بهبود بهره‌وری باغات پسته در شرایط تغییر اقلیم: مرور راهکارهای فناوری‌های نوین مبتنی بر تجربیات ایالات متحده آمریکا

اعظم رنجبر*[۱]، رضا صداقت[۲]

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۷

چکیده

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی بخش کشاورزی در قرن بیست و یکم، تولید محصولات باغی از جمله پسته را تحت تأثیر قرار داده است. افزایش دما، کاهش منابع آبی، و وقوع بیشتر رویدادهای حدی اقلیمی، لزوم بازنگری در شیوه‌های سنتی باغداری پسته و بهره‌گیری از راهکارهای مکانیزاسیون و فناوری‌های نوین را بیش از پیش نمایان ساخته است. ایالات متحده آمریکا، به‌ویژه ایالت کالیفرنیا، به‌عنوان یکی از تولیدکنندگان پیشروی پسته در جهان، تجربیات ارزشمندی در زمینه تطبیق با تغییرات اقلیمی و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید از طریق فناوری ارائه داده است. این مطالعه مروری، راهکارهای مکانیزاسیون و فناوری‌های نوین بکارگرفته‌شده در باغداری پسته آمریکا را با هدف افزایش بهره‌وری و پایداری در شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های آبیاری دقیق، پایش هوشمند باغ، ماشین‌آلات برداشت و فرآوری پیشرفته، و به‌کارگیری داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی می‌تواند مصرف آب و نهاده‌ها را کاهش داده، عملکرد را افزایش داده، و انعطاف‌پذیری باغات پسته در برابر تنش‌های اقلیمی را بهبود بخشد. این تجربیات می‌تواند چارچوبی ارزشمند برای تولیدکنندگان پسته در سایر مناطق جهان، از جمله ایران، فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: امنیت غذایی، بهره‌وری آب، توسعه اقتصادی، گرمایش جهانی

.

[۱] پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران
[۲] پژوهشکده پسته، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رفسنجان، ایران
* نویسنده مسئول: azam_ranjbar91@yahoo.com

مقدمه

پسته (*Pistacia vera* L.) یکی از محصولات باارزش باغی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است. تغییرات اقلیمی، از جمله افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، و تشدید دوره‌های خشکی و امواج گرما، چالش‌های جدی برای تولید پایدار این محصول ایجاد کرده‌اند. در این شرایط، افزایش بهره‌وری منابع (به‌ویژه آب) و کاهش تلفات از طریق بهینه‌سازی فرآیندهای کاشت، داشت و برداشت ضروری است. در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، محدودیت منابع انرژی و نیاز به افزایش تولیدات کشاورزی، لزوم توجه به بهبود بهره‌وری را بیش از پیش آشکار ساخته است. در این راستا، توسعه فناوری‌ها با رویکردی اساسی در مدیریت تغییرات اقلیم می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای بهره‌وری ایفا کند. ایالات متحده آمریکا، با تولید بیش از نیمی از پسته جهان در کالیفرنیا، سرمایه‌گذاری قابل توجهی در توسعه و بکارگیری فناوری‌های پیشرفته برای مقابله با چالش‌های اقلیمی و اقتصادی انجام داده است. این مقاله به بررسی این راهکارها و قابلیت تطبیق آن‌ها با شرایط سایر مناطق پسته‌خیز می‌پردازد. هدف این مطالعه، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر باغداری پسته، شناخت فناوریهای نوین در کشور آمریکا و اثرات توسعه فناوری‌ها بر بهره‌وری بخش کشاورزی در شرایط تغییر اقلیم است.

اثرات تغییر اقلیم از دیدگاه اکولوژیکی

گرمایش جهانی منجر به افزایش تبخیر و کاهش رطوبت خاک و در نتیجه خشکسالی در مناطق نیمه‌خشک می‌شود (IPCC, 2021). خشکسالی در اثر عوامل متعددی از جمله شرایط اقلیمی یا جغرافیایی طبیعی، الگوی نامنظم بارندگی، دمای بالا، شدت نور بالا، وزش باد خشک، عدم ظرفیت نگهداری آب در خاک ایجاد می‌شود (Iqbal *et al*., 2020). با این وجود در سالهای اخیر تجزیه و تحلیل مسایل مرتبط با خشکی بیانگر تأثیر افزایش دما بر شدت خشکی است (Jiang *et al*., 2015). بارزترین اثر تغییرات آب و هوایی بر اکولوژی و بیوسفر، افزایش شوری خاک است. تغییرات اقلیمی با افزایش دما و تشدید تبخیر و تعرق، کاهش بارش، آبشویی خاک و آلودگی آبهای زیرزمینی موجب افزایش شوری خاک می‌گردد (Kamran *et al*., 2019).

از طرف دیگر بافت خاک، چگالی ظاهری و محتوای مواد آلی به طور مستقیم تحت تاثیر تغییرات آب و هوایی است. اثرات تغییر اقلیم روی خاک از طریق تغییر در رطوبت، دما و سطوح دی‌اکسیدکربن خاک است، بنابراین اثرات متغیری بر فرآیندهای مربوط به حاصلخیزی خاک دارد (Zandalinas *et al*., 2022; Qiu *et al*., 2023). اثرات ترکیبی دما و رطوبت، فرآیند تبدیل مواد معدنی به ترکیبات خاک را تعیین می‌کند. بنابراین نوسانات بارندگی

و دمای فصلی بر خواص هیدروفیزیکی خاک تأثیر می‌گذارد. خصوصیات فیزیکی خاک (ترکیب یا بافت مکانیکی) و ساختار (شکل و پایداری، چگالی ظاهری، تخلخل و توزیع اندازه منافذ) به‌طور قابل توجهی بر خواص هیدرولوژیکی خاک (هدایت هیدرولیکی و نگهداری آب) تأثیر می‌گذارد (Yu *et al*., 2018). همچنین خصوصیات فیزیکی بر فرآیندهای شیمیایی، بیولوژیکی و حاصلخیزی خاک و در نتیجه عملکرد محصول تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، سطح تعامل بین میکروارگانیسم‌های تخریب‌کننده آلاینده‌های آلی در خاک، ذخایر کربن آلی خاک، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداری آب و ذخیره مواد مغذی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Hung *et al*., 2022). از طرف دیگر نوسانات دما و رطوبت با تغییر رشد و فیزیولوژی میکروارگانیسم‌ها بر ساختار و عملکرد جوامع میکروبی خاک تأثیر می‌گذارد (Alkorta *et al*., 2017). ساختار خاک، حاصلخیزی و جمعیت میکروبی به‌طور مستقیم به کربن آلی خاک بستگی دارد. افزایش سطوح دی‌اکسید کربن در جو با افزایش فعالیت میکروبی خاک، مواد آلی خاک را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (Wessolek *et al*., 2023). کاهش مواد آلی خاک با کاهش فعالیت میکروبی و فرسایش خاک منجر به افزایش چگالی ظاهری و متراکم شدن خاک و در نتیجه مهار رشد ریشه و کاهش عملکرد خواهد شد (Yu *et al*., 2019). میکروارگانیسم‌های خاک، شاخص‌های زیستی مهمی هستند که چرخه بیوژئوشیمیایی کربن، نیتروژن و سایر عناصر حیاتی برای رشد گیاهان را کنترل می‌کنند. گرم شدن به دلیل تغییرات آب و هوایی باعث تغییر در شار ترشح، پویایی برهمکنش و کاهش بیوماس میکروبی می‌شود (Jiang *et al*., 2022). گرم شدن الگوی سازگاری گیاه و میکروب‌های متقابل آنها را تغییر می‌دهد و مهاجرت، انقراض و جایگزینی میکروبی را در خاک افزایش می‌دهد (Cavicchioli *et al*., 2019). بنابراین، گرم شدن کره زمین پیامدهای غیرقابل انکاری برای پایداری و تعامل متعادل گیاه-خاک- میکروب دارد.

اثرات تغییر اقلیم از دیدگاه فیزیولوژی گیاهی

تغییر اقلیم با ایجاد تنش‌های هم‌زمان و پیچیده‌ای مانند افزایش دما، کاهش بارندگی و تشدید خشکی، و شور شدن منابع آب و خاک، ساختار فیزیولوژیک گیاهان را هدف قرار می‌دهد (Kaplan & Öztürk, 2025). این تغییرات با اختلال در فرایندهای اساسی مانند فتوسنتز، تعرق، و جذب عناصر غذایی، کارایی متابولیک گیاه را کاهش می‌دهد (Suresh *et al*, 2025).

اثرات خشکی

تغییر اقلیم و الگوهای آب و هوایی با کاهش میزان آب در دسترس منجر به تنش غیرزنده و کاهش بهره‌وری

محصول می‌شود (Zahoor *et al*., 2022). استرس اکسیداتیو، سمیت یونی و کمبود مواد مغذی تحت تنش خشکی بسیاری از فرآیندهای بیوشیمیایی، مولکولی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی و عملکرد را مختل می‌کند (ALshamrani *et al*., 2022). تحت تنش خشکی، انتشار دی‌اکسید کربن از طریق روزنه‌ها و درون مزوفیل و سلول‌های فتوسنتزی کاهش می‌یابد و در نهایت تثبیت کربن را کاهش می‌دهد (Chaves *et al*., 2009). بدین ترتیب تمام جنبه‌های رشد گیاه، از جمله فتوسنتز، سنتز پروتئین، روابط آب، تورژسانس سلولی، یکپارچگی غشا و جذب مواد مغذی تحت تاثیر خشکسالی قرار می‌گیرد (Todorova *et al*., 2016; Nongpiur *et al*., 2020). از آنجایی که مقدار آسیمیلات در دسترس و فشار تورگ تعیین‌کننده میزان انبساط و رشد برگ است، کاهش تورگر ناشی از تنش خشکی تقسیم‌سلولی، طویل‌شدن و تمایز سلولی را مهار می‌کند و با کاهش فتوسنتز، از انبساط برگ جلوگیری می‌کند (Jaleel *et al*., 2009). علاوه بر این، نرخ تعرق کم ناشی از بسته‌شدن روزنه‌ها تحت تنش خشکی منجر به افزایش دمای برگ می‌شود و در اثر تخریب رنگدانه‌های فتوسنتزی کارایی فتوسیستم II کاهش می‌یابد (El Yamani *et al*., 2019). کاهش غلظت کلروفیل، کاهش سطح برگ (به‌دلیل توقف رشد و نمو)، اختلال در فعالیت آنزیم‌هایی مانند ریبولوز- ۱،۵- بی‌فسفات کربوکسیلاز/اکسیژناز (روبیسکو)، فسفو انول پیرووات کربوکسیلاز، فروکتوز ۱،۶- بیس فسفاتاز، ساکارز فسفات‌سنتاز در نتیجه کاهش پتانسیل آب، و کاهش کارایی انتقال الکترون در واکنش‌های نوری فتوسنتزی اتفاق می‌افتد. همچنین تنش خشکی باعث تغییراتی در مورفولوژی و آناتومی گیاهان به‌عنوان مثال کاهش اندازه برگ، کاهش تعداد روزنه‌ها، ضخیم‌شدن دیواره سلولی، و کاهش زیست توده کل گیاه با افزایش نسبت ریشه به ساقه می‌شود (Salehi-Lisar & Bakhshayeshan-Agdam, 2016). در ریشه‌ها، تنش خشکی به ساختار آوند چوبی آسیب رسانده و باعث کاهش رسانایی آوند چوبی و تعرق می‌شود (Hillabrand *et al*., 2016). بنابراین حساسیت گیاهان به بیماری‌ها به‌دلیل دسترسی بهتر باکتری به آوند چوبی افزایش می‌یابد (Thorne *et al*., 2006).

اثرات شوری

تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن در کلروپلاست و میتوکندری، پراکسیداسیون لیپیدی، مهار فعالیت‌های آنزیمی و فرآیندهای متابولیک پایه، کاهش فتوسنتز، تنفس، سنتز پروتئین و مهار رشد و نمو در گونه‌های حساس پیامد مهم تنش شوری در گیاهان هستند (Bano *et al*., 2021). افزایش تجمع سدیم در

سلول‌های گیاهی باعث خروج یون‌های پتاسیم، کلسیم و در نتیجه عدم تعادل در هموستاز سلولی، کمبود مواد مغذی، اختلال در عملکرد سلولی و فعالیت آنزیم‌های ضروری، استرس اکسیداتیو، تاخیر در رشد و مرگ سلولی می‌شود (Hoffmann *et al*., 2020). جذب و تجمع کلر در شرایط شوری بر جذب نیتروژن توسط ریشه، رشد و تولید مثل گیاهان تأثیر می‌گذارد (Bhantana *et al*., 2021). غلظت‌های بالای کلر به همراه SO_4^{-2} جذب فسفر برای فتوسنتز، ذخیره‌سازی و انتقال انرژی را کاهش می‌دهد (Hao *et al*., 2023). اختلال در فتوسنتز تحت تنش شوری به بسته‌شدن روزنه، کاهش غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی، تورم غشای تیلاکوئید و تخریب فراساختار کلروپلاست، از دست‌دادن یکپارچگی غشای فتوسنتزی، تخریب پروتئین‌ها و آنزیم‌های مسیر فتوسنتزی، کم آبی غشای سلولی و افزایش پیری نسبت داده می‌شود (Kamran *et al*., 2019; Yadav & Atri, 2020). علاوه بر این، آسیب اسمزی جذب آب را کاهش می‌دهد و باعث مهار یا کاهش فتوسنتز، تنفس و سنتز کربوهیدرات و پروتئین می‌شود که منجر به کاهش رشد و نمو گیاه خواهد شد (Denaxa *et al*., 2022). بنابراین از نظر فیزیولوژیکی، تنش شوری با مهار فتوسنتز و اختلال در تعادل مواد مغذی، بهره‌وری محصول را کاهش می‌دهد. از نظر مورفولوژیکی، گیاهان دچار توقف رشد، کلروز و اختلال در جوانه زنی بذر می‌شوند. علاوه بر این، فرآیندهای بیوشیمیایی گیاهان تحت تنش‌های اکسیداتیو، نشت الکترولیت و به‌هم ریختگی غشاء قرار می‌گیرند (Cruz *et al*., 2018).

اثرات دمای بالا

دمای بالا با غیر فعال کردن آنزیم تثبیت کربن (روبیسکو) منجر به تنفس نوری و کاهش فتوسنتز خالص می‌شود (Qu *et al*., 2023). افزایش دما باعث تولید و تجمع گونه‌های فعال اکسیژن در میتوکندری و کلروپلاست، مهار سنتز پروتئین و دناتوره شدن پروتئین‌ها، تخریب کلروفیل، مهار جریان انتقال الکترون، پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، تغییر در سیالیت و نفوذپذیری غشاء، تغییر در سطوح هورمون‌های گیاهی، سیگنال‌دهی کلسیم، اکسید نیتریک، پروتئین کیناز فعال شده با میتوژن، و اختلال در تنفس و مرگ سلولی می‌شود (Zahra *et al*., 2023). تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن منجر به استرس اکسیداتیو می‌شود که مستقیما بر فیزیولوژی کلی برگ، سطح برگ، احتباس برگ، هدایت روزنه‌ای، پتانسیل آب، سرعت تعرق تأثیر می‌گذارد (Masson-Delmotte *et al*., 2021). تحت تنش گرمایی، نرخ تعرق به دلیل افزایش رسانایی روزنه‌ای، افزایش نفوذپذیری کوتیکول و کاهش ویسکوزیته آب افزایش می‌یابد (Sadok *et al*., 2021). گرمای شدید و خشکسالی

حرکت آب را متوقف می‌کند و باعث جذب کمتر مواد مغذی و آسیب تمام قسمت‌های گیاه می‌شود (Orians *et al*., 2019). علاوه بر این، گرما و خشکی باعث کاهش محتوای دی‌اکسید کربن داخلی گیاهان، رشد رویشی و بلوغ اولیه شده و از فعالیت آنزیم روبیسکو که در سنتز ATP نقش دارد، جلوگیری می‌کند (Moore *et al*., 2021). تغییرات دما بر الگوی کشت، عملکرد محصول و فنولوژی (رشد برگ، گرده افشانی، تنفس، جوانه‌زنی گرده، و تولید زیست‌توده) تاثیر دارد (Lestari *et al*., 2020). کاهش ظرفیت فتوسنتزی در دمای بالا و تکمیل چرخه رشد گیاه در مدت زمان کوتاه منجر به کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Taylor *et al*., 2022). استرس گرمایی بیوسنتز، هموستاز، و بخش‌بندی هورمون را تغییر می‌دهد و با اختلال عملکرد اجزای مولکولی مسیرهای هورمونی روی عملکرد گیاه تأثیر می‌گذارد (Ding *et al*., 2020).

چالش‌های تغییر اقلیم برای باغداری پسته

تغییر اقلیم به‌عنوان یک عامل فشار اصلی در بخش کشاورزی، باغداری پسته را با چالش‌های متعدد و پیچیده‌ای مواجه کرده است. این تأثیرات از طریق تغییر در الگوهای دما و بارش و افزایش رویدادهای حدی آب‌وهوایی اعمال می‌شود و تمامی مراحل فنولوژیکی درخت پسته را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mehrnejad, 2020; Doğan & Düdükçü, 2025). کاهش بارندگی، افزایش دما، و تبخیر-تعرق فزاینده به تشدید دوره‌های خشکی و کاهش تجدیدپذیری منابع آب سطحی و زیرزمینی منجر شده است (Gholampoor *et al*., 2025). این وضعیت، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و افزایش شوری آن‌ها را در پی دارد که امنیت آبی باغات پسته را، به‌ویژه در مناطق اصلی کشت مانند ایران، به‌شدت تهدید می‌کند (Khalilpour *et al*., 2021). بنابراین، مدیریت مؤثر آب برای پایداری تولید پسته حیاتی است (Khormizi *et al*., 2024).

افزایش دمای زمستان باعث کاهش انباشت ساعات سرمایی مؤثر می‌شود که برای شکستن یکنواخت خواب زمستانه، جوانه‌زنی و گل‌دهی درختان پسته ضروری است (Fernandez *et al*., 2023; Alipour *et al*., 2025). این عدم یکنواختی فنولوژیکی، مدیریت باغ و عملیات برداشت را دشوار ساخته و با کاهش گرده‌افشانی و درصد تشکیل میوه، کیفیت و عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Alipour *et al*., 2025). گرم‌شدن زودهنگام در اواخر زمستان می‌تواند منجر به جوانه‌زنی پیش از موعد شود و بافت‌های حساس جوانه‌ها و گل‌ها را در معرض یخبندان‌های ناگهانی بهاره قرار دهد که خسارات شدیدی به باغات وارد می‌آورد (Fernandez *et al*., 2023). دمای بالا و تنش گرمایی در مراحل حساس رشدی پسته

می‌تواند پیامدهای زیانباری داشته باشد. به‌عنوان مثال، افزایش دما همراه با سطوح خاصی از دی‌اکسید کربن اتمسفر، می‌تواند تولید آفلاتوکسین B1 توسط آسپرژیلوس فلاووس را در مغز پسته تحریک کند و ایمنی غذایی و کیفیت محصول را به خطر اندازد (Ranjbar *et al*., 2025). اگرچه در مطالعات موجود، آسیب مستقیم به گرده و مادگی یا کاهش اندازه مغز و افزایش پوکی ناشی از تنش گرمایی در پسته به صراحت ذکر نشده است، اما پاسخ‌های فیزیولوژیکی و آنتی‌اکسیدانی گیاه به استرس‌های غیرزیستی مانند گرما تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Nikoogoftar-Sedghi *et al*., 2023). افزایش دما به گسترش دامنه میزبانی و تسریع چرخه زندگی آفات کلیدی پسته کمک می‌کند. برای مثال، چرخه زندگی پسیل معمولی پسته به‌شدت تحت تأثیر دما قرار دارد و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دمای بهینه برای رشد آن گزارش شده است (Mehrnejad & Copland, 2005). در مجموع، تغییر اقلیم می‌تواند باعث گسترش جغرافیایی، افزایش بقای زمستان‌گذرانی و افزایش تعداد نسل آفات حشرات شود (Skendžić *et al*., 2021). همچنین، تغییرات اقلیمی ممکن است کارایی دشمنان طبیعی آفات را کاهش داده و منجر به طغیان آن‌ها شود، زیرا بر الگوهای توزیع و همزمانی فصلی بین دشمنان طبیعی و میزبانان آنها تأثیر می‌گذارد (Skendžić *et al*., 2021). شرایط گرم و مرطوب نیز می‌تواند شیوع بیماری‌های قارچی را تشدید کند (Rhouma *et al*., 2024). پیامد ثانویه تغییرات اقلیمی، تشدید شوری خاک و آب است که به دلیل افزایش تبخیر و کاهش آبشویی رخ می‌دهد. تحت این شرایط، تحمل درختان پسته به تنش خشکی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Shirvani *et al*., 2025). علاوه بر این، تحت شرایط تنش گرمایی و خشکی شدید، بازده فتوسنتزی و کارایی مصرف آب در درختان پسته کاهش می‌یابد، اگرچه پسته مکانیسم‌هایی برای تحمل تنش خشکی و حفظ کارایی فتوسنتزی نشان داده است (Hamed *et al*., 2025).

در واقع تغییر اقلیم، سیستم پایدار باغداری پسته را با تهدیدات چندبعدی مواجه کرده است. برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری این سیستم، تلفیق راهبردهای تطبیقی مانند استفاده از ارقام متحمل به گرما، خشکی و کم‌نیاز سرمایی، اصلاح روش‌های آبیاری (تحت فشار، زیرسطحی)، مدیریت خاک و تغذیه بهینه، پایش و مدیریت یکپارچه آفات و بیماری‌ها بر اساس مدل‌های پیش‌آگاهی نوین، کاربرد فناوری‌های نوین و به‌کارگیری سیستم‌های هشدار زودهنگام یخبندان و امواج گرما ضروری است. همچنین ادامه پژوهش‌های بین‌رشته‌ای برای توسعه راهکارهای عملی مبتنی بر شرایط محلی، حیاتی به‌نظر می‌رسد.

اهمیت کاربرد فناوری‌های نوین در باغداری پسته

پسته (*Pistacia vera* L.) متعلق به خانواده Anacardiaceae یک محصول باغی با اهمیت اقتصادی جهانی است که به‌دلیل ارزش غذایی و کاربردهای متنوع آن مورد توجه قرار گرفته است (Al-Saghir *et al*., 2012). با این‌حال، تولید پسته به‌عنوان یک سیستم کشاورزی انرژی‌بر شناخته می‌شود که مدیریت بهینه انرژی در آن برای پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی ضروری است (Babaeian *et al*., 2025). تحلیل‌های انرژی در تولید پسته نشان می‌دهد که نهاده‌هایی چون کودها، سوخت دیزل برای ماشین‌آلات، و برق مصرفی در آبیاری سهم عمده‌ای در کل مصرف انرژی دارند (Babaeian *et al*., 2025; Özdemir *et al*., 2025). مطالعات در ایران نشان داده است که برق، دیزل، و کودهای نیتروژنی بیشترین سهم را در انرژی ورودی دارند (Afshar *et al*., 2013). این مصرف نامنظم و فشرده انرژی در کشاورزی، پیامدهای زیست‌محیطی متعددی از جمله کاهش منابع انرژی تجدیدناپذیر، از بین رفتن تنوع زیستی، و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌دنبال دارد (Ahmed *et al*., 2025). بهره‌وری انرژی به‌عنوان یک شاخص حیاتی پایداری عمل می‌کند که عملکرد انرژی را مستقیماً با اثرات زیست‌محیطی و ویژگی‌های اقتصادی، از جمله هزینه‌های انرژی و کاهش بهره‌وری، مرتبط می‌سازد (Komnitsas *et al*., 2017). بنابراین، نظارت دقیق بر عملکرد انرژی سیستم‌های کشت برای تدوین راهبردهای مدیریتی سازگار با محیط زیست که به استفاده بهینه از منابع انرژی و رشد پایدار اجتماعی-اقتصادی در سطح باغات کمک می‌کند، ضروری است (Afshar *et al*., 2013).

به‌کارگیری فناوری‌های نوین کشاورزی، به‌ویژه کشاورزی دقیق، در کلیه مراحل کاشت، داشت، برداشت، و نگهداری، برای افزایش کارایی تولید و تضمین امنیت غذایی در شرایط تغییر اقلیم اهمیت فزاینده‌ای یافته است (Zhang & Meng, 2021; Nagaraja *et al*., 2023). این فناوری‌ها، از جمله شبکه‌های حسگر بی‌سیم و سنجش از دور، پتانسیل بهینه‌سازی مصرف نهاده‌ها، افزایش بهره‌وری، و بهبود کنترل کیفیت را در باغات پسته دارند (Martínez-Peña *et al*., 2023; Kaur *et al*., 2024). استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق می‌تواند طبقه‌بندی دقیق ارقام پسته را بهبود بخشیده و به کنترل کیفیت و قابلیت ردیابی محصول کمک کند (Siahaan *et al*., 2025). همچنین، بقایای پسته، مانند پوست، می‌توانند برای تولید مواد کربنی فعال با کاربرد در ذخیره‌سازی انرژی پایدار مورد استفاده قرار گیرند، که نشان‌دهنده یک رویکرد جامع به پایداری است (Sathish & Navamathavan, 2024). موفقیت در پیاده‌سازی این

فناوری‌ها مستلزم برنامه‌ریزی دقیق، توسعه زیرساخت‌های مناسب، و مدیریت بهینه نهاده‌ها متناسب با شرایط اقلیمی هر منطقه است (Yaghoubi & Niknami, 2022). چالش‌های موجود شامل توجیه اقتصادی، یکپارچگی اراضی، و کمبود زیرساخت‌های فنی مورد نیاز برای کشاورزی دقیق در باغات پسته است (Yaghoubi & Niknami, 2022). با این‌حال، غلبه بر این چالش‌ها برای استفاده کامل از پتانسیل فناوری در جهت کشاورزی پایدار و مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی ضروری است.

راهکارهای مکانیزاسیون و فناوری‌های نوین در شرایط تغییر اقلیم

در مواجهه با چالش‌های اقلیمی فزاینده، باغداری پسته نیازمند رویکردهای نوین در مکانیزاسیون و بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته است. ایالات متحده آمریکا، به‌عنوان یکی از پیشروترین تولیدکنندگان محصولات کشاورزی تخصصی، سرمایه‌گذاری‌های چشمگیری در اتوماسیون و کشاورزی دقیق انجام داده است که شامل تأمین مالی تحقیقات و همکاری‌های صنعتی برای توسعه فناوری‌های مکانیکی و هوشمند در مدیریت و برداشت محصول می‌شود (Yaghoubi & Niknami, 2022).

توسعه سیستم‌های مدیریت هوشمند آب برای باغات پسته در ایالات متحده شامل استفاده از فناوری‌هایی برای بهینه‌سازی مصرف آب و بهبود عملکرد محصول است. این سیستم‌ها می‌توانند به کشاورزان در اتخاذ تصمیمات آبیاری در مقیاس مزرعه کمک کنند. کاربرد گسترده سیستم‌های آبیاری میکرو و زیرسطحی، به‌ویژه در مناطق خشک، راندمان مصرف آب را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. تحقیقاتی در سال ۲۰۲۳ بر روی سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی لوله شن عمودی لایه‌ای (SVGTSD) در باغات پسته، بهره‌وری آب ۰.۹کیلوگرم بر متر مکعب را گزارش کرده است و در مقایسه با روش‌های سنتی، مصرف آب را کاهش داده و میزان ورود نمک به خاک را تعدیل می‌کند (Tavakoli *et al*., 2024). استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند تا ۹۵ درصد در مقایسه با روش‌های سطحی، راندمان مصرف آب را بهبود بخشد (Dastorani *et al*., 2008). کاربرد فناوری‌هایی مانند آبیاری با کسری تنظیم‌شده یک استراتژی صرفه‌جویی در مصرف آب است که می‌تواند بهینه‌سازی تولید محصول را در منابع آبی محدود ممکن سازد (Gholampoor *et al*., 2025). بهره‌گیری از حسگرهای رطوبت خاک و پتانسیل‌سنج‌های گیاهی، امکان پایش دقیق وضعیت رطوبتی ریشه و تنظیم آبیاری بر اساس نیاز واقعی گیاه را فراهم می‌آورد (Marino *et al*., 2019). این امر به تصمیم‌گیری‌های

بهینه در خصوص زمان‌بندی و حجم آبیاری کمک می‌کند (Bellvert *et al*., 2018). استفاده از پهپادها و تصاویر ماهواره‌ای برای ارزیابی شاخص‌های سلامت گیاه، تشخیص تنش آبی و پایش دمای سطح باغ، امکان مدیریت ناحیه‌ای را فراهم می‌آورد (Martínez-Peña *et al*., 2023; Sharma *et al*., 2025). این فناوری‌ها می‌توانند تبخیر و تعرق واقعی را با دقت بالا تخمین زده و به برنامه‌ریزی دقیق‌تر آبیاری کمک کنند (Bellvert *et al*., 2018). در کالیفرنیا، درصد قابل توجهی از باغات پسته در خاک‌های شور و سدیمی قرار دارند. اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی در این شرایط می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا تخصیص و مدیریت آب آبیاری را با شرایط خاص باغ (مانند ویژگی‌های سایبان و شوری/سدیمی آب-خاک) تنظیم کنند. این امر می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در آب و انرژی از طریق بهبود روش‌های مدیریت آبیاری شود (Marino *et al*., 2019). همچنین، کاربرد ترکیباتی مانند گچ و گوگرد از طریق پایش سنجش از دور، به کاهش دمای درختان پسته و نیاز آبی آن‌ها در شرایط گرمایی بالا کمک می‌کند (Aliabad *et al*., 2022). پایش و مدیریت باغ با فناوری‌های دیجیتال از جمله کاربرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم برای اندازه‌گیری پارامترهای اقلیمی میکرو (مانند دما، رطوبت، باد) در سطح باغ، اطلاعات با ارزشی را برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم می‌آورد (Yan *et al*., 2018). پلتفرم‌های مدیریت مزرعه با یکپارچه‌سازی داده‌های خاک، آب، هوا و گیاه، به اتخاذ تصمیمات آگاهانه کمک می‌کنند. همچنین، تکنولوژی‌های نرخ متغیر امکان اعمال نهاده‌ها (مانند کود و آب) را بر اساس نقشه‌های تغییرپذیری مکانی در باغ فراهم می‌سازند (Yaghoubi & Niknami, 2022).

اتوماسیون پیشرفته در برداشت و فرآوری پسته در ایالات متحده شامل استفاده از فناوری‌های نوین برای افزایش کارایی، کیفیت و ایمنی محصول است. مطالعات بر روی بهینه‌سازی برداشت مکانیزه پسته از طریق تحلیل ارتعاشات درختان پسته انجام شده است. این تحقیقات نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی پارامترهای ارتعاشی مانند دامنه نیرو، فرکانس و ارتفاع کلمپینگ، می‌توان نرخ برداشت را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشید (Wei *et al*., 2020). گزارش شده است که پارامترهای بهینه ارتعاش شامل دامنه نیرو ۳۰۰۰ نیوتن، فرکانس ارتعاش ۱۸ هرتز و ارتفاع کلمپینگ ۷۰۰ میلی‌متر می‌تواند تعداد درختانی را که به نرخ برداشت بیش از ۹۰ درصد می‌رسند، ۱.۴۶ برابر افزایش دهد (Wei *et al*., 2020). خطوط فرآوری کاملاً خودکار شامل جداسازی، پوست‌گیری، خشک‌کردن، شکافتن و سورتینگ بر اساس رنگ، اندازه و کیفیت با استفاده از بینایی ماشین و هوش مصنوعی است (Kheiralipour *et al*, 2022; Liu *et al*., 2024).

سیستم‌های بینایی ماشین می‌توانند پسته‌های دهان‌بست یا لکه‌دار را با دقت بالا شناسایی و جداسازی کنند (Idress *et al*., 2024). همچنین مدل‌های یادگیری عمیق مانند MobileNetV2 برای طبقه‌بندی گونه‌های پسته با استفاده از مجموعه‌های داده بزرگ از تصاویر با وضوح بالا به کار گرفته شده‌اند. این سیستم‌ها دقت بالایی در تشخیص گونه‌های مختلف پسته دارند و می‌توانند فرآیند طبقه‌بندی را خودکار کرده و دقت را نسبت به روش‌های سنتی دستی افزایش دهند. این فناوری پتانسیل زیادی برای بهینه‌سازی فرآوری پسته و تضمین کیفیت محصولات در بازار دارد (Rani & Lande, 2025). همچنین، فناوری‌های نوآورانه برای شناسایی غیرتهاجمی آفلاتوکسین در پسته، شامل تصویربرداری فراطیفی، نوارهای آزمایش کروماتوگرافی، چارچوب‌های فلز-آلی لومینسانس، روش‌های طیف‌سنجی، بینایی ماشین و مدل‌های پیشرفته هوش مصنوعی، در حال توسعه هستند. این فناوری‌ها می‌توانند به حفاظت از سلامت عمومی، کاهش زیان‌های اقتصادی و پایداری صنعت پسته کمک کنند (Mahroughi, 2025).

برای مقابله با تغییرات اقلیمی، برنامه‌های به‌نژادی مدرن بر توسعه ارقام جدید متحمل به خشکی و گرما با استفاده از مارکرهای مولکولی تمرکز دارند (Singh *et al*., 2016). این مطالعات به شناسایی ارقامی با مکانیسم‌های سازگاری با خشکی، مانند سیستم ریشه‌ای توسعه‌یافته و تنظیم اسمزی تقویت‌شده، کمک می‌کند که می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب شود (Gholampoor *et al*., 2025). مشاهده شده که استفاده از پایه‌های مقاوم به خشکی و شوری مانند UCB-1 و بادامی در پسته، تحمل گیاه را در شرایط تنش آبی و شوری افزایش می‌دهد (Osku *et al*., 2025). تحقیقات نشان می‌دهد که درک مکانیسم‌های تعامل پایه × پیوندک × محیط، به توسعه پایه‌های جدید با انعطاف‌پذیری بیشتر در برابر تغییرات اقلیمی و همچنین آفات و بیماری‌ها کمک خواهد کرد (Karimi, 2025). تحقیقات نشان داده است که تغییرات اقلیمی، مانند افزایش دما، بارندگی‌های شدید و خشکسالی‌ها، عوامل تعدیل‌کننده رشد قارچ و تولید مایکوتوکسین هستند (Ranjbar *et al*., 2025). برای مقابله با این چالش اقتصادی و بهداشتی، فناوری‌های پیشرفته کنترل بیولوژیکی مانند محصول بیوکنترل غیرسمی *Aspergillus flavus* AF36 در پسته ثبت شده است (Ortega-Beltran *et al*., 2019). همچنین انتخاب پایه‌هایی که بتوانند به جذب مواد مغذی کمک کنند و با شرایط مختلف خاک سازگار شوند، از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این، کاربرد نانوکودها و محرک‌های زیستی به افزایش کارایی جذب آب و مواد غذایی تحت تنش کمک می‌کند (Suriya *et al*., 2025).

نانوکودها، با ارائه دقیق و کنترل‌شده مواد مغذی، می‌توانند کارایی استفاده از مواد مغذی را افزایش داده و نیاز به کودهای سنتی را کاهش دهند (Saurabh *et al*., 2024). ادغام هوش مصنوعی و تحلیل داده‌های بزرگ در مدیریت باغات پسته، پیش‌بینی دقیق عملکرد و کیفیت بر اساس داده‌های تاریخی و جوی (Kaur, 2024)، تشخیص هوشمند آفات و بیماری‌ها در مراحل اولیه از طریق پردازش تصاویر پهپادها و الگوریتم‌های بینایی ماشین (Mortazavi *et al*., 2025)، بهینه‌سازی زنجیره تأمین و بازار با پیش‌بینی قیمت و تقاضا را بهبود می‌بخشد (Ebrahimi Sirizi *et al*., 2023). هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی عملکرد و ارزیابی ویژگی‌های کیفی پسته، داده‌های گسترده‌ای را از وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین، ماهواره‌ها و حسگرهای زمینی تحلیل می‌کند (Ajith *et al*., 2025). در باغات پسته، تصاویر چندطیفی و حرارتی با وضوح بالا که توسط پهپادها جمع‌آوری می‌شوند، برای محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی مانند شاخص اختلاف نرمال‌شده لبه قرمز، شاخص اختلاف نرمال‌شده سبز، شاخص اختلاف نرمال‌شده پوشش گیاهی و شاخص تنش آبی محصول استفاده می‌شوند (Martínez-Peña *et al*., 2023). این شاخص‌ها می‌توانند همبستگی‌های قابل توجهی با عملکرد محصول و پارامترهای کیفی مانند درصد کربوهیدرات، منیزیم، آهن و اسیدهای چرب (مانند پالمیتوئیل، استئاریک، اولئیک و لینولئیک) نشان دهند (Martínez-Peña *et al*., 2023). شاخص اختلاف نرمال‌شده سبز به عنوان مؤثرترین شاخص در تخمین عملکرد و کیفیت در مراحل مختلف رشد پسته شناخته شده است (Martínez-Peña *et al*., 2023). سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، به ویژه یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، از داده‌های بلادرنگ حسگرهای اینترنت اشیا، پهپادها و تصاویر ماهواره‌ای جهت تشخیص زودهنگام و دقیق مسائل مربوط به سلامت محصول بهره می‌برند (Rekiek *et al*., 2025). الگوریتم‌های بینایی ماشین و شبکه‌های عصبی کانولوشنال برای شناسایی و طبقه‌بندی آفات و بیماری‌ها از طریق پردازش تصاویر استفاده می‌شوند (Mittal *et al*., 2024; Rekiek *et al*., 2025). این رویکردها منجر به مداخلات هدفمند، کاهش مصرف آفت‌کش‌ها و بهبود کلی عملکرد محصول می‌شوند. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در بهینه‌سازی عملیات زنجیره تأمین و پیش‌بینی مالی نقش حیاتی دارند (Olola and Olatunde, 2025; Yarlagadda, 2025). پیش‌بینی تقاضا با استفاده از هوش مصنوعی فراتر از روش‌های آماری سنتی عمل می‌کند و جریان‌های داده‌ای متنوعی مانند احساسات رسانه‌های اجتماعی، الگوهای آب و هوا و شاخص‌های اقتصاد کلان را برای پیش‌بینی چندبعدی با

دقت بالا ترکیب می‌کند (Khmara, 2025). این امر به کاهش خطرات کمبود یا انباشت بیش از حد موجودی کمک می‌کند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین و تحلیل‌های پیش‌بینی‌کننده، کنترل موجودی را بهبود می‌بخشند و بهینه‌سازی لجستیک از طریق یادگیری تقویتی و شبکه‌های عصبی برای برنامه‌ریزی مسیر و پیش‌بینی زمان بهینه ذخیره‌سازی مجدد بر اساس الگوهای تقاضا استفاده می‌شود (Olola and Olatunde, 2025). این نوآوری‌ها کارایی عملیاتی، کاهش هزینه‌ها و افزایش رقابت‌پذیری را در بازارهای جهانی به ارمغان می‌آورند (Yarlagadda, 2025). به طور کلی، کاربرد هوش مصنوعی در کشاورزی، از جمله مدیریت پسته، به افزایش بهره‌وری، پایداری و تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده کمک می‌کند.

نتیجه گیری کلی و چشم اندازهای آینده

در سال‌های اخیر، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، کمبود منابع انرژی و نیروی کار، و افزایش هزینه‌های تولید، گرایش به مکانیزاسیون باغات پسته در کشورهای توسعه‌یافته و در حال‌توسعه از جمله ایران تشدید شده است. با این حال، تجربه نشان می‌دهد که صرف افزایش سرمایه‌گذاری در تجهیزات مکانیکی، به‌تنهایی بر کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی تأثیر چشمگیری نخواهد داشت. نمونه موفق ایالات متحده مؤید این امر است که کلید سازگاری با تغییرات اقلیمی و ارتقای بهره‌وری در باغداری پسته، اتخاذ رویکردی یکپارچه و مبتنی بر مدیریت دقیق باغ با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین است. برای به‌کارگیری چنین راهکارهایی در شرایطی مانند ایران، برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری صحیح جهت بهره‌گیری مؤثر از مکانیزاسیون در افزایش بهره‌وری کشاورزی ضروری است. یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از فناوری‌های مکانیزاسیون می‌تواند به‌عنوان راهبردی کارآمد برای افزایش پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی در تولید محصولات تخصصی نظیر پسته مورد توجه قرار گیرد. در این مسیر، دولت می‌تواند با حمایت از واردات و تولید داخلی ماشین‌آلات کشاورزی، کاهش موانع اداری، اعطای تسهیلات ویژه، توسعه شرکت‌های اجاره‌ای خدمات مکانیزاسیون، و بهینه‌سازی الگوی توزیع تجهیزات و مدیریت انرژی، روند توسعه مکانیزاسیون را تسریع بخشد. در زمینه مکانیزاسیون برداشت، برنامه‌ریزی دقیق برای تأمین و توزیع ماشین‌آلات مناسب با توجه به سطح زیر کشت امری ضروری است. همچنین، اصلاح الگوی کشت، معرفی فناوری‌های مکانیزاسیون سازگار با زمین مانند سامانه‌های پیشرفته آبیاری و فناوری‌های مناسب باغات کوچک، و تلفیق آن‌ها با اهداف امنیت غذایی پایدار، از جمله اقدامات پایه‌ای به‌شمار می‌روند. افزایش آگاهی کشاورزان نسبت به مزایای فناوری‌های نوین و ارتقای مهارت‌های مدیریتی

آنان نیز نقشی کلیدی در این فرآیند ایفا می‌کند. سیاست‌های حمایتی نظیر تعیین قیمت‌های تضمینی مناسب و ایجاد بورس محصولات کشاورزی می‌تواند به کاهش ریسک درآمدی کشاورزان کمک کند. همچنین، بازنگری در ساختار تعاونی‌های تولید و تقویت مدیریت یکپارچه برای بهبود کارآیی آن‌ها پیشنهاد می‌شود. از جمله اولویت‌های تحقیقاتی و اجرایی در این حوزه می‌توان به طراحی برنامه‌های آموزشی (مانند کارگاه‌ها، بازدیدها و دوره‌های کارآموزی) برای کارشناسان کشاورزی به‌منظور ارتقای دانش و نگرش آنان نسبت به مکانیزاسیون، ارائه خدمات مشاوره‌ای به باغداران، توسعه پژوهش‌های بومی برای انطباق فناوری‌ها با شرایط اقلیمی، خاکی و اجتماعی هر منطقه، و حمایت از تحقیقات اقتصادی در زمینه مکانیزاسیون و نیازسنجی دقیق برای سرمایه‌گذاری در بخش ماشین‌آلات اشاره کرد. علاوه بر این، توسعه زیرساخت‌های دیجیتال از جمله دسترسی به اینترنت پرسرعت و داده‌های اقلیمی قابل اعتماد در مناطق روستایی نیز باید در اولویت قرار گیرد.

در نتیجه، گذار از روش‌های سنتی به سمت باغداری هوشمند و داده‌بنیان پسته، نه تنها یک انتخاب، بلکه ضرورتی انکارناپذیر برای تضمین پایداری و سودآوری این صنعت در عصر تغییرات اقلیمی است. این گذار نیازمند همکاری گسترده و مؤثر بین نهادهای تحقیقاتی و دانشگاهی، تولیدکنندگان و عرضه‌کنندگان ماشین‌آلات کشاورزی، و سازمان‌های دولتی مرتبط است تا فناوری‌های مکانیزاسیونی طراحی و اجرا شوند که به‌طور جامع شرایط فنی، اقتصادی، جغرافیایی و توپوگرافی باغات را در نظر بگیرند.

منابع

1. Afshar, R. K., Alipour, A., Hashemi, M., Jovini, M. A., & Pimentel, D. (2013). Energy inputs-yield relationship and sensitivity analysis of pistachio (*Pistacia vera* L.) production in Markazi Region of Iran. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *11*(3), 661-669.
2. Ahmed, N., Xinagyu, G., Alnafissa, M., Ali, A., & Ullah, H. (2025). Linear and non-linear impact of key agricultural components on greenhouse gas emissions. *Scientific Reports*, *15*(1), 5314.
3. Ajith, S., Vijayakumar, S., & Elakkiya, N. (2025). Yield prediction, pest and disease diagnosis, soil fertility mapping, precision irrigation scheduling, and food quality assessment using machine learning and deep learning algorithms. *Discover Food*, *5*(1), 67.
4. Aliabad, F. A., Shojaei, S., Mortaz, M., Ferreira, C. S. S., & Kalantari, Z. (2022). Use of Landsat 8 and UAV images to assess changes in temperature and evapotranspiration by economic trees following foliar spraying with light-reflecting compounds. *Remote Sensing*, *14*(23), 6153.
5. Alipour, H., Hasheminasab, H., & Ranjbar, A. (2025). Selection of Low-Chill Pistachio Cultivars for Adaptation to Climate Change in Temperate and Semi-Arid Regions. *Applied Fruit Science*, *67*(6), 428.
6. Alkorta, I., Epelde, L., & Garbisu, C. (2017). Environmental parameters altered by climate change affect the activity of soil microorganisms involved in bioremediation. *FEMS Microbiology Letters*, *364*(19), fnx200.
7. AL-Saghir, M. G., & Porter, D. M. (2011). Taxonomic revision of the genus Pistacia L. (Anacardiaceae). *American Journal of Plant Sciences*, *3*(1), 12-32.
8. ALshamrani, S.M., Safhi, F.A., Alshaya, D.S., Ibrahim, A.A., Mansour, H., Abd El Moneim D. 2022. Genetic diversity using biochemical, physiological, karyological and molecular markers of *Sesamum indicum* L. Frontiers in Genetics 13:1035977.
9. Babaeian, M., Tavassoli, A., Rastegaripour, F., Rodrigo-Comino, J., & Caballero-Calvo, A. (2025). Analysis of Energy Use and Environmental Impacts of Pistachio (Pistacia vera L.) in Conventional and Bio-friendly Production Systems. *Applied Fruit Science*, *67*(1), 37.
10. Bano A, Gupta A, Rai S, Fatima T, Sharma S, Pathak N. Mechanistic role of reactive oxygen species and its regulation via the antioxidant system under environmental stress. In: Hasanuzzaman M, Nahar K, editors. Plant Stress Physiology - Perspectives in Agriculture. IntechOpen; 2021. p. 1-18.
11. Bellvert, J., Adeline, K., Baram, S., Pierce, L., Sanden, B. L., & Smart, D. R. (2018). Monitoring crop evapotranspiration and crop coefficients over an almond and pistachio orchard throughout remote sensing. *Remote Sensing*, *10*(12), 2001.
12. Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X. C., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., & Hu, C. X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*, *84*, 19-37.
13. Cavicchioli, R., Ripple, W. J., Timmis, K. N., Azam, F., Bakken, L. R., Baylis, M., Behrenfeld, M. J., Boetius, A., Boyd, P. W., Classen, A. T., Crowther, T. W., Danovaro, R., Foreman, C. M., Huisman, J., Hutchins, D. A., Jansson, J. K., Karl, D. M., Koskella, B., Mark Welch, D. B., & Webster, N. S. (2019). Scientists' warning to humanity: Microorganisms and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, *17*(9), 569–586.
14. Chaves, M.M., Flexas, J. & Pinheiro, C. (2009) Photosynthesis under drought and

salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany, 103,* 551–560.

15. Cruz, J. L., Coelho, E. F., Coelho Filho, M. A., & Santos, A. A. D. (2018). Salinity reduces nutrients absorption and efficiency of their utilization in cassava plants. *Ciência Rural*, *48*(11), e20180351.
16. Dastorani, M. T., Heshmati, M., & Sadeghzadeh, M. A. (2010). Evaluation of the efficiency of surface and subsurface irrigation in dryland environments. *Irrigation and Drainage: The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, *59*(2), 129-137.
17. Denaxa, N. K., Nomikou, A., Malamos, N., Liveri, E., Roussos, P. A., & Papasotiropoulos, V. (2022). Salinity effect on plant growth parameters and fruit bioactive compounds of two strawberry cultivars, coupled with environmental conditions monitoring. *Agronomy*, *12*(10), 2279.
18. Doğan, M., & Düdükçü, A. T. (2025). Impacts of Climate Change on the Distribution of Pistachio (*Pistacia vera* L.) and Adaptation Strategies. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, *13*(s2), 3663-3677.
19. Ebrahimi Sirizi, M., Taghavi Zirvani, E., Esmailzadeh, A., Khosravian, J., Ahmadi, R., Mijani, N., & Jokar Arsanjani, J. (2023). A scenario-based multi-criteria decision-making approach for allocation of pistachio processing facilities: A case study of Zarand, Iran. *Sustainability*, *15*(20), 15054.
20. El Yamani, M., Sakar, E. H., Boussakouran, A., & Rharrabti, Y. (2019). Physiological and biochemical responses of young olive trees (*Olea europaea* L.) to water stress during flowering. *Archives of Biological Sciences*, *71*(1), 123-132.
21. Fernandez, E., Mojahid, H., Fadón, E., Rodrigo, J., Ruiz, D., Egea, J. A., & Luedeling, E. (2023). Climate change impacts on winter chill in Mediterranean temperate fruit orchards. *Regional environmental change*, *23*(1), 7.
22. Gholampoor, M., Osku, M., Jahanifard, M., Sarikhani, S., Aliniaeifard, S., Sadeghi-Majd, R., & Roozban, M. R. (2025). Exploring drought adaptation strategies in pistachios through morpho-physiological analysis under deficit irrigation. *Scientific Reports*.
23. Hamed, S. B., Lefi, E., & Chaieb, M. (2025). Water stress effect on grafted *Pistacia vera* L. in field conditions. *Acta Botanica Brasilica*, *39*, e20230184.
24. Hao, D., Li, X., Kong, W., Chen, R., Liu, J., Guo, H., & Zhou, J. (2023). Phosphorylation regulation of nitrogen, phosphorus, and potassium uptake systems in plants. *The Crop Journal*, *11*(4), 1034-1047.
25. Hillabrand, R.M., Hacke, U.G. & Lieffers, V.J. (2016) Drought‐induced xylem pit membrane damage in aspen and balsam poplar. *Plant, Cell & Environment, 39,* 2210‒2220.
26. Hoffmann, J., Berni, R., Hausman, J.-F., & Guerriero, G. (2020). A review on the beneficial role of silicon against salinity in non-accumulator crops: tomato as a model. *Biomolecules 10,* 1284.
27. Hung, H., Halsall, C., Ball, H., Bidleman, T., Dachs, J., De Silva, A., & Wilson, S. (2022). Climate change influence on the levels and trends of persistent organic pollutants (POPs) and chemicals of emerging Arctic concern (CEACs) in the Arctic physical environment–a review. *Environmental Science: Processes & Impacts*, *24*(10), 1577-1615.
28. Iqbal, M. S., Singh, A. K., & Ansari, M. I. (2020). Effect of drought stress on crop production. *New Frontiers in Stress Management for Durable Agriculture*, 35-47.
29. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021:*

The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

30. Jaleel, C. A., Manivannan, P. A. R. A. M. A. S. I. V. A. M., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H. J., Somasundaram, R. A. M. A. M. U. R. T. H. Y., & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture and Biology*, *11*(1), 100-105.
31. Jiang, S., Xiao, B., Fan, X., Li, Y., Ma, X., Wang, J., Yue, B., & Zi, H. (2022). Roles of plants in controlling the response of soil bacterial community to climate warming on the Qinghai-Tibetan Plateau. *European Journal of Soil Biology*, *110*, 103401.
32. Jiang, R., Xie, J., He, H., Luo, J., and Zhu, J. 2015. Use of four drought indices for evaluating droght characteristics under climate change in Shaanxi, China: 1951-2012. *Nature, 75*(3), 2885-2903.
33. Kamran, M., Parveen, A., Ahmar, S., Malik, Z., Hussain, S., Chattha, M. S., & Chen, J. T. (2019). An overview of hazardous impacts of soil salinity in crops, tolerance mechanisms, and amelioration through selenium supplementation. *International journal of molecular sciences*, *21*(1), 148.
34. Kaplan, F., & Öztürk, H. (2025). Effects of Climate Change on Plant Nutrition and Soil Fertility. *Asian Journal of Research in Agriculture and Forestry*, *11*(4), 11-21.
35. Karimi, H. R. (2025). Pistachio rootstocks, their characteristics and breeding traits. *Discover Plants*, *2*(1), 33.
36. Kaur, A. (2024). Precision Pistachios: Enhancing Agricultural Quality Control with Deep Learning. In *2024 Second International Conference on Intelligent Cyber Physical Systems and Internet of Things (ICoICI)* (pp. 1346-1351). IEEE.
37. Kaur, A., Kukreja, V., Upadhyay, D., Aeri, M., & Sharma, R. (2024). An Effective Pistachio Classification by Ensembling Fine-tuned ResNet20 and DenseNet Models. In *2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)* (Vol. 2, pp. 1-6). IEEE.
38. Khmara, M. P. (2025). The impact of artificial intelligence application on the optimization of logistics and warehouse management. *Journal of Strategic Economic Research*, (3), 97-109.
39. Khalilpour, M., Mozafari, V., & Abbaszadeh-Dahaji, P. (2021). Tolerance to salinity and drought stresses in pistachio (Pistacia vera L.) seedlings inoculated with indigenous stress-tolerant PGPR isolates. *Scientia Horticulturae*, *289*, 110440.
40. Kheiralipour, K., Nadimi, M., & Paliwal, J. (2022). Development of an intelligent imaging system for ripeness determination of wild pistachios. *Sensors*, *22*(19), 7134.
41. Khormizi, H. Z., Malamiri, H. R. G., & Ferreira, C. S. S. (2024). Estimation of evaporation and drought stress of pistachio plant using UAV multispectral images and a surface energy balance approach. *Horticulturae*, *10*(5), 515.
42. Komnitsas, K. A., & Doula, M. K. (2017). Framework to improve sustainability of agriculture in small islands: The case of Pistacia vera L. cultivation in Aegina, Greece. *Environmental Forensics*, *18*(3), 214-225.
43. Idress, K. A. D., Öztekin, Y. B., & Gadalla, O. A. A. (2024). Classification of Open and Closed Pistachio Shells Using Machine Vision Approach. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, *21*(4), 854-864.
44. Lestari, F. W., Suminar, E., Nuraini, A., Ezura, H., & Mubarok, S. (2020).

Perubahan viabilitas pollen dan anatomi stomata pada dua mutan tomat, iaa9-3 dan iaa9-5, akibat cekaman suhu tinggi. *Agrikultura*, *31*(1), 25-31.

45. Liu, X., Yang, L., Zhu, H., Zhang, L., An, Y., Wei, L., & Han, Z. (2024). The pistachio quality detection based on deep features plus unsupervised clustering. *Journal of Food Process Engineering*, *47*(1), e14519.
46. Mahroughi, S., Mehrabinejad, H., Ispoglou, T., George, J., & Sheikh-Akbari, A. (2025, June). Innovative Technologies for Non-Intrusive Aflatoxin Detection in Pistachios. In *2025 14th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)* (pp. 1-8). IEEE.
47. Marino, G., Zaccaria, D., Snyder, R. L., Lagos, O., Lampinen, B. D., Ferguson, L., & Sanden, B. L. (2019). Actual evapotranspiration and tree performance of mature micro-irrigated pistachio orchards grown on saline-sodic soils in the San Joaquin Valley of California. *Agriculture*, *9*(4), 76.
48. Martínez-Peña, R., Vélez, S., Vacas, R., Martín, H., & Álvarez, S. (2023). Remote sensing for sustainable pistachio cultivation and improved quality traits evaluation through thermal and non-thermal UAV vegetation indices. *Applied Sciences*, *13*(13), 7716.
49. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., & Zhou, B. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, *2*.
50. Mehrnejad, M. R. (2020). Arthropod pests of pistachios, their natural enemies and management. *Plant Protection Science*, *56*(4), 231-260.
51. Mehrnejad, M. R., & Copland, M. J. W. (2005). The seasonal forms and reproductive potential of the common pistachio psylla, Agonoscena pistaciae (Hem., Psylloidea). *Journal of Applied Entomology*, *129*(6), 342-346.
52. Mittal, M., Gupta, V., Aamash, M., & Upadhyay, T. (2024). Machine learning for pest detection and infestation prediction: A comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, *14*(5), e1551.
53. Moore, C. E., Meacham-Hensold, K., Lemonnier, P., Slattery, R. A., Benjamin, C., Bernacchi, C. J., & Cavanagh, A. P. (2021). The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: from enzymes to ecosystems. *Journal of Experimental Botany*, *72*(8), 2822-2844.
54. Mortazavi, M., Cappelleri, D. J., & Ehsani, R. (2025). RoMu4o: A Robotic Manipulation Unit For Orchard Operations Automating Proximal Hyperspectral Leaf Sensing. *arXiv preprint arXiv:2501.10621*.
55. Nagaraja, G. S., Vanishree, K., & Azam, F. (2023). Novel framework for secure data aggregation in precision agriculture with extensive energy efficiency. *Journal of Computer Networks and Communications*, *2023*(1), 5926294.
56. Nikoogoftar-Sedghi, M., Rabiei, V., Razavi, F., Molaei, S., & Khadivi, A. (2023). The effect of foliar application of *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. seaweed extract on biochemical traits related to abiotic stresses in pistachio (*Pistacia vera* L. cv. Kaleh-Ghoochi). *BMC Plant Biology*, *23*(1), 635.
57. Nongpiur, R.C., Singla-Pareek, S.L. & Pareek, A. (2020) The quest for osmosensors in plants. Journal of Experimental Botany, 71, 595–607.
58. Olola, T. M., & Olatunde, T. I. (2025). Artificial intelligence in financial and supply chain optimization: Predictive analytics for business growth and market stability in the USA. *International Journal of Applied Sciences and Radiation Research*, *2*(1).

59. Orians, C. M., Schweiger, R., Dukes, J. S., Scott, E. R., & Müller, C. (2019). Combined impacts of prolonged drought and warming on plant size and foliar chemistry. *Annals of Botany*, *124*(1), 41-52.
60. Ortega-Beltran, A., Moral, J., Picot, A., Puckett, R. D., Cotty, P. J., & Michailides, T. J. (2019). Atoxigenic Aspergillus flavus isolates endemic to almond, fig, and pistachio orchards in California with potential to reduce aflatoxin contamination in these crops. *Plant Disease*, *103*(5), 905-912.
61. Osku, M., Procino, S., Mascio, I., Miazzi, M. M., Vivaldi, G. A., Vona, D., & Montemurro, C. (2025). Physiological and molecular responses of two contrasting drought resistance pistachio interspecific hybrid rootstocks. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1515819.
62. Özdemir, M., Yağmur, H., & Kaya, B. E. (2025). Analysis of Life Cycle Inventory Data of Pistachio Production through Cobb-Douglas Analogy and Forecasting with ARIMA Model. *Journal of Agriculture*, *8*(1), 35-42.
63. Qiu, J., Shen, Z., & Xie, H. (2023). Drought impacts on hydrology and water quality under climate change. *Science of The Total Environment*, *858*, 159854.
64. Qu, Y., Mueller-Cajar, O. & Yamori, W. (2023) Improving plant heat tolerance through modification of rubisco activase in C3 plants to secure crop yield and food security in a future warming world. *Journal of Experimental Botany, 74*, 591–599.
65. Rani, R., & Lande, J. (2025, April). Automated Pistachio Species Classification Using MobileNetV2: A Deep Learning Approach for Enhanced Agricultural Processing. In *2025 4th OPJU International Technology Conference (OTCON) on Smart Computing for Innovation and Advancement in Industry 5.0* (pp. 1-6). IEEE.
66. Ranjbar, A., Mohammadi, A. H., & Moradinezhad, F. (2025). Aflatoxins control during pre and postharvest stages in commercial pistachio production. *Journal of Stored Products Research*, *111*, 102563.
67. Rekiek, S., Jebari, H., Ezziyyani, M., & Cherrat, L. (2024, December). AI-driven pest control and disease detection in smart farming systems. In *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development* (pp. 801-810). Cham: Springer Nature Switzerland.
68. Rhouma, A., Rhouma, R., & Hajji-Hedfi, L. (2024). The threat of Alternaria Late Blight of Pistachio and its integrated management. *Journal of Oasis Agriculture and Sustainable Development*, *6*(04), 28-37.
69. Sadok, W., Lopez, J.R. & Smith, K.P. (2021) Transpiration increases under high-temperature stress: potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world. *Plant, Cell & Environment, 44,* 2102–2116.
70. Salehi-Lisar, S. Y., & Bakhshayeshan-Agdam, H. (2016). Drought stress in plants: causes, consequences, and tolerance. *Drought stress tolerance in plants, Vol 1: physiology and biochemistry*, 1-16.
71. Sathish, S., & Navamathavan, R. (2024). Pistachio Waste-Derived Activated Carbon Materials for Sustainable Energy Storage: Supercapacitor Applications. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, *13*(2), 021005.
72. Saurabh, K., Prakash, V., Dubey, A. K., Ghosh, S., Kumari, A., Sundaram, P. K., & Singh, R. R. (2024). Enhancing sustainability in agriculture with

nanofertilizers. *Discover Applied Sciences*, *6*(11), 559.

73. Sharma, H., Sidhu, H., & Bhowmik, A. (2025). Remote Sensing Using Unmanned Aerial Vehicles for Water Stress Detection: A Review Focusing on Specialty Crops. *Drones*, *9*(4), 241.
74. Shirvani, H., Fatehi, F., Hejri, S., & Katam, R. (2025). Metabolic Reprogramming and Amino Acid Adjustments in Pistachio (Pistacia vera L.) Under Salinity Stress. *Horticulturae*, *11*(10), 1201.
75. Siahaan, A. P. U., Iqbal, M., Dika, D., & Syahputri, M. (2025). Classification of pistachio varieties using machine learning algorithms. *Jurnal Minfo Polgan*, *14*(1), 1452-1457.
76. Suresh, G., Sharma, P., Dadrwal, B. K., Jat, R. K., Singh, V. P., Kumar, M., & Teja, M. S. V. R. (2025). Climate Extremes and Crop Productivity: Integrating Physiological Mechanisms and Adaptive Traits for Resilience and Yield Stability. *Journal of Scientific Research and Reports*, *31*(10), 585-600.
77. Singh, D., Singh, C. K., Tomar, R. S. S., Taunk, J., Singh, R., Maurya, S., & Dubey, S. K. (2016). Molecular assortment of Lens species with different adaptations to drought conditions using SSR markers. *PLoS One*, *11*(1), e0147213.
78. Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects*, *12*(5), 440.
79. Suriya, R., Indu Rani, C., Savitha, B. K., Ashokkumar, G., Janaki, P., Djanaguiraman, M., & Sudha, M. (2025). Nanofertilizers in vegetable crops: Harnessing nanotechnology for improved crop nutrition and environmental sustainability.
80. Thorne, E. T., Stevenson, J. F., Rost, T. L., Labavitch, J. M., & Matthews, M. A. (2006). Pierce's disease symptoms: comparison with symptoms of water deficit and the impact of water deficits. *American Journal of Enology and Viticulture*, *57*(1), 1-11.
81. Tavakoli, A. R., Sepaskhah, A. R., & Hokmabadi, H. (2024). Introducing a stratified vertical gravel tube subsurface drip system under different irrigation regimes for pistachio: Growth, yield and water productivity. *Irrigation and Drainage*, *73*(2), 426-443.
82. Taylor, A., Zotz, G., Weigelt, P., Cai, L., Karger, D. N., König, C., & Kreft, H. (2022). Vascular epiphytes contribute disproportionately to global centres of plant diversity. *Global Ecology and Biogeography*, *31*(1), 62-74.
83. Todorova, D., Talaat, N. B., Katerova, Z., Alexieva, V., & Shawky, B. T. (2016). Polyamines and brassinosteroids in drought stress responses and tolerance in plants. *Water stress and crop plants: a sustainable approach*, *2*, 608-627.
84. Wessolek, G., Bohne, K., & Trinks, S. (2023). Validation of soil thermal conductivity models. *International Journal of Thermophysics*, *44*(2), 20.
85. Wei, J., Yang, G. Y., Yan, H., Jing, B., & Yu, Y. (2021). Rigid-flexible coupling simulation and experimental vibration analysis of pistachio tree for optimal mechanized harvesting efficiency. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, *28*(22), 2360-2369.
86. Yadav, S., & Atri, N. (2020). Impact of salinity stress in crop plants and mitigation strategies. *New Frontiers in Stress Management for Durable Agriculture*, 49-63.
87. Yaghoubi, M., & Niknami, M. (2022). Challenges of precision agriculture application in pistachio orchards: factor analysis from Iranian Agricultural Experts' Perspective. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, *19*(3), 473-482.
88. Yan, M., Liu, P., Zhao, R., Liu, L., Chen, W., Yu, X., & Zhang, J. (2018). Field microclimate monitoring system based on

wireless sensor network. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *35*(2), 1325-1337.

89. Yarlagadda, K. C. (2025). AI-powered supply chain optimization: Enhancing demand forecasting and logistics. *Journal of Computer Science and Technology Studies*, *7*(4), 792-801.
90. Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., & Gao, B. (2019). Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. *Journal of environmental management*, *232*, 8-21.
91. Yu, K. L., Show, P. L., Ong, H. C., Ling, T. C., Chen, W. H., & Salleh, M. A. M. (2018). Biochar production from microalgae cultivation through pyrolysis as a sustainable carbon sequestration and biorefinery approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *20*, 2047-2055.
92. Zahoor, Z., Khan, I., Hou, F., 2022. Clean energy investment and financial development as determinants of environment and sustainable economic growth: evidence from China. Environ. Sci. Pollut. Res. 29, 16006–16016.
93. Zahra, N., Hafeez, M.B., Ghaffar, A., Kausar, A., Al Zeidi, M., Siddique, K.H.M. et al. (2023) Plant photosynthesis under heat stress: effects and management. Environmental and Experimental Botany, 206, 105178.
94. Zandalinas, S. I., Balfagón, D., Gómez-Cadenas, A., & Mittler, R. (2022). Plant responses to climate change: metabolic changes under combined abiotic stresses. *Journal of Experimental Botany*, *73*(11), 3339-3354.
95. Zhang, B., & Meng, L. (2021). Energy efficiency analysis of wireless sensor networks in precision agriculture economy. *Scientific Programming*, *2021*(1), 8346708.

Improving Pistachio Orchard Productivity under Climate Change: A Review of Innovative Technology Solutions Based on United States Experiences

Azam Ranjbar[1]*, Reza Sedaghat[2]

Abstract

Climate change, as one of the main challenges in the agricultural sector of the twenty-first century, has affected the production of horticultural products, including pistachios. Rising temperatures, reduced water resources, and an increased frequency of extreme climate events have made it ever more clear that traditional pistachio orchard management practices must be reevaluated, and that solutions based on mechanization and modern technologies must be adopted. The United States of America, particularly the state of California, as one of the world's leading pistachio producers, has offered valuable experience in adapting to climate change and optimizing production processes through technology. This review study examines the mechanization solutions and modern technologies employed in American pistachio orchard management with the goal of enhancing productivity and sustainability under climate change conditions. The findings indicate that the use of precision irrigation systems, smart orchard monitoring, advanced harvesting and processing machinery, and the application of big data and artificial intelligence can reduce water and input consumption, increase yield, and improve the resilience of pistachio orchards to climate-induced stresses. These experiences can provide a valuable framework for pistachio producers in other regions of the world, including Iran.

Key words: Economic Development, Food Security, Global Warming, Water Use Efficiency.

.

[1] Pistachio Research Center, Horticultural Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran.
[2] Pistachio Research Center, Horticultural Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rafsanjan, Iran.
∗ Corresponding author: azam_ranjbar91@yahoo.com