل کشاورزی پایدار مطرح است. این نظام مدیریتی بر سه اصل بنیادین استوار است: حداقل‌سازی یا حذف عملیات خاک‌ورزی، پوشش دائمی سطح خاک با بقایای گیاهی یا گیاهان زنده، و تنوع در تناوب و کشت محصولات. هدف اصلی کشاورزی حفاظتی آن است که خاک به عنوان منبعی زنده و پویا حفظ شود و چرخه‌های طبیعی درون آن دچار اختلال نگردد. برخلاف کشاورزی سنتی که بر تجربه و روش‌های بومی تکیه دارد و برخلاف کشاورزی پایدار که بیشتر به عنوان یک مفهوم کلان و فلسفه مدیریتی مطرح می‌شود، کشاورزی حفاظتی مجموعه‌ای از روش‌های فنی و علمی مشخص را در اختیار کشاورزان قرار می‌دهد تا با اجرای آن‌ها به تولید پایدار دست یابند.

تفاوت اصلی کشاورزی سنتی با کشاورزی حفاظتی در نگاه به خاک و منابع طبیعی نهفته است. در کشاورزی سنتی معمولاً عملیات شخم و خاک‌ورزی به روش‌های ابتدایی و با ابزارهای ساده انجام می‌گیرد. هرچند این شخم به اندازه شخم عمیق مدرن مخرب نیست، اما در بسیاری موارد موجب از بین رفتن پوشش گیاهی خاک و افزایش فرسایش می‌شود. در مقابل، کشاورزی حفاظتی تلاش می‌کند تا حد امکان از دستکاری مکانیکی خاک پرهیز شود و ساختار طبیعی آن حفظ گردد. به عبارت دیگر، در کشاورزی سنتی کاهش دخالت به دلیل

محدودیت تکنولوژیک است، در حالی که در کشاورزی حفاظتی این پرهیز ناشی از آگاهی علمی نسبت به اهمیت ساختار خاک و فعالیت زیستی آن است.

جدول ۱-۶. مقایسه نظام‌های کشاورزی سنتی، پایدار و حفاظتی بر اساس معیارهای اصلی

معیار مقایسه	کشاورزی سنتی	کشاورزی پایدار	کشاورزی حفاظتی
نگرش به خاک	مدیریت علمی محدود	برای نسل‌های آینده حفظ شود	خاک صرفاً بستر رشد گیاه است، خاک منبع حیاتی است و باید حفاظت از ساختمان و ماده آلی خاک یک موجود زنده و پویاست، خاک اصل اساسی است
روش خاک‌ورزی	موارد فرسایش‌زا	هدف کاهش تخریب	شخم سطحی با ابزار ساده؛ در برخی شخم معمولاً انجام می‌شود اما با حداقل یا بدون شخم (No-Till) برای حفظ ساختمان خاک
پوشش سطح خاک	بقایا اغلب به عنوان خوراک دام یا سوخت مصرف می‌شوند؛ خاک گاهی بدون پوشش	تلاش برای حفظ پوشش گیاهی، اما همیشگی نیست	پوشش دائمی خاک با بقایای گیاهی یا گیاهان زنده یک اصل الزامی است
تناوب و تنوع محصولات	فناوری برنامه علمی	رویکرد حفظ حاصلخیزی	تناوب و تنوع طراحی شده بر پایه اصول علمی برای کنترل آفات و چرخه مواد غذایی
مصرف نهاده‌ها	استفاده محدود از کود و سموم استفاده منطقی و مدیریت شده کاهش مصرف نهاده‌ها از طریق شیمیایی، بیشتر کود حیوانی و بذر از نهاده‌ها با کاهش اثرات بهبود کارایی و افزایش حاصلخیزی بومی	زیست‌محیطی	طبیعی خاک
بهره‌وری عملکرد	و پایین و بیشتر برای خانوار یا جامعه محلی	تولید و محیط زیست	اما در بلندمدت پایدار و اغلب بالاتر
اثرات زیست‌محیطی	فشار زیست‌محیطی کم، اما فرسایش تلاش برای کاهش اثرات منفی و خاک ممکن است رخ دهد	حفظ اکوسیستم	کاهش شدید فرسایش، افزایش ماده آلی، ذخیره کربن و بهبود تنوع زیستی
ابعاد اجتماعی-اقتصادی	بخشی از فرهنگ و سنت روستاها؛ درآمد محدود	تأکید بر عدالت اجتماعی، نیازمند آموزش و تغییر نگرش؛ حمایت از کشاورزان و پایداری کاهش هزینه‌های تولید و افزایش معیشت	سود در بلندمدت
هدف اصلی	تأمین نیازهای معیشتی خانوار یا تأمین نیازهای امروز بدون جامعه محلی	تأمین نیازهای معیشتی خانوار یا تأمین نیازهای امروز بدون آسیب به توان نسل‌های آینده	تحقق عملی کشاورزی پایدار از طریق اصول فنی و مدیریتی مشخص

از نظر پوشش خاک نیز تفاوت‌های آشکاری میان این دو نظام وجود دارد. در کشاورزی سنتی، بقایای گیاهی معمولاً به عنوان منبع خوراک دام یا سوخت مصرف می‌شوند و کمتر به صورت پوشش روی خاک باقی می‌مانند. در نتیجه خاک اغلب در فصولی از سال بدون پوشش باقی می‌ماند و در معرض فرسایش قرار می‌گیرد. اما در کشاورزی حفاظتی اصل دوم بر این استوار است که خاک باید همواره پوشیده باشد تا از تبخیر، تغییرات

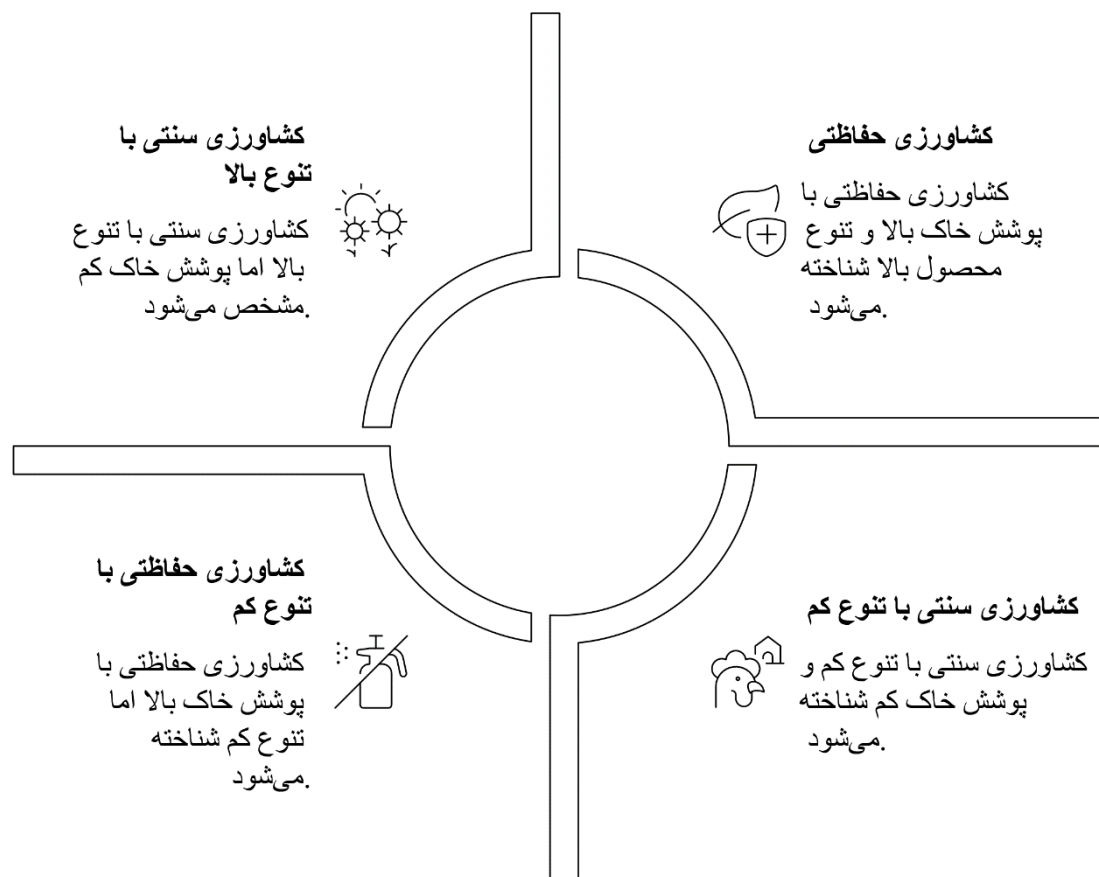
دمایی شدید و فرسایش محافظت شود. بنابراین بقایای گیاهی یا گیاهان پوششی به طور هدفمند روی خاک باقی گذاشته می‌شوند و نقش مهمی در پایداری سیستم ایفا می‌کنند.

از نظر تنوع محصولات، کشاورزی سنتی در بسیاری موارد دارای تنوع بالایی بوده است، زیرا کشاورزان به دلیل نیازهای معیشتی خود انواع گوناگونی از محصولات را در یک مزرعه کشت می‌کردند. این امر باعث حفظ تنوع ژنتیکی و کاهش خطر نابودی کامل محصول می‌شد. با این حال، نبود مدیریت علمی و فقدان تناوب زراعی برنامه‌ریزی شده، موجب می‌شد بهره‌وری خاک در سطح پایین باقی بماند. در کشاورزی حفاظتی، تنوع و تناوب محصولات به صورت علمی و بر اساس اصول اکولوژیک طراحی می‌شود تا چرخه عناصر غذایی کامل شود و فشار آفات و بیماری‌ها کاهش یابد.

مقایسه کشاورزی پایدار و کشاورزی حفاظتی نیز نشان می‌دهد که این دو اگرچه اهداف مشترکی مانند حفظ منابع طبیعی و تضمین امنیت غذایی دارند، اما در سطح کاربرد و روش‌ها متفاوت‌اند. کشاورزی پایدار مفهومی گسترده است که به ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی کشاورزی توجه می‌کند و بر عدالت اجتماعی، مشارکت جوامع محلی و حفظ محیط‌زیست تأکید دارد. این مفهوم نوعی چارچوب کلی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی محسوب می‌شود. در حالی که کشاورزی حفاظتی بیشتر به عنوان یک بسته فنی در سطح مزرعه مطرح است و دستورالعمل‌های مشخصی را برای مدیریت خاک و آب ارائه می‌دهد. به بیان دیگر، کشاورزی پایدار مقصد است و کشاورزی حفاظتی یکی از مسیرهای رسیدن به آن مقصد (شکل ۴-۶).

در بعد زیست‌محیطی، کشاورزی سنتی به دلیل استفاده محدود از نهاده‌های شیمیایی فشار کمتری بر منابع طبیعی وارد می‌کند، اما به دلیل عملکرد پایین و بهره‌وری کم، برای پاسخ‌گویی به نیازهای غذایی جهان کافی نیست. کشاورزی پایدار می‌کوشد همزمان هم از محیط زیست محافظت کند و هم بهره‌وری را افزایش دهد، و در این میان کشاورزی حفاظتی به عنوان ابزاری کارآمد برای تحقق این هدف عمل می‌کند. برای مثال، کشاورزی حفاظتی با افزایش ماده آلی خاک و ذخیره کربن در آن می‌تواند نقش مهمی در کاهش تغییرات اقلیمی ایفا کند؛ امری که کشاورزی سنتی به دلیل محدودیت‌های فناورانه قادر به انجام آن در مقیاس وسیع نیست (شکل ۴-۶).

از منظر اقتصادی، کشاورزی سنتی به دلیل مقیاس کوچک و بهره‌وری پایین معمولاً درآمد محدودی برای کشاورزان به همراه دارد و در شرایط خشکسالی یا آفات ممکن است کل معیشت خانوار از بین برود. کشاورزی پایدار بر ایجاد نظام‌های اقتصادی منصفانه و حمایت از کشاورزان تأکید دارد و کشاورزی حفاظتی با کاهش هزینه‌های تولید، صرفه‌جویی در مصرف سوخت و آب و افزایش عملکرد در بلندمدت، زمینه‌های تحقق این عدالت اقتصادی را فراهم می‌سازد.



شکل ۴-۶: مقایسه ویژگی‌ها و پیامدهای کشاورزی سنتی و کشاورزی حفاظتی

از نظر اجتماعی نیز تفاوت‌هایی میان این سه نظام مشاهده می‌شود. کشاورزی سنتی معمولاً بخشی جدایی‌ناپذیر از فرهنگ و سنت‌های جوامع روستایی است و نقش مهمی در هویت اجتماعی ایفا می‌کند. کشاورزی پایدار با تأکید بر مشارکت جوامع محلی و عدالت اجتماعی تلاش می‌کند این ارزش‌های فرهنگی را نیز حفظ کند. کشاورزی حفاظتی اگرچه بیشتر جنبه فنی دارد، اما برای موفقیت نیازمند تغییر نگرش کشاورزان و پذیرش روش‌های نوین است و این امر بدون آموزش، ترویج و مشارکت اجتماعی امکان‌پذیر نخواهد بود (جدول ۱-۶).

در مجموع می‌توان گفت کشاورزی سنتی، پایدار و حفاظتی سه مرحله از تکامل اندیشه و عمل در حوزه کشاورزی هستند. کشاورزی سنتی بر تجربه و دانش بومی استوار است اما بهره‌وری کمی دارد. کشاورزی پایدار مفهومی جامع است که می‌خواهد بین بهره‌وری، عدالت اجتماعی و حفاظت از محیط زیست تعادل برقرار کند. کشاورزی حفاظتی نیز ابزاری عملی و علمی برای دستیابی به کشاورزی پایدار محسوب می‌شود و با اجرای

اصول مشخص خود می‌تواند بسیاری از معایب کشاورزی سنتی و مدرن را جبران کند. در جهانی که با بحران‌هایی همچون تغییر اقلیم، کاهش منابع آب و تخریب خاک روبه‌رو است، گذار از کشاورزی سنتی و حتی مدرن به سمت کشاورزی پایدار با بهره‌گیری از رویکردهای حفاظتی ضرورتی انکارناپذیر است. آینده کشاورزی و امنیت غذایی بشر در گرو آن است که این تفاوت‌ها به‌خوبی درک شوند و سیاست‌گذاران و کشاورزان مسیر درست را برگزینند تا هم نیازهای امروز تأمین شود و هم منابع حیاتی برای نسل‌های آینده حفظ گردد.

۲-۶- اصول کشاورزی حفاظتی و ارتباط آن با کاهش اثرات تغییر اقلیم

کشاورزی معاصر در جهان امروز بیش از هر زمان دیگری با چالش‌های محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی مواجه است و تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدها، امنیت غذایی و معیشت میلیون‌ها کشاورز را به خطر انداخته است. افزایش دمای کره زمین، تغییر در الگوهای بارش، تشدید پدیده‌های حدی نظیر خشکسالی، سیل و طوفان، و نیز افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، موجب شده است که نظام‌های زراعی سنتی دیگر پاسخگوی نیاز روزافزون بشر نباشند. در چنین شرایطی، کشاورزی حفاظتی به‌عنوان رویکردی نوین و علمی که اصول مشخصی برای استفاده پایدار از منابع طبیعی ارائه می‌دهد، جایگاهی کلیدی در کاهش اثرات تغییر اقلیم یافته است. این نظام نه‌تنها روشی برای افزایش پایداری تولید محصولات کشاورزی است، بلکه ابزاری برای کاهش انتشار کربن، بهبود کارایی مصرف آب و حفظ سلامت خاک به شمار می‌آید.

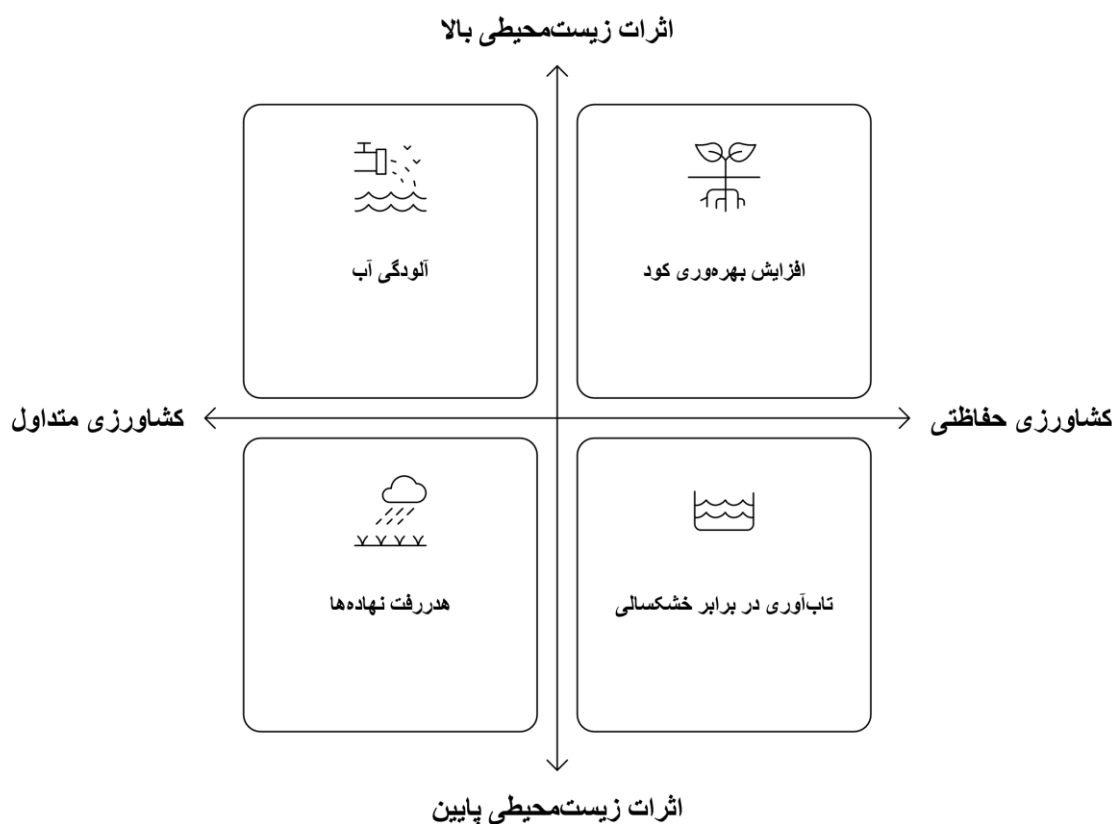
شخم‌های عمیق و مکرر که در بسیاری از نظام‌های کشاورزی رایج است، سبب از بین رفتن ساختمان خاک، کاهش ماده آلی و تسریع فرسایش می‌شود. در مقابل، زمانی که خاک کمتر دست‌خورده باقی بماند، کربن بیشتری در آن ذخیره می‌شود و فرآیند معدنی‌شدن مواد آلی کندتر رخ می‌دهد. این به معنای کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن، دو گاز گلخانه‌ای مهم، است. ذخیره کربن در خاک یکی از راهبردهای اساسی برای مقابله با گرمایش جهانی شناخته می‌شود. افزون بر آن، حفظ ساختمان طبیعی خاک باعث بهبود نفوذپذیری و افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌گردد، که این امر در شرایط خشکسالی مکرر ناشی از تغییر اقلیم نقشی حیاتی ایفا می‌کند. در مناطقی که بارش‌ها به‌طور نامنظم و شدید رخ می‌دهند، خاک‌های دست‌نخورده کمتر دچار رواناب و سیلاب می‌شوند و در نتیجه خطر فرسایش و از دست رفتن مواد غذایی خاک به حداقل می‌رسد.

خاک‌های عریان در برابر تابش خورشید، وزش باد و باران شدید بسیار آسیب‌پذیرند. زمانی که سطح خاک با بقایای محصولات قبلی یا مالچ‌های گیاهی پوشانده می‌شود، تبخیر آب به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد و رطوبت خاک برای مدت بیشتری حفظ می‌گردد. این ویژگی در مناطقی که با کمبود آب و خشکسالی‌های متوالی مواجه هستند، ارزشمند است. از سوی دیگر، پوشش سطح خاک نقش مهمی در کاهش دمای خاک دارد؛ به‌گونه‌ای که خاک زیر بقایا خنک‌تر باقی می‌ماند و این شرایط به حفظ فعالیت میکروارگانیسم‌های مفید کمک می‌کند. این میکروارگانیسم‌ها در چرخه مواد غذایی، تثبیت ازت و افزایش ماده آلی نقش کلیدی دارند.

همچنین، پوشش گیاهی مانع از فرسایش بادی و آبی می‌شود، که در شرایط تغییر اقلیم با افزایش شدت طوفان‌ها و بارش‌های سیل‌آسا اهمیت بیشتری می‌یابد. جالب آن‌که وجود پوشش گیاهی علاوه بر کاهش خسارت‌های ناشی از تغییر اقلیم، به جذب بیشتر کربن از جو و ذخیره آن در زیست‌توده و خاک منجر می‌شود و از این طریق در کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای نیز مؤثر است.

کشاورزی تک‌محصولی در برابر تغییرات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر است، زیرا بروز یک تنش مانند خشکسالی یا هجوم آفات می‌تواند کل تولید را نابود کند. اما زمانی که کشاورزان از تناوب علمی و متنوع استفاده می‌کنند، مقاومت مزرعه در برابر تنش‌ها افزایش می‌یابد. برای مثال، تناوب غلات با حبوبات نه تنها موجب بهبود حاصلخیزی خاک از طریق تثبیت بیولوژیکی نیتروژن می‌شود، بلکه خطر شیوع بیماری‌ها و آفات را کاهش می‌دهد. در شرایط تغییر اقلیم که تنش‌های زیستی و غیرزیستی افزایش یافته‌اند، تنوع کشت مانند بیمه‌ای عمل می‌کند که پایداری تولید را تضمین می‌نماید. افزون بر آن، سیستم‌های متنوع زراعی قابلیت بیشتری برای ذخیره کربن و حمایت از تنوع زیستی دارند. گیاهان مختلف با ریشه‌های متفاوت در اعماق گوناگون خاک نفوذ کرده و موجب افزایش پایداری ساختاری خاک و ذخیره آب می‌شوند (شکل ۵-۶).

ارتباط مستقیم کشاورزی حفاظتی با کاهش اثرات تغییر اقلیم تنها به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش ذخیره کربن محدود نمی‌شود. این نظام با بهبود کارایی مصرف نهاده‌ها نیز در این زمینه نقش دارد. در کشاورزی متداول، بخش زیادی از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها به دلیل شرایط نامناسب خاک و آب هدر می‌روند و در نهایت وارد منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شوند. این مسئله هم از نظر اقتصادی زیان‌بار است و هم از نظر زیست‌محیطی به آلودگی و تولید گازهای گلخانه‌ای مانند اکسید نیتروژن می‌انجامد. اما در کشاورزی حفاظتی، با بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش فعالیت زیستی، بهره‌وری کودها بالاتر می‌رود و نیاز به مصرف بیش از حد نهاده‌ها کاهش می‌یابد (شکل ۵-۶). این امر هم به نفع کشاورز است و هم به نفع محیط زیست و اقلیم. نکته مهم دیگر این است که کشاورزی حفاظتی نوعی رویکرد سازگاران در برابر تغییر اقلیم محسوب می‌شود. سازگاری در این زمینه به معنای توانایی نظام کشاورزی برای تداوم تولید در شرایط اقلیمی جدید است. برای نمونه، خاک‌هایی که در کشاورزی حفاظتی مدیریت می‌شوند، ظرفیت بیشتری برای ذخیره آب دارند و می‌توانند در دوره‌های خشکسالی طولانی مدت رطوبت کافی برای رشد گیاه فراهم کنند. همچنین، ریشه‌های گیاهان در خاک‌هایی که بدون شخم باقی مانده‌اند، عمیق‌تر نفوذ کرده و دسترسی بیشتری به منابع آب و مواد غذایی پیدا می‌کنند. این موضوع به افزایش تاب‌آوری گیاهان در برابر تنش‌های ناشی از تغییر اقلیم کمک می‌کند. از سوی دیگر، وجود تناوب‌های متنوع مانع از شیوع گسترده آفات و بیماری‌ها در شرایط آب‌وهوایی متغیر می‌شود.



شکل ۵-۶: برتری‌ها و مزایای کشاورزی حفاظتی نسبت به متداول در تغییر اقلیم

کشاورزی حفاظتی علاوه بر اثرات سازگارانه، در کاهش علل تغییر اقلیم نیز سهم دارد. به بیان دیگر، این نظام هم برای «تطبیق» (Adaptation) «و هم برای «کاهش» (Mitigation) «مفید است. کاهش انتشار کربن از طریق کاهش عملیات شخم و مصرف سوخت، ذخیره‌سازی بیشتر کربن در خاک و زیست‌توده، و مدیریت بهتر بقایای گیاهی از مهم‌ترین نقش‌های آن در حوزه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. همزمان، افزایش کارایی مصرف آب و نهاده‌ها، حفظ تنوع زیستی و بهبود کیفیت محیط زیست موجب افزایش توان تطبیقی کشاورزان در برابر اقلیم متغیر می‌شود. این دو کارکرد همزمان، کشاورزی حفاظتی را به یکی از کلیدی‌ترین ابزارها برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار و توافق‌نامه پاریس در زمینه اقلیم تبدیل کرده است.

با این حال، تحقق کامل مزایای کشاورزی حفاظتی نیازمند زیرساخت‌های مناسب، آموزش کشاورزان و حمایت‌های سیاستی است. اجرای موفق این نظام در بسیاری از کشورها، به‌ویژه کشورهای در حال توسعه، با موانعی مانند کمبود ماشین‌آلات مخصوص کشت بدون شخم، محدودیت در دسترسی به بقایای گیاهی به دلیل استفاده آنها به‌عنوان سوخت یا خوراک دام، و نیز عدم آگاهی کافی کشاورزان از اصول علمی همراه بوده

است. اما تجربه کشورهایمانند برزیل، آرژانتین، هند و حتی برخی مناطق ایران نشان داده است که با سیاست‌گذاری مناسب و ترویج علمی، کشاورزی حفاظتی می‌تواند به سرعت گسترش یابد و آثار مثبت خود را بر تولید، معیشت و محیط زیست نشان دهد.

جمع‌بندی آن‌که کشاورزی حفاظتی با اصول بنیادین خود، راهکاری علمی و عملی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم و افزایش تاب‌آوری نظام‌های تولیدی به شمار می‌آید. این رویکرد از یک‌سو با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش ذخیره کربن در خاک، به کند کردن روند گرمایش جهانی کمک می‌کند، و از سوی دیگر با بهبود حاصلخیزی خاک، افزایش ذخیره آب و تنوع محصولات، تاب‌آوری کشاورزان را در برابر شرایط اقلیمی متغیر ارتقا می‌بخشد. در جهانی که تغییر اقلیم آینده کشاورزی را با تهدیدهای جدی مواجه کرده است، پذیرش و توسعه کشاورزی حفاظتی نه یک انتخاب، بلکه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای تضمین امنیت غذایی و پایداری منابع طبیعی محسوب می‌شود.

۱-۲-۶- کاهش فرسایش خاک

فرسایش خاک یکی از جدی‌ترین تهدیدهایی است که نظام‌های کشاورزی جهان با آن مواجه هستند. هر ساله میلیون‌ها تن خاک حاصلخیز در اثر فعالیت‌های انسانی و فرایندهای طبیعی از بین می‌رود و این موضوع امنیت غذایی، پایداری منابع طبیعی و زیست‌پذیری سرزمین‌ها را به خطر می‌اندازد. تغییر اقلیم و بحران کم‌آبی نیز این روند را تشدید کرده‌اند، زیرا بارش‌های شدید و ناگهانی، خشکسالی‌های طولانی و افزایش دما موجب می‌شوند که خاک‌ها بیش از پیش در معرض فرسایش قرار گیرند. در چنین شرایطی، کشاورزی حفاظتی به‌عنوان رویکردی جامع و علمی، ابزاری کارآمد برای مقابله با فرسایش خاک و کاهش اثرات تغییر اقلیم و کم‌آبی شناخته می‌شود. این نظام با تکیه بر سه اصل کلیدی یعنی کاهش عملیات خاک‌ورزی، حفظ پوشش دائمی خاک و تنوع در تناوب محصولات، می‌تواند ظرفیت خاک برای مقاومت در برابر فرسایش را افزایش دهد و هم‌زمان بهره‌وری آب و توان سازگاری با شرایط اقلیمی متغیر را ارتقا بخشد (شکل ۶-۶).

فرسایش خاک به دو صورت عمده رخ می‌دهد: فرسایش آبی و فرسایش بادی. در مناطق نیمه‌خشک و خشک مانند ایران، هر دو نوع فرسایش به شدت دیده می‌شوند. بارش‌های رگباری موجب کنده‌شدن ذرات خاک و انتقال آنها می‌شوند و بادهای شدید به‌ویژه در زمین‌های برهنه، ذرات ریز خاک را جابه‌جا می‌کنند. در هر دو حالت، مواد آلی و عناصر غذایی ارزشمند خاک در معرض از دست رفتن قرار می‌گیرند. کشاورزی حفاظتی با حفظ پوشش گیاهی و بقایای محصولات پیشین، مانعی فیزیکی در برابر نیروی ضربه باران و وزش باد ایجاد می‌کند. این پوشش مانند سپری از خاک محافظت می‌کند و اجازه نمی‌دهد ذرات خاک به راحتی کنده یا جابه‌جا شوند. در نتیجه، فرسایش به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این امر به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم که شدت بارش‌ها و بادهای افزایش یافته، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (شکل ۶-۶).

مقابله با فرسایش خاک در کشاورزی



شکل ۶-۶: مقابله با فرسایش خاک در کشاورزی

کاهش عملیات خاک‌ورزی نیز در کاهش فرسایش نقش کلیدی دارد. شخم‌های مکرر و عمیق باعث می‌شوند خاک ساختار طبیعی خود را از دست بدهد، دانه‌بندی آن تخریب شود و پایداری کلوخه‌ها کاهش یابد. خاکی که ساختار خود را از دست داده باشد، به راحتی در برابر باران و باد فرسایش پیدا می‌کند. در مقابل، کشاورزی حفاظتی با حذف یا کاهش شخم، به خاک فرصت می‌دهد تا ساختار طبیعی خود را حفظ کرده و پایداری بیشتری در برابر نیروهای فرساینده داشته باشد. افزون بر این، در سیستم بدون شخم، ریشه گیاهان در لایه‌های مختلف خاک باقی می‌مانند و همچون رشته‌هایی به هم تنیده، ذرات خاک را در کنار هم نگه می‌دارند. این شبکه ریشه‌ای استحکام خاک را بالا برده و مانع فرسایش می‌شود.

ارتباط میان کاهش فرسایش خاک در کشاورزی حفاظتی و کاهش اثرات تغییر اقلیم بسیار عمیق است. خاکی که دچار فرسایش می‌شود، نه تنها حاصلخیزی خود را از دست می‌دهد بلکه ظرفیت ذخیره‌سازی کربن و آب آن نیز کاهش می‌یابد. این یعنی خاک فرسایش‌یافته قادر به ایفای نقش خود در تعدیل اقلیم و مقابله با کم‌آبی نیست. در مقابل، خاکی که تحت کشاورزی حفاظتی مدیریت می‌شود و از فرسایش مصون می‌ماند، ظرفیت بالاتری برای ذخیره کربن دارد. این کربن در قالب ماده آلی خاک ذخیره می‌شود و از ورود آن به جو به شکل دی‌اکسید کربن جلوگیری می‌کند. از آنجا که دی‌اکسید کربن یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است، هر چه ذخیره آن در خاک افزایش یابد، روند گرمایش جهانی کندتر می‌شود. بنابراین، کاهش فرسایش خاک نه تنها به حفظ باروری زمین‌ها کمک می‌کند، بلکه نقشی اساسی در کاهش تغییر اقلیم دارد.

از منظر بحران آب نیز کشاورزی حفاظتی و کاهش فرسایش رابطه‌ای تنگاتنگ دارند. یکی از مهم‌ترین پیامدهای فرسایش، کاهش توان خاک در ذخیره و نگهداری آب است. خاکی که دچار فرسایش سطحی می‌شود، لایه حاصلخیز و غنی از مواد آلی خود را از دست می‌دهد و به تدریج به لایه‌های کم‌عمق‌تر و فقیرتر می‌رسد. این لایه‌ها ظرفیت کمتری برای جذب و نگهداری آب دارند و به همین دلیل، بارش‌های بارانی به رواناب تبدیل می‌شوند و به جای آنکه به درون خاک نفوذ کنند، از سطح آن خارج می‌شوند. در نتیجه، نه تنها آب از دست می‌رود بلکه فرسایش بیشتر تشدید می‌گردد. در کشاورزی حفاظتی، وجود بقایای گیاهی بر سطح خاک مانند فیلتری عمل می‌کند که سرعت رواناب را کاهش داده و فرصت بیشتری برای نفوذ آب به خاک فراهم می‌آورد. همچنین، ساختار پایدار خاک در سیستم بدون شخم موجب افزایش نفوذپذیری و ظرفیت نگهداری آب می‌شود. بدین ترتیب، خاک توانایی بیشتری برای مقابله با خشکسالی‌ها پیدا می‌کند و بهره‌وری مصرف آب افزایش می‌یابد.

از منظر تغییر اقلیم، این موضوع اهمیت دوچندان دارد. در سال‌های اخیر، الگوی بارش‌ها در بسیاری از مناطق جهان تغییر کرده است. بارش‌ها کوتاه‌تر، شدیدتر و پراکنده‌تر شده‌اند. این نوع بارش‌ها به‌طور طبیعی مستعد ایجاد رواناب و فرسایش شدید هستند. اما در سیستم کشاورزی حفاظتی، همان بارش‌ها می‌توانند به منبعی ارزشمند از آب تبدیل شوند، زیرا خاک توانایی بیشتری برای جذب و نگهداری آنها دارد. به این ترتیب، کشاورزی حفاظتی نوعی راهبرد سازگاری با شرایط بارش‌های جدید است. علاوه بر این، خاک‌هایی که کمتر دچار فرسایش می‌شوند، به دلیل داشتن ماده آلی بیشتر و پوشش گیاهی دائمی، در برابر افزایش دما نیز مقاوم‌تر هستند، زیرا تبخیر از سطح آنها کمتر رخ می‌دهد و رطوبت بیشتری ذخیره می‌گردد.

نکته مهم دیگر ارتباط میان کاهش فرسایش خاک و بهبود کیفیت منابع آبی است. در شرایطی که خاک دچار فرسایش می‌شود، ذرات ریز همراه با رواناب وارد رودخانه‌ها، سدها و آبراهه‌ها می‌شوند و علاوه بر رسوب‌گذاری، مواد شیمیایی مانند کود و سموم را نیز با خود حمل می‌کنند. این امر منجر به آلودگی منابع آب و کاهش کیفیت آنها می‌گردد. در کشاورزی حفاظتی، با کاهش فرسایش و رواناب، میزان ورود رسوب و آلاینده‌ها به منابع آبی کاهش می‌یابد و این موضوع هم به مدیریت بحران کم‌آبی و هم به کاهش اثرات تغییر اقلیم کمک می‌کند. زیرا منابع آبی پاکیزه‌تر و در دسترس‌تر خواهند بود و هزینه‌های تصفیه کاهش می‌یابد.

کاهش فرسایش در کشاورزی حفاظتی همچنین به ارتقای تنوع زیستی مرتبط با خاک منجر می‌شود. موجودات ریزخاکی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها و کرم‌های خاکی در شرایطی که خاک پوشیده و از فرسایش مصون باشد، زیستگاه پایدارتری پیدا می‌کنند. این موجودات در افزایش ماده آلی، چرخه عناصر غذایی و تثبیت خاک نقش کلیدی دارند. افزایش فعالیت زیستی خاک نیز به بهبود جذب کربن و ذخیره آن در خاک کمک می‌کند. از دیدگاه تغییر اقلیم، این یک چرخه مثبت است: کاهش فرسایش باعث افزایش تنوع زیستی خاک می‌شود، افزایش فعالیت زیستی منجر به ذخیره بیشتر کربن می‌گردد و ذخیره بیشتر کربن موجب کاهش گرمایش جهانی می‌شود.

اگر کشاورزی حفاظتی را از منظر سیاست‌گذاری و مدیریت منابع در نظر بگیریم، می‌توان آن را یک استراتژی کارآمد برای مقابله با سه بحران هم‌زمان یعنی فرسایش خاک، تغییر اقلیم و کم‌آبی دانست. کشورهایی که اجرای این نظام را در سطح ملی پیاده کرده‌اند، نتایج چشمگیری به دست آورده‌اند. برای نمونه، در برزیل و آرژانتین میلیون‌ها هکتار از زمین‌های زراعی به روش‌های بدون شخم و کشاورزی حفاظتی مدیریت می‌شوند و کاهش محسوسی در نرخ فرسایش و رواناب مشاهده شده است. این کشورها توانسته‌اند علاوه بر افزایش پایداری تولید محصولات کشاورزی، نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کنند. در مناطقی مانند آسیای مرکزی و خاورمیانه که کم‌آبی یک معضل جدی است، کشاورزی حفاظتی فرصتی ویژه برای حفظ منابع خاک و آب فراهم می‌کند.

با وجود این مزایا، پذیرش کشاورزی حفاظتی نیازمند تغییر نگرش و آموزش کشاورزان است. بسیاری از کشاورزان سال‌ها به شخم به‌عنوان نماد کشاورزی عادت کرده‌اند و تصور می‌کنند شخم عمیق به بهبود عملکرد کمک می‌کند. در حالی که شواهد علمی نشان می‌دهد در بلندمدت شخم موجب تخریب خاک و تشدید فرسایش می‌شود. بنابراین، ترویج و آموزش نقش کلیدی در گسترش این نظام دارد. همچنین، باید سیاست‌های حمایتی برای تأمین ماشین‌آلات کشت مستقیم، مدیریت بقایای گیاهی و ترویج تناوب‌های علمی طراحی و اجرا شود.

۲-۲-۶- حفظ رطوبت و بهبود ظرفیت نگهداری آب

رطوبت خاک و ظرفیت نگهداری آب از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده پایداری کشاورزی در شرایط اقلیمی متغیر هستند. در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب و کاهش بارش‌ها چالش اصلی تولید به‌شمار می‌رود و تغییر اقلیم این مسئله را پیچیده‌تر کرده است. افزایش دما، تغییر الگوی بارندگی و وقوع خشکسالی‌های پیاپی موجب شده است که کارایی مصرف آب به یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی نظام‌های کشاورزی تبدیل شود. در این میان، کشاورزی حفاظتی به‌عنوان رویکردی جامع و مبتنی بر اصول علمی، توانسته است نشان دهد که با مدیریت صحیح خاک و بقایای گیاهی می‌توان رطوبت خاک را

حفظ کرد و ظرفیت نگهداری آب را بهبود بخشید. این ویژگی‌ها نه تنها به کاهش اثرات کم‌آبی کمک می‌کند بلکه در کاهش شدت پیامدهای تغییر اقلیم نیز نقشی اساسی ایفا دارند.

کاهش عملیات خاک‌ورزی باعث می‌شود که ساختمان طبیعی خاک دست‌نخورده باقی بماند، خلل و فرج آن حفظ شود و مسیرهای طبیعی نفوذ آب مسدود نشوند. این موضوع سبب افزایش ظرفیت نفوذپذیری خاک و کاهش رواناب می‌شود. هنگامی که آب باران یا آبیاری بهتر در خاک نفوذ کند، ذخیره رطوبت در پروفیل خاک بیشتر می‌شود و گیاهان می‌توانند در طول دوره‌های خشکی به این ذخیره دسترسی داشته باشند. از سوی دیگر، عدم دست‌کاری مکرر خاک موجب تجمع ماده آلی و ایجاد خاک‌دانه‌های پایدار می‌شود که خاصیت اسفنجی خاک را افزایش داده و توانایی نگهداری آب را ارتقا می‌دهد (جدول ۲-۶).

حفظ پوشش دائمی خاک دومین اصل کشاورزی حفاظتی است که رابطه‌ای مستقیم با کاهش تبخیر و حفظ رطوبت دارد. در شرایط معمولی، بخش زیادی از آبی که وارد مزرعه می‌شود، پیش از آن که در اختیار گیاه قرار گیرد، از سطح خاک تبخیر می‌گردد. این امر به‌ویژه در مناطق گرم و خشک با تابش شدید خورشید بسیار محسوس است. اما هنگامی که سطح خاک با بقایای گیاهی پوشانده شود، یک لایه محافظ تشکیل می‌شود که مانند سایبان عمل کرده و مانع از تابش مستقیم خورشید به خاک می‌گردد. در نتیجه، تبخیر سطحی کاهش یافته و رطوبت برای مدت طولانی‌تری حفظ می‌شود. افزون بر آن، پوشش گیاهی موجب کاهش سرعت باد در سطح خاک می‌شود و این موضوع نیز از افزایش تبخیر و خشک‌شدن سریع خاک جلوگیری می‌کند. اصل سوم، یعنی تنوع در تناوب و کشت محصولات، نیز در بهبود شرایط رطوبتی نقش غیرمستقیم دارد. گیاهان مختلف دارای سیستم‌های ریشه‌ای متفاوتی هستند. برخی ریشه‌های عمیق دارند و می‌توانند آب را از لایه‌های زیرین خاک استخراج کنند، در حالی که برخی دیگر ریشه‌های سطحی دارند و از رطوبت لایه‌های بالایی بهره می‌برند. زمانی که این گیاهان در قالب تناوب یا کشت مخلوط مدیریت شوند، استفاده از منابع آبی خاک بهینه می‌شود. علاوه بر این، بقایای متنوع گیاهی که از این تناوب‌ها بر جای می‌ماند، ویژگی‌های متفاوتی در بهبود ماده آلی و ساختار خاک دارند و این امر به افزایش ظرفیت کلی نگهداری آب کمک می‌کند (جدول ۲-۶).

ارتباط میان حفظ رطوبت در کشاورزی حفاظتی و کاهش اثرات تغییر اقلیم بسیار روشن است. یکی از پیامدهای اصلی تغییر اقلیم، افزایش شدت و فراوانی خشکسالی‌هاست. در شرایطی که بارش‌ها کاهش یافته یا الگوی آنها تغییر می‌کند، تنها راهکار پایدار آن است که از آب موجود حداکثر بهره‌برداری صورت گیرد. کشاورزی حفاظتی با کاهش تبخیر و افزایش ذخیره‌سازی آب در خاک، امکان استفاده کارآمدتر از منابع آبی محدود را فراهم می‌سازد. به بیان دیگر، خاک تحت مدیریت حفاظتی همچون مخزن عمل می‌کند که می‌تواند آب بارش‌های پراکنده و کوتاه‌مدت را ذخیره کرده و در زمان‌های کم‌آبی در اختیار گیاه قرار دهد. این ویژگی سبب افزایش تاب‌آوری مزارع در برابر خشکسالی‌های مکرر می‌شود (جدول ۲-۶).

از منظر تغییر اقلیم، افزایش دما نه تنها تبخیر از سطح خاک را بیشتر می‌کند، بلکه تبخیر تعرق گیاه را نیز افزایش می‌دهد. این موضوع نیاز آبی محصولات را بالا می‌برد و فشار بیشتری بر منابع آب وارد می‌کند. اما در

کشاورزی حفاظتی، دمای خاک به دلیل وجود پوشش گیاهی پایین تر باقی می ماند و این امر باعث می شود ریشه ها در محیطی خنک تر فعالیت کنند و تبخیر تعلق در مقایسه با شرایط بدون پوشش کاهش یابد. بدین ترتیب، در شرایط گرم تر، کارایی مصرف آب همچنان بالا باقی می ماند.

بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک تحت مدیریت حفاظتی علاوه بر سازگاری با تغییر اقلیم، در کاهش شدت آن نیز نقش دارد. خاکی که رطوبت بیشتری ذخیره می کند، معمولاً مقدار ماده آلی بالاتری دارد. ماده آلی نه تنها خاصیت اسفنجی خاک را افزایش می دهد بلکه منبعی برای ذخیره کربن نیز به شمار می آید. در نتیجه، افزایش ماده آلی و رطوبت خاک همزمان موجب افزایش ذخیره کربن می شود و این امر انتشار دی اکسید کربن به جو را کاهش می دهد. بدین ترتیب، کشاورزی حفاظتی علاوه بر کمک به سازگاری با تغییر اقلیم، در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای نیز نقش آفرینی می کند.

جدول ۲-۶. نقش اصول کشاورزی حفاظتی در حفظ رطوبت خاک و کاهش اثرات تغییر اقلیم و کم آبی

اصل کشاورزی حفاظتی	اثر بر حفظ رطوبت خاک	اثر بر ظرفیت نگهداری آب	پیامد در کاهش اثرات تغییر اقلیم و کم آبی
حداقل سازی یا عدم شخم (No-Till)	کاهش تبخیر سطحی به دلیل دست نخورده ماندن ساختمان خاک؛ افزایش نفوذ آب باران و آبیاری	حفظ خلل و فرج خاک، تجمع ماده آلی و افزایش پایداری خاک دانه ها که خاصیت اسفنجی خاک را تقویت می کند	کاهش نیاز آبی محصولات؛ افزایش تاب آوری در برابر خشکسالی؛ ذخیره کربن در خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای
پوشش دائمی خاک با ایجاد سایبان و کاهش دمای خاک؛ بقایای گیاهی یا جلوگیری از تبخیر سریع؛ کاهش اثر باد بر خشک شدن خاک	افزودن بقایای آلی که توانایی نگهداری آب را افزایش می دهد؛ ایجاد لایه حفاظتی برای کاهش رواناب	بهبود کارایی مصرف آب؛ کاهش فشار بر منابع آبی؛ کاهش دمای خاک و اثرات گرمایش زمین	
تنوع و تناوب استفاده از ریشه های متنوع برای تنوع بقایای گیاهی باعث استفاده بهینه از بارش های پراکنده؛ افزایش پایداری تولید؛ کاهش وابستگی به آبیاری مداوم	مختلف؛ توزیع یکنواخت تر مصرف آلی و بهبود ساختمان خاک می شود		
یکپارچه سازی کاهش هدررفت آب با مدیریت	کاهش هدررفت آب با مدیریت	ارتقای ظرفیت نگهداری آب از ایجاد نظامی مقاوم در برابر تغییر	طریق ترکیب اثرات سه اصل اقلیم؛ کاهش خطر بی آبی و بهبود امنیت غذایی

ارتباط میان حفظ رطوبت در کشاورزی حفاظتی و بحران کم آبی نیز بسیار مهم است. در بسیاری از کشورها، به ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا، منابع آب سطحی و زیرزمینی در حال کاهش هستند و بهره برداری بیش از حد موجب افت سطح سفره های آب و خشک شدن تالاب ها و رودخانه ها شده است. در چنین شرایطی، افزایش بهره وری آب در سطح مزرعه یک الزام حیاتی است. کشاورزی حفاظتی این امکان را فراهم می آورد که از هر واحد آب بارندگی یا آبیاری حداکثر استفاده شود. به بیان ساده، اگر در شرایط متداول بخش زیادی از

آب هدر می‌رود، در کشاورزی حفاظتی همان مقدار آب می‌تواند برای دوره‌های طولانی‌تری نیاز گیاه را تأمین کند. این موضوع فشار بر منابع آبی را کاهش داده و به مدیریت پایدار آنها کمک می‌کند.

تجربه‌های میدانی در کشورهای مختلف نشان داده است که کشاورزی حفاظتی می‌تواند رطوبت خاک را تا چندین هفته بیشتر از سیستم‌های متداول حفظ کند. برای مثال، در مطالعات انجام‌شده در مزارع ذرت و گندم در آمریکای لاتین، مشخص شد که خاک‌های تحت مدیریت بدون شخم و با پوشش بقایای گیاهی، در مقایسه با خاک‌های شخم‌خورده و عاری از پوشش، رطوبت بیشتری در عمق‌های مختلف ذخیره کرده و عملکرد محصول در شرایط کم‌آبی بالاتر بوده است. در هند نیز اجرای کشاورزی حفاظتی در مناطق خشک نشان داده است که این روش می‌تواند کارایی مصرف آب را تا ۳۰ درصد افزایش دهد. چنین شواهدی نشان می‌دهد که این رویکرد نه یک نظریه صرف، بلکه راه‌حلی عملی برای مقابله با کم‌آبی و تغییر اقلیم است.

از سوی دیگر، بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک مزایای اجتماعی و اقتصادی نیز دارد. کشاورزانی که بتوانند با منابع آب محدود محصول بیشتری تولید کنند، امنیت غذایی خانواده و جامعه خود را تضمین خواهند کرد. همچنین، کاهش نیاز به آبیاری به معنای کاهش هزینه‌های تولید است، زیرا آبیاری به‌ویژه در مناطق خشک یکی از پرهزینه‌ترین مراحل کشاورزی است. بدین ترتیب، کشاورزی حفاظتی می‌تواند نه تنها به پایداری زیست‌محیطی بلکه به بهبود وضعیت معیشتی کشاورزان نیز کمک کند.

البته تحقق این مزایا نیازمند حمایت‌های گسترده است. اجرای کشاورزی حفاظتی در بسیاری از کشورها با موانعی مانند دسترسی محدود به ماشین‌آلات مناسب، کمبود آگاهی کشاورزان و مشکلات مربوط به مدیریت بقایای گیاهی مواجه است. در برخی مناطق، بقایا به‌عنوان خوراک دام یا سوخت مصرف می‌شوند و در نتیجه برای پوشش خاک باقی نمی‌مانند. بنابراین، سیاست‌های حمایتی و برنامه‌های ترویجی باید به گونه‌ای طراحی شوند که کشاورزان را به حفظ بقایا و اجرای تناوب‌های متنوع تشویق کنند.

۳-۲-۶- افزایش ذخیره کربن خاک

افزایش ذخیره کربن در خاک یکی از مباحث کلیدی در کشاورزی نوین و به‌ویژه در رویکرد کشاورزی حفاظتی است که ارتباط مستقیمی با کاهش اثرات تغییر اقلیم و مدیریت بحران کم‌آبی دارد. خاک نه تنها بستر رشد گیاهان است، بلکه یک مخزن بزرگ کربن نیز به شمار می‌آید. مقدار کربنی که خاک در خود ذخیره می‌کند، به‌طور مستقیم بر چرخه جهانی کربن، تعادل گازهای گلخانه‌ای در جو و کارکرد اکوسیستم‌های کشاورزی اثر می‌گذارد. در شرایطی که تغییر اقلیم ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو به تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و منابع آبی جهان تبدیل شده است، استفاده از ظرفیت خاک برای جذب و ذخیره کربن می‌تواند هم به‌عنوان یک راهبرد کاهش‌دهنده (Mitigation) و هم به‌عنوان یک سازوکار سازگاری (Adaptation) ایفای نقش کند.

زمانی که کربن در خاک ذخیره می‌شود، ماده آلی خاک افزایش می‌یابد. این ماده آلی شامل بقایای گیاهی و جانوری تجزیه‌شده است که ساختار خاک را بهبود بخشیده، پایداری خاک‌دانه‌ها را افزایش داده و ظرفیت

خاک برای جذب و نگهداری آب را تقویت می‌کند. به عبارت دیگر، هرچه میزان ماده آلی خاک بیشتر باشد، توانایی آن برای عمل کردن مانند یک اسفنج طبیعی نیز بیشتر خواهد بود. چنین خاکی نه تنها رطوبت بیشتری در زمان بارندگی ذخیره می‌کند بلکه در دوره‌های خشک قادر است این رطوبت را به آرامی در اختیار گیاه قرار دهد. بنابراین افزایش ذخیره کربن خاک، یک رابطه مستقیم با کاهش اثرات کم‌آبی و خشکسالی دارد.

در نظام کشاورزی متداول که مبتنی بر شخم عمیق و برداشت کامل بقایا است، بخش زیادی از کربن ذخیره شده در خاک به سرعت اکسید شده و به شکل دی‌اکسید کربن وارد جو می‌شود. این امر هم ذخایر کربنی خاک را کاهش می‌دهد و هم به افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. در مقابل، کشاورزی حفاظتی با حداقل سازی عملیات خاک‌ورزی، حفظ بقایای گیاهی روی سطح خاک و تنوع بخشی به تناوب محصولات، شرایطی فراهم می‌آورد که کربن بیشتری در خاک انباشته شده و برای مدت طولانی‌تری ذخیره شود.

رابطه میان ذخیره کربن خاک و کاهش اثرات تغییر اقلیم را می‌توان از دو جنبه بررسی کرد. نخست، افزایش ذخیره کربن به معنای کاهش انتشار دی‌اکسید کربن به جو است. خاک‌هایی که از ماده آلی غنی هستند، مانند یک مخزن عمل می‌کنند و کربن را در خود حبس می‌نمایند. این امر به کاهش سطح گازهای گلخانه‌ای در جو کمک کرده و روند گرمایش جهانی را کند می‌کند. دوم، خاک‌های کربن دار دارای خصوصیات فیزیکی و بیولوژیکی بهتری هستند که موجب افزایش تاب‌آوری نظام‌های کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی می‌شود. به‌طور مثال، در خاک‌هایی که میزان کربن آلی بالا است، نفوذپذیری آب بیشتر، ظرفیت نگهداری رطوبت بالاتر و فعالیت میکروبی متنوع‌تر است؛ همه این موارد باعث می‌شود گیاهان بهتر با تنش‌های خشکی و گرما سازگار شوند. در ارتباط با بحران کم‌آبی، افزایش ذخیره کربن خاک اهمیت دوچندان دارد. ماده آلی خاک با توانایی بالای خود در جذب آب، ظرفیت نگهداری رطوبت را تا چند برابر افزایش می‌دهد. بر اساس مطالعات، هر یک درصد افزایش در کربن آلی خاک می‌تواند معادل چندین ده هزار لیتر آب در هر هکتار ظرفیت نگهداری ایجاد کند. این بدان معنا است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش کربن آلی می‌تواند تفاوتی اساسی میان بقا یا نابودی محصول در سال‌های خشک ایجاد کند. بنابراین، ذخیره کربن خاک نه تنها یک اقدام زیست‌محیطی برای کاهش تغییر اقلیم است بلکه یک استراتژی مدیریت منابع آب نیز به شمار می‌آید (جدول ۳-۶).

فرایندهای زیستی متعددی در ذخیره کربن خاک نقش دارند. زمانی که بقایای گیاهی در سطح خاک باقی می‌مانند یا به تدریج در خاک تجزیه می‌شوند، بخشی از کربن موجود در آنها به ترکیبات پایدار تبدیل می‌شود. میکروارگانیسم‌های خاکی این بقایا را تجزیه کرده و محصولات پایدار کربنی ایجاد می‌کنند که می‌توانند صدها سال در خاک باقی بمانند. وجود تنوع گیاهی در تناوب‌های کشاورزی نیز باعث می‌شود که ریشه‌های متفاوت با الگوهای متنوع خود کربن را در اعماق مختلف خاک تثبیت کنند. ریشه‌های عمیق کربن را به لایه‌های پایین‌تر منتقل می‌کنند که پایداری بیشتری دارند و کمتر در معرض اکسیداسیون قرار می‌گیرند.

افزون بر این، افزایش ذخیره کربن خاک موجب بهبود خواص شیمیایی خاک نیز می‌شود. ماده آلی حاصل از کربن آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی را افزایش داده و در نتیجه توانایی خاک برای نگهداری عناصر غذایی

بیشتر می‌شود. این موضوع باعث می‌شود گیاهان در شرایط کم‌آبی نیز دسترسی بهتری به مواد غذایی داشته باشند و فشار تنش مضاعف کاهش یابد. از این منظر، ذخیره کربن خاک یک پیوند عمیق میان مدیریت آب، حاصلخیزی خاک و سلامت گیاه برقرار می‌سازد.

جدول ۳-۶: اثرات زنجیره‌ای افزایش کربن خاک بر ویژگی‌های خاک، مدیریت آب و کاهش تغییر اقلیم و کم‌آبی

سطح اثرگذاری	تغییر ایجادشده با افزایش کربن خاک	پیامد مستقیم	پیامد نهایی
ویژگی‌های فیزیکی خاک	بهبود ساختمان خاک، پایداری خاک‌دانه‌ها، افزایش تخلخل	افزایش نفوذ آب و کاهش رواناب	ذخیره بیشتر آب بارندگی و کاهش فرسایش
ویژگی‌های شیمیایی خاک	افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و دسترسی بهتر گیاهان به مواد افزایش عملکرد محصول در نگهداری عناصر غذایی	غذایی حتی در خشکی	شرایط کم‌آبی
ویژگی‌های بیولوژیکی خاک	افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و قارچ‌های بهبود چرخه مواد غذایی و تجزیه تقویت سلامت خاک و پایداری همزیست	بقایا	اکوسیستم زراعی
مدیریت رطوبت خاک	افزایش ظرفیت نگهداری آب به واسطه کاهش تبخیر و آزادسازی تدریجی تاب‌آوری بیشتر محصولات در خاصیت اسفنجی ماده آلی	آب	برابر خشکسالی
تغییر اقلیم	تثبیت کربن در خاک و کاهش انتشار CO_2	کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو	کند شدن روند گرمایش زمین
بحران کم‌آبی	افزایش بهره‌وری مصرف آب (WUE)	کاهش وابستگی به آبیاری مداوم	مدیریت پایدار منابع آب و امنیت غذایی

ارتباط مستقیم افزایش کربن خاک با کاهش تغییر اقلیم را می‌توان در سیاست‌ها و توافقات جهانی نیز مشاهده کرد. در توافق‌نامه پاریس، یکی از راهبردهای مهم برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش ذخیره کربن خاک معرفی شده است. طرح جهانی "چهار در هزار" که توسط فرانسه در کنفرانس اقلیمی ۲۰۱۵ مطرح شد، تأکید دارد که اگر کربن آلی خاک در سطح جهان سالانه تنها ۴/۰ درصد افزایش یابد، می‌تواند بخش عمده‌ای از انتشار ناشی از فعالیت‌های انسانی را جبران کند. این طرح نشان می‌دهد که ظرفیت خاک برای مقابله با تغییر اقلیم بسیار عظیم است و مدیریت صحیح آن از اهمیت حیاتی برخوردار است.

در ارتباط با کم‌آبی، مطالعات میدانی نشان داده است که مزارعی با خاک غنی از کربن آلی، در دوره‌های خشکسالی عملکرد بالاتری نسبت به مزارع با خاک فقیر دارند. برای مثال، در ایالات متحده در مزارع ذرت و سویا، مشاهده شد که عملکرد محصول در خاک‌های دارای ماده آلی بالا تا ۲۰ درصد بیشتر از خاک‌های فقیر در سال‌های خشک بود. این افزایش عملکرد ناشی از توانایی بالاتر خاک در ذخیره و آزادسازی تدریجی آب است. در آفریقا نیز مطالعات مشابه نشان داده است که افزایش کربن خاک توانسته است تولید غلات را در شرایط کم‌آبی پایدار نگه دارد و امنیت غذایی جوامع محلی را تضمین کند (جدول ۳-۶).

ذخیره کربن خاک همچنین با افزایش فعالیت زیستی خاک همراه است. میکروارگانیسم‌ها، قارچ‌های میکوریز و موجودات خاک‌زی همگی از حضور ماده آلی بهره‌مند می‌شوند. این موجودات به بهبود ساختار خاک، افزایش

نفوذپذیری و حفظ رطوبت کمک می‌کنند. به بیان دیگر، افزایش کربن خاک یک زنجیره مثبت ایجاد می‌کند که از سطح مولکولی تا اکوسیستم اثرگذار است و در نهایت به کاهش فشارهای ناشی از تغییر اقلیم و کم‌آبی منجر می‌شود (جدول ۳-۶).

البته افزایش ذخیره کربن خاک نیازمند مدیریت‌های خاص و مداوم است. صرف‌نظر از باقی‌گذاشتن بقایا، اقدامات دیگری مانند استفاده از کود سبز، کشت گیاهان پوششی، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در مزارع و مدیریت پایدار مراتع نیز نقش مهمی دارند. در مناطق خشک، اجرای کشاورزی حفاظتی با تاکید بر حداقل‌سازی شخم و نگهداری بقایا مهم‌ترین راهکار برای جلوگیری از از دست رفتن کربن و حفظ آن در خاک است. در مناطق مرطوب‌تر، مدیریت تناوب‌های متنوع و افزودن کودهای آلی می‌تواند نقش بیشتری ایفا کند. با وجود این مزایا، چالش‌هایی نیز وجود دارد. در برخی مناطق، کشاورزان به دلیل نیاز اقتصادی بقایا را برای خوراک دام یا سوخت برداشت می‌کنند و بنابراین خاک بی‌پوشش می‌ماند. در چنین شرایطی، سیاست‌های حمایتی برای تأمین منابع جایگزین ضروری است. علاوه بر این، سنجش و پایش دقیق میزان کربن ذخیره‌شده در خاک نیازمند ابزارها و فناوری‌های پیشرفته است تا بتوان اثرات اقدامات کشاورزی حفاظتی را به‌طور علمی و مستند ارزیابی کرد (جدول ۳-۶).

۳-۶- کشت مستقیم و کاهش شخم

کشت مستقیم و کاهش شخم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اصول کشاورزی حفاظتی، تحولی بنیادین در مدیریت خاک و منابع طبیعی محسوب می‌شود که نقش چشمگیری در مقابله با چالش‌های جهانی نظیر تغییر اقلیم، کم‌آبی و کاهش حاصلخیزی خاک ایفا می‌کند. در شیوه‌های مرسوم کشاورزی، شخم به‌منظور آماده‌سازی زمین، کنترل علف‌های هرز و تسهیل جوانه‌زنی بذر انجام می‌گیرد، اما تحقیقات متعدد نشان داده‌اند که تداوم شخم‌های عمیق و مکرر نه‌تنها ساختار خاک را تخریب می‌کند بلکه باعث کاهش ماده آلی، افزایش فرسایش، تشدید تبخیر و در نهایت کاهش ظرفیت خاک برای ذخیره آب می‌شود. در مقابل، کشت مستقیم به‌معنای کاشت بذر بدون دستکاری شدید خاک و حذف یا حداقل‌سازی عملیات شخم، می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد پایدار برای سازگاری با تغییرات اقلیمی و مدیریت بحران آب در نظر گرفته شود.

زمانی که خاک به‌طور مداوم شخم زده می‌شود، پیوستگی خاک‌دانه‌ها از بین رفته و لایه سطحی خاک مستعد فرسایش آبی و بادی می‌گردد. این فرسایش نه‌تنها مواد مغذی و لایه حاصلخیز خاک را از دسترس خارج می‌کند بلکه کربن ذخیره‌شده در خاک را نیز به جو بازمی‌گرداند و در نتیجه غلظت دی‌اکسید کربن جو افزایش می‌یابد که یکی از عوامل اصلی تغییر اقلیم است. کشت مستقیم با حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک، شرایطی فراهم می‌کند که خاک‌دانه‌ها پایدارتر بمانند و ساختار طبیعی خاک حفظ شود. این وضعیت موجب افزایش نفوذ آب بارندگی و کاهش رواناب می‌گردد، در حالی که لایه‌های سطحی خاک از فرسایش مصون می‌مانند (جدول ۴-۶).

از سوی دیگر، یکی از اثرات بارز کاهش یا حذف شخم، افزایش ماده آلی خاک است. در کشاورزی سنتی، شخم زدن بقایای گیاهی را سریع تر تجزیه کرده و موجب آزادسازی کربن به جو می شود. در حالی که در کشت مستقیم، بقایا در سطح خاک باقی می مانند و به تدریج تجزیه می شوند. این روند آهسته نه تنها چرخه مواد غذایی را پایدارتر می سازد بلکه به افزایش ذخیره کربن خاک و بهبود ظرفیت نگهداری آب کمک می کند. خاکی که دارای مقدار بیشتری ماده آلی باشد، همچون اسفنج عمل می کند و توانایی جذب و نگهداری رطوبت بیشتری دارد. این ویژگی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که با کمبود منابع آبی مواجه اند اهمیت بالایی دارد زیرا موجب کاهش نیاز به آبیاری مداوم و افزایش بهره وری مصرف آب می شود (جدول ۴-۶).

جدول ۴-۶: مقایسه اثرات کشت مستقیم و شخم سنتی بر خاک، مدیریت آب و تغییر اقلیم

معیار	شخم سنتی	کشت مستقیم (بدون شخم)
ساختار خاک	تخریب خاک دانه ها، کاهش پایداری و افزایش تراکم	حفظ خاک دانه ها، افزایش تخلخل و بهبود تهویه
ماده آلی خاک	تجزیه سریع بقایا و کاهش ذخیره کربن	تجزیه تدریجی بقایا و افزایش ذخیره کربن
فرسایش خاک	شدت بالای فرسایش بادی و آبی	کاهش چشمگیر فرسایش به دلیل پوشش بقایا
نفوذ و نگهداری آب	نفوذ کم، افزایش رواناب و تبخیر سطحی	نفوذ بهتر، کاهش تبخیر و افزایش ظرفیت نگهداری آب
کیفیت آب	افزایش ورود رسوبات، کود و سموم به آب ها	کاهش رواناب و بهبود کیفیت آب های سطحی و زیرزمینی
دمای خاک	نوسانات حرارتی زیاد، افزایش دمای سطح در تابستان	تثبیت دما به وسیله پوشش بقایا، کاهش تنش حرارتی
تنوع زیستی خاک	کاهش جمعیت میکروارگانیسم ها و کرم های خاکی	افزایش فعالیت میکروبی و تقویت زیست بوم خاک
انتشار گازهای گلخانه ای	ناشی از تجزیه سریع ماده آلی و CO ₂ افزایش انتشار سوخت ماشین آلات	و ذخیره بیشتر کربن CO ₂ کاهش انتشار در خاک
مصرف انرژی و سوخت	بالا به دلیل عملیات مکرر خاک ورزی	پایین به دلیل کاهش تردد ماشین آلات
بهره وری مصرف آب (WUE)	پایین به دلیل تبخیر زیاد و رواناب بالا	بالا به دلیل حفظ رطوبت و نفوذ بهتر آب
تاب آوری در برابر تغییر اقلیم	آسیب پذیر در برابر خشکسالی و گرمایش زمین	مقاوم تر در برابر خشکسالی، کم آبی و نوسانات آب و هوایی

کشت مستقیم همچنین نقش مؤثری در کاهش تبخیر سطحی دارد. بقایای گیاهی که سطح خاک را می پوشانند، همانند یک لایه محافظ عمل می کنند و از رسیدن مستقیم تابش خورشید به خاک جلوگیری می پوشانند،

می‌نمایند. این پوشش طبیعی، دمای خاک را در روزهای گرم کاهش داده و نوسانات حرارتی خاک را نیز کمتر می‌کند. در نتیجه، رطوبت موجود در خاک مدت زمان بیشتری حفظ شده و نیاز گیاهان به آب کاهش می‌یابد. کاهش تبخیر سطحی به‌همراه افزایش نفوذپذیری خاک باعث می‌شود بارش‌های پراکنده و کوتاه‌مدت نیز به‌خوبی ذخیره شوند و در دوره‌های خشکسالی به‌کار آیند.

ارتباط کشت مستقیم با کاهش اثرات تغییر اقلیم نیز چندوجهی است. از یک سو، همان‌طور که گفته شد، این روش موجب افزایش ذخیره کربن خاک و کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن می‌شود. از سوی دیگر، با بهبود مدیریت آب و افزایش بهره‌وری مصرف آب، وابستگی کشاورزی به منابع آبی محدود کاهش می‌یابد و فشار بر سفره‌های زیرزمینی کمتر می‌شود. این امر به‌ویژه در کشورهایی که با بحران آب و تغییر اقلیم به‌طور هم‌زمان روبه‌رو هستند، اهمیتی دوچندان دارد. افزون بر آن، کشت مستقیم موجب بهبود تنوع زیستی خاک و افزایش جمعیت موجودات مفیدی نظیر کرم‌های خاکی و میکروارگانیسم‌ها می‌شود که به پایداری بیشتر اکوسیستم‌های کشاورزی کمک می‌کنند.

از منظر اقتصادی و اجتماعی نیز، این روش در بلندمدت هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد. گرچه در مراحل اولیه ممکن است کشاورزان با چالش‌هایی همچون کنترل علف‌های هرز یا نیاز به تجهیزات خاص مواجه شوند، اما در بلندمدت صرفه‌جویی در مصرف سوخت، کاهش تعداد عملیات خاکی، کاهش هزینه‌های آبیاری و بهبود عملکرد محصولات، مزایای قابل‌توجهی به‌همراه دارد. این مزایا، همراه با بهبود تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی در برابر تغییر اقلیم، سبب می‌شود کشت مستقیم به‌عنوان یک گزینه استراتژیک در سیاست‌های کلان مدیریت منابع آب و خاک معرفی شود.

در ارتباط با کم‌آبی، باید به این نکته اشاره کرد که کاهش شخم و کشت مستقیم نه‌تنها مصرف آب را کاهش می‌دهد بلکه کیفیت آب را نیز بهبود می‌بخشد. زمانی که رواناب سطحی کاهش یابد، ورود رسوبات، کودها و سموم به منابع آبی کمتر خواهد شد و در نتیجه کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی حفظ می‌گردد. این موضوع به‌ویژه در حوضه‌های آبریز حساس که منابع آب آن‌ها در معرض آلودگی قرار دارند اهمیت بالایی دارد. به‌علاوه، ذخیره بهتر آب در خاک موجب می‌شود محصولات کشاورزی کمتر به نوسانات بارندگی وابسته باشند و پایداری تولید در شرایط اقلیمی متغیر حفظ شود.

از منظر اکولوژیک، کشت مستقیم و کاهش شخم تأثیر مستقیمی بر کاهش پدیده جزایر حرارتی و تعدیل شرایط خرداقلیم مزرعه دارد. به‌دلیل پوشش بقایا و افزایش رطوبت خاک، دمای سطح زمین کمتر افزایش می‌یابد و تبخیر و تعرق کل اکوسیستم متعادل‌تر می‌شود. این شرایط علاوه بر کاهش نیاز آبی گیاهان، به کاهش بازتاب گازهای گلخانه‌ای و بهبود تعادل انرژی سطحی کمک می‌کند.

از دیدگاه مدیریت منابع خاک، کشت مستقیم فرآیند تخریب خاک را متوقف یا حداقل کند می‌کند. خاکی که تحت شخم مداوم قرار دارد، به مرور زمان دچار کاهش عمق لایه حاصلخیز، کاهش ظرفیت نگهداری آب، کاهش ماده آلی و در نهایت ناباروری می‌شود. در حالی که در سیستم‌های کشت مستقیم، خاک فرصت بازیابی

پیدا می‌کند و کیفیت آن در طول زمان ارتقا می‌یابد. به همین دلیل، این روش نه تنها برای کشاورزان بلکه برای نسل‌های آینده نیز سودمند است و به مفهوم توسعه پایدار نزدیک‌تر می‌شود. یکی دیگر از جنبه‌های مهم ارتباط کشت مستقیم با تغییر اقلیم، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است. در روش‌های مرسوم، ماشین‌آلات کشاورزی بارها برای شخم، دیسک‌زنی، تسطیح و سایر عملیات وارد مزرعه می‌شوند و این امر به مصرف زیاد سوخت و انتشار قابل توجه گازهای آلاینده منجر می‌گردد. در حالی که در کشت مستقیم، نیاز به تردد ماشین‌آلات به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و در نتیجه انتشار دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن و سایر گازهای مخرب کاهش پیدا می‌کند. این امر در مقیاس کلان می‌تواند اثر قابل‌توجهی بر کاهش ردپای کربنی بخش کشاورزی داشته باشد.

۱-۳-۶- اثرات بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، متان و اکسید نیتروژن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تغییر اقلیم شناخته شده‌اند و بخش کشاورزی سهم چشمگیری در این زمینه دارد. کشاورزی علاوه بر آنکه مصرف‌کننده اصلی منابع آب و خاک است، در فرآیندهای مختلف خود از جمله شخم، مصرف کود و سم، پرورش دام و استفاده از سوخت‌های فسیلی نیز به انتشار مستقیم و غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای دامن می‌زند. این وضعیت سبب شده است که نگاه جهانی به کشاورزی نه تنها به‌عنوان یک عامل تولید غذا بلکه به‌عنوان بخشی کلیدی از معادله تغییر اقلیم معطوف گردد. در چنین شرایطی، اتخاذ رویکردهای نوین برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشاورزی و در عین حال افزایش تاب‌آوری آن در برابر کم‌آبی و گرمایش زمین اهمیت دوچندان پیدا می‌کند.

یکی از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشاورزی، عملیات خاک‌ورزی و شخم است. هنگامی که خاک به‌طور مداوم شخم زده می‌شود، کربن آلی خاک که در قالب ماده آلی و بقایای گیاهی ذخیره شده است، در معرض اکسیژن قرار می‌گیرد و به سرعت اکسید می‌شود. این فرایند سبب آزاد شدن مقادیر زیادی دی‌اکسیدکربن به جو می‌گردد و نقش مستقیمی در افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای دارد. در مقابل، روش‌هایی همچون کشاورزی حفاظتی، کشت مستقیم و کاهش شخم می‌توانند این روند را معکوس کنند. باقی‌ماندن بقایای گیاهی روی سطح خاک و کاهش اختلاط آن‌ها با لایه‌های زیرین، موجب می‌شود تجزیه آلی کندتر صورت گیرد و کربن برای مدت‌زمان طولانی‌تری در خاک تثبیت گردد. این امر نه تنها میزان انتشار CO₂ را کاهش می‌دهد بلکه ظرفیت ذخیره کربن خاک را نیز ارتقا می‌بخشد و به‌عنوان یک راهبرد پایدار برای کاهش اثرات تغییر اقلیم عمل می‌کند.

منبع دیگر انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشاورزی مصرف کودهای شیمیایی است. استفاده بی‌رویه از کودهای نیتروژنه باعث افزایش انتشار اکسید نیتروژن (N₂O) می‌شود که اثر گرمایش آن حدود ۳۰۰ برابر دی‌اکسیدکربن است. در روش‌های نوین کشاورزی حفاظتی، به دلیل بهبود چرخه مواد غذایی و افزایش فعالیت

میکروبی، کارایی مصرف کود افزایش می‌یابد و بخشی از نیاز غذایی گیاه توسط مواد آلی و تجزیه بقایا تأمین می‌شود. این وضعیت موجب کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و در نتیجه کاهش انتشار اکسید نیتروژن می‌گردد. همچنین استفاده از کودهای آلی، کمپوست و روش‌های تلفیقی تغذیه گیاهی باعث می‌شود چرخه نیتروژن در مزرعه پایدارتر شود و میزان گازهای گلخانه‌ای مرتبط با آن کاهش یابد.

از سوی دیگر، تولید و مصرف انرژی در کشاورزی نیز عامل مهمی در انتشار گازهای گلخانه‌ای است. عملیات متعدد خاک‌ورزی، آبیاری‌های سنگین، استفاده از ماشین‌آلات و انتقال نهاده‌ها همگی به مصرف بالای سوخت‌های فسیلی وابسته‌اند و در نهایت منجر به انتشار CO_2 و سایر گازهای آلاینده می‌شوند. در کشاورزی حفاظتی، با حذف یا کاهش عملیات خاک‌ورزی و کاهش دفعات ورود ماشین‌آلات به مزرعه، مصرف انرژی به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، با افزایش بهره‌وری مصرف آب، نیاز به پمپاژهای سنگین و مکرر کاهش می‌یابد و در نتیجه مصرف سوخت و انرژی در سامانه‌های آبیاری نیز کمتر می‌شود. کاهش مصرف انرژی در کنار بهبود ذخیره کربن خاک، دو مسیر مکمل برای کاهش ردپای کربنی کشاورزی هستند.

ارتباط کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با کاهش اثرات تغییر اقلیم بسیار مستقیم است. کاهش انتشار CO_2 ، CH_4 و N_2O سبب می‌شود نرخ گرمایش جهانی کندتر شود و شدت پدیده‌های اقلیمی چون موج‌های گرمایی، خشکسالی‌های طولانی‌مدت، بارش‌های سیل‌آسا و نوسانات شدید دمايي کاهش یابد. در سطح محلی، این کاهش انتشار موجب بهبود شرایط خرداقلیم مزارع نیز می‌گردد. برای نمونه، خاکی که دارای کربن و ماده آلی بیشتری است، دمای سطحی کمتری دارد، رطوبت بیشتری ذخیره می‌کند و می‌تواند محیط زیست مناسب‌تری برای گیاهان و میکروارگانیسم‌ها فراهم آورد. این شرایط موجب می‌شود محصولات کشاورزی تاب‌آوری بیشتری در برابر تنش‌های اقلیمی داشته باشند و امنیت غذایی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی تقویت شود.

از منظر ارتباط با بحران کم‌آبی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌طور غیرمستقیم در مدیریت بهتر آب نیز مؤثر است. تغییر اقلیم ناشی از گازهای گلخانه‌ای موجب افزایش دمای هوا، تشدید تبخیر و ترق و تغییر الگوی بارش‌ها می‌شود. این وضعیت در بسیاری از مناطق جهان به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک باعث کاهش منابع آبی قابل دسترس شده است. با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و کند شدن روند تغییر اقلیم، شدت این پدیده‌ها کاهش می‌یابد و فشار بر منابع آبی کمتر می‌شود. به بیان دیگر، هر اقدامی که به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود، به‌طور غیرمستقیم در کاهش بحران کم‌آبی و ارتقای پایداری منابع آبی نیز نقش دارد (جدول ۵-۶).

افزون بر این، روش‌های کشاورزی پایدار که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند، معمولاً بهره‌وری مصرف آب را نیز افزایش می‌دهند. برای مثال، کشت مستقیم با حفظ بقایای گیاهی روی سطح خاک، تبخیر را کاهش داده و نفوذ آب را افزایش می‌دهد. این شرایط موجب می‌شود بارش‌های طبیعی کارایی بیشتری در تأمین نیاز آبی گیاه داشته باشند و نیاز به آبیاری‌های مکرر کمتر شود. همچنین بهبود ساختار خاک در اثر افزایش ماده آلی باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌شود (جدول ۵-۶). بنابراین، در حالی که انتشار گازهای

گلخانه‌ای کاهش می‌یابد، بحران کم‌آبی نیز هم‌زمان مدیریت می‌شود و این دو فرآیند به‌صورت مکمل هم عمل می‌کنند.

نقش دامداری نیز در این میان حائز اهمیت است. نشخوارکنندگان در فرآیند هضم خود مقادیر زیادی متان تولید می‌کنند که یکی از قوی‌ترین گازهای گلخانه‌ای است. مدیریت بهینه تغذیه دام، استفاده از افزودنی‌های خوراکی کاهش‌دهنده متان و بهبود کارایی تولیدی می‌تواند سهم این بخش را در انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش دهد. از سوی دیگر، کود حیوانی اگر به‌درستی مدیریت نشود، منبع مهمی برای انتشار اکسید نیتروژن است. اما در سیستم‌های کشاورزی یکپارچه و پایدار، کود حیوانی به‌عنوان منبع آلی برای بهبود خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد و بخشی از چرخه کربن و نیتروژن را کامل می‌سازد. این امر هم به کاهش گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند و هم موجب افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود نگهداری آب می‌گردد.

جدول ۵-۶. زنجیره اثرات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بر تغییر اقلیم، کم‌آبی و کشاورزی پایدار

مرحله	فرآیند کلیدی	پیامد مستقیم	پیامد نهایی
کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	کاهش CO_2 ناشی از شخم، CH_4 ناشی از دامداری، N_2O ناشی از مصرف کود	کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو	کند شدن روند گرمایش زمین
کاهش شدت تغییر اقلیم	کاهش میانگین دمای هوا و تعادل در چرخه بارش	کاهش تبخیر و تعرق و کاهش خشکسالی‌های شدید	تعدیل نوسانات اقلیمی و پایداری بیشتر
مدیریت بحران کم‌آبی	افزایش نفوذ و نگهداری آب در خاک، کاهش تبخیر سطحی، کاهش فشار بر منابع زیرزمینی	بهبود دسترسی به آب برای محصولات	کاهش نیاز به آبیاری و افزایش بهره‌وری مصرف آب
بهبود پایداری کشاورزی	افزایش حاصلخیزی خاک، ارتقای ماده آلی، تقویت تنوع زیستی	افزایش عملکرد و کیفیت محصولات در شرایط تنش	امنیت غذایی پایدار در شرایط اقلیم متغیر

از منظر سیاست‌گذاری، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کشاورزی می‌تواند نقش مؤثری در دستیابی به تعهدات بین‌المللی کشورها در زمینه تغییر اقلیم ایفا کند. بسیاری از توافق‌نامه‌های جهانی نظیر توافق پاریس بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تأکید دارند و کشاورزی یکی از بخش‌های کلیدی در این زمینه است. سرمایه‌گذاری در روش‌های کشاورزی حفاظتی و پایدار نه تنها به کاهش انتشار گازها کمک می‌کند بلکه هم‌زمان امنیت غذایی و منابع آبی را نیز تضمین می‌نماید.

در نهایت باید گفت که اثرات کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بر تغییر اقلیم و کم‌آبی به‌صورت زنجیره‌ای و چندلایه ظاهر می‌شود. کاهش انتشار به معنای کاهش شدت گرمایش زمین است، و این خود به معنای کاهش شدت خشکسالی‌ها، تبخیر و تغییرات الگوی بارش خواهد بود. بهبود شرایط اقلیمی موجب کاهش فشار بر منابع آب می‌شود و این امر به پایداری تولیدات کشاورزی کمک می‌کند. در عین حال، روش‌هایی که انتشار

گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند، غالباً موجب افزایش کارایی مصرف آب، بهبود کیفیت خاک و افزایش ذخیره کربن می‌شوند که همگی به کاهش کم‌آبی و ارتقای تاب‌آوری کشاورزی کمک می‌نمایند. به بیان دیگر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نه تنها یک هدف زیست‌محیطی برای مقابله با تغییر اقلیم است بلکه یک راهبرد حیاتی برای مدیریت بحران کم‌آبی نیز محسوب می‌شود. کشاورزی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع انتشار و در عین حال یکی از بزرگ‌ترین قربانیان تغییر اقلیم و کم‌آبی، نقشی دوگانه و تعیین‌کننده در این فرآیند دارد. حرکت به‌سوی سیستم‌های کشاورزی کم‌کربن، پایدار و مبتنی بر حفاظت از خاک و آب، آینده‌ای ایمن‌تر برای منابع طبیعی و امنیت غذایی جهان رقم خواهد زد.

۴-۶- جمع‌بندی و تحقیقات آینده

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده نشان داده‌اند که رویکردهای نوین مبتنی بر کشاورزی حفاظتی قادرند هم‌زمان چندین هدف کلان شامل کاهش فشار بر منابع طبیعی، افزایش بهره‌وری آب و خاک، ارتقای ظرفیت ذخیره کربن، و کاهش ردپای کربنی بخش کشاورزی را دنبال کنند. اما در عین حال، این یافته‌ها نیازمند تکمیل، تعمیق و بومی‌سازی در شرایط اقلیمی و اجتماعی مختلف هستند تا بتوانند از مرحله توصیه‌های پژوهشی به راهکارهای اجرایی فراگیر تبدیل شوند.

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این حوزه تأیید نقش کلیدی مدیریت خاک در کاهش تغییر اقلیم است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ذخیره‌سازی کربن در خاک می‌تواند به‌عنوان یکی از مؤثرترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های کاهش دی‌اکسید کربن جوی عمل کند. افزایش ماده آلی خاک علاوه بر بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن، ظرفیت نگهداری آب را افزایش داده و تاب‌آوری محصولات را در برابر خشکی ارتقا می‌دهد. با این حال، در بسیاری از مناطق هنوز داده‌های کافی درباره پایداری این کربن ذخیره‌شده در بلندمدت وجود ندارد. اینکه چه میزان کربن می‌تواند در انواع خاک‌ها و تحت شرایط مدیریتی مختلف تثبیت شود، چه مدت در خاک باقی می‌ماند، و چه عواملی ممکن است موجب آزادسازی دوباره آن شوند، پرسش‌هایی هستند که باید در تحقیقات آینده به‌طور عمیق بررسی شوند.

دومین یافته مهم این است که کاهش یا حذف شخم، نه تنها انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد بلکه از نظر مدیریت آب نیز دستاوردهای قابل‌توجهی دارد. بقایای گیاهی سطح خاک همچون یک پوشش محافظ عمل کرده و تبخیر را کاهش می‌دهند، ضمن آنکه نفوذپذیری خاک را افزایش می‌دهند. اما چالش مهمی که در اینجا مطرح می‌شود، مدیریت علف‌های هرز در سیستم‌های بدون شخم است. تحقیقات نشان داده‌اند که در مراحل اولیه گذار به کشت مستقیم، علف‌های هرز می‌توانند به‌طور جدی عملکرد محصولات را تهدید کنند. بنابراین، تحقیقات آینده باید بر توسعه روش‌های تلفیقی مدیریت علف‌های هرز متمرکز شوند تا نیاز به علف‌کش‌های شیمیایی کاهش یابد و پایداری زیست‌محیطی این نظام‌ها حفظ گردد. استفاده از تناوب‌های زراعی متنوع، کشت گیاهان پوششی و بهره‌گیری از ابزارهای مکانیکی کم‌هزینه می‌تواند بخشی از این راهکارها باشد، اما نیاز به آزمون و بومی‌سازی آن‌ها در شرایط مختلف وجود دارد.

نکته دیگر که در جمع‌بندی اهمیت دارد، ارتباط مستقیم میان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بحران کم‌آبی است. تغییر اقلیم ناشی از افزایش این گازها الگوهای بارندگی را دگرگون کرده و شدت خشکسالی‌ها را افزایش می‌دهد. هرگونه اقدام در جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به‌طور غیرمستقیم به کاهش شدت بحران کم‌آبی نیز منجر می‌شود. در عین حال، روش‌هایی که به کاهش این انتشار کمک می‌کنند، معمولاً به افزایش بهره‌وری مصرف آب نیز منجر می‌شوند. برای مثال، کشاورزی حفاظتی با حفظ رطوبت و افزایش ذخیره آب در خاک، هم فشار بر منابع آبی را کاهش می‌دهد و هم از آزادسازی کربن اضافی جلوگیری می‌کند. این هم‌افزایی میان مدیریت آب و کربن یکی از نقاط قوت کشاورزی حفاظتی است که باید در تحقیقات آینده بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

از منظر اقتصادی و اجتماعی، تحقیقات آینده باید بر روی پذیرش کشاورزان و موانع ترویج این روش‌ها تمرکز کند. اگرچه مزایای کشاورزی حفاظتی از نظر علمی و زیست‌محیطی اثبات شده است، اما کشاورزان در عمل با چالش‌هایی همچون هزینه‌های اولیه بالا، نیاز به تجهیزات خاص، کمبود دانش فنی و ریسک‌پذیری پایین مواجه‌اند. بنابراین، پژوهش‌های بین‌رشته‌ای که عوامل اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی پذیرش این روش‌ها را بررسی کنند، می‌توانند نقش مهمی در ترویج آن‌ها ایفا نمایند. همچنین مطالعات آینده باید اثرات بلندمدت این روش‌ها را بر درآمد، اشتغال و رفاه کشاورزان ارزیابی کنند تا شواهد کافی برای سیاست‌گذاری و سرمایه‌گذاری در این حوزه فراهم شود.

از دیدگاه تغییر اقلیم، تحقیقات آینده باید بیش از پیش بر اثرات تجمعی و منطقه‌ای تمرکز کنند. تاکنون بسیاری از مطالعات در مقیاس مزرعه یا منطقه‌ای محدود انجام شده‌اند، اما برای تدوین سیاست‌های ملی و جهانی نیاز به مدل‌سازی‌های کلان‌مقیاس وجود دارد. این مدل‌ها باید اثرات ترکیبی کشاورزی حفاظتی بر چرخه کربن، چرخه آب، تولید غذا و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌صورت یکپارچه در نظر بگیرند. چنین مدل‌سازی‌هایی می‌تواند به کشورها کمک کند تا سهم واقعی کشاورزی در کاهش تغییر اقلیم را برآورد کنند و اهداف واقع‌بینانه‌ای برای تعهدات بین‌المللی خود تعیین نمایند.

از منظر فناوری نیز، آینده تحقیقات باید به سمت نوآوری‌هایی برود که اجرای کشاورزی حفاظتی را کارآمدتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر کند. برای نمونه، توسعه ماشین‌آلات کم‌هزینه برای کاشت مستقیم، سامانه‌های آبیاری هوشمند متناسب با خاک‌های پرکربن، حسگرهای رطوبتی و کربنی، و فناوری‌های سنجش از دور می‌تواند به بهبود مدیریت مزارع کمک کند. همچنین استفاده از هوش مصنوعی و کلان‌داده‌ها برای پیش‌بینی نیازهای آبی و کودی در سیستم‌های بدون شخم، افق‌های تازه‌ای برای تحقیقات و کاربردهای عملی ایجاد خواهد کرد. در حوزه بیولوژیکی، پژوهش‌های آینده باید به بررسی نقش میکروارگانیسم‌های خاک در تثبیت کربن و چرخه مواد غذایی بپردازند. شواهد اولیه نشان می‌دهد که تنوع و تراکم میکروبی در سیستم‌های کشاورزی حفاظتی بیشتر است و این موجودات نقشی کلیدی در پایداری کربن و آب ایفا می‌کنند. اما هنوز سازوکارهای دقیق این روابط به‌طور کامل شناخته نشده است. مطالعه این سازوکارها می‌تواند به توسعه استراتژی‌هایی برای افزایش ظرفیت خاک در ذخیره کربن و نگهداری آب منجر شود.

همچنین، پژوهش‌های آینده باید به اثرات هم‌افزای کشاورزی حفاظتی با سایر فناوری‌های نوین کشاورزی بپردازند. برای مثال، ترکیب کشاورزی حفاظتی با اصلاح ژنتیکی گیاهان برای مقاومت به خشکی، یا استفاده از نانوکودها برای افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی، می‌تواند اثربخشی این رویکردها را چند برابر کند. در عین حال، ارزیابی اثرات زیست‌محیطی این ترکیبات جدید نیز باید بخشی از برنامه‌های تحقیقاتی باشد تا از بروز مشکلات ناخواسته جلوگیری شود.

در جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که کشاورزی حفاظتی و روش‌های وابسته به آن، یکی از مؤثرترین رویکردها برای مقابله با تغییر اقلیم و کم‌آبی به‌شمار می‌روند. این روش‌ها نه تنها موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند بلکه با افزایش ذخیره کربن خاک، بهبود ظرفیت نگهداری آب، کاهش تبخیر، کاهش فرسایش و افزایش تنوع زیستی خاک، یک بسته کامل از خدمات زیست‌محیطی را ارائه می‌دهند. اما برای تبدیل این پتانسیل‌ها به واقعیت، تحقیقات آینده باید به‌صورت جامع، بین‌رشته‌ای و کاربردی دنبال شود. تمرکز بر پایداری بلندمدت ذخیره کربن، مدیریت علف‌های هرز در سیستم‌های بدون شخم، مدل‌سازی‌های کلان‌مقیاس، نوآوری‌های فناورانه، بررسی عوامل اجتماعی و اقتصادی پذیرش، و مطالعه نقش میکروارگانیسم‌های خاک از جمله حوزه‌های کلیدی هستند که آینده تحقیقات را شکل خواهند داد.

بدون شک، مسیر دستیابی به کشاورزی پایدار و تاب‌آور در برابر تغییر اقلیم و کم‌آبی از دل چنین پژوهش‌هایی عبور می‌کند. با تکیه بر دانش روز، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، و درک عمیق‌تر از تعاملات پیچیده میان خاک، آب، گیاه و اقلیم، می‌توان به آینده‌ای امیدوار بود که در آن کشاورزی نه تنها قربانی تغییر اقلیم نباشد بلکه به بخشی از راه‌حل جهانی برای این بحران‌ها تبدیل شود.

منابع

- کوچکی ع و نصیری محلاتی م، ۱۳۸۷. تاثیر تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت CO₂ بر عملکرد گندم در ایران و ارزیابی راهکارهای سازگاری. مجله پژوهش‌های زراعی ایران. جلد ششم. صفحه‌های ۱۳۹ تا ۱۵۳.
- کوچکی ع. نصیری محلاتی م، و کمالی غ ع، ۱۳۸۵. تغییر اقلیم و تولید گندم دیم در ایران. مجله پژوهش‌های زراعی ایران. جلد هشتم. صفحه‌های ۵۰۸ تا ۵۲۰.
- کوچکی ع، نصیری محلاتی م، مرادی ر، علی زاده ی، ۱۳۹۱. اثر سطوح مختلف نیتروژن بر عملکرد و کارایی مصرف نیتروژن در کشت مخلوط ذرت و پنبه. مجله پژوهش‌های زراعی ایران. جلد نهم: در دست چاپ.
- نصیری محلاتی م، کوچکی ع، کمالی غ و مرعشی ح، ۱۳۸۵. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شاخص‌های اقلیمی کشاورزی ایران. مجله علوم و صنایع کشاورزی. جلد بیستم. صفحه‌های ۷۱ تا ۸۲.
- Abbadi, A., Shekari, F. and Mustafavi, S. H. (2015). Effect of paclobutrazol and salicylic acid on antioxidants enzyme activity in drought stress in wheat. *Idesia*. 33: 5–13.
- Abbasi, N., Mirzaie-Asl, A. and Khodaei, L. (2021). The effect of drought stress on antioxidant enzymes activity and artemisinin content in wormwood (*Artemisia siberi*). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*.
- Abid, M., Tian, Z., Ata-Ul-Karim, S. T., Liu, Y., Cui, Y., Zahoor, R. and Dai, T. (2016). Improved tolerance to post-anthesis drought stress by pre-drought priming at vegetative stages in drought-tolerant and-sensitive wheat cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 106:218-227.
- Álvarez, S., Rodríguez, P., Broetto, F. and Sánchez-Blanco, M. J. (2018). Long term responses and adaptive strategies of *Pistacia lentiscus* under moderate and severe deficit irrigation and salinity:

- Osmotic and elastic adjustment, growth, ion uptake and photosynthetic activity. *Agricultural Water Management*, 202:253-262.
- Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M. and Lee, D. J. (2018). Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. *Silicon*, 10(2):177-183.
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Tanveer, M., Khan, I., Hussain, S., Shahzad, B. and Wang, L. C. (2017). Drought induced changes in growth, osmolyte accumulation and antioxidant metabolism of three maize hybrids. *Frontiers in Plant Science*, 8.
- Ariano, S., Bartolomeo, D., Cristos, X. and Andras, M. (2005). Antioxidant defences in Olive tree during drought stress: changes in activity of some antioxidant enzymes. *Functional plant Biology*. 32:45-53.
- Arndt, S. K., Clifford, S. C., Wanek, W., Jones, H. G. and Popp, M. (2001). Physiological and morphological adaptations of the fruit tree *Ziziphus rotundifolia* in response to progressive drought stress. *Tree Physiology*, 21(11):705-715.
- Ashraf, M. H. P. J. C. and Harris, P. J. (2013). Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica*, 51(2), 163-190.
- Askari, A., Ardakani, M. R., Vazan, S., Paknejad, F. and Hosseini, Y. (2018). The effect of mycorrhizal symbiosis and seed priming on the amount of chlorophyll index and absorption of nutrients under drought stress in sesame plant under field conditions. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(1):335-357.
- Batool, T., Ali, S., Seleiman, M. F., Naveed, N. H., Ali, A., Ahmed, K. and Mubushar, M. (2020). Plant growth promoting rhizobacteria alleviates drought stress in potato in response to suppressive oxidative stress and antioxidant enzymes activities. *Scientific Reports*, 10(1):1-19.
- Beck, E. H., Fettig, S., Knake, C., Hartig, K. and Bhattarai, T. (2007). Specific and unspecific responses of plants to cold and drought stress. *Journal of Biosciences*, 32(3):501-510.
- Bielach, A., Hrtan, M. and Tognetti, V. B. (2017). Plants under stress: involvement of auxin and cytokinin. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(7):1427.
- Biyare, V., Shekari, F., Seifzadeh, S., Zakerin, H. and Hadidi, E. (2020). Effect of Foliar Application of Salicylic Acid on Yield and Yield Components of Pumpkin under Different Water Deficiencies. *Journal of Crop Ecophysiology*, 14(54(2)):173-192.
- Blum, A. (2011). Plant water relations, plant stress and plant production. In *Plant Breeding for Water-Limited Environments* (pp. 11-52). Springer, New York, NY.
- Boulard, T., Roy, J. C., Pouillard, J. B., Fatnassi, H. and Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158:110-133.
- Chamani, F., Tohidi Nejad, E. and Mahiji, M. (2019). Effect of drought tension and salicylic acid on some morphophysiological and agronomic traits of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.). *Crop Physiology Journal*. 10 (40): 5-18
- Chen, W., Yao, X., Cai, K. and Chen, J. (2011). Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research*, 142(1):67-76.
- Cruz de Carvalho, M. H. (2008). Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling. *Plant Signaling and Behavior*, 3(3):156-165.
- da Silva Lobato, A. K., de Oliveira Neto, C. F., dos Santos Filho, B. G., Da Costa, R. C. L., Cruz, F. J. R., Neves, H. K. B. and dos Santos Lopes, M. J. (2008). Physiological and biochemical behavior in soybean (*Glycine max* cv. Sambaiba) plants under water deficit. *Australian Journal of Crop Science*, 2: 25-32.
- Danaee, E. and Abdossi, V. (2021). The effects of drought stress and sodium nitroprusside on growth indices and enzymatic activity of *Satureja hortensis*. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*.
- Daryanto, S., Wang, L. and Jacinthe, P. A. (2017). Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*, 179:18-33.
- Das, D., Prakash, P., Rout, P. K. and Bhaladhare, S. (2021). Synthesis and Characterization of Superabsorbent Cellulose-Based Hydrogel for Agriculture Application. *Starch-Stärke*, 73(1-2):1900284.

- Dehghanzadeh, H. and Adavi, Z. (2019). Effect of salicylic acid and humic acid on some physiological characteristics and yield of forage maize (*Zea mays* L.) under drought tension conditions. *Crop Physiology Journal*, 10(40): 35-54.
- Dinar, A., & Mendelsohn, R. O. (Eds.). (2011). *Handbook on climate change and agriculture*. Edward Elgar Publishing.
- Dobra, J., Motyka, V., Dobrev, P., Malbeck, J., Prasil, I. T., Haisel, D. and Vankova, R. (2010). Comparison of hormonal responses to heat, drought and combined stress in tobacco plants with elevated proline content. *Journal of Plant Physiology*, 167(16):1360-1370.
- Ebadi, N., Seyed Sharifi, R., Narimani, H. and Khalilzadeh, R. (2021). Effects of supplementary irrigation and application of mycorrhiza and azetobacter on grain filling components of rain fed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 16(61):64-79.
- Eneji, A. E., Inanaga, S., Muranaka, S., Li, J., Hattori, T., An, P. and Tsuji, W. (2008). Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. *Journal of Plant Nutrition*, 31(2):355-365.
- Etesami, H. and Jeong, B. R. (2018). Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147:881-896.
- Ezati, N., Maleki, A. and Fathi, A. (2020). Effect of drought stress and spraying of gibberellic acid and salicylic acid on the quantitative and qualitative yield of canola (*Brassica napus*). *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 14(56):94-109.
- Fahad, S., Hussain, S., Bano, A., Saud, S., Hassan, S., Shan, D. and Huang, J. (2015). Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses: consequences for changing environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(7):4907-4921.
- Fahad, S., Saud, S., Nawaz, T., Gu, L., Ahmad, M., & Zhou, R. (Eds.). (2024). *Environment, climate, plant and vegetation growth* (pp. 609-630). Springer.
- Farooq, M., Gogoi, N., Barthakur, S., Baroowa, B., Bharadwaj, N., Alghamdi, S. S. and Siddique, K. H. M. (2017). Drought stress in grain legumes during reproduction and grain filling. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(2):81-102.
- Farooq, M., Hussain, M. and Siddique, K. H. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical reviews in plant sciences*, 33(4):331-349.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A. and Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Sustainable Agriculture*, 153-188.
- Fathi, A. and Kardon, F. (2020). The importance of quinoa (*Chenopodium Quinoa willd.*) cultivation in developing countries: A review. *Cercetari Agronomice în Moldova*. 3 (183): 337-356.
- Fathi, A. and Tari, D. B. (2016). Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International Journal of Life Sciences*, 10(1):1-6.
- Fathi, A., Farnia, A. and Maleki, A. (2016). Effects of biological nitrogen and phosphorus fertilizers on vegetative characteristics, dry matter and yield of corn. *Applied Field Crops Research*, 29(1):1-7.
- Galindo, A., Collado-González, J., Griñán, I., Corell, M., Centeno, A., Martín-Palomo, M. J. and Pérez-López, D. (2018). Deficit irrigation and emerging fruit crops as a strategy to save water in Mediterranean semiarid agrosystems. *Agricultural Water Management*, 202:311-324.
- Ghai, N. Setia, R. C. and Setia, N. (2002). Effect of paclobutrazol and salicylic acid on chlorophyll content, hill activity and yield components in *Brescia napus* L. (cv. GSL-1) *Phytomorphology*. 52: 83- 87.
- Ghanbari, M., Mokhtassi-Bidgoli, A. and Talebi-Siah Saran, P. (2019). The effect of bio-fertilizers on yield component, yield, protein and oil in soybean (*Glycine max* Merrill) under different irrigation regimes. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 13(52):1-15.
- Ghosh, D. and Xu, J. (2014). Abiotic stress responses in plant roots: a proteomics perspective. *Frontiers in Plant Science*, 5:6.
- Goche, T., Shargie, N. G., Cummins, I., Brown, A. P., Chivasa, S. and Ngara, R. (2020). Comparative physiological and root proteome analyses of two sorghum varieties responding to water limitation. *Scientific Reports*, 10(1):1-18.
- Gong, H. J., Chen, K. M., Zhao, Z. G., Chen, G. C. and Zhou, W. J. (2008). Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. *Biologia Plantarum*, 52(3):592-596.

- Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S. and Zhang, C. (2005). Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 169(2):313-321.
- Gray, S. B. and Brady, S. M. (2016). Plant developmental responses to climate change. *Developmental Biology*, 419(1):64-77.
- Hussain, S., Hussain, S., Qadir, T., Khaliq, A., Ashraf, U., Parveen, A. and Rafiq, M. (2019). Drought stress in plants: An overview on implications, tolerance mechanisms and agronomic mitigation strategies. *Plant Science Today*, 6(4):389-402.
- Idso, S. B., & Idso, C. D. (2007). Carbon Dioxide and Global Change: Separating Scientific Fact from Personal Opinion.
- Ijaz, R., Ejaz, J., Gao, S., Liu, T., Imtiaz, M., Ye, Z. and Wang, T. (2017). Overexpression of annexin gene *AnnSp2*, enhances drought and salt tolerance through modulation of ABA synthesis and scavenging ROS in tomato. *Scientific Reports*, 7(1):1-14.
- Jain, S. K., & Singh, V. P. (2023). *Water resources systems planning and management*. Elsevier.
- Janni, M., Maestri, E., Gullì, M., Marmioli, M., & Marmioli, N. (2024). Plant responses to climate change, how global warming may impact on food security: a critical review. *Frontiers in plant science*, 14, 1297569.
- Karami Chame, S., Khalil-Tahmasbi, B., ShahMahmoodi, P., Abdollahi, A., Fathi, A., Seyed Mousavi, S.J. and Bahamin, S. (2016). Effects of salinity stress, salicylic acid and *Pseudomonas* on the physiological characteristics and yield of seed beans (*Phaseolus vulgaris*). *Scientia*, 14(2): 234-238.
- Karami, H., Maleki, A. and Fathi, A. (2018). Determination effect of mycorrhiza and vermicompost on accumulation of seed nutrient elements in maize (*Zea mays* L.) affected by chemical fertilizer. *Journal of Crop Nutrition Science*, 4(3):15-29.
- KaviKishor, P.B., Sangam, S., Amrutha, R.N., Sri Laxmi, P., Naidu, K.R. and Rao, K. (2005). Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: Its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current Science*, 88: 424-438.
- Kaya, C., Ashraf, M., Alyemeni, M. N., Corpas, F. J. and Ahmad, P. (2020). Salicylic acid-induced nitric oxide enhances arsenic toxicity tolerance in maize plants by upregulating the ascorbate-glutathione cycle and glyoxalase system. *Journal of Hazardous Materials*, 399:123020.
- Kheiri Sis, M., Jahanbakhsh Godehkahriz, S. and Raeesi sadati, S. (2021). Putrescine impact in increasing the tolerance of plants to drought stress on some of Biochemical Parameters in wheat. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 34(2):464-478.
- ki, K. and Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. *Frontiers in Plant Science*, 5:86.
- Kim, Y., Chung, Y. S., Lee, E., Tripathi, P., Heo, S. and Kim, K. H. (2020). Root response to drought stress in rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 21(4):1513.
- Kovacik, J., Klejdus, B., Babula, P. and Jarosova, M. (2014). Variation of antioxidants and secondary metabolites in nitrogen-deficient barely plants. *Journal of Plant Physiology*, 171: 260-268.
- Lichtenthaler, H. K. and Babani, F. (2000). Detection of photosynthetic activity and water stress by imaging the red chlorophyll fluorescence. *Plant Physiology and Biochemistry*, 38(11):889-895.
- Li-ping, B., Fang-Gong, S., Ti-Da, G., Zhao-Hui, S., Yin-Yan, L. and Guang-Sheng, Z. (2006). Effect of soil drought stress on leaf water status, membrane permeability and enzymatic antioxidant system of maize. *Soil Science Society of China*. 16(3): 326-332.
- López-Galiano, M. J., García-Robles, I., González-Hernández, A. I., Camañes, G., Vicedo, B., Real, M. D. and Rausell, C. (2019). Expression of miR159 is altered in tomato plants undergoing drought stress. *Plants*, 8(7):201.
- Maleki, A. and Fathi, A. (2019). Multivariate Statistical Analysis to Yield of Canola under Drought Stress and Spraying of Gibberellin and Salicylic Acid. *Journal of Crop Nutrition Science*, 5(3), 1-11.
- Maleki, A., Fathi, A. and Bahamin, S. (2020). The effect of gibberellin hormone on yield, growth indices, and biochemical traits of corn (*Zea Mays* L.) under drought stress. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 15(59):1-16.
- Maleki, A., Heidari, A., Siadat, A., Tahmasebi, A. and Fathi, A. (2011). Effect of supplementary irrigation on yield, yield components and protein percentages of chickpea cultivars in Ilam, Iran. *Journal of Crop Ecophysiology* 5(3): 65-75.

- Maleki, A., Naderi, A., Naseri, R., Fathi, A., Bahamin, S. and Maleki, R. (2013). Physiological performance of soybean cultivars under drought stress. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 2(6):38-44.
- Marcin'ska, I., Czyczyło-Mysza, I., Skrzypek, E., Filek, M., Grzesiak, S., Grzesiak, M.T., Janowiak, F., Hura, T., Dziurka, M., Dziurka, K., Nowakowska, A. and Quarrie, S.A. (2013). Impact of osmotic stress on physiological and biochemical characteristics in drought-susceptible and drought-resistant wheat genotypes. *Acta Physiology Plant*, 35: 451-461.
- Martínez-Vilalta, J. and García-Fórner, N. (2017). Water potential regulation, stomatal behaviour and hydraulic transport under drought: deconstructing the iso/anisohydric concept. *Plant, Cell & Environment*, 40(6):962-976.
- Miller, G., Suzuki, N. and Ciftci-Yilmaz, S. (2010). Reactive oxygen species homeostasis and signaling during drought and salinity stresses. *Plant Cell and Enviro* 33: 453-467.
- Miranda, M. T., Da Silva, S. F., Silveira, N. M., Pereira, L., Machado, E. C. and Ribeiro, R. V. (2021). Root osmotic adjustment and stomatal control of leaf gas exchange are dependent on citrus rootstocks under water deficit. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40(1):11-19.
- Mirzaei, A., Naseri, R., Torab Miri, S. M., Soleymani Fard, A. and Fathi, A. (2018). Reaspose of Yield and Yield Components of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Cultivars to the Application of Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Nitrogen Chemical Fertilizer under Rainfed Conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(44 (4)):775-790.
- Mohammadi, A., Habibi, D., Rohami, M. and Mafakheri, S. (2011). Effect of drought stress on antioxidant enzymes activity of some chickpea cultivars. *American-Eurasian Journal Agricultural and Environmental Science*, 11(6): 782-785.
- Movludi, A., Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., Davari, M. and Parmoon, G.H. (2014). The effect of water deficit and nitrogen on the antioxidant enzymes activity and quantum yield of barley (*Hordeum vulgare*). *Notulae Botanicae Hortical Agrobotanici Cluj-Napoca*, 42:398-404.
- Naseri, R., Soleymani Fard, A., Mirzaei, A., Darabi, F. and Fathi, A. (2020). The effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria on activities of antioxidative enzymes, physiological characteristics and root growth of four chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under dry land conditions of Ilam province. *Iranian Journal Pulses Research*, 10(2):62-76.
- Nazim, M., Ali, M., Shahzad, K., Ahmad, F., Nawaz, F., Amin, M. and Datta, R. (2021). Kaolin and Jasmonic acid improved cotton productivity under water stress conditions. *Saudi Journal of Biological Sciences*.
- Noctor, G., Veljovic-Jovanovic, S. and Foyer, C. H. (2000). Peroxide processing in photosynthesis: antioxidant coupling and redox signalling. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 355(1402):1465-1475.
- Nolla, A., de Faria, R. J., Korndorfer, G. H. and da Silva, T. B. (2012). Effect of silicon on drought tolerance of upland rice. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10(1 part 1):269-272.
- O'Connell, E. (2017). Towards adaptation of water resource systems to climatic and socio-economic change. *Water Resources Management*, 31(10):2965-2984.
- Olle, M. (2014). The effect of Silicon on the organically grown cucumber transplants growth and quality. In *World Fertilizer Congress*, 16: 90.
- Osuagwu, G. G. E., Edeoga, H. O. and Osuagwu, A. N. (2010). The influence of water stress (drought) on the mineral and vitamin potential of the leaves of *Ocimum gratissimum* L. *Recent Research in Science and Technology*, 2(2):27-33.
- Patger, M., Bragato, C. and Brix, H. (2005). Tolerance and physiological responses of phragmites australis to water deficit. *Aquatic Botany*, 81: 285-299.
- Per, T. S., Khan, M. I. R., Anjum, N. A., Masood, A., Hussain, S. J. and Khan, N. A. (2018). Jasmonates in plants under abiotic stresses: Crosstalk with other phytohormones matters. *Environmental and Experimental Botany*, 145:104-120.
- Pospisilova, J. 2011. Responses of Transgenic Tobacco Plants with Increased Proline Content to Drought and/or Heat Stress. *American Journal of Plant Sciences*. 2: 318-324.
- Ramazan Nejad, R., Lahouti, M. and Ganjali, A. (2013). The effect of salicylic acid on some physiological and biochemical characteristics of two chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes in drought stress. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 8 (31):1-11.
- Ranjan, R., Bohra, S.P. and Jeet, A.M. (2001). Plant Senescence. *Jodhpur, agrobios*. 10: 18-4.

- Ristvey, A. G., Belayneh, B. E. and Lea-Cox, J. D. (2019). A Comparison of irrigation-water containment methods and management strategies between two ornamental production systems to minimize water security threats. *Water*, 11(12):2558.
- Sabkia, M. H., Ongb, P. Y., Ibrahimc, N., Leea, C. T., Klemešd, J. J., Lie, C. and Gaoe, Y. (2021). A Review on Abiotic Stress Tolerance and Plant Growth Metabolite Framework by Plant Growth-Promoting Bacteria for Sustainable Agriculture. *Chemical Engineering Transactions*, 83:367-372.
- Sahraei, E. Maleki, A., Pazoki, A. and Fathi, A. (2018). The effect of Salicylic and Ascorbic Acid on Eco physiological Characteristics and German Chamomile Essences in Deficit of Water. *Applied Research of Plant Ecophysiology*. 5(1): 117-142.
- Salehi-Lisar, S. Y. and Bakhshayeshan-Agdam, H. (2020). Agronomic crop responses and tolerance to drought stress. *Agronomic Crops*, 3:63-91.
- Sallam, A., Alqudah, A. M., Dawood, M. F., Baenziger, P. S. and 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.
- Sayyahfar, M., Mirshekari, B., Yarnia, M., Farahvash, F. and Esmailzadeh Moghaddam, M. (2018). Effect of mycorrhiza inoculation and methanol spraying on some photosynthetic characteristics and yield in wheat cultivars under end-season drought stress. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16:3783-3803.
- Seleiman, M. F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y. and Battaglia, M. L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, 10 (2):259.
- Seleiman, M. F., Refay, Y., Al-Suhaibani, N., Al-Ashkar, I., El-Hendawy, S. and Hafez, E. M. (2019). Integrative effects of rice-straw biochar and silicon on oil and seed quality, yield and physiological traits of *Helianthus annuus* L. grown under water deficit stress. *Agronomy*, 9(10):637.
- Senaratna, T., Touchell, D., Bunn, E. and Dixon, K. 2000. Acetyl salicylic acid (Aspirin) and salicylic acid induce multiple stress tolerance in bean and tomato plants. *Plant Growth Regulation*, 30: 157–161.
- Setayesh-Mehr, Z., Ganjeali, A. (2013). Effects of Drought Stress on Growth and Physiological Characteristics of Dill (*Anethum graveolens* L.). *Journal of Horticultural Science*, 27(1), 27-35.
- Sharma, A., Sidhu, G. P. S., Araniti, F., Bali, A. S., Shahzad, B., Tripathi, D. K., & Landi, M. (2020). The role of salicylic acid in plants exposed to heavy metals. *Molecules*, 25(3), 540.
- Sharma, M., Gupta, S. K., Majumder, B., Maurya, V. K., Deeba, F., Alam, A. and Pandey, V. (2017). Salicylic acid mediated growth, physiological and proteomic responses in two wheat varieties under drought stress. *Journal of Proteomics*, 163:28-51.
- Sohrabi, Y., Heidari, G., Weisany, W., Ghasemi-Golezani, K. and Mohammadi, K. (2012). Some physiological responses of chickpea cultivars to arbuscular mycorrhiza under drought stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 59(6):708-716.
- Taheri, F., Maleki, A. and Fathi, A. (2021). Study of different levels of nitrogen fertilizer and irrigation on quantitative and qualitative characteristics of quinoa grain yield. *Crop Physiology Journal*. 13(50):135-149.
- Takeda, S. and Matsuoka, M. (2008). Genetic approaches to crop improvement: responding to environmental and population changes. *Nature Reviews Genetics*, 9(6):444-457.
- Tardieu, F., Parent, B., Caldeira, C. F. and Welcker, C., (2014). Genetic and physiological controls of growth under water deficit. *Plant Physiology*. 164:1628–1635
- Tekle, A. T. and Alemu, M. A. (2016). Drought tolerance mechanisms in field crops. *World Journal of Biology and Medical Sciences*, 3(2):15-39.
- Thinley, J. and Dorji, C. (2021). Screening of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for drought tolerance. *bioRxiv*.
- Tiwari, P., Srivastava, D., Chauhan, A. S., Indoliya, Y., Singh, P. K., Tiwari, S. and Nautiyal, C. S. (2021). Root system architecture, physiological analysis and dynamic transcriptomics unravel the drought-responsive traits in rice genotypes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 207:111252.
- Tohidi, Z., Sobhanian, H. and baghizadeh, A. (2021). Evaluation and comparison of ten ecotypes of *Teucrium polium* L. in tolerance to drought stress. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 16(62:23-138.

- Torres, A. M., Avila, C. M., Gutierrez, N., Palomino, C., Moreno, M. T. and Cubero, J. I. (2010). Marker-assisted selection in faba bean (*Vicia faba* L.). *Field Crops Research*, 115(3):243-252.
- Turkan, I. (2011). Plant responses to drought and salinity stress, Development in a post-Genomic era. *Advances in Botanical Research*, 593p.
- Tzortzakis, N., Chrysargyris, A. and Aziz, A. (2020). Adaptive response of a native mediterranean grapevine cultivar upon short-term exposure to drought and heat stress in the context of climate change. *Agronomy*, 10(2), 249.
- Upreti, D. C., Reddy, V. R., & Mura, J. D. (2019). Climate change and agriculture (pp. 31-41). Singapore:: Springer.
- Usefirad, M., and sharifi, M. (2019). Effect of salicylic acid and selenium foliar application on physiological and agronomic characteristics of safflower (*Carthamus tictorius* L.) in drought stress conditions. *Crop Physiology Journal*. 11 (41): 29-46
- Verslues, P. E., Agarwal, M., Katiyar-Agarwal, S., Zhu, J. and Zhu, J. K. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. *The Plant Journal*, 45(4):523-539.
- Waraich, E. A., Ahmad, R. and Ashraf, M. Y. (2011). Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Science*, 5(6):764-777.
- Yamori, W., Hikosaka, K. and Way, D. A. (2014). Temperature response of photosynthesis in C₃, C₄, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis Research*, 119(1):101-117.
- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., ... & Ao, X. (2024). Impacts of global climate change on agricultural production: a comprehensive review. *Agronomy*, 14(7), 1360.
- Zeidali, E., Naseri, R., Mirzaei, A., Fathi, A. and Darabi, F. (2018). Study the effect of plant nourishment with chemical, PGPR and manure fertilizers on agro-physiologic characteristics and weed density of maize. *Journal of Plant Ecophysiology*, 10(32):198-214.
- Zhang, F., Wang, P., Zou, Y. N., Wu, Q. S. and Kuča, K. (2019). Effects of mycorrhizal fungi on root-hair growth and hormone levels of taproot and lateral roots in trifoliate orange under drought stress. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9):1316-1330.
- Zhao, H., Dai, T., Jing, Q., Jiang, D. and Cao, W. (2007). Leaf senescence and grain filling affected by post-anthesis high temperatures in two different wheat cultivars. *Plant Growth Regulation*, 51(2):149-158.
- Zoghi, Z., Hosseini, S., Tabari Kouchaksaraei, M. and Kooch, Y. (2019). Effect of adding perlite in soil on some growth and physiology characteristics of *Queues castanifolia* seedlings under water deficit stress. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 14(55):1-12.