



نقش سیستم‌های آگروفارستری در سازگاری با تغییرات اقلیمی مزایا و چالش‌ها

فاطمه احمدلو^{۱*}، محسن کلاگری^۲، سعیده اسکندری^۲ و سارا تیموری^۱

مقدمه

امروزه، تغییر اقلیم به دلیل تأثیرات منفی بر اقتصاد، تولیدات کشاورزی، جوامع اجتماعی و منابع طبیعی، مهم‌ترین تهدید علیه بشریت است و بزرگ‌ترین چالش قرن بیست و یکم شناخته می‌شود (Sabbaghi *et al.*, 2020). اگرچه تغییرات اقلیمی یک فرایند طبیعی است، اما فعالیت‌های انسانی، اثرهای آن را به‌طور قابل‌توجهی تسریع کرده و منجر به تغییراتی در الگوهای بارندگی، تغییرات دما، افزایش سطح دریاها و رویدادهای شدید و مکرر آب‌وهوایی شده است. فعالیت‌های کشاورزی مانند جنگل‌زدایی و افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، آفت‌کش‌ها، مواد شیمیایی کشاورزی، کشت تک‌محصولی و دامداری به‌عنوان علل اصلی گرمایش جهانی شناخته می‌شوند که پیامدهای محلی، ملی و جهانی دارند (Wang *et al.*, 2021). با این حال، بخش کشاورزی به‌طور اساسی، بیش‌ترین حساسیت را به تغییر شرایط اقلیمی دارد، به‌طوری‌که، به‌شکل مستقیم تحت تأثیر تغییرات سطح و الگوی بارش، همچنین تغییرات دما قرار می‌گیرد (Bhattacharjee *et al.*, 2018). اثرهای منفی تغییرات اقلیمی بر بخش کشاورزی با ادغام تخریب منابع طبیعی، تغییر کاربری زمین و تخلیه بیش‌ازاندازه آب تشدید می‌شود (Cui *et al.*, 2020). پیش‌بینی می‌شود، تا پایان سال ۲۰۵۰، تغییرات اقلیمی، تولیدات کشاورزی را ۲۵ درصد کاهش دهد (IPCC, 2018)، همچنین، ۲/۳ میلیارد نفر دیگر به جمعیت کره زمین اضافه شود که منجر به افزایش ۷۰ درصدی مصرف مواد غذایی خواهد شد (Hunt *et al.*, 2018). بنابراین، کاربری‌ها و شیوه‌های کشاورزی باید به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابند تا نیازهای نسل‌های آینده را بدون اعمال فشار بیشتر بر

اکوسیستم‌های جهانی برآورده کنند. مطالعات متعددی از کاهش عملکرد محصولات مختلف در مناطق مختلف کشور به دلیل تغییرات اقلیمی، کاهش منابع آب (Gohari *et al.*, 2013)، تخریب زمین (Mesgaran *et al.*, 2021) و تغییرات ناشی از آب‌وهوا مانند خشک‌سالی (Bhattacharjee *et al.*, 2018) گزارش داده‌اند. علاوه‌براین پیش‌بینی می‌شود، تغییرات اقلیمی آینده تأثیر منفی بر محصولات کشاورزی در مناطق مختلف ایران داشته باشد (Ban-Nayan & Rezaei, 2014). کشاورزی منبع معیشت بیش از ۱۵ میلیون نفر در ایران است که بسیاری از آن‌ها خرده‌مالک هستند و در جوامع روستایی کم‌درآمد زیست می‌کنند (FAO, 2017). با این حال، سیستم‌های کشاورزی باید کارآمدتر و پربارتر باشند (درعین حال منابع طبیعی را حفظ کنند و پایداری را ارتقا دهند) و آسیب‌پذیری این افراد را در برابر تغییرات اقلیمی کاهش دهند. چالش‌های کشاورزی، اجرای برنامه‌هایی مانند آگروفارستری را می‌طلبد که خطر ناامنی غذایی را کاهش می‌دهد، تاب‌آوری جوامع روستایی و معیشت آن‌ها را تقویت می‌کند و سهم بخش کشاورزی را در اقتصاد کشور بهبود می‌بخشد (Coulis *et al.*, 2017).

سیستم‌های کشاورزی باید کارآمدتر و پربارتر باشند (درعین حال منابع طبیعی را حفظ کنند و پایداری را ارتقا دهند) و آسیب‌پذیری این افراد را در برابر تغییرات اقلیمی کاهش دهند. چالش‌های کشاورزی، اجرای برنامه‌هایی مانند آگروفارستری را می‌طلبد که خطر ناامنی غذایی را کاهش می‌دهد، تاب‌آوری جوامع روستایی و معیشت آن‌ها را تقویت می‌کند و سهم بخش کشاورزی را در اقتصاد کشور بهبود می‌بخشد

نیاز به تأمین تغذیه جمعیت روبه‌رشد، کاهش مشکلات زمین‌های کشاورزی و کاهش گرمایش جهانی منجر به ظهور مفاهیمی مانند تشدید پایدار (SI) و کشاورزی هوشمند مبتنی بر اقلیم (CSA) شده است (Manes *et al.*, 2021). اساس این دو مفهوم، افزایش بهره‌وری، همچنین تاب‌آوری زمین‌های کشاورزی در برابر از دست دادن منابع طبیعی، تنوع زیستی و

کشاورزی را ۲۵ درصد کاهش دهد (IPCC, 2018)، همچنین، ۲/۳ میلیارد نفر دیگر به جمعیت کره زمین اضافه شود که منجر به افزایش ۷۰ درصدی مصرف مواد غذایی خواهد شد (Hunt *et al.*, 2018). بنابراین، کاربری‌ها و شیوه‌های کشاورزی باید به‌طور قابل‌توجهی بهبود یابند تا نیازهای نسل‌های آینده را بدون اعمال فشار بیشتر بر

* نویسنده مسئول، استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران پست الکترونیک: fatemeh_ahmadloo@yahoo.com، شماره تماس: ۰۹۱۸۴۳۳۲۴۵۹

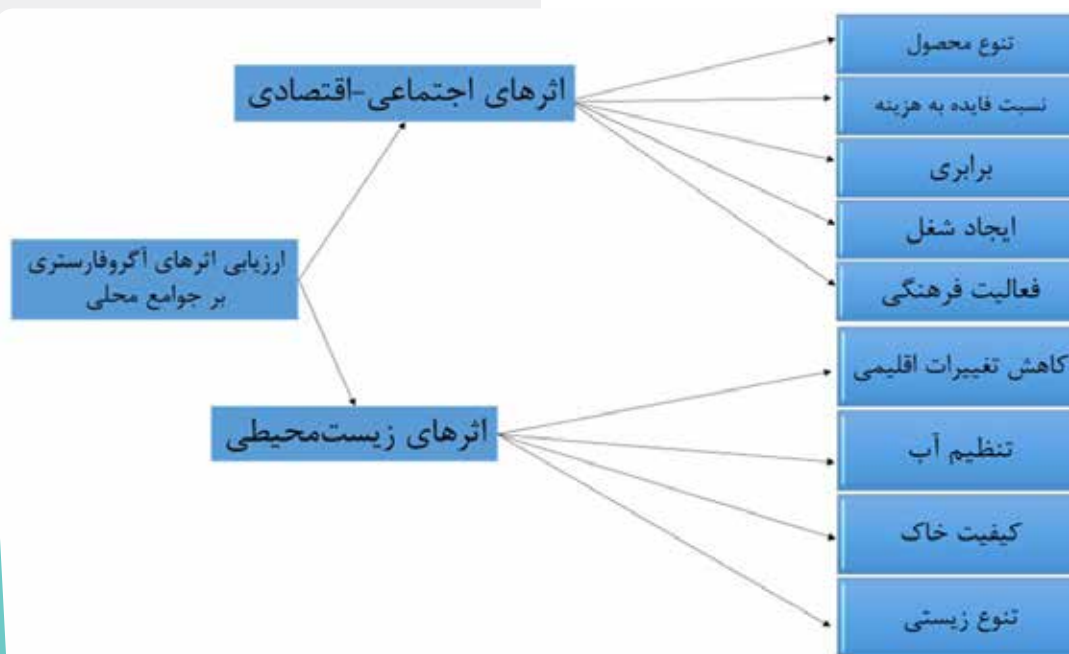
۲- دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران



زیستگاه از طریق استراتژی‌های ایمن و پایدار است که منجر به حفاظت و بهبود خدمات اکوسیستم می‌شود (Thomson et al., 2019). آگروفارستری به‌عنوان نمونه بارز SI و CSA شناخته می‌شود و ادغام هدفمند درختان یا درختچه‌ها با محصولات زراعی و/یا دام است. سیستم آگروفارستری یکی از استراتژی‌های بالقوه سازگاری با تغییرات اقلیمی برای افزایش تاب‌آوری کشاورزان و سیستم‌های کشاورزی در برابر خطرات اقلیمی است که طیف وسیعی از مزایای بیوفیزیکی و اجتماعی - اقتصادی را ارائه می‌دهد (Quandt et al., 2017). طبق گزارش‌های اخیر هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) (Bezner Kerr et al., 2022)، آگروفارستری به‌دلیل مزیت‌های فراوان از جمله هم‌افزایی با کاهش تغییرات اقلیمی از طریق ترسیب کربن، افزایش امنیت غذایی و فرصت‌های درآمدی، تأمین خدمات اکوسیستمی و حفاظت از تنوع زیستی، یک رویکرد کشاورزی - اکولوژیکی امیدوارکننده برای سازگاری با تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌رود (Van Noordwijk et al., 2021). براین اساس، تعدادی از توافق‌نامه‌های بین‌المللی، مانند کنوانسیون چهارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییرات اقلیمی (UNFCCC) و پروتکل کیوتو، دولت‌ها را تشویق کردند که آگروفارستری را در دستور کار خود قرار دهند. علاوه بر این، برنامه REDD (کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از جنگل‌زدایی و تخریب جنگل‌ها) توسط سازمان ملل متحد در سال ۲۰۰۵ با هدف پاداش دادن به کشورهای در حال توسعه برای به‌کارگیری استراتژی‌های پایدار آگروفارستری و جلوگیری از تخریب جنگل‌ها آغاز شد (Ickowitz et al., 2017). اگرچه آمار دقیقی در مورد سطح عرصه‌های آگروفارستری وجود ندارد، اما برآوردها نشان می‌دهند، در حال حاضر سیستم‌های آگروفارستری، ۱/۰۲۳ میلیارد هکتار را دربرمی‌گیرند و تقریباً ۵۶۰ میلیون نفر را در کشورهای در حال توسعه پشتیبانی می‌کنند (Shi et al., 2018).

اهمیت آگروفارستری

آگروفارستری از طریق نقش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی خود، آن‌چنان به پایداری محیط‌زیست کمک می‌کند که نمی‌توان اهمیت آن را نادیده گرفت، آگروفارستری با تأمین غذا و سایر نیازهای اساسی (مانند چوب سوخت، مواد نگه‌دارنده، الیاف، چوب، کنسانتره‌های دارویی، روغن‌ها، میوه‌ها و علوفه حیوانات)، همچنین ایفای نقش حیاتی در حاصلخیزی خاک، به بخش بزرگی از جمعیت روستایی سود می‌رساند (شکل ۱) و



شکل ۱- فلوچارت اثرهای آگروفارستری بر جوامع محلی

علاوه بر افزایش درآمد کشاورزان، به پایداری و استمرار امنیت غذایی نیز کمک می‌کند (احمدلو و همکاران، ۱۴۰۱). از مزایای اصلی آگروفارستری نیز می‌توان به حفظ تنوع زیستی، حفاظت از محیط‌زیست (حوزه آبخیز) و کاهش تغییرات اقلیمی و سازگاری با آن‌ها به‌منظور توسعه پایدار اشاره کرد. اثرهای سیستم‌های آگروفارستری بر جامعه و محیط‌زیست را می‌توان با استفاده از پارامترهای مدل مانند زیست‌توده اندام‌های هوایی، نرخ رشد درخت، میزان پوشش گیاهی، توانایی ذخیره کربن و تغییرات در هزینه‌های ورودی و محصول تخمین زد (Jalón et al., 2018; Kraft et al., 2021).

سناریوی تغییر اقلیم و آگروفارستری

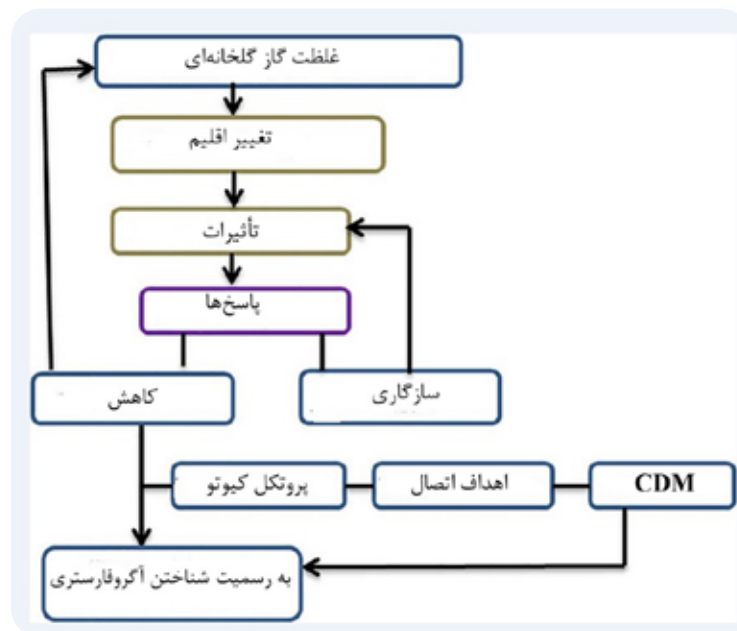
انتظار می‌رود تغییر آب‌وهوا در قرن بیست و یکم در پاسخ به روند روبه‌افزایش انتشار جهانی گازهای گلخانه‌ای ادامه یابد. بنابراین، آگروفارستری مکانیسم کاربری زمین از طریق ترسیب گازهای مختلف گلخانه‌ای است. جدول ۱، خلاصه

جامعی را از غلظت گازهای گلخانه‌ای کلیدی مانند دی‌اکسیدکربن (CO₂)، متان (CH₄) و دی‌نیتروژن مونوکسید (N₂O) در جو، همان‌طور که در پنجمین گزارش ارزیابی IPCC ارائه شده است، نشان می‌دهد. این جدول افزایش قابل توجه غلظت‌های CH₄، CO₂ و N₂O را نسبت به سطوح پیش از صنعتی شدن نشان می‌دهد و تأثیر فزاینده فعالیت‌های انسانی را بر سیستم آب‌وهوایی جهانی برجسته می‌سازد. این مقادیر به‌عنوان معیاری برای ارزیابی روندهای فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارزیابی اثربخشی تلاش‌های بین‌المللی برای کاهش انتشار آن‌ها عمل می‌کنند.

اقلیم جهانی در معرض تغییرات فزاینده است و این موضوع در سال‌های اخیر آشکارتر شده است. این گرمایش سیستم اقلیمی، همان‌طور که اکنون از مشاهده افزایش میانگین دمای جهانی هوا و اقیانوس، ذوب گسترده برف و یخ و افزایش میانگین سطح آب دریاها مشهود است، امری بدیهی است (IPCC, 2007). امروزه، آگروفارستری به‌عنوان یک علم کاربردی یکپارچه شناخته می‌شود که پتانسیل پرداختن را به بسیاری از مسائل مربوط به سازگاری و کاهش تغییرات اقلیمی دارد (شکل ۲).

جدول ۱- غلظت گازهای گلخانه‌ای (IPCC, 2013) قبل و بعد از صنعتی شدن

گاز	غلظت عنصر در جو قبل از سال ۱۷۵۰ میلادی	غلظت عنصر در جو در سال‌های اخیر	درصد افزایش از ۱۷۵۰ میلادی تا سال‌های اخیر (درصد)
دی‌اکسیدکربن (CO ₂)	۲۸۰ ppm	۳۹۵/۴ ppm	۴۱/۲
متان (CH ₄)	۷۰۰ ppb	۱۸۹۳ ppb	۱۷۰/۴
دی‌نیتروژن مونوکسید (N ₂ O)	۲۷۰ ppb	۳۲۶ ppb	۲۰/۷



شکل ۲- نقش آگروفارستری در سازگاری و کاهش تغییرات اقلیمی (IPCC, 2013)

CDM (مکانیسم توسعه پاک): یک مکانیسم همکاری بین‌المللی است که تحت پیمان کیوتو بنا نهاده شده است و منابع بسیار مهمی را برای دستیابی به توسعه پایدار از طریق ترویج سرمایه‌گذاری در پروژه‌های سازگار با محیط‌زیست در اختیار کشورهای درحال توسعه قرار می‌دهد.



نقش شیوه‌های آگروفارستری در سازگاری با تغییرات اقلیمی

شیوه‌های آگروفارستری نقش مهمی را در افزایش تاب‌آوری اقلیمی، به‌ویژه در مناطقی که در معرض تغییرات اقلیمی هستند، ایفا می‌کنند. مطالعات کمی نشان می‌دهند، سیستم‌های آگروفارستری، حاصلخیزی خاک، حفظ آب و بهره‌وری محصول را بهبود می‌بخشند و آسیب‌پذیری را در برابر خشک‌سالی و سایر تنش‌های ناشی از آب‌وهوا کاهش می‌دهند (جدول ۲). به‌عنوان نمونه، مطالعه‌ای توسط Mbow و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد، ادغام درختان در اراضی کشاورزی می‌تواند کربن آلی خاک (SOC) را ۲۰ تا ۳۰ درصد بهبود بخشد، نفوذ آب را افزایش دهد و محصولات را در برابر دوره‌های طولانی خشک‌سالی محافظت کند. به‌طور مشابه و براساس تحقیقات Ajayi و همکاران (۲۰۱۱)، به‌کارگیری شیوه‌های آگروفارستری توسط کشاورزان در کشورهای جنوب صحرائی آفریقا، موجب افزایش ۴۰ درصدی عملکرد ذرت شد، این شیوه‌ها شامل کشت مخلوط با درختان تثبیت‌کننده نیتروژن بود.

علاوه بر بهبود بهره‌وری کشاورزی، شیوه‌های آگروفارستری خدمات اکوسیستمی را نیز ارائه می‌دهند که برای سازگاری با اقلیم ضروری هستند. ارزیابی‌های کمی نشان می‌دهند، سیستم‌های مبتنی بر درخت، رواناب سطحی را ۳۰ تا ۵۰ درصد، کاهش و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی را افزایش می‌دهند که برای حفظ کشاورزی در طول الگوهای نامنظم بارندگی ضروری هستند (Nyaga et al., 2021). علاوه بر این، درختان در سیستم‌های آگروفارستری به‌عنوان بادشکن عمل می‌کنند، آسیب به محصولات را کاهش و عملکرد را در مناطق نیمه‌خشک تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهند (Rahman et al. 2012). این شیوه‌ها حفاظت از تنوع زیستی و تاب‌آوری اکوسیستم را در برابر تغییرات اقلیمی تقویت می‌کنند. به‌عنوان مثال، این روش‌ها در غرب آفریقا و در قطعاتی که سیستم‌های آگروفارستری دارند و گونه‌های متنوع درختی را در خود جای داده‌اند، شیوع آفات را کاهش داده

و منجر به کاهش ۲۰ درصدی تلفات محصول در مقایسه با مزارع تک‌کشتی شده‌اند (Duguma et al., 2019).

مکانیسم‌های شیوه‌های آگروفارستری برای سازگاری با تغییرات اقلیمی

شیوه‌های آگروفارستری با ادغام درختان با محصولات کشاورزی و دام، نقش مهمی در افزایش تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی دارند و سیستم‌های کشاورزی پایدارتر و سازگارتری ایجاد می‌کنند. شواهد کمی نشان می‌دهند، سیستم‌های آگروفارستری می‌توانند فرسایش خاک را تا ۵۰ درصد کاهش دهند، در نتیجه رطوبت خاک را حفظ می‌کنند و دسترسی به آب برای محصولات در دوره‌های خشک‌سالی بهبود می‌بخشند (Mbow et al., 2014). علاوه بر این، این سیستم‌ها به تنظیم دما در اراضی کشاورزی کمک می‌کنند و دمای سطح را ۲ تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهند، این موضوع در نهایت می‌تواند، موجب کاهش اثرهای تنش گرمایی بر محصولات کشاورزی و دام شود (Thorlakson & Neufeldt, 2012). علاوه بر این، شیوه‌های آگروفارستری ذخایر کربن آلی خاک را افزایش می‌دهند، به‌طوری‌که مطالعات نشان می‌دهند، این افزایش تا ۲۵ درصد در مقایسه با سیستم‌های تک‌کشتی است و در نتیجه حاصلخیزی و بهره‌وری خاک بهبود می‌یابد (Zomer et al., 2016). تنوع منابع درآمد از طریق محصولات درختی، مانند میوه و چوب، به کشاورزان خرده‌مالک در امنیت معیشت کمک می‌کند. به‌عنوان مثال گزارش شده است، سیستم‌های زراعت-دام و درخت به دلیل بهبود دسترسی به علوفه، تولید شیر را در مناطق خشک ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش می‌دهند (Jose, 2009). این مکانیسم‌ها در مجموع پتانسیل شیوه‌های آگروفارستری را برای افزایش تاب‌آوری اقلیمی، تضمین امنیت غذایی و معیشت پایدار در مناطق آسیب‌پذیر برجسته می‌کنند. در ادامه مکانیسم‌های اصلی شیوه‌های آگروفارستری شامل بهبود سلامت خاک، مدیریت آب، تنظیم میکروکلیمات و مدیریت آفات و بیماری‌ها برای سازگاری با تغییرات اقلیمی نشان داده شده است.

جدول ۲- نقش شیوه‌های آگروفارستری در سازگاری با تغییرات اقلیمی در سراسر جهان

کشور/ منطقه	نوع فعالیت آگروفارستری	نقش سازگاری با اقلیم	منبع
اتیوپی	باغ‌های خانگی، زمین پارک	افزایش مقاومت در برابر خشک‌سالی، بهبود حاصلخیزی خاک، پشتیبانی از امنیت غذایی	(Kindu et al., 2014)
هند	کشت توأم درختان و محصولات زراعی، باغ‌های خانگی	تنظیم میکروکلیمات، ایجاد درآمد متنوع	(Nair, 2011)
برزیل	ترکیب محصولات زراعی، دام و درختان	افزایش ترسیب کربن، حفظ تنوع زیستی	(Montagnini & Nair, 2004)
کنیا	کشت توأم درختان و محصولات زراعی	جلوگیری از فرسایش، افزایش امنیت غذایی و افزایش عرضه علوفه	(Mbow et al., 2014)
اندونزی	کشت توأم درختان و محصولات زراعی	خدمات اکوسیستم و حفاظت طبیعی برای کاهش خطر سیل	van Noordwijk et al., (2021)
نیکاراگوئه	ترکیب دام و درختان	افزایش تاب‌آوری معیشت در برابر تغییرات اقلیمی	(Molua, 2005)
فیلیپین	کشت توأم درختان و محصولات زراعی در ارتفاعات	تثبیت دامنه‌ها و پشتیبانی از درآمدهای متنوع	(Lasco et al., 2014)

الف) بهبود سلامت خاک

این سیستم در آن مناطق می‌تواند به کاهش فرسایش خاک و غرقاب شدن کمک کند (Jose, 2009). سیستم‌های آگروفارستری با افزایش نفوذ آب، به تغذیه مجدد منابع آب زیرزمینی و کاهش خطر سیلاب کمک می‌کنند. وجود پوشش گیاهی همچنین سرعت آب سطحی را کاهش می‌دهد و فرسایش و از بین رفتن خاک سطحی را به حداقل می‌رساند (FAO, 2017). علاوه بر این، تاج پوشش درختان می‌تواند به تعدیل شدت بارندگی، کاهش تأثیر باران‌های شدید بر سطح خاک و بهبود مدیریت آب کمک کند (Garrity et al., 2010).

ج) تنظیم میکروکلیم

سیستم‌های آگروفارستری نقش مهمی در تعدیل شرایط آب‌وهوایی محلی از طریق تنظیم میکروکلیم ایفا می‌کنند. درختان و درختچه‌ها در این سیستم‌ها، از طریق تاج پوشش، سایه تولید می‌کنند که مقدار دما را کاهش می‌دهد و نیز موجب کاهش تنش گرمایی بر محصولات کشاورزی و دام‌ها می‌شود و محیط مطلوب‌تری را برای آن‌ها ایجاد می‌کند. این اثر سایه‌اندازی به‌ویژه در شدت گرما مفید است، زیرا به حفظ شرایط دمایی پایدارتر کمک می‌کند (Jose, 2009). بادشکن‌ها، نوعی سیستم آگروفارستری هستند که در آن ردیف‌هایی از درختان یا درختچه‌ها برای حفاظت از محصولات کشاورزی و دام‌ها در برابر باد کاشته می‌شوند و می‌توانند به تنظیم میکروکلیم کمک می‌کنند. بادشکن‌ها با کاهش سرعت باد، تلفات تیخیر از خاک و گیاهان را به حداقل می‌رسانند و به حفظ رطوبت خاک و کاهش خطر خشک‌سالی کمک می‌کنند (Holmes, 2015).

د) مدیریت آفات و بیماری‌ها

تنوع زیستی در سیستم‌های آگروفارستری مزایای قابل توجهی برای مدیریت آفات و بیماری‌ها ارائه می‌دهد. تنوع گیاهان و زیستگاه‌های

شيوه‌های آگروفارستری با بهبود حاصلخیزی، ساختار و حفظ رطوبت خاک، سلامت خاک را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهند. ادغام درختان و درختچه‌ها در سیستم‌های کشاورزی، مواد آلی را از طریق برگ‌های خشک، زیست‌توده ریشه و اندام گیاهی در حال تجزیه به خاک اضافه می‌کند (Getachew & Mulatu, 2024). این ماده آلی، خاک را با مواد مغذی، غنی می‌کند و ساختار آن را بهبود می‌بخشد و منجر به تهویه بهتر و افزایش ظرفیت نگهداری آب می‌شود که در دوره‌های خشک‌سالی و الگوهای بارش بسیار مهم است (Nair, 2011). مزایای سازگاری شامل افزایش ظرفیت خاک در حفظ رطوبت، کاهش آسیب‌پذیری در برابر خشک‌سالی و بهبود امنیت غذایی است، همان‌طور که با افزایش عملکرد تا ۳۰ درصد در سیستم‌های مبتنی بر آگروفارستری در مقایسه با کشت تک‌محصولی مشهود است (Ahmed et al., 2021). درختان همچنین می‌توانند به مواد مغذی از لایه‌های عمیق‌تر خاک دسترسی یابند و آن‌ها را جذب کنند، این مواد سپس از طریق ریزش برگ و جذب از طریق ریشه در اختیار محصولات زیرکشت قرار می‌گیرند. این فرایند به افزایش حاصلخیزی خاک و کاهش نیاز به کود کمک می‌کند (Montagnini & Nair, 2004).

ب) مدیریت آب

سیستم‌های آگروفارستری از طریق بهبود نفوذ آب و کاهش رواناب، مدیریت آب را بهبود می‌بخشند. سیستم‌های ریشه درختان و درختچه‌ها، با ایجاد کانال‌هایی در خاک، نفوذ بهتر آب را تسهیل می‌کنند و رواناب سطحی را کاهش می‌دهند. این امر به‌ویژه در مناطقی که مستعد بارندگی شدید است، اهمیت دارد، به‌طوری‌که

جدول ۳- سازوکارهای شیوه‌های آگروفارستری برای سازگاری با تغییرات اقلیمی

مکانیسم آگروفارستری	مکان نمونه	توضیحات	منبع
تنظیم میکروکلیم	منطقه ساحل و غرب آفریقا	درختان سایه ایجاد می‌کنند، سرعت باد را کاهش می‌دهند و دمای اراضی کشاورزی را پایین می‌آورند.	(Bayala et al., 2012)
بهبود حاصلخیزی خاک	ارتفاعات مرکزی، کنیا	ادغام درختان تثبیت‌کننده نیتروژن، سطح مواد مغذی خاک را بهبود می‌بخشد.	(Mowo et al., 2010)
نگهداری از آب	گات‌های غربی، هند	آگروفارستری رواناب را کاهش و نفوذ آب را افزایش می‌دهد.	(Nyaga et al., 2021)
حفاظت از تنوع زیستی	حوزه آمازون، برزیل	آگروفارستری روبشگاه را حفظ می‌کند و فشار را بر جنگل‌های طبیعی کاهش می‌دهد.	(Schroth et al., 2004)
تنوع‌بخشی به معیشت	اتیوپی (SNNPR)	باغ‌های خانگی و درختان، سپر دفاعی در برابر از بین رفتن محصولات و ناامنی غذایی هستند.	(Negash & Niehof, 2004)
ترسیم کرین	اندونزی (سوماترا)	سیستم‌های آگروفارستری چندلایه، سطوح بالایی از کرین را در زیست‌توده ذخیره می‌کنند.	(Hairiah et al., 2011)

SNNPR: کشورهای جنوبی، ملیتها و مناطق محلی



ایجادشده توسط این سیستم‌ها، از شکارچیان طبیعی و حشرات مفیدی، که جمعیت آفات را کنترل می‌کنند، پشتیبانی می‌کند. به‌عنوان مثال، وجود گیاهان گل‌دار و پوشش گیاهی متنوع می‌تواند گرده‌افشان‌ها و حشرات شکارچی را که از آفات آسیب‌رسان به محصولات کشاورزی تغذیه می‌کنند، جذب کند (Garrity et al., 2010). علاوه بر این، تنوع ساختاری در سیستم‌های آگروفارستری می‌تواند چرخه حیات آفات را مختل کند و تراکم جمعیت آن‌ها را کاهش دهد. با ایجاد یک محیط پیچیده‌تر و ناهمگن‌تر، این سیستم‌ها می‌توانند میزان شیوع آفات و بیماری‌ها را کاهش دهند (Tscharrntke et al., 2005). این تنظیم طبیعی آفات و بیماری‌ها، وابستگی به آفت‌کش‌های شیمیایی را کاهش می‌دهد که هم با محیط‌زیست سازگار هستند و هم از نظر اقتصادی به‌صرفه‌اند. جدول ۳ مکانیسم‌های کلیدی را ارائه می‌دهد که از طریق آن‌ها شیوه‌های آگروفارستری به سازگاری با تغییرات اقلیمی کمک می‌کنند و نقش آن‌ها را در تنظیم میکروکلیم، حفظ منابع خاک و آب، تنوع‌بخشی به معیشت و ترسیب کربن برجسته می‌سازد.

نقش شیوه‌های آگروفارستری در کاهش تغییرات اقلیمی

شیوه‌های آگروفارستری با افزایش ترسیب کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، نقش مهمی در کاهش تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند. مطالعات کمی نشان داده‌اند، این سیستم‌ها می‌توانند بسته به گونه درخت، تراکم کاشت و شیوه‌های مدیریتی، بین ۱/۵ تا ۲/۵ مگاگرم کربن را در هکتار

در سال ترسیب کنند (Nair et al., 2010). علاوه بر این، ادغام درختان در اراضی کشاورزی می‌تواند وابستگی به نهاده‌های مبتنی بر سوخت‌های فسفیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. به‌عنوان مثال، Sharma و همکاران (۲۰۲۱) گزارش دادند، سیستم‌های ترکیب درخت + دام به دلیل بهبود چرخه مواد مغذی، انتشار اکسیدنیترژن را در مقایسه با سیستم‌های چرای سنتی ۲۵ درصد کاهش می‌دهند.

فرا تر از ترسیب کربن، آگروفارستری ذخایر کربن آلی خاک (SOC) را نیز افزایش می‌دهد. یک متا‌آنالیز توسط Lorenz و Lal (۲۰۱۴) نشان داد، آگروفارستری در مقایسه با سیستم‌های تک‌کشتی، SOC را ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. علاوه بر این، آگروفارستری از طریق تنظیم میکروکلیم به تاب‌آوری اقلیمی کمک می‌کند که سبب کاهش دماهای شدید و حفاظت از بهره‌وری محصول در شرایط تغییرات آب‌وهوایی می‌شود (Mbow et al., 2014). ادغام درختان تثبیت‌کننده نیترژن، حاصلخیزی خاک را نیز بهبود می‌بخشد و منجر به کشاورزی پایدار می‌شود و درعین حال انتشار گازهای گلخانه‌ای را توسط کودهای شیمیایی کاهش می‌دهد (Jose, 2009). بنابراین، سیستم‌های آگروفارستری یک رویکرد چندوجهی را برای کاهش تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهند. با ترکیب ترسیب کربن، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش سلامت خاک، این سیستم در دستیابی به اهداف جهانی آب‌وهوا نقش دارد و هم‌زمان سبب معیشت پایدار می‌شود. جدول ۴، سیستم‌های مختلف آگروفارستری و نقش‌های مهم آن‌ها را در کاهش تغییرات اقلیمی از طریق افزایش ترسیب کربن نشان می‌دهد. این

جدول ۴- سیستم‌های آگروفارستری و نقش آن‌ها در کاهش تغییرات اقلیمی از طریق ترسیب کربن

مکان/ موقعیت	یافته‌ها	منبع
کنیا (ارتفاعات غربی)	سیستم‌های آگروفارستری تا ۶۸ مگاگرم کربن را در هکتار در زیست‌توده‌های هوایی و زیرزمینی ذخیره کردند.	(Mutuo et al., 2005)
ساحل (مالی، بورکینافاسو)	زمین پارک، کربن خاک را ۱۰ تا ۳۰ درصد بهبود بخشید و حاصلخیزی و تاب‌آوری خاک را در درازمدت افزایش داد.	(Bayala et al., 2006)
هند (هارینا و پنجاب)	سیستم‌های آگروفارستری مبتنی بر صنوبر، ۶ تا ۸/۲ مگاگرم کربن را در هکتار در سال در زیست‌توده درخت و خاک ذخیره کردند.	(Kumar & Nair, 2012)
برزیل (منطقه آمازون)	سیستم‌های آگروفارستری چندلایه تا ۷۲ مگاگرم کربن را در هکتار در زیست‌توده و خاک ذخیره کردند.	(Montagnini & Nair, 2004)
اتیوپی (ارتفاعات مرکزی)	ادغام درختان در مزارع، ۲۰ تا ۳۲ مگاگرم کربن را در هکتار ترسیب کرد و تنظیم میکروکلیم را بهبود بخشید.	(Fekadu et al., 2019)
اندونزی (سوماترا)	آگروفارستری با درختان کائوچو، ذخایر کربنی را تا ۹۱ مگاگرم کربن در هکتار افزایش داد، جایگزین خوبی برای کشت‌های تک‌محصولی است.	(Hairiah et al., 2011)
کامرون	سیستم‌های آگروفارستری با کاکائو ضمن حفاظت از تنوع زیستی، ترسیب کربن را نیز افزایش دادند.	(Duguma et al., 2019)
نیکاراگوئه	باغ‌های خانگی ۳۰ تا ۵۰ مگاگرم کربن را در هکتار ذخیره کردند و به جلوگیری از جنگل‌زدایی کمک کردند.	(de Jong et al., 2001)
تانزانیا (اوسامبارا)	سیستم‌های آگروفارستری مبتنی بر علوفه، ۴۵ تا ۶۰ مگاگرم کربن را در هکتار در زیست‌توده چوبی و لاش‌برگ ترسیب کردند.	(Kaonga & Bayliss-Smith, 2009)
فیلیپین	سیستم‌های آگروفارستری آیش، ۱۳ تا ۱۹ مگاگرم کربن را در هکتار در طول یک دوره ۶ ساله جذب کردند.	(Lasco et al., 2002)

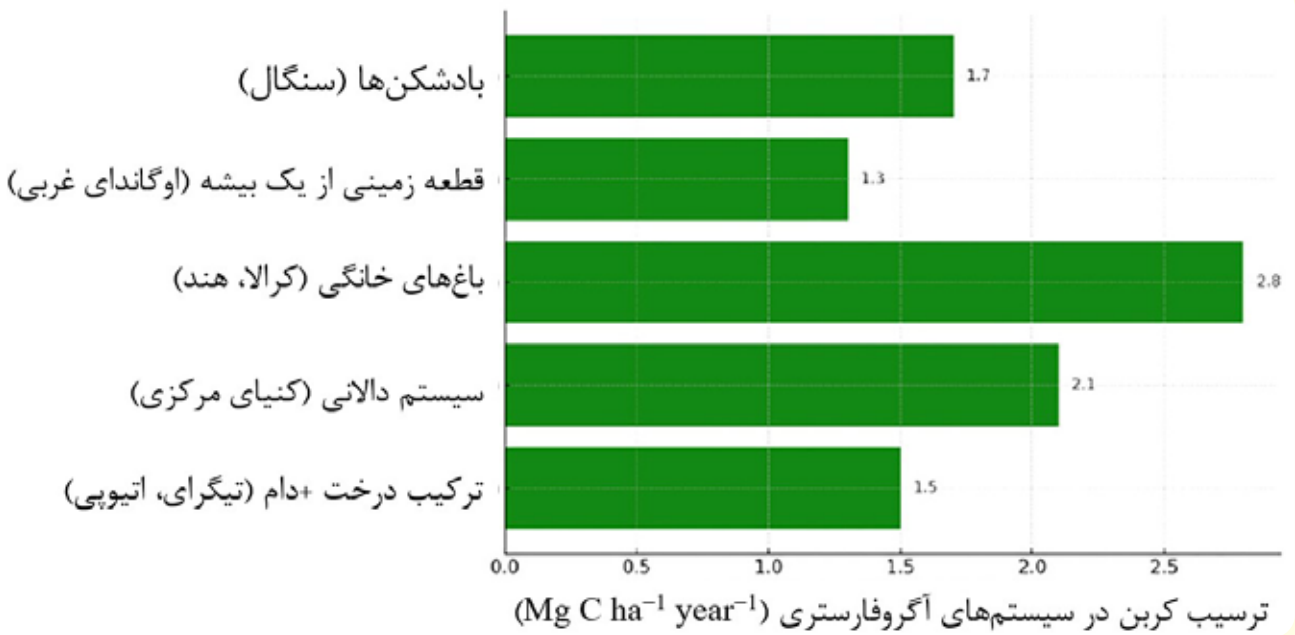
جدول، شیوه‌های مختلف آگروفارستری، مانند ترکیب درختان و دام، سیستم راهرویی (دالانی)، باغ‌های خانگی و ترکیب کشت توأم درختان و محصولات زراعی را دسته‌بندی می‌کند و سهم آن‌ها را در ذخیره‌سازی کربن در هر دو بخش اندام هوایی و اندام زمینی گیاه شرح می‌دهد. همچنین نشان داده شده است، این سیستم‌ها با افزایش بهره‌وری استفاده از زمین و ترویج مدیریت پایدار منابع، تجمع زیست‌توده را افزایش می‌دهند، محتوای ذخیره کربن آلی خاک را بهبود می‌بخشند و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند. به‌طور کلی، داده‌های ارائه‌شده در جدول ۴، مزایای چندمنظوره آگروفارستری را به‌عنوان یک راه‌حل مبتنی بر طبیعت در کاهش تغییرات اقلیمی نشان می‌دهند.

مکانیسم‌های شیوه‌های آگروفارستری برای کاهش تغییرات اقلیمی

شیوه‌های آگروفارستری با افزایش ترسیب کربن، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارتقای سلامت خاک، به‌طور قابل توجهی در کاهش تغییرات اقلیمی نقش دارند. مطالعات کمی نشان داده‌اند، این سیستم‌ها می‌توانند بسته به گونه‌های درختی، شیوه‌های مدیریتی و شرایط آب‌وهوایی، بین ۲ تا ۴ مگاگرم کربن را در هکتار در سال ترسیب کنند (Mbow et al., 2014). به‌عنوان مثال مشخص شد، سیستم‌های ترکیب درخت + دام در مناطق گرمسیری به‌دلیل بهبود کیفیت علوفه و ایجاد سایه با توسعه تاج‌پوشش درختان و کاهش استرس بر دام، انتشار متان از دام را ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش می‌دهند (Nair et al., 2009). علاوه‌براین، آگروفارستری ذخایر کربن آلی خاک (SOC) را بهبود می‌بخشد. یک متا‌آنالیز توسط Udawatta و Jose (۲۰۱۱) نشان داد، خاک‌های تحت سیستم‌های آگروفارستری ۲۰ تا ۳۰ درصد کربن آلی بیشتری نسبت به سیستم‌های تک‌کشتی دارند.

شکل ۳، پتانسیل ترسیب کربن سیستم‌های مختلف آگروفارستری را، که بر حسب مگاگرم کربن در هکتار در سال ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) اندازه‌گیری شده است، نشان می‌دهد. داده‌ها نشان‌دهنده تنوع قابل توجه در بین سیستم‌ها هستند، به‌طوری‌که برخی از سیستم‌ها به‌دلیل تفاوت در ترکیب گونه‌ها، شیوه‌های مدیریتی و مناطق اکولوژیکی، نرخ ترسیب کربن بسیار بالاتری دارند.

این نمودار میانگین پتانسیل سالانه ترسیب کربن پنج سیستم رایج آگروفارستری شامل ترکیب درخت و دام، کشت دالانی، باغ‌های خانگی، بیشه‌ها و بادشکن‌ها را براساس مقادیر گزارش‌شده در مطالعات تجربی انجام‌شده در اتیوپی، کنیا، هند، اوگاندا و سنگال نشان می‌دهد. طبق نتایج Montagnini و Nair (۲۰۰۴)، سیستم‌های آگروفارستری پتانسیل قابل توجهی برای ترسیب کربن جوی، به‌ویژه در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری دارند. به‌عنوان مثال، باغ‌های خانگی گرمسیری در کراالا، هند، به‌دلیل تنوع بالای درختان و پوشش تاجی در تمام طول سال، می‌توانند تا $2/8$ مگاگرم کربن را در هکتار در سال ترسیب کنند (Kumar, 2006). سیستم‌های چراگاه‌های جنگلی در اتیوپی، که دام و درختان را با هم ادغام می‌کنند، حدود $1/5$ مگاگرم کربن را در هکتار در سال ذخیره می‌کنند، درحالی‌که بادشکن‌ها در سنگال با کاهش فرسایش و جذب کربن همچون پوشش گیاهی حاشیه زمین، تقریباً $1/7$ مگاگرم کربن را در هکتار در سال ذخیره می‌کنند (Mbow et al., 2014). این یافته‌ها نشان می‌دهند، سیستم‌های متنوع مبتنی بر درخت، یک استراتژی مناسب را برای کاهش تغییرات اقلیمی در جغرافیای مختلف در کشورهای جنوب صحرائی آفریقا و جنوب آسیا ارائه می‌دهند. علاوه‌براین، آگروفارستری با کاهش وابستگی به کودهای شیمیایی و در نتیجه مهار انتشار دی‌نیتروژن مونوکسید (N_2O) به



شکل ۳- ترسیب کربن سیستم‌های مختلف آگروفارستری بر حسب مگاگرم کربن در هکتار در سال ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$)



کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند، ادغام درختان تثبیت‌کننده نیتروژن در سیستم‌های کشاورزی می‌تواند تا ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن را در هکتار در سال تأمین کند و نیاز به کود را ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد (Garrity, 2004). علاوه بر این، آگروفارستری با ارائه منابع جایگزین چوب سوخت و الوار، از جنگل‌زدایی جلوگیری می‌کند. این مکانیسم‌ها در مجموع نقش چندمنظوره آگروفارستری را در مقابله با تغییرات اقلیمی و درعین حال حمایت از تولید پایدار کشاورزی نشان می‌دهند. مکانیسم‌های شیوه‌های آگروفارستری برای کاهش تغییرات اقلیمی شامل ترسیب کربن، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و غنی‌سازی تنوع زیستی در زیر فهرست شده‌اند.

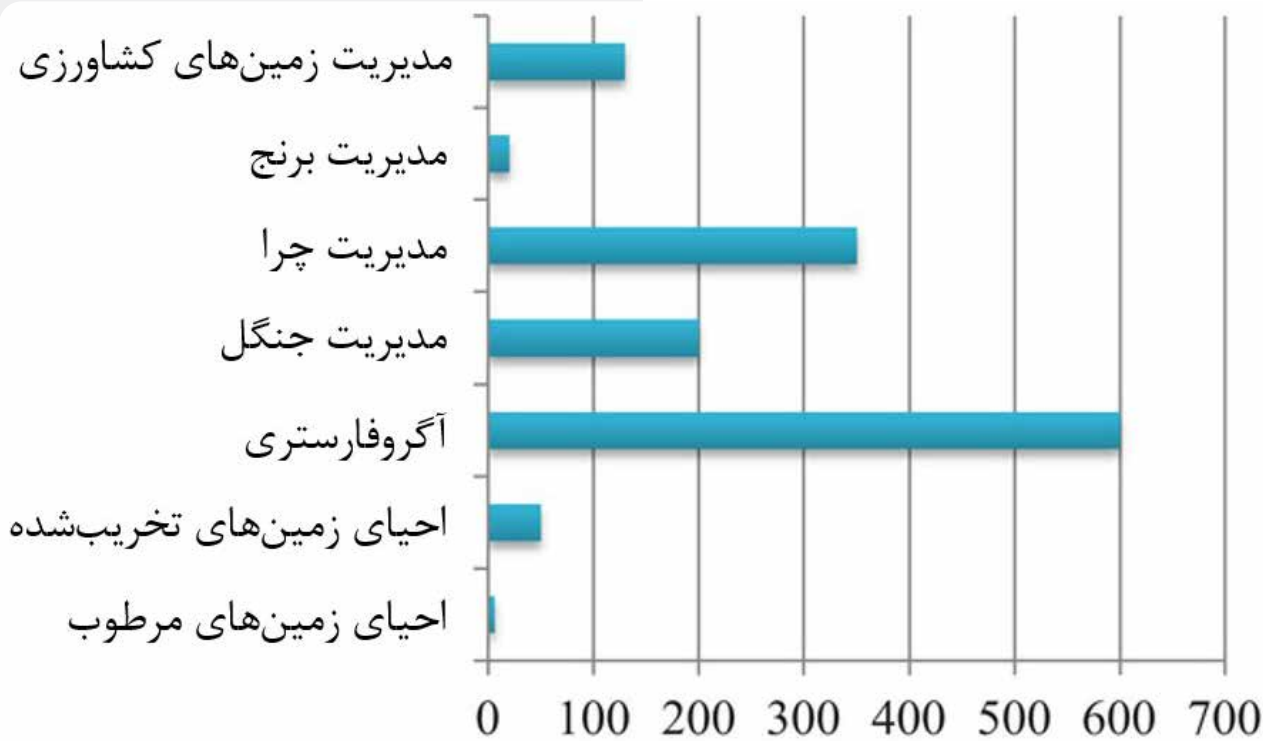
الف) ترسیب کربن

سیستم‌های آگروفارستری به‌طور مؤثر کربن را در زیست‌توده و خاک ترسیب می‌کنند و در نتیجه اثرهای تغییرات اقلیمی را کاهش می‌دهند. درختان و درختچه‌ها در این سیستم‌ها، دی‌اکسید کربن جوی (CO₂) را از طریق فتوسنتز، جذب و آن را در زیست‌توده خود در چوب، برگ و ریشه ذخیره می‌کنند. این فرایند به کاهش غلظت CO₂ در جو، که یکی از اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای است، کمک می‌کند (Nair, 2010). علاوه بر ذخیره کربن اندام هوایی، سیستم‌های آگروفارستری، ترسیب کربن خاک را نیز افزایش می‌دهند. ادغام

ریشه‌های درختان در خاک، ساختار خاک را بهبود می‌بخشد و منجر به افزایش ماده آلی و ذخیره کربن می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند، در مقایسه با سیستم‌های کشاورزی تک‌کشتی، سیستم‌های آگروفارستری می‌توانند ذخایر کربن خاک را تا ۲۰ تا ۳۰ درصد افزایش دهند (Montagnini & Nair, 2004). تجزیه برگ‌ها و سایر مواد آلی از درختان نیز به تشکیل مخازن پایدار کربن آلی (SOC) کمک می‌کند (Lal, 2020). سیستم‌های آگروفارستری به دلیل پتانسیل قابل توجه ترسیب کربن در مقایسه با سایر انواع کاربری زمین، به‌طور گسترده شناخته شده‌اند (شکل ۴). با ادغام درختان با محصولات زراعی و دام، آگروفارستری تجمع زیست‌توده و ذخیره کربن آلی (SOC) را افزایش می‌دهد و آن را به یک استراتژی مؤثرتر برای کاهش تغییرات اقلیمی نسبت به شیوه‌های کشاورزی مرسوم یا مزارع تک‌کشتی تبدیل می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند، سیستم‌های آگروفارستری در مقایسه با زمین‌های زراعی و مراتع می‌توانند مقادیر بیشتری از کربن را در اندام هوایی و زمینی ترسیب کنند، درحالی‌که مزایای زیست‌محیطی و اجتماعی - اقتصادی بیشتری نیز ارائه می‌دهند (Montagnini & Nair, 2004).

ب) کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

سیستم آگروفارستری از طریق بهبود مدیریت مواد مغذی و کاهش فرسایش خاک به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. در



پتانسیل ترسیب کربن تا سال ۲۰۴۰ (میلیون تن کربن در سال)

شکل ۴- پتانسیل ترسیب کربن سیستم آگروفارستری در مقایسه با سایر کاربری‌های زمین (IPCC, 2000)

موانع اجرایی هستند.

الف) هزینه‌های اولیه

یکی از موانع اصلی پذیرش آگروفارستری، سرمایه‌گذاری اولیه موردنیاز برای ایجاد و نگهداری سیستم‌هاست. هزینه‌های مرتبط با کاشت درختان، خرید نهال و مدیریت سیستم می‌تواند برای کشاورزان خرده‌مالک یا کسانی که منابع محدودی دارند، بازدارنده باشد (Abdul-Salam et al., 2022). بازگشت دیر هنگام سرمایه‌گذاری در آگروفارستری نیز، مانع دیگری است، چراکه معمولاً چندین سال طول می‌کشد تا درختان، قطور و قابل فروش شوند. این عوامل می‌توانند پذیرندگان بالقوه را منصرف کنند (Nair, 2011).

ب) رقابت بر سر زمین

سیستم‌های آگروفارستری اغلب با کاربری‌های سنتی زمین‌های کشاورزی رقابت می‌کنند. تخصیص زمین برای درختان و درختچه‌ها در مناطقی با تراکم جمعیت بالا یا مناطقی که در آن‌ها زمین به شدت برای تولید مواد غذایی استفاده می‌شده است، می‌تواند چالش برانگیز باشد. این رقابت برای زمین به تضاد بین اهداف حفاظتی و نیازهای امنیت غذایی منجر می‌شود (Schroth et al., 2017).

ج) کمبود دانش فنی و تخصص

اغلب، کمبود دانش فنی و تخصص در مورد اجرا و مدیریت سیستم‌های آگروفارستری وجود دارد. ممکن است کشاورزان با مزایا و شیوه‌های مرتبط با این سیستم آشنا نباشند و خدمات ترویجی کافی را برای آموزش و پشتیبانی لازم دریافت نکنند (Garrity et al., 2010).

ملاحظات اقتصادی و اجتماعی

ملاحظات اقتصادی و اجتماعی شامل موارد زیر است:

- نیاز بیشتر به نیروی کار که ممکن است با زمان کار در سایر مزارع هم‌زمان شود.
- رقابت بین محصولات زراعی و باغی (درختی) که ممکن است میزان کل تولید را نسبت به کشت خالص کمتر کند.
- طولانی بودن دوره رشد درختان
- مقاومت زارعان برای جایگزین کردن درختان با محصولات زراعی به ویژه در جاهایی که زمین کمیاب است.
- پیچیدگی زیاد کار و برنامه‌ریزی در سیستم‌های آگروفارستری نسبت به سیستم‌های زراعی متداول
- انتخاب درختانی که تاج کوچک و سبک داشته باشند، به طوری که نور کافی به گونه‌های زراعی برسد.
- انتخاب درختانی با ریشه عمیق، تا رطوبت و مواد غذایی از عمق بیشتر خاک جذب شود. درحالی‌که گونه‌های زراعی، رطوبت و مواد غذایی خود را از لایه سطحی خاک به دست می‌آورند.
- فاصله درخت کاری طوری در نظر گرفته شود که اثرهای رقابتی را با گونه‌های زراعی کاهش دهد.

این سیستم‌ها، درختان و درختچه‌ها می‌توانند با جذب و بازیافت مواد مغذی، به بهینه‌سازی چرخه مواد مغذی کمک کنند و نیاز به کود را کاهش دهند. این امر انتشار دی‌نیتروژن مونوکسید (N_2O)، را نیز به حداقل می‌رساند (Jose, 2009). این گاز، یکی از قوی‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که در پی استفاده بیش از اندازه کود منتشر می‌شود. نتایج نشان می‌دهند، سیستم‌های آگروفارستری می‌توانند $3/5$ تا $9/8$ مگاگرم CO_2 را در هکتار در سال جذب کنند که این میزان بسته به گونه درخت، نوع خاک و شرایط آب‌وهوایی متفاوت است (Smith et al., 2020). علاوه بر این، ادغام درختان با محصولات زراعی و دام، تنوع زیستی را 25 تا 40 درصد افزایش می‌دهد و محتوای SOC را به طور متوسط 15 درصد در طول دو دهه بهبود می‌بخشد (Jones et al., 2019). علاوه بر این، درختان در سیستم‌های آگروفارستری با تثبیت خاک توسط ریشه‌هایشان، فرسایش خاک را کاهش می‌دهند، این روش از هدررفت خاک سطحی، که غنی از کربن آلی است و برای رشد گیاه ضروری است، جلوگیری می‌کند. سیستم‌های آگروفارستری با به حداقل رساندن فرسایش خاک، به حفظ کربن خاک و کاهش میزان کربن آزاد شده در جو کمک می‌کنند (Lasco et al., 2014).

ج) غنی‌سازی تنوع زیستی

سیستم‌های آگروفارستری نقش حیاتی در حفظ و افزایش تنوع زیستی دارند و به پایداری و تاب‌آوری اکوسیستم کمک می‌کنند. سیستم‌های آگروفارستری با ادغام درختان و درختچه‌ها با محصولات زراعی و دام، زیستگاه‌های متنوعی را ایجاد می‌کنند که از طیف وسیعی از گونه‌ها، از جمله حشرات، پرندگان و سایر حیات وحش حفاظت می‌کنند (Garrity et al., 2010). این افزایش تنوع زیستی می‌تواند عملکردهای اکوسیستم مانند گرده‌افشانی، کنترل آفات و چرخه مواد مغذی را بهبود دهد. سیستم‌های آگروفارستری متنوع همچون، کریدورها و پناهگاه‌های اکولوژیکی را برای گونه‌ها فراهم می‌کنند که در غیر این صورت ممکن است با شیوه‌های کشاورزی تک‌کشتی جایگزین شوند. پیچیدگی ساختاری مناظر آگروفارستری، با انواع گیاهان متنوع و چیدمان‌های فضایی آن‌ها، از یک اکوسیستم مقاوم‌تر و سازگارتر پشتیبانی می‌کند (Tschantke et al., 2005). این تنوع زیستی نه تنها به پایداری اکوسیستم کمک می‌کند، بلکه توانایی آن را در مقابله با تغییرات و عوامل استرس‌زای محیطی، از جمله موارد ناشی از تغییرات اقلیمی، افزایش می‌دهد.

چالش‌ها و محدودیت‌های سیستم آگروفارستری

اگرچه آگروفارستری مزایای بی‌شماری برای سازگاری و کاهش تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد، اما چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی می‌توانند بر اجرای گسترده آن تأثیر بگذارند. این چالش‌ها و محدودیت‌ها شامل موانع اجرایی و ملاحظات اقتصادی و اجتماعی در سطح گسترش نوع سیستم کاربردی آن می‌شود.

موانع اجرایی

هزینه‌های اولیه، رقابت بر سر زمین و کمبود دانش فنی و تخصص،



مزایای بیوفیزیکی و اجتماعی - اقتصادی آگروفارستری
 بررسی تحقیقات اخیر در مورد مزایای بیوفیزیکی و اجتماعی -
 اقتصادی آگروفارستری برای سازگاری با تغییرات اقلیمی نشان
 داد:

الف) مزایای بیوفیزیکی

آگروفارستری می‌تواند ریزاقلیم‌هایی با میانگین دمای هوای پایین‌تر ایجاد کند. با سایه‌اندازی روی محصولات، میزان تعرق محصول کاهش دهد. آب را از لایه‌های عمیق‌تر خاک توسط درختان و از لایه‌های بالاتر خاک توسط ریشه سایر محصولات زیرکشت جذب کند (Padovan *et al.*, 2015)، از دست دادن خاک را در هنگام بارندگی شدید و / یا سیل در پایین دست به حداقل برساند، بادشکن ایجاد کند و محصولات را از آسیب باد حفظ کند (Holmes, 2015). آگروفارستری می‌تواند با افزایش نیتروژن و کربن خاک (Haskett *et al.*, 2019)، همچنین افزایش ناهمگونی مکانی جامعه میکروبی خاک (Guillot *et al.*, 2019)، تاب‌آوری خاک‌های کشاورزی را افزایش دهد.

باین حال، سیستم آگروفارستری ممکن است به دلیل کاهش نور در دسترس و کاهش احتمالی فتوسنتز محصول و رقابت بین درختان و محصولات برای دریافت آب موجود، تأثیرات منفی بر محصولات زیرکشت داشته باشد (Thevathasan & Gordon, 2004). تحقیقات اخیر، مزایای بیوفیزیکی آگروفارستری را در مورد سازگاری با تغییرات اقلیمی از طریق مدل‌سازی بیوفیزیکی سناریوهای اقلیمی پیش‌بینی شده و تأثیر آن‌ها بر تولیدات کشاورزی نشان می‌دهند (Reyes *et al.*, 2021) و دیدگاه‌های کشاورزان را در مورد مزایای بیوفیزیکی این سیستم ارائه می‌کنند.

به‌طور فزاینده‌ای، از مدل‌سازی بیوفیزیکی برای درک چگونگی حفاظت درختان در سیستم آگروفارستری از محصولات زیرکشت در برابر رویدادهای شدید اقلیمی و تغییرات طولانی‌مدت آب‌وهوا استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، Reyes و همکاران (۲۰۲۱) رشد تک‌کشتی گندم دوروم زمستانی را در مقایسه با سیستم کشت راهرویی مبتنی بر گردو با استفاده از پیش‌بینی‌های IPCC، که به سه سناریو تقسیم شده بودند، مدل‌سازی کردند: گذشته (۱۹۵۱-۱۹۹۰)، حال (۱۹۹۱-۲۰۳۰) و آینده (۲۰۳۱-۲۰۷۰). مدل‌های آن‌ها نشان دادند، حتی با وجود دو برابر شدن تنش‌های گرما، خشک‌سالی و نیتروژن از سناریوهای گذشته به آینده، این تنش‌ها در سیستم آگروفارستری با درختان متوسط به مقدار ۲۰ تا ۳۵ درصد کاهش یافته و به تثبیت عملکرد محصول کمک کرده است. در برزیل نیز، Gomes و همکاران (۲۰۲۰) با مدل‌سازی نشان دادند، چگونه سیستم‌های آگروفارستری مبتنی بر درخت قهوه با پوشش سایه ۵۰ درصدی می‌توانند میانگین دما را کاهش دهند و ۷۵ درصد از منطقه مناسب برای تولید قهوه را در سال ۲۰۵۰ حفظ کنند. علاوه بر این، Chemura و همکاران (۲۰۲۱) از مدل‌های APSIM (شبیه‌ساز سیستم تولید کشاورزی) برای تخمین عملکرد پیش‌بینی شده ذرت در سال ۲۰۵۰ در اتیوپی استفاده کردند و دریافتند، ۲۰ درصد سایه ایجاد شده در سیستم آگروفارستری مبتنی بر درختان چندمنظوره، تلفات عملکرد ذرت را

حدود ۱۱ درصد کاهش می‌دهد.

ب) مزایای اجتماعی - اقتصادی

با توجه به محدودیت‌های زمین و توانایی سیستم‌های آگروفارستری در افزایش تولید در همان قطعه زمین، زمین‌های حاشیه‌ای و کوچک کشاورزان از مزایای اجتماعی زیادی برخوردار است. افزایش مساحت تحت پوشش این سیستم و فعالیت‌های توسعه زنجیره ارزش مرتبط با آن، مانند توسعه نهالستان‌ها، مزارع، افزایش چوب‌بری‌ها و سازماندهی گروه‌های بازاریابی، سبب ایجاد شغل پایدار و فعالیت‌های تولید و کسب درآمد شده است. مزایای عمومی اجتماعی - اقتصادی سیستم‌های آگروفارستری به‌خوبی شناخته شده است و شامل تأمین غذا و درآمد از درختان، محصولات کشاورزی و دام می‌شود (Lasco *et al.*, 2014). تحقیقات اخیر نشان داده است، مزایای عمومی اجتماعی - اقتصادی همچنین می‌توانند به کشاورزان کمک کنند تا با افزایش ظرفیت سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری خود، با رویدادهای شدید ناشی از تغییرات آب‌وهوایی سازگار شوند (Quandt, 2020). کشاورزان در کنیا تأکید کرده‌اند، کاشت گونه‌های درختی مقاوم به خشکی، تاب‌آوری آن‌ها را در برابر خشک‌سالی افزایش می‌دهد (Quandt, 2020). درحالی‌که جهان با فشارهای روبه‌افزایش تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و ناامنی غذایی مواجه است، آگروفارستری راه‌حل قابل‌قبولی برای دستیابی به سیستم‌های کشاورزی پایدار و مقاوم است. پذیرش آگروفارستری می‌تواند آینده‌ای سبزتر، سالم‌تر و ایمن‌تر برای همه به ارمغان آورد. مقایسه شرایط اجتماعی - اقتصادی کشاورزان دارای سیستم آگروفارستری و سیستم تک‌کشتی در بنگلادش نشان داد، کشاورزان دارای سیستم آگروفارستری از نظر اجتماعی و اقتصادی وضعیت بهتری نسبت به کشاورزان دارای سیستم تک‌کشتی دارند (Chakraborty *et al.*, 2015). جدول ۵، ویژگی‌های اجتماعی - اقتصادی و جمعیتی کشاورزان را در سطح کشور ایران نشان می‌دهد (Kheiri *et al.*, 2023). این گزارش، درصد کشاورزانی را ارائه می‌دهد که براساس درآمد سالانه‌شان به طبقات بسیار پایین، پایین، متوسط، بالا و بسیار بالا طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین، درصد کشاورزانی را نشان می‌دهد که براساس سطح تحصیلاتشان به طبقات بی‌سواد، ابتدایی یا غیررسمی، دبیرستان و کاردانی یا بالاتر طبقه‌بندی می‌شوند.

جدیدترین تحقیقات پیرامون مزایای اجتماعی - اقتصادی آگروفارستری برای سازگاری با تغییرات آب‌وهوایی، برای شناخت دیدگاه‌های کشاورزان، از نظرسنجی‌ها و مصاحبه‌ها استفاده کرده است. تحقیقات در کنیا، نپال و سنگال نشان داده است، هنگام مواجهه با رویدادهای شدید آب‌وهوایی، کشاورزان خرده‌مالک برای کسب درآمد از فروش محصولات درختی، همچنین میوه، هیزم، علوفه، چوب و دارو برای مصرف خانوار به درختان این سیستم متکی هستند (Quandt, 2020). تأمین غذا، چوب سوخت و مصالح ساختمانی توسط کشاورزان کامرون به‌عنوان مزایای اصلی سیستم آگروفارستری در زمینه سازگاری با تغییرات اقلیمی ذکر شده است. Córdova و همکاران (۲۰۱۹) هنگام مقایسه کشاورزان دارای

جدول ۵- ویژگی‌های اجتماعی- اقتصادی و جمعیتی کشاورزان در ایران

متغیر	گروه	فراوانی	درصد
سن	≤ ۲۰	۳۲۸۷	۰/۱۳
	۲۱-۳۰	۱۳۳۴۰۰	۵/۴
	۳۱-۴۰	۴۰۹۷۸۵	۱۶/۵
	۴۱-۵۰	۵۸۵۹۶۷	۲۳/۶
	۵۱-۶۰	۵۹۹۸۰۰	۲۴/۲
	۶۱-۷۰	۴۰۷۳۸۲	۱۶/۴
	≥ ۷۰	۳۴۳۲۷۰	۱۳/۸
	کل	۲۴۸۲۸۹۱	۱۰۰
درآمد سالانه	خیلی کم (≥ ۷۵ میلیون ریال)	۱۹۷۷۶۹	۸
	کم (۱۲۰-۷۶ میلیون ریال)	۲۷۷۲۵۴	۱۱/۲
	متوسط (۱۹۵-۱۲۱ میلیون ریال)	۶۰۵۸۳۶	۲۴/۴
	زیاد (۳۶۰-۱۹۶ میلیون ریال)	۸۹۰۶۳۴	۳۵/۹
	خیلی زیاد (≥ ۳۶۰ میلیون ریال)	۵۱۱۳۹۷	۲۰/۶
کل	۲۴۸۲۸۹۱	۱۰۰	
سطح تحصیلات	بی سواد	۸۵۲۸۲۲	۳۴/۴
	ابتدایی/ غیررسمی	۸۷۱۸۳۹	۳۵/۱
	دبیرستان	۶۲۸۴۸۱	۲۵/۳
	تحصیلات دانشگاهی	۱۲۹۷۴۸	۵/۲
	کل	۲۴۸۲۸۹۱	۱۰۰
مالکیت زمین	مالک زمین	۲۰۷۶۹۶۰	۸۴/۷
	بی زمین	۴۰۵۹۳۱	۱۶/۳
	کل	۲۴۸۲۸۹۱	۱۰۰
اشتغال*	شاغل	۱۹۷۴۵۸۴۶	۹۱/۶
	بیکار	۱۸۱۰۷۵۴	۸/۴
	کل	۲۱۵۵۶۶۰۰	۱۰۰

* به اشتغال در جوامع روستایی ایران اشاره دارد.



سیستم تک‌کشتی با آگروفارستری دریافتند، کشاورزان دارای سیستم تک‌کشتی تأثیر منفی بیشتری از عوامل استرس‌زای مرتبط با تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی و سلامت احساس می‌کنند. Thorlakson و Neufeldt (۲۰۱۲) گزارش دادند، کشاورزانی که در کنیا، سیستم آگروفارستری دارند، در طول خشک‌سالی طولانی‌مدت، ۲۵ درصد بیشتر از کشاورزان دارای سیستم تک‌کشتی، امنیت غذایی را تجربه کرده‌اند. درختان در سیستم آگروفارستری همچنین با ذخیره سرمایه مالی برای مواقع ضروری، نقش مهمی در کمک به کشاورزان در مدیریت ریسک و عدم قطعیت ایفا می‌کنند. در یک منطقه در نیپال، بیش از ۸۰ درصد از کشاورزانی، که سیستم آگروفارستری را اجرا می‌کنند، برای کاهش ریسک مرتبط با آب‌وهوا و اقلیم در کمک به آن‌ها و جلوگیری از بدهی در مواقع نیاز مالی، به فروش محصولات درختی مانند چوب، هیزم، علوفه و میوه اقدام کرده‌اند. علاوه بر این، سیستم‌های آگروفارستری منابع

درآمدی متنوعی را برای کشاورزان ایجاد می‌کنند و به توانایی آن‌ها در سازگاری با رویدادهای شدید آب‌وهوایی می‌افزایند. مزایای اجتماعی - اقتصادی آگروفارستری به صورت کلی در زیر فهرست شده‌اند.

- ارتقای کیفیت زندگی در جوامع محلی: آگروفارستری، با ایجاد فرصت‌های شغلی و درآمدی جدید می‌تواند به ارتقای سطح زندگی در جوامع محلی کمک کند. این سیستم کشاورزی می‌تواند فقر را در مناطق روستایی کاهش دهد و استانداردهای زندگی را بهبود بخشد. علاوه بر این، ترویج آگروفارستری می‌تواند به حفظ و تقویت فرهنگ‌ها و دانش‌های بومی در مدیریت پایدار منابع طبیعی منجر شود.

- حمایت از زنان و گروه‌های آسیب‌پذیر: آگروفارستری می‌تواند نقش مهمی در حمایت از زنان و گروه‌های آسیب‌پذیر در جوامع روستایی ایفا کند. زنان اغلب نقش‌های کلیدی در کشاورزی و

مدیریت منابع طبیعی دارند و سیستم‌های آگروفارستری می‌تواند فرصت‌های بیشتری برای مشارکت آن‌ها در اقتصاد محلی فراهم کند. آموزش و توانمندسازی زنان در این زمینه می‌تواند به بهبود وضعیت اقتصادی و اجتماعی آن‌ها منجر شود. اطمینان از اینکه

شیوه‌های آگروفارستری با ارزش‌ها و نیازهای محلی هم‌سو هستند، برای پذیرش و اثربخشی آن‌ها بسیار مهم است.

نتیجه‌گیری

با وجود مزایای فراوان، آگروفارستری با چالش‌هایی از جمله کمبود آگاهی و دانش در میان کشاورزان در خصوص مدیریت کشت‌های متنوع، دسترسی محدود به منابع و بازارها و محدودیت‌های سیاستی مواجه است. از دیگر چالش‌ها، تنوع در شرایط محلی، مانند انواع خاک، اقلیم و الگوهای کاربری زمین است که می‌تواند بر اثربخشی و سازگاری سیستم‌های آگروفارستری تأثیر بگذارد. برای غلبه بر این مشکلات، ضروری است، آموزش و خدمات ترویجی که مهارت‌ها و دانش لازم را به کشاورزان ارائه می‌دهند، ترویج شود. علاوه بر این، سیاست‌ها و مشوق‌های مالی حمایت‌کننده می‌توانند به پذیرش روش‌های آگروفارستری کمک کنند. نوآوری در تکنیک‌ها و فناوری‌های کشاورزی متناسب با شرایط اکولوژیکی مختلف، می‌تواند بهره‌وری را بهینه کند و در عین حال تنوع

زیستی را ارتقا دهد. تحقیقات آینده باید بر بهینه‌سازی سیستم‌های آگروفارستری برای شرایط اکولوژیکی و اجتماعی - اقتصادی مختلف متمرکز شود که شامل مطالعه ارتباطات بین درختان و محصولات کشاورزی، شناسایی گونه‌های درختی مناسب و توسعه مدل‌های نوآورانه آگروفارستری است که حداکثر منافع محیطی و اقتصادی را فراهم می‌کند. پیشرفت‌های فناوری فرصت‌های قابل توجهی را برای بهبود شیوه‌های آگروفارستری ارائه می‌دهند. نوآوری‌هایی مانند سنجش از دور، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و کشاورزی دقیق می‌توانند طراحی و مدیریت این سیستم‌ها را بهبود بخشند. به عنوان مثال، GIS می‌تواند برای نقشه‌برداری از انواع خاک و بهینه‌سازی الگوهای کاشت درخت استفاده شود، در حالی که سنجش از دور می‌تواند سلامت جنگل و تغییرات کاربری زمین را پایش کند. ادغام این فناوری‌ها می‌تواند کارایی و نتایج این سیستم‌ها را بهبود بخشد. تحقیق در مورد مدل‌های جدید آگروفارستری، که با شرایط متغیر محیطی و اجتماعی - اقتصادی سازگار باشند، نیز بسیار مهم است. به عنوان مثال، بررسی ادغام گونه‌های درختی مقاوم به خشک‌سالی و انواع محصولات می‌تواند تاب‌آوری را در

مناطق خشک و نیمه‌خشک افزایش دهد. علاوه بر این، توسعه سیستم‌های آگروفارستری، که محصولات سنتی را با درختان با ارزش ترکیب می‌کنند، می‌تواند منابع درآمدی متنوعی را فراهم کند و پایداری اقتصادی را افزایش دهد.

با وجود مزایای فراوان، آگروفارستری با چالش‌هایی از جمله کمبود آگاهی و دانش در میان کشاورزان در خصوص مدیریت کشت‌های متنوع، دسترسی محدود به منابع و بازارها و محدودیت‌های سیاستی مواجه است. از دیگر چالش‌ها، تنوع در شرایط محلی، مانند انواع خاک، اقلیم و الگوهای کاربری زمین است که می‌تواند بر اثربخشی و سازگاری سیستم‌های آگروفارستری تأثیر بگذارد. برای غلبه بر این مشکلات، ضروری است، آموزش و خدمات ترویجی که مهارت‌ها و دانش لازم را به کشاورزان ارائه می‌دهند، ترویج شود. علاوه بر این، سیاست‌ها و مشوق‌های مالی حمایت‌کننده می‌توانند به پذیرش روش‌های آگروفارستری کمک کنند. نوآوری در تکنیک‌ها و فناوری‌های کشاورزی متناسب با شرایط اکولوژیکی مختلف، می‌تواند بهره‌وری را بهینه کند و در عین حال تنوع زیستی را ارتقا دهد.

- <https://doi.org/10.3390/su11092623>.
- Coulibaly, J.Y., Chiputwa, B., Nakelse, T. and Kundhlande, G., 2017. Adoption of agroforestry and the impact on household food security among farmers in Malawi. *Agricultural Systems*, 155: 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.03.017>.
- Cui, X., 2020. Climate change and adaptation in agriculture: Evidence from US cropping patterns. *Journal of Environmental Economics and Management*, 101: 102306. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102306>.
- de Jong, B.H.J., Ong, C.K., Vlam, M.F. and Soekardi, M., 2001. The potential of agroforestry for carbon sequestration in the humid tropics of Mexico. *Agroforestry Systems*, 51(2): 117–132. <https://doi.org/10.1023/A:1010629009288>.
- Duguma, LA., Minang, P.A. and van Noordwijk, M., 2019. Climate change mitigation and adaptation in the land use sector: from complementarity to synergy. *Environmental Management*, 63(2): 201–217. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1117-9>.
- FAO. 2017. Agroforestry for landscape restoration: exploring the potential of agroforestry to enhance the sustainability and resilience of degraded landscapes. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i7374en/i7374EN.pdf>.
- Fekadu, M., Tadesse, W. and Belay, B., 2019. Carbon stock potential of agroforestry practices in central highlands of Ethiopia. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 11(6): 89–97.
- García de Jalón, S., Graves, A., Palma, J.H., Williams, A., Upson, M. and Burgess, P.J., 2018. Modelling and valuing the environmental impacts of arable, forestry and agroforestry systems: A case study. *Agroforestry systems*, 92(2): 1059–1073. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0128-z>.
- Garrity, D.P., 2004. Agroforestry and the achievement of the millennium development goals. *Agroforestry Systems*, 61(1-3): 5–17. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028986.37502.7c>.
- Garrity, D.P., Akinnifesi, F.K., Ajayi, O.C., Weldesemayat Sileshi, G., Mowo, J.G., Antoine, K., Mahamane, L. and Bayala, J., 2010. Evergreen agriculture: a robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Security*, 2(3): 197–214. <https://doi.org/10.1007/s12571-010-0070-7>.
- Getachew, G. and Mulatu, A., 2024. Agroforestry contribution to native woody species conservation, carbon sequestration, and livelihood benefits in Ethiopia: A systematic review. *Journal of Landscape Ecology*, 7(2): 101–129. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2024-0012>.
- Gohari, A., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Bavani, A.M., Wang, D. and Madani, K., 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River basin. *Science of The Total Environment*, 442C(4): 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.029>.
- Gomes, L.C., Bianchi, F.J.J.A., Cardoso, I.M., Fernandes, R.B.A., Fernandes Filho, E.I. and Schulte. RPO., 2020. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 294: 106858. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>.
- Guillot, E., Hinsinger, P., Dufour, L., Roy, J. and Bertrand, I., 2019. With or without trees: resistance and resilience of soil microbial communities to drought and heat stress in a Mediterranean agroforestry system. *Soil Biology*
- احمدلو، ف.، کلاگری، م.، صالحی، آ.، اسکندری، س. ۱۴۰۱. ارزیابی سودمندی عملکرد و بهره‌وری اقتصادی صنوبر در تلفیق با محصولات زراعی، علوفه‌ای و دارویی، مجله طبیعت ایران، ۲۷(۲): ۳۵–۴۸.
- Abdul-Salam, Y., Ovando, P. and Roberts, D., 2022. Understanding the economic barriers to the adoption of agroforestry: A Real Options analysis. *Journal of Environmental Management*, 302(Part A):113955. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113955>.
- Ajayi, O.C., Akinnifesi, F.K. Sileshi, G. and Chakeredza, S., 2011. Adoption of renewable soil fertility replenishment technologies in Southern African region: lessons learnt and the way forward. *Natural Resources Forum*, 35(2): 129–151. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2011.01386.x>.
- Bannayan, M. and Rezaei, E.E., 2014. Future production of rainfed wheat in Iran (Khorasan province): climate change scenario analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(2): 211–227. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9435-x>.
- Bayala, J., Sanou, J., Teklehaimanot, Z. and Kalinganire, A., 2006. Effects of pruning on millet yield and soil carbon under *Faidherbia albida* parkland systems in West Africa. *Agroforestry Systems*, 72 (3): 199–209. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9081-0>.
- Bezner Kerr, R., Hasegawa, T., Lasco, R., Bhatt, I., Deryng, D., Farrell, A., Gurney-Smith, H., Ju, H., Lluch-Cota, S., Meza, F., Nelson, G., Neufeldt, H. and Thornton, P., 2022. Food, fiber, and other ecosystem products. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by Pörtner, H-O., Roberts, DC., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V., Okem, A, Rama, B., Cambridge University Press; 2022: 713-906. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.007>
- Bhattacharjee, S., Kidwai, Z., Bhattarai, S., Bajpai, H., Reddy, G.V. and Yessoufou, K. 2018. A case for reconsidering the conservation status of former closed areas in arid landscapes of western India. *Journal for Nature Conservation*, 45: 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2018.07.006>.
- Camilli, F., Gatto, P. and Pettenella, D., 2024. What challenges impede the adoption of agroforestry practices? A global perspective through a systematic literature review. *Agroforestry Systems*, 98(6): 1817–1837. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00993-w>.
- Chakraborty, M., Haider, M.Z. and Rahaman, M.M., 2015. Socio economic impact of cropland agroforestry: Evidence from Jessore district of Bangladesh. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*, 2(1):11-20.
- Chemura, A., Yalaw, A.W. and Gornott, C., 2021. Quantifying agroforestry yield buffering potential under climate change in the smallholder maize farming systems of Ethiopia. *Frontiers in Agronomy*, 3: 609536. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.609536>.
- Córdova, R., Hogarth, N.J. and Kanninen, M., 2019. Mountain farming systems' exposure and sensitivity to climate change and variability: Agroforestry and conventional agriculture systems compared in Ecuador's indigenous territory of Kayambi people. *Sustainability*, 11: 2623,

- doi.org/10.1007/s10457-009-9174-9.
- Kheiri, M., Kambouzia, J., Sayahnia, R., Soufizadeh, Mahdavi Damghani, A. and Azadi, H., 2023. Environmental and socioeconomic assessment of agroforestry implementation in Iran. *Journal for Nature Conservation*, 72: 126358. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126358>.
- Kindu, M., Schneider, T., Teketay, D. and Knoke, T., 2014. Agricultural land abandonment and its drivers in the Highlands of Ethiopia: the case of the Lasta District, north Wollo zone. *Land Degradation & Development*, 26(8): 804–818.
- Kraft, P., Rezaei, E.E., Breuer, L., Ewert, F., Große-Stoltenberg, A., Kleinebecker, T., Seserman, D.M. and Nendel, C., 2021. Modelling agroforestry's contributions to people: A review of available models. *Agronomy*, 11(11): 2106. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112106>.
- Kumar, B.M., 2006. Carbon sequestration potential of tropical homegardens. In *tropical homegardens: a time-tested example of sustainable agroforestry*. In: Kumar, B.M., Nair, P.K.R., Springer, Dordrecht, Netherlands, pp: 185–204.
- Lasco, R.D., Delfino, R.J.P. and Espaldon, M.V.O., 2014. Agroforestry systems: helping smallholders adapt to climate risks while mitigating climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(6): 825–833. <https://doi.org/10.1002/wcc.301>.
- Lorenz, K. and Lal, R., 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 4(2): 443–454. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>.
- Manes, S., Costello, M.J., Beckett, H., Debnath, A., Devenish-Nelson, E., Grey, K.A. and Vale, M.M. 2021. Endemism increases species' climate change risk in areas of global biodiversity importance. *Biological Conservation*, 257: 109070. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109070>.
- Mbow, C., Smith, P., Skole, D., Duguma, L. and Bustamante, M., 2014. Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6: 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.09.002>.
- Mesgaran, M.B., Madani, K., Hashemi, H. and Azadi, P., 2017. Iran's land suitability for agriculture. *Scientific Reports*, 7(1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08066-y>.
- Molua, E.L., 2005. The economics of tropical agroforestry systems: the case of agroforestry farms in Cameroon. *Forest Policy and Economics*, 7(2): 199–211. [https://doi.org/10.1016/S1389-9341\(03\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S1389-9341(03)00032-7).
- Montagnini, F. and Nair, P.K.R., 2004. Carbon sequestration: an under exploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61–62 (1–3): 281–295. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.00000290>.
- Mowo, J.G., Kalinganire, A. and Ajayi, O.C., 2010. Improved soil fertility and climate adaptation in Kenya's highlands. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(9): 575–583. <https://doi.org/10.5897/AJEST.9000042>.
- Mutuo, P.K., Mugendi, D.N., Ojiem, J. and Palm, C.A., 2005. Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71(1): 43–54. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-1265-7>.
- Nair, P.K.R. 2011. Agroforestry systems and environmental quality: introduction. *Journal of Environmental Quality*, and *Biochemistry*, 129: 122–135. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.011>.
- Hairiah, K., Dewi, S., Agus, F., Velarde, S.J., Ekadinata, A., Rahayu, S. and van Noordwijk, M. 2011. Measuring carbon stocks across land use systems: A Manual. World Agroforestry Centre, ICRAF, SEA Regional Office, Bogor, 154 p.
- Haskett, J.D., Simane, B. and Smith, C., 2019. Energy and climate change mitigation benefits of *Faidherbia albida* agroforestry in Ethiopia. *Frontiers in Environmental Science*, 7: 146. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00146>.
- Holmes, J., 2015. Windbreaks and shelterbelts: conservation and management. *Agroforestry Systems*, 89(1): 55–69.
- Hunt, J.R., Hayman, P.T., Richards, R.A. and Passioura, J.B., 2018. Opportunities to reduce heat damage in rainfed wheat crops based on plant breeding and agronomic management. *Field Crops Research*, 224: 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.05.012>.
- Ickowitz, A., Sills, E. and de Sassi, C., 2017. Estimating smallholder opportunity costs of REDD+: A pantropical analysis from households to carbon and back. *World Development*, 95: 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.02.022>.
- IPCC, 2000. Land Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the IPCC. In: Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo and David J. Dokken (Eds.), Cambridge University Press, UK. pp 375. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srl-en-1.pdf>.
- IPCC, 2007. Climate change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- IPCC, 2013. Climate change 2013, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- IPCC, 2018. Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., et al. (Eds.), *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 °C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 32 p.
- Jones, M., Wilson, T. and Green, R., 2019. Agroforestry for biodiversity and soil health. *Sustainable Agriculture Reviews*, 22(1): 89–104.
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An Overview. *Agroforestry Systems*, 76(1): 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>.
- Kaonga, M. and Bayliss-Smith, T.P., 2009. Carbon pools in tree biomass and the soil in improved fallows in Eastern Zambia. *Agroforestry Systems*, 76(1): 37–51. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>.

- scales, and contexts. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 38: 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.04.011>.
- Thorlakson, T. and Neufeldt, H., 2012. Reducing subsistence farmers' vulnerability to climate change: evaluating the potential contributions of agroforestry in Western Kenya. *Agriculture & Food Security*, 1(15): 1–13. <https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-15>.
- Tscharntke, T., Klein, A., Kruess, M.A., Steffan-Dewenter, I. and Thies, C., 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity-ecosystem service management. *Ecology Letters*, 8(8): 857–874. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x>.
- Van Noordwijk, M., Coe, R., Sinclair, F.L., Luedeling, E., Bayala, J., Muthuri, C.W., Cooper, P., Kindt, R., Duguma, L., Lamanna, C. and Minang, P.A., 2021. Climate change adaptation in and through agroforestry: four decades of research initiative by Peter Huxley. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26(5):1-33. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09954-5>.
- Wang, Y., Lan, T., Deng, S., Zang, Z., Zhao, Z., Xie, Z. and Shen, G., 2022. Forest-cover change rather than climate change determined giant panda's population persistence. *Biological Conservation*, 265: 109436. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109436>.
- Zomer, R.J., Bossio, D.A. Trabucco, A., Yuanjie, L., Gupta, D.C. and Singh, V.P., 2016. Trees on farms: An update and reanalysis of agroforestry's global extent and socio ecological impacts. *World Agroforestry (ICRAF)*: Bogor, Indonesia, 33 p.
- 40(3): 784–790. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0076>.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M. and Nair, V.D., 2009. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1): 10–23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M. and Nair, V.D., 2010. Carbon sequestration potential of agroforestry systems. *Advances in Agronomy*, 108: 237–307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Nyaga, J., Mugwe, J., Mucheru-Muna, M. and Diels, J., 2021. Enhancing resilience to climate change through agroforestry systems: a case study in Eastern Kenya. *Agroforestry Systems*, 95(1): 37–49. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00503-4>.
- Padovan, M.D., Padovan, M.P., Cortez, V.J., Navarrete, L.F., Navarrete, E.D., Deffner, A.C., Centeno, L.G., Munguia, R., Barrios, M., Vilchez-Mendoza, J.S., Vega-Jarquín, C., Costa, A.N., Brook, R.M. and Rapidel, B., 2015. Root distribution and water use in coffee shaded with *Tabebuia rosea* Bertol. and *Simarouba glauca* DC. compared to full sun coffee in sub-optimal environmental conditions. *Agroforestry Systems*, 89(5): 857–868. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9820-z>.
- Quandt, A., Neufeldt, H. and McCabe, J.T., 2018. Building livelihood resilience: what role does agroforestry play? *Climate and Development*, 11(6):485-500. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1447903>.
- Rahman, S.A., Imam, M., Snelder, D. and Sunderland, T.C.H., 2012. Agroforestry for livelihood security in agrarian landscapes of the Padma floodplain in Bangladesh *Small-scale Forestry*, 11 (4): 529-538. <https://doi.org/10.1007/s11842-012-9198-y>.
- Reyes, F., Gosme, M., Wolz, K.J., Lecomte, I. and Dupraz, C., 2021. Alley cropping mitigates the impacts of climate change on a wheat crop in a mediterranean environment: a biophysical model based assessment. *Agriculture*, 11(4): 356. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040356>.
- Sabbaghi, M.A., Nazari, M., Araghinejad, S. and Soufizadeh, S., 2020. Economic impacts of climate change on water resources and agriculture in Zayandehroud River basin in Iran. *Agricultural Water Management*, 241(2): 106323. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106323>.
- Schroth, G., Fernandes, E.C.M. and da Silva, F.L., 2017. *Agroforestry and biodiversity conservation in tropical landscapes*. Island Press, Washington, DC, 524 p.
- Sharma, S., Jha, P. and Singh, V., 2021. Role of agroforestry in reducing greenhouse gas emissions: a case study of silvopastoral systems. *Environmental Research*, 197: 111072.
- Shi, L., Feng, W., Xu, J. and Kuzyakov, Y., 2018. Agroforestry systems: meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes and future potentials. *Land Degradation & Development*, 29(11): 3886-3897. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>.
- Smith, J., Brown, K. and Patel, R., 2020. Carbon sequestration potential of agroforestry systems. *Journal of Climate Change Science*, 15(3): 123–135.
- Thevathasan, N.V. and Gordon, A.M., 2004. Ecology of tree intercropping systems in the North Temperate Region: experiences from Southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 61 (1): 257-268, <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029003.00933.6d>.
- Thomson, A.M., Ellis, E.C., Grau, H.R., Kuemmerle, T., Meyfroidt, P., Ramankutty, N. and Zeleke, G., 2019. Sustainable intensification in land systems: trade-offs,