وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریه فنی:

خاک‌ورزی حفاظتی در تعامل با محیط زیست و سلامت خاک

احمد شریفی مالواجردی و ارژنگ جوادی

سال انتشار: ۱۴۰۵

AERI

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، کدپستی: ۳۱۳۵۹۱۳۵۳۳، مؤسسه تحقیقات فنی ومهندسی کشاورزی
تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰، ۳۲۷۰۵۲۴۲ و ۳۶۱۵۰۰۰۰(۰۲۶)
دورنگار: ۳۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)، آدرس دسترسی: www.aeri.ir(بخش انتشارات الکترونیکی)

بسم‌الله الرحمن الرحیم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریهٔ فنی

خاک‌ورزی حفاظتی در تعامل با محیط زیست و سلامت خاک

تهیه و تدوین:
احمد شریفی مالواجردی و ارژنگ جوادی
اعضای هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

سال انتشار:
۱۴۰۵

وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نوع نوشتار: نشریهٔ فنی
عنوان نوشتار: خاک‌ورزی حفاظتی در تعامل با محیط زیست و سلامت خاک
نگارندگان: احمد شریفی مالواجردی و ارژنگ جوادی
ویراستار ادبی: محمدرضا داهی
صفحه‌آرا: شبنم جباری
طراح جلد: سمیه وطن‌دوست
ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
شمارگان: محدود
نوبت چاپ: اول
سال انتشار: ۱۴۰۵

مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ٦٩٣٧١ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ١٤٠٥/٠٣/١٠

مخاطبان نشریه

کارشناسان، مروجان، ناظران و محققان کشاورزی

هدف‌های آموزشی:
شما خوانندگان در این نشریه با:

- یافته‌های خاک‌ورزی حفاظتی در دنیا
- اثر روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و مرسوم بر پارامترهای محیط زیستی شامل:
  - ✓ گازهای گلخانه‌ای ، انتشار دی اکسید کربن، اکسید نیتروژن، گاز متان، مصرف سوخت، مصرف انرژی
- اثر روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و مرسوم بر پارامترهای سلامت خاک شامل:
  - ✓ حفظ و نگهداری آب در خاک، مادۀ آلی خاک، تنوع زیستی و سلامت خاک، فرسایش خاک و ساختمان خاک
- خلأهای تحقیقاتی
- خاک‌ورزی موردی
- چالش‌ها و فرصت‌ها

آشنا خواهید شد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱ مقدمه ۱

۲ اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر محیط زیست و انتشار گازهای گلخانه‌ای ۳

۲-۱ انتشار دی اکسید کربن ۴

۲-۲ انتشار اکسید نیتروژن ۶

۲-۳ انتشار گاز متان ۷

۲-۴ افزایش ترسیب کربن ۷

۲-۵ کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی ۸

۲-۶ کاهش مصرف انرژی ۹

۳ اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر سلامت خاک ۹

۳-۱ فرسایش خاک ۹

۳-۲ نگهداری آب در خاک ۱۰

۳-۳ تنوع زیستی ۱۱

۳-۴ حفظ و مدیریت بقایای گیاهی ۱۱

٤ خلأهای تحقیقاتی ۱۴

۴-۱ کربن آلی خاک و چرخه مواد مغذی ۱۴

۴-۲ تنوع منطقه‌ای و راهبردهای مدیریت تطبیقی ۱۴

۴-۳ فرآیندهای میکروبی ۱۵

۴-۴ مداخلات سیاستی و نوآوری‌های فناورانه ۱۶

۴-۵ توسعه فناوری‌های دقیق ۱۷

۵ خاک‌ورزی موردی ۲۱

٦ چالش‌ها و فرصت‌ها ۲۲

۷ جمع‌بندی **۲٤**

۸ منابع مورد استفاده ۲۵

۱ مقدمه

خاک‌ورزی حفاظتی از دیدگاه منافع ملی و کشاورزان دارای مزایای زیادی است و بر همین اساس، نزدیک به دو دهه است که اجرای روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی در ایران توسعه و گسترش پیدا کرده است. به‌همین دلیل وزارت جهاد کشاورزی نیز توسعهٔ خاک‌ورزی حفاظتی در کشور را یکی از برنامه‌های محوری خود قرار داده است. نتایج تحقیقات و پایلوت‌های اجرایی متعدد در کشور، اثرهای مثبت خاک‌ورزی حفاظتی شامل کاهش مصرف سوخت تراکتور، افزایش بازده مزرعه‌ای ماشین، کاهش هزینه‌های عملیات کشاورزی، کاهش مصرف بذر و کود و سم، کاهش مصرف آب و کاهش یا ثابت نگه‌داشتن عملکرد محصول را در مقایسه با روش‌های مرسوم خاک‌ورزی نشان داده است (افضلی نیا، ۱۴۰۰a & b، جوادی و همکاران، ۱۳۹۵، جوادی و همکاران، ۱۳۹۶، جوادی و همکاران، ۲۰۰۴، رحیم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳، صیدی و همکاران، ۱۳۹۰، تقی نژاد و جوادی، ۱۳۹۳، صلح جو و جوادی، ۱۳۹۳، شریفی و همکاران، ۱۳۹۵، شریفی مالواجردی، ۱۳۹۶، شریفی مالواجردی و همکاران، ۲۰۲۵). اما در مباحث محیط زیستی و سلامت خاک یافته‌های کمتری مشاهده شده است. در این نشریه سعی بر این است تا یافته‌های جدید خاک‌ورزی حفاظتی در خصوص مباحث محیط زیستی و سلامت خاک در دنیا ارائه شود. این یافته‌ها شامل اثر روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی و مرسوم بر پارامترهای زیست محیطی و گازهای گلخانه‌ای شامل انتشار دی اکسید کربن، اکسید نیتروژن، گاز متان، مصرف سوخت و مصرف انرژی و هم‌چنین پارامترهای سلامت خاک شامل حفظ و نگهداری آب در خاک، ماده آلی خاک، تنوع زیستی و سلامت خاک، فرسایش خاک، ساختمان خاک و خاک‌ورزی موردی است. تغییر نگرش در توسعهٔ خاک‌ورزی حفاظتی با توجه به مطالعات و تحقیقات روز دنیا امری است ضروری تا بتوان با پیشرفت‌ها و فناوری‌های جدید در این زمینه قدم برداشت. شکل (۱) مزایای جدیدی از خاک‌ورزی حفاظتی را از منظر زیست محیطی و ویژگی‌های خاک نشان می‌دهد. روش خاک‌ورزی حفاظتی بهینه باید هزینه‌های نیروی کار و سوخت را کاهش دهد، ویژگی‌های خاک را بهبود بخشد، آب را حفظ کند، کیفیت آب و هوا را بهبود بخشد، فرسایش خاک را

کاهش دهد و زیستگاه و تنوع حیات وحش را افزایش دهد. روش خاک‌ورزی حفاظتی بهینه همچنین باید پوشش گیاهی یا بقایای گیاهی کافی را برای افزایش زبری سطح خاک، بهبود ظرفیت نفوذ آب، افزایش چرخهٔ مواد مغذی و تجمع مواد آلی خاک و نیز همهٔ پیش‌نیازهای کاهش فرسایش و بهبود کیفیت خاک، هوا و آب را داشته باشد. سامانه خاک‌ورزی حفاظتی باید به طور خاص برای هر خاک بر اساس معیارهای خاص محل (مانند سودآوری مزرعه، شدت فرسایش خاک، نوع خاک، توپوگرافی، آب و هوا) طراحی شود. شیوه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، از جمله کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی، با به حداقل رساندن به‌هم خوردن خاک و افزایش سلامت خاک، جایگزین‌های پایداری برای روش‌های خاک‌ورزی مرسوم هستند (شکل ۲).

شکل ۱. مزایای خاک‌ورزی حفاظتی از منظر محیط زیست و ویژگی‌های خاک در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم (CTIC 2016) (بلانکو و لال ۲۰۲۳)

شکل ۲. شیوه‌های مدیریت خاک‌ورزی و تأثیر آنها بر اکولوژی خاک و راه‌حل‌های ممکن، الف) اثر خاک‌ورزی مرسوم، ب) راه‌کارهای ممکن برای مدیریت عملیات خاک‌ورزی با تکیه بر خاک‌ورزی حفاظتی (سریواستاوا[1] ۲۰۲۵)

۲ اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر محیط زیست و انتشار گازهای گلخانه‌ای

انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی اکسید کربن، اکسید نیتروژن و متان علاوه بر ایجاد آلودگی هوا، در ترکیبات گازهای موجود در جو نیز اثرگذار بوده و باعث افزایش گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی می شوند. به‌طوریکه اثر گرمایشی بالقوه اکسید نیتروژن ۳۱۰ برابر

[1] Srivastava

دی اکسید کربن و اثر گرمایشی بالقوه گاز متان ۲۱ برابر دی اکسید کربن دارند (حیدری سلطان آبادی و دهقانی، ۱۳۹۹)

۲-۱ انتشار دی اکسید کربن

انتشار گاز دی اکسید کربن در شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی به طور قابل توجهی بسته به شدت به‌هم زدن خاک و مدیریت مواد آلی خاک متفاوت است. شیوه‌های خاک‌ورزی مرسوم، که با برگردان کردن عمیق خاک و به‌هم زدن گستردهٔ خاک شناخته می‌شوند، در مقایسه با شیوه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی، معمولاً منجر به انتشار دی اکسید کربن بیشتری می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهد که خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند به دلیل افزایش فعالیت میکروبی و تجزیهٔ سریع‌تر مواد آلی خاک، تقریباً ۶۱۰۰ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل[1] در هکتار در سال منتشر کند (لل[2]، ۲۰۱۸). در مقابل، شیوه‌های کم‌خاک‌ورزی، که شامل به‌هم زدن کمتر و کم‌عمق‌تر خاک می‌شوند، حدود ۳۱۰۰ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل در هکتار در سال منتشر می‌کنند. این در حالی است که سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی، با حداقل به‌هم‌زدن خاک و حفظ بقایای سطحی، تقریباً ۲۹۰۰ کیلوگرم دی اکسید کربن معادل در هکتار در سال منتشر می‌کنند (لل، ۲۰۱۸). این تفاوت‌ها تأثیر شیوه‌های خاک‌ورزی بر پویایی کربن خاک و انتشار دی اکسید کربن متعاقب آن را برجسته می‌کنند (جدول ۱).

[1] CO_2 equivalent (CO_2e)
[2] Lal

جدول ۱. تحلیل مقایسه‌ای روش‌های خاک‌ورزی بر متغیرهای مختلف خاک و محیط زیست

پارامتر		خاک‌ورزی مرسوم	خاک‌ورزی حفاظتی	
			کم خاک‌ورزی	بی‌خاک‌ورزی
		شخم عمیق و به‌هم زدن شدید خاک، که منجر به تخریب ساختار خاک و افزایش فرسایش می‌شود	خاک‌ورزی کم عمق با کاهش به‌هم خوردگی خاک، با هدف حفظ ساختار خاک و کاهش فرسایش	حداقل به‌هم‌زدن خاک، حفظ ساختار خاک و ارتقای سلامت خاک و تنوع زیستی
محیط زیستی	انتشار دی اکسید کربن (کیلوگرم کربن معادل/هکتار/سال)	تقریباً ۶۱۰۰ کیلوگرم کربن معادل/هکتار/سال (لال ۲۰۱۵؛ پاولسن و همکاران ۲۰۱۴b؛ پاولسن و همکاران ۲۰۱۴a)	حدود۳۱۰۰ کیلوگرم کربن معادل/هکتار/سال (لال ۲۰۱۵؛ پاولسن و همکاران، ۲۰۱۴b) حدود ۱۴۷ کیلوگرم معادل دی کسید کربن در هکتار (افضلی نیا و همکاران (۱۴۰۰))	تقریباً ۲۹۰۰ کیلوگرم کربن معادل/هکتار/سال (لال ۲۰۱۵؛ پاولسن و همکاران ۲۰۱۴b) حدود ۱۰۵ کیلوگرم معادل دی کسید کربن در هکتار (افضلی نیا و همکاران (۱۴۰۰))
	انتشار اکسید نیتروژن (کیلوگرم N_2O-N/هکتار/سال)	انتشار بیشتر به دلیل به‌هم خوردگی خاک، ۴ تا ۶ کیلوگرم N_2O-N در هکتار در سال (فنگ[1] و همکاران، ۲۰۱۸؛ پنل بین المللی تغییر اقلیم[2]، ۲۰۱۹)	در مقایسه با روش مرسوم، ۳ تا ۵ کیلوگرم N_2O-N در هکتار در سال، به طور متوسط کاهش یافته است (فنگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ون کسل[3] و همکاران، ۲۰۱۳؛ پنل بین المللی تغییر اقلیم، ۲۰۱۹)	انتشار کمتر به دلیل کاهش به‌هم خوردگی خاک، در ابتدا ممکن است افزایش یابد، با گذشت زمان تثبیت شود یا کاهش یابد، ۲ تا ۴ کیلوگرم N_2O-Nدر هکتار در سال (پنل بین المللی تغییر اقلیم ۲۰۱۹، هی [4]و همکاران ۲۰۲۴ ؛ون کسل و همکاران ۲۰۱۳)
	انتشار گاز متان (کیلوگرم متان در هکتار در سال)	متغیر، تحت تأثیر شرایط خاک، انتشار بالاتر ۱۰–۲۰ کیلوگرم متان در هکتار در سال (بایر[5] و همکاران، ۲۰۱۲)	در مقایسه با روش مرسوم، متوسط، کاهش یافته است: ۵.۱۵ کیلوگرم متان در هکتار در سال (بایر و همکاران، ۲۰۱۲؛ ورهولست[6] و همکاران، ۲۰۱۰)	به طور کلی به دلیل کاهش به‌هم خوردگی خاک، انتشار کمتر متان ۲ تا ۱۰ کیلوگرم متان در هکتار در سال (ژائو[7] و همکاران، ۲۰۱۶؛ ورهولست و همکاران، ۲۰۱۰) کمتر است.
سلامت خاک	نگهداری آب (میلی‌متر در هکتار)	کاهش نگهداری آب، افزایش رواناب، نگهداری آب به میزان ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر در هکتار کاهش یافت (درپش[8] و همکاران، ۲۰۱۰)	بهبود نگهداری آب، کاهش رواناب در مقایسه با روش‌های مرسوم، افزایش نگهداری آب به میزان ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر در هکتار(باسچه[9] و همکاران، ۲۰۱۶؛ درپش و همکاران، ۲۰۱۰)	نفوذ آب را افزایش می‌دهد، رطوبت خاک را حفظ می‌کند، و نگهداری آب را ۲۰ تا ۴۰ میلی‌متر در هکتار افزایش می‌دهد (باشچه و همکاران، ۲۰۱۶؛ درپش و همکاران، ۲۰۱۰؛ هالند، ۲۰۰۴؛ سکاران و همکاران، ۲۰۲۱).
	ماده آلی خاک (درصد تغییر)	تجزیه را تسریع می‌کند، محتوای ماده آلی را به مرور زمان کاهش می‌دهد (کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی) (پاولسون و همکاران ۲۰۱۴b؛ پاولسون و همکاران ۲۰۱۴a؛ پیج و همکاران ۲۰۲۰)	تجزیه را تعدیل می‌کند، بقایای سطحی را حفظ می‌کند، مواد آلی خاک را حفظ یا کمی بهبود می‌بخشد (کاهش ۵ تا ۱۵ درصدی) (پاولسون، استرلینگ و همکاران، ۲۰۱۴b؛ پیج و همکاران، ۲۰۲۰)	مواد آلی را حفظ می‌کند، ترسیب کربن را افزایش می‌دهد و منجر به بهبود محتوای مواد آلی خاک در طول زمان می‌شود (افزایش ۵ تا ۲۰ درصدی) (لال ۲۰۱۵؛ سیکس و همکاران ۲۰۰۰؛ پیج و همکاران ۲۰۲۰)
	تنوع زیستی و سلامت خاک	اغلب به دلیل به‌هم خوردگی مکرر، تنوع زیستی خاک و فعالیت میکروبی را کاهش می‌دهد	از تنوع زیستی خاک پشتیبانی می‌کند، در مقایسه با روش‌های مرسوم، تنوع میکروبی را افزایش می‌دهد	سلامت خاک را ارتقا می‌دهد، از گونه‌های زیستی متنوع خاک پشتیبانی می‌کند (لی و همکاران، ۲۰۲۰)
	هدررفت مواد مغذی کیلوگرم در هکتار در سال)	خطر بیشتر شسته شدن مواد مغذی و رواناب (هدداوی و همکاران، ۲۰۱۷)	از دست دادن مواد مغذی در روش معتدل، در مقایسه با روش مرسوم، دسترسی به مواد مغذی را افزایش می‌دهد (هدداوی و همکاران، ۲۰۱۷)	کاهش آبشویی مواد مغذی، حفظ مواد مغذی خاک (هدداوی و همکاران، ۲۰۱۷)
	کنترل فرسایش (تن در هکتار در سال)	با نمایان کردن خاک لخت، خطرات فرسایش خاک را افزایش می‌دهد(درپش و همکاران، ۲۰۱۰)	با حفظ پوشش و ساختار خاک، فرسایش را کاهش می‌دهد (درپش و همکاران، ۲۰۱۰)	با پوشش مداوم خاک، خطر فرسایش را به حداقل می‌رساند (درپش و همکاران، ۲۰۱۰)
	تأثیر بر ساختار خاک	خاکدانه‌های خاک را از بین می‌برد و به مرور زمان خاک را متراکم می‌کند	ساختار خاک را حفظ می‌کند، فشردگی را کاهش می‌دهد در مقایسه با روش‌های مرسوم	ساختار خاک را حفظ می‌کند، تراکم و تخلخل را افزایش می‌دهد (پیج و همکاران، ۲۰۲۰)

[1] Feng
[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
[3] Van Kessel
[4] He
[5] Bayer
[6] Verhulst
[7] Zhao
[8] Derpsch
[9] Basche

آزادسازی دی اکسید کربن از خاک‌های کشاورزی در درجه اول تحت تأثیر میزان به‌هم‌خوردگی خاک و تجزیهٔ مواد آلی خاک است. خاک‌ورزی مرسوم با قرار دادن مواد آلی خاک در شرایط هوازی، تجزیهٔ آنها را تسریع می‌کند و منجر به انتشار بیشتر دی اکسید کربن می‌شود (لل، ۲۰۱۵). اختلال در خاکدانه‌های خاک و افزایش فعالیت میکروبی در خاک‌ورزی مرسوم، فرآیندهای معدنی شدن کربن را افزایش می‌دهد و دی اکسید کربن را به جو آزاد می‌کند. تجزیهٔ بیشتر مواد آلی خاک در خاک‌های شخم خورده به غلظت دی اکسید کربن اتمسفری کمک می‌کند که به دلیل نقش آن در به دام انداختن گرما در جو زمین، عامل اصلی تغییرات اقلیمی است. در مقابل، روش‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی، ساختار خاک و مواد آلی را حفظ می‌کنند و در نتیجه با به حداقل رساندن به‌هم خوردگی خاک و حفظ ذخایر کربن خاک، انتشار دی اکسید کربن را کاهش می‌دهند (سیکس[1] و همکاران، ۲۰۰۴؛ جوادی و همکاران، ۱۳۹۵).

۲-۲ انتشار اکسید نیتروژن

انتشار اکسید نیتروژن از خاک‌های کشاورزی تحت تأثیر شیوه‌های خاک‌ورزی قرار دارد و تفاوت‌های قابل توجهی بین سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی مشاهده می‌شود. انتشار اکسید نیتروژن تحت تأثیر شیوه‌های مدیریت خاک است که بر در دسترس بودن نیتروژن و فرآیندهای میکروبی تأثیر می‌گذارند. شیوه‌های خاک‌ورزی مرسوم معمولاً به دلیل افزایش هوادهی خاک و میزان معدنی شدن نیتروژن، انتشار اکسید نیتروژن را افزایش می‌دهند. این امر به در دسترس بودن بیشتر لایه‌های نیتروژن برای فرآیندهای نیتروژن‌دهی و نیتروژن زدایی منجر می‌شود که اکسید نیتروژن را به عنوان یک محصول جانبی تولید می‌کنند (سیکس و همکاران، ۲۰۰۴). در مقابل، سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی، با حفظ ساختار خاک و کاهش به‌هم خوردگی آن، عموماً با محدود کردن این فرآیندهای میکروبی، انتشار اکسید نیتروژن را کاهش می‌دهند (لل، ۲۰۱۸). شیوه‌های خاک‌ورزی مرسوم اغلب از

[1] Six

طریق افزایش معدنی شدن مواد آلی و تجزیهٔ خاکدانه‌ها، در دسترس بودن نیتروژن را افزایش می‌دهند و منجر به انتشار بیشتر اکسید نیتروژن می‌شوند. در مقابل، سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی مواد آلی خاک را حفظ می‌کنند و در دسترس بودن نیتروژن و در نتیجه انتشار اکسید نیتروژن را کاهش می‌دهند (سیکس و همکاران، ۲۰۰۴).

۲-۳ انتشار گاز متان

انتشار گاز متان از خاک‌های کشاورزی در درجه اول با شرایط بی‌هوازی مرتبط است که فعالیت میکروبی متان‌زا را افزایش می‌دهد. در حالی که شیوه‌های خاک‌ورزی در انتشار گاز متان، در مقایسه با انتشار گازهای دی اکسید کربن و اکسید نیتروژن ، تأثیر غیرمستقیم‌تری دارند؛ این شیوه های خاک‌ورزی می‌توانند به همان ترتیب که بر شرایط خاک موثرند بر تولید متان نیز تأثیر گذارباشند. . شیوه‌های بی‌خاک‌ورزی، با حفظ رطوبت خاک و به حداقل رساندن به‌هم خوردگی خاک، می‌توانند ریزمحل‌های بی‌هوازی ایجاد کنند که به تولید متان کمک می‌کند (اوسیری و لال[1]، ۲۰۰۹). با این حال، تأثیر کلی خاک‌ورزی بر انتشار متان، در مقایسه با دیگر گازهای گلخانه‌ای، در سامانه‌های کشت مناطق مرتفع[2] عموماً کمتر است. انتشار گاز متان عمدتاً در شرایط بی‌هوازی تولید می‌شود، جایی که آرکی‌های متان‌زا رشد می‌کنند. شیوه‌های بی‌خاک‌ورزی، با حفظ ساختار خاک و محدود کردن به‌هم خوردگی خاک، می‌توانند ریزمحل‌های بی‌هوازی را در پروفیل خاک ایجاد کنند و تولید متان را افزایش دهند (اوسیری و لل، ۲۰۰۹) این حالت در تضاد با خاک‌ورزی مرسوم است که معمولاً خاک را هوادهی می‌کند و شرایط بی‌هوازی را کاهش می‌دهد.

۲-٤ افزایش ترسیب کربن[3]

ترسیب کربن به جذب کربن موجود در هوا توسط خاک و گیاهان گفته می‌شود. این جذب باعث می‌شود که از میزان گاز گلخانه‌ای دی اکسید کربن کم شده و کیفیت هوا بهبود

[1] Ussiri and Lal
[2] Upland cropping systems
[3] Carbon sequestration

یابد. کربن آلی خاک نقش مهمی در پایداری کشاورزی و کاهش تغییرات اقلیمی دارد. شیوه‌های خاک‌ورزی با تغییر ساختار خاک و فعالیت میکروبی به طور قابل توجهی بر ذخیره و میزان گردش کربن آلی خاک تأثیر می‌گذارند. روش‌های مرسوم خاک‌ورزی که با به‌هم‌خوردگی شدید خاک و تجزیه سریع مواد آلی شناخته می‌شوند، بسته به نوع خاک، آب و هوا و شیوه‌های مدیریتی، منجر به تلفات سالانه کربن آلی خاک از ۰/۳ تا ۱/۲ تن در هکتار می‌شوند (سیکس و همکاران ۲۰۰۴، لل ۲۰۰۴، پیج[1] و همکاران ۲۰۲۰). این تلفات پتانسیل ترسیب کربن را کاهش می‌دهد و به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند. در مقابل، شیوه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، مانند سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی، با به‌حداقل رساندن به‌هم‌خوردگی خاک و حفظ ساختار خاک، اثرهای نامطلوب به‌هم‌خوردگی خاک را کاهش می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که سامانه‌های بی‌خاک‌ورزی، با کاهش تلفات کربن و افزایش تشکیل خاکدانه‌های پایدار خاک، که از تجزیهٔ سریع مواد آلی جلوگیری می‌کنند، ذخایر کربن آلی خاک را سالانه تا ۱ تن در هکتار افزایش می‌دهند (تکسیرا[2] و همکاران ۲۰۲۱، سیکس و همکاران ۲۰۰۰، جوادی و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی با حفظ بقایای سطحی، پتانسیل ترسیب کربن را بهبود می‌بخشند و از استراتژی‌های مدیریت پایدار خاک و تلاش‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای پشتیبانی می‌کنند.

۲-۵ کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی

تحقیقات مختلف داخلی و خارجی، موضوع کاهش مصرف سوخت را در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به روش خاک‌ورزی مرسوم تایید می‌کنند. در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی چون تردد ماشین‌ها و ادوات کشاورزی در مزرعه نسبت به روش مرسوم کمتر است، طبیعتاً مصرف سوخت تراکتور نیز کمتر خواهد شد. منابع مختلف، کاهش مصرف سوخت را از ۲۰ تا ۵۰ درصد گزارش داده‌اند. (جدول ۳).

[1] Page
[2] Teixeira

۲-٦ کاهش مصرف انرژی

در خصوص مصرف انرژی در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی مطالعات و تحقیقات متعددی شده است. در این تحقیقات به مصرف انرژی در جریان تولید محصولات کشاورزی و محاسبهٔ انرژی معادل مصرف نهاده‌های کود، سم، بذر، آب و ماشین پرداخته شده است. مصرف نهاده‌هایی مانند آب، ماشین و سوخت در روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به روش مرسوم کاهش پیدا می کند. بنابراین انرژی مصرفی این نهاده‌ها در خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم نیز کمتر خواهد بود. اما نکته‌ای که باید در نظر گرفت این است که نهادهٔ "سم" برای مبارزه با علف‌های هرز در روش خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به روش مرسوم بیشتر است. از اینرو انرژی مصرفی سموم شیمیایی در خاک‌ورزی حفاظتی از انرژی مصرفی آنها در روش خاک‌ورزی مرسوم بیشتر است. میزان کاهش مصرف انرژی آب، سوخت، ماشین در خاک‌ورزی حفاظتی در مقایسه با افزایش مصرف انرژی مواد شیمیایی بیشتر است. به همین دلیل پژوهش‌ها نشان داده اند که مصرف انرژی در خاک‌ورزی حفاظتی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم کمتر است (افضلی نیا و همکاران، ۱۴۰۲، جوادی و همکاران، ۱۳۹۵) . بررسی اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر مصرف انرژی در تولید سویا در استان گلستان نیز نشان می‌دهد که تولید سویا در روش بی‌خاک‌ورزی کمترین انرژی را مصرف می‌کند (شریفی و همکاران، ۱۳۹۵ و ۲۰۲۵).

۳ اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر سلامت خاک

۳-۱ فرسایش خاک

جدول ۲ اثر نگه‌داشتن بقایای گیاهی در سطح مزرعه را بر فرسایش خاک نشان می‌دهد. با افزایش درصد پوشش بقایای گیاهی، خطر فرسایش خاک کاهش می‌یابد. شیوه‌های مرسوم خاک‌ورزی با به‌هم زدن ساختار خاک و قرار دادن خاک لخت در معرض فرسایش بادی و آبی، فرسایش خاک را تشدید می‌کنند (هدداوی[1] و همکاران، ۲۰۱۷؛ جوادی

[1] Haddawy

و همکاران، ۱۳۹۵). فرسایش خاک نه تنها موجب به از بین رفتن خاک سطحی حاصلخیز می‌شود، بلکه منجر به رسوب‌گذاری در آب نیز می‌شود که بر کیفیت آب و زیست بوم‌های آبی تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، به‌هم خوردگی خاک در به‌هنگام خاک‌ورزی می‌تواند از بین رفتن مواد مغذی را از طریق آبشویی و رواناب تسریع کند، حاصلخیزی خاک را کاهش دهد و نیاز به کود اضافی برای حفظ عملکرد محصول را افزایش دهد (لل، ۲۰۱۵).

جدول ۲. اثر حفظ بقایای گیاهی بر کاهش خطر فرسایش خاک

پوشش سطح خاک با بقایا (درصد)	کاهش ریسک فرسایش (درصد)
۱۰	۳۰
۲۰	۵۰
۳۰	۶۵
۴۰	۷۵
۵۰	۸۳
۶۰	۸۸
۷۰	۹۱
۸۰	۹۴

۳-۲ نگهداری آب در خاک

روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی، مانند کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی، با حفظ ساختار خاک و بقایای سطحی باعث حفظ بهتر آب در خاک می‌شوند (جدول ۱). این امر نفوذ آب در خاک را افزایش و رواناب سطحی را کاهش می‌دهد، خطر فرسایش خاک را پایین می‌آورد و مقاومت در برابر خشکسالی را در سامانه‌های کشاورزی بهبود می‌بخشد (پاولسن[1] و همکاران، ۲۰۱۴a). بهبود حفظ آب، همچنین به استفادهٔ کارآمدتر از آب آبیاری کمک خواهد

[1] Powlson

کرد و از تولید پایدار محصول در دوره‌های خشکسالی پشتیبانی می‌کند (سِکاران[1] و همکاران، ۲۰۲۱، جوادی و محمدی گل، ۱۳۸۹).

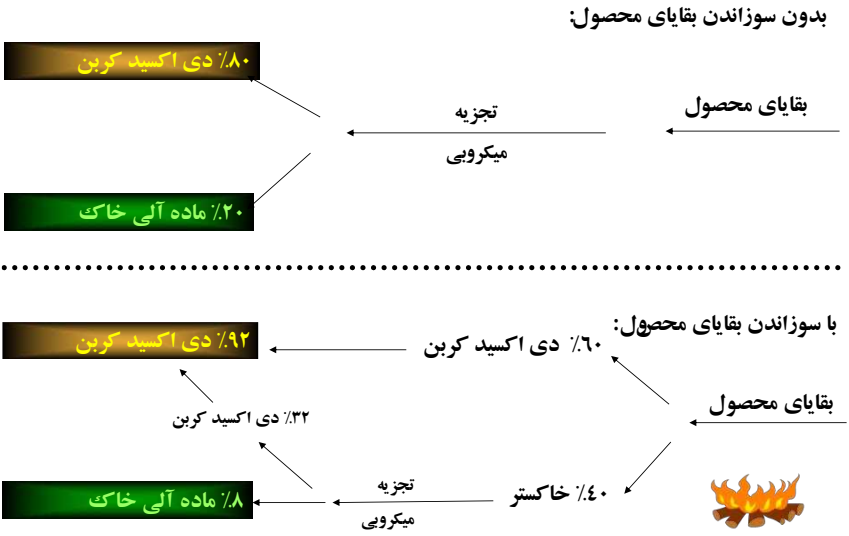
۳-۳ تنوع زیستی

شیوه‌های خاک‌ورزی حفاظتی در مقایسه با روش‌های خاک‌ورزی مرسوم، همانطور که در جدول ۱ ارائه شده است، باعث افزایش تنوع زیستی و بهبود خدمات زیست بوم می‌شوند. این شیوه‌ها با حفظ ساختار خاک و مواد آلی، شرایط مطلوبی را برای موجودات خاک، حشرات مفید و تنوع گیاهی ایجاد می‌کنند (هدداوی و همکاران، ۲۰۱۷). این افزایش تنوع زیستی به نوبه‌ی خود به کنترل طبیعی آفات، گرده‌افشانی و چرخه‌ی مواد مغذی یاری می‌رساند و سلامت و تاب‌آوری کلی اکوسیستم را ارتقا می‌دهد (لی[2] و همکاران، ۲۰۲۰).

۳-٤ حفظ و مدیریت بقایای گیاهی

سوزاندن بقایای گیاهی موجب آسیب‌دیدگی ساختمان خاک می‌شود. اگر بقایای گیاهی سوزانده نشوند، تجزیهٔ میکروبی آن‌ها باعث تولید ۸۰ درصد دی اکسید کربن و ۲۰ درصد ماده آلی خاک می‌شود. اگر این بقایا سوزانده شوند، ۶۰ درصد دی اکسید کربن و ۴۰ درصد خاکستر تولید می شود. از تجزیه میکروبی ۴۰ درصد خاکستر، ۳۲ درصد دی اکسید کربن و ۸ درصد ماده آلی خاک بوجود می‌آید. بنابراین وقتی بقایای گیاهی سوزانده شوند، ۹۲ درصد آن تبدیل به دی اکسید کربن می‌شود و به جو می‌رود. پس باید از سوزاندن بقایای گیاهی جلوگیری شود تا به ساختمان خاک هم آسیب زده نشود (شکل ۳) (آلبرشت[3] و همکاران، ۱۹۹۴، جوادی و همکاران، ۱۳۹۵).

[1] Sekaran
[2] Li
[3] Albrecht



شکل ۳. نسوزاندن بقایای گیاهی(بالا)، تجزیه میکروبی بقایای گیاهی حاصل از سوزاندن و حفظ بقایا (پایین)

جدول ۳. نتایج برخی از تحقیقات در ایران و چند کشور دنیا

کشور	روش خاک ورزی	یافته	منبع
ایران	بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی	کاهش مصرف سوختهای فسیلی تا ۵۰ درصد کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	افضلی نیا و همکاران (a , b۱۴۰۰) انگزی و همکاران (۱۴۰۳) پرماه و همکاران (۱۴۰۴) جوادی و همکاران (۱۳۹۵) طباطبائی‌فر و جوادی (۲۰۰۴)
استرالیا	کم خاک‌ورزی	کاهش مصرف سوخت ۱۰ تا ۲۰ درصد	چن و همکاران[1]، ۲۰۰۸ چن و بیلی[2]، ۲۰۰۹
اسپانیا	بی‌خاک‌ورزی، کم خاک‌ورزی	ترسیب کربن خاک تا ۱۲ درصد افزایش نگهداری مواد مغذی خاک افزایش مقاومت به خشکسالی	مورنو-گارسیا[3] و همکاران (۲۰۲۰) کلونگا[4] و همکاران (۲۰۲۵)
آلمان	کم‌خاک‌ورزی	افزایش زیست توده میکروبی خاک تا ۲۰ درصد کاهش اکسید نیتروژن تا ۱۵ درصد	اشلوتر[5] و همکاران (۲۰۱۸) زیکلی و گروبر[6] (۲۰۱۷)
برزیل	خاک‌ورزی حفاظتی	کاهش فرسایش خاک تا ۳۰ درصد کاهش رواناب نیتروژن و فسفر بهبود ساختمان خاک و نگهداری رطوبت خاک	مارتینز-منا[7] (۲۰۲۰) مرتن[8] و همکاران (۲۰۱۵) ملو و ون رایج[9] (۲۰۰۶)
چین	بی‌خاک‌ورزی، کم خاک‌ورزی	کاهش گاز متان تا ۲۰ درصد در شالیزارها افزایش میکروبهای اکسید کننده متان	ژو و لی[10] (۲۰۲۴) لی و همکاران (۲۰۲۴)
کنیا	کم‌خاک‌ورزی	کاهش فرسایش خاک تا ۴۰ درصد افزایش حفظ مواد مغذی خاک افزایش عملکرد تا ۱۵ درصد	فینی[11] و همکاران (۲۰۲۳) اوکیو[12] و همکاران (۲۰۱۴)
هند	بی‌خاک‌ورزی	بهبود نگهداری رطوبت خاک تا ۲۵ درصد افزایش ماده آلی خاک تا ۱۵ درصد کاهش نیاز به آبیاری	هامفریس[13] و همکاران (۲۰۱۶) پراساد[14] و همکاران (۲۰۱۶)

[1] Chen et al
[2] Chen and Baillie
[3] Moreno-Garcia
[4] Colunga
[5] Schlüter
[6] Zikeli and Gruber
[7] Martínez-Mena
[8] Merten
[9] Mello and van Raij
[10] Zhu and Li
[11] Feeney
[12] Okeyo
[13] Humphreys
[14] Prasad

٤ خلأهای تحقیقاتی

٤-١ کربن آلی خاک و چرخهٔ مواد مغذی

شیوه‌های خاک‌ورزی پایدار مانند سامانه‌های کم‌خاک‌ورزی یا بی‌خاک‌ورزی، مزایای کوتاه‌مدت امیدوارکننده‌ای را از نظر حفظ کربن آلی خاک و افزایش نگهداری مواد مغذی نشان داده‌اند. با این حال، درک تأثیرات بلندمدت آنها برای اجرای مؤثر و تدوین سیاست توسعه سامانه‌ها بسیار مهم است. مطالعات طولانی و درازمدت که این شیوه‌ها را در دوره‌های طولانی بررسی می‌کنند، می‌توانند بینش‌هایی در مورد پایداری ذخایر کربن خاک و در دسترس بودن مواد مغذی ارائه دهند. برای مثال، تحقیقات نشان می‌دهد که کم خاک‌ورزی می‌تواند در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم به افزایش قابل توجه کربن آلی خاک در طول زمان بینجامد و در نتیجه به افزایش حاصلخیزی خاک و ترسیب کربن کمک کند (سیکس و همکاران، ۲۰۰۴). ارزیابی پویایی چرخهٔ مواد مغذی تحت روش‌های مختلف خاک‌ورزی همچنین می‌تواند روشن کند چگونه این شیوه‌ها بر در دسترس بودن مواد مغذی و بهره‌وری گیاه در چندین چرخه کشت تأثیر می‌گذارند.

داده‌های به‌دست آمده از آزمایش‌های میدانی بلندمدت و فراتحلیل‌ها نشان می‌دهند شیوه‌های خاک‌ورزی پایدار نه تنها انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند، بلکه مقاومت خاک را در برابر عوامل تنش‌زای محیطی مانند خشک‌سالی و فرسایش تقویت می‌کنند (ون ارد[1] و همکاران، ۲۰۱۴). این یافته‌ها بر اهمیت ادغام دیدگاه‌های بلندمدت در راهبردهای مدیریت کشاورزی برای بهینه‌سازی سلامت و بهره‌وری پایدار خاک تأکید دارند.

٤-٢ تنوع منطقه‌ای و راهبردهای مدیریت تطبیقی

اثربخشی شیوه‌های خاک‌ورزی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود سلامت خاک به دلیل عوامل زراعی و اقلیمی در مناطق مختلف به طور قابل توجهی متفاوت است. برای تنظیم راهبردهای مدیریت تطبیقی که شرایط محلی و زمینه‌های اجتماعی–اقتصادی

[1] Van Eerd

را در نظر می‌گیرند، مطالعات منطقه‌ای ضروری است. تحقیقات نشان داده است که مزایای کاهش خاک‌ورزی ممکن است بسته به عواملی مانند نوع خاک، رژیم آب و هوایی و سامانه کشت متفاوت باشد (لیانگ و همکاران، ۲۰۲۰)، نتایج برخی از تحقیقات در ایران و چند کشور دنیا در جدول ۳ ارائه شده است. با این حال، درک این تفاوت‌های ظریف منطقه‌ای برای بهینه‌سازی شیوه‌های خاک‌ورزی و ترویج پذیرش آنها در بین کشاورزان بسیار مهم است.

تنوع منطقه‌ای همچنین به چشم‌اندازهای اجتماعی–اقتصادی و سیاست‌گذاری نیز گسترش می‌یابد، جایی که سیاست‌ها و مشوق‌های کشاورزی محلی نقش مهمی در تأثیرگذاری بر تصمیمات کشاورزان در مورد شیوه‌های خاک‌ورزی دارند (لیانگ و همکاران، ۲۰۲۰). مطالعات موردی (جدول ۳) از مناطق جغرافیایی متنوع، نیاز به رویکردهای خاص زمینه‌ای را برجسته می‌کند که هم پایداری زیست‌محیطی و هم امکان‌سنجی اجتماعی–اقتصادی را در نظر می‌گیرند. تلاش‌های تحقیقاتی مشترک با هدف شناسایی چالش‌ها و فرصت‌های خاص منطقه می‌تواند توسعهٔ استراتژی‌های هدفمند را برای افزایش پایداری کشاورزی در مقیاس جهانی تسهیل کند (لی و همکاران، ۲۰۲۳؛ لیانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

علاوه بر این، نیاز به تحقیقات گسترده‌تر در مورد اثرهای متقابل شیوه‌های خاک‌ورزی حفاظتی با دیگر استراتژی‌های مدیریت کشاورزی، مانند کشت پوششی و تناوب زراعی، وجود دارد. درک اینکه چگونه این شیوه‌ها به طور هم‌افزایی سلامت خاک را افزایش می‌دهند، انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند و مدیریت آب و مواد مغذی را بهبود می‌بخشند، برای توسعه سیستم‌های کشاورزی یکپارچه و پایدار بسیار مهم است (پیتلکوو و همکاران، ۲۰۱۵).

٤-۳ فرآیندهای میکروبی

جوامع میکروبی در تعدیل دینامیک گازهای گلخانه‌ای در خاک‌های کشاورزی تحت روش‌های مختلف خاک‌ورزی نقش محوری دارند. مطالعات مکانیسمی که تعاملات بین فرآیندهای میکروبی و تغییرات ناشی از خاک‌ورزی را روشن می‌کند، می‌تواند بینش‌های

مهمی در مورد مسیرهای انتشار و استراتژی‌های کاهش آن ارائه دهد (بایو[1] ۲۰۲۰). برای مثال، فرآیندهای میکروبی مانند نیترات‌زدایی و تولید جانبی متان تحت تأثیر هوادهی خاک و در دسترس بودن مواد آلی قرار دارند که به طور مستقیم تحت تأثیر شدت خاک‌ورزی قرار می‌گیرند. درک این مکانیسم‌ها برای توسعه مداخلات هدفمند ضروری است زیرا انتشار گازهای گلخانه‌ای را به حداقل می‌رسانند و در عین حال حاصلخیزی و بهره‌وری خاک را بهینه می‌کنند (بایو، ۲۰۲۰). پیشرفت‌های اخیر در زیست‌شناسی مولکولی و فنون ردیابی ایزوتوپی، توانایی ما را در توصیف جوامع میکروبی و نقش‌عملکردی آنها را در اکوسیستم‌های خاک افزایش داده است (هوانگ[2] و همکاران، ۲۰۲۳). ادغام این رویکردها با آزمایش‌های میدانی، درک جامع‌تری از چگونگی واکنش فعالیت‌های میکروبی را به شیوه‌های خاک‌ورزی و تغییرات محیطی را فراهم می‌کند (نکونگولو و نارندرولا–کوتا[3]، ۲۰۲۰).

٤-٤ مداخلات سیاستی و نوآوری‌های فناورانه

مداخلات سیاستی و نوآوری‌های فناورانه در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از فعالیت‌های کشاورزی، به ویژه از طریق ترویج شیوه‌های خاک‌ورزی پایدار، نقش محوری دارند. (بوسیو[4] و همکاران، ۲۰۲۰). سیاست‌گذاران این فرصت را دارند که مشوق‌ها و مقرراتی را اجرا کنند که از پذیرش سیستم‌های کم خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی حمایت می‌کنند، سیستم‌هایی که نشان داده شده است انتشار دی اکسید کربن و اکسید نیتروژن را در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم کاهش می‌دهند (پاولسون و همکاران، ۲۰۱۴a؛ پاولسون و همکاران، ۲۰۱۴b). مشوق‌های مالی مانند یارانه برای خرید تجهیزات خاک‌ورزی حفاظتی یا اعتبارات ترسیب کربن خاک، می‌تواند کشاورزان را به گذار به شیوه‌های پایدارتر تشویق کند (چیارلا و همکاران ۲۰۲۳). برای تشویق به پذیرش روش‌های مختلف خاک‌ورزی، به مداخلات سیاستی نیاز خواهد بود. تحقیقات درپش و همکاران (۲۰۱۰) صرفه‌جویی در هزینه‌های بالقوه‌ای را آشکار کرده است که می‌توان از طریق کاهش عملیات خاک‌ورزی به دست آورد.

[1] Bayu
[2] Huang
[3] Nkongolo and Narendrula-Kotha
[4] Bossio

با به حداقل رساندن آسیب‌ها به خاک، کشاورزان می‌توانند در هزینه‌های سوخت و نیروی کار صرفه‌جویی کنند؛ این هزینه‌ها در عملیات کشاورزی سنتی قابل توجه هستند. صرفه‌جویی‌های گفته شده نه تنها از نظر مالی مفید هستند، بلکه با کاهش مصرف انرژی و ردپای کربن فعالیت‌های کشاورزی، به پایداری شیوه‌های کشاورزی نیز کمک می‌کنند.

با این حال، همانطور که پاولسن و همکاران (a۲۰۱۴) و اسمیت و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرده‌اند، نیاز به تحلیل‌های اقتصادی جامع‌تری وجود دارد. چنین تحلیل‌هایی به سودآوری بلندمدت و توجیه اقتصادی این شیوه‌های خاک‌ورزی در مزارع با اندازه‌ها و سیستم‌های کشت مختلف می‌پردازند. توجه به این نکته مهم است که آنچه ممکن است برای عملیات در مقیاس بزرگ باصرفه باشد، ممکن است برای یک مزرعهٔ کوچک‌تر مزایای مالی یکسانی نداشته باشد و برعکس. علاوه بر این، محصولات مختلف ممکن است واکنش‌های متفاوتی به شیوه‌های خاک‌ورزی نشان دهند که می‌تواند بر عملکرد و نتایج اقتصادی آن تأثیر بگذارد. این تحلیل‌های اقتصادی برای درک کامل پیامدهای اتخاذ شیوه‌های خاک‌ورزی کاهش‌یافته ضروری هستند. شیوه‌های خاک‌ورزی می‌توانند داده‌های لازم را برای تصمیم‌گیری‌های آگاهانه که هدف‌های اقتصادی را با نظارت بر محیط زیست متعادل می‌کنند، در اختیار کشاورزان، سیاست‌گذاران و ذینفعان قرار دهند. سرانجام اینکه هدف عبارت است از شناسایی و ترویج شیوه‌های خاک‌ورزی که نه تنها از نظر زیست‌محیطی پایدار باشند، بلکه در درازمدت از نظر اقتصادی نیز برای کشاورزان باصرفه باشند.

٤-٥ توسعهٔ فناوری‌های دقیق

نوآوری‌های فناورانه نه تنها نویدبخش هستند، بلکه دائما چشم‌انداز شیوه‌های خاک‌ورزی پایدار را با تمرکز قابل توجه بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تغییر می‌دهند. همانطور که گوپتا[1] و همکاران (۲۰۲۱) گفته‌اند، این پیشرفت‌ها در افزایش کارایی و سازگاری با محیط زیست در عملیات کشاورزی نقش اساسی دارند. فناوری‌های کشاورزی دقیق، مانند تجهیزات

[1] Gupta

هدایت‌شده با سامانه مکان‌یاب جهانی و فناوری‌های سنجش از دور، انقلابی در نحوهٔ مدیریت مزارع کشاورزان ایجاد کرده‌اند. تیکسیرا[1] و همکاران (۲۰۲۱) اشاره دارد به اینکه فناوری‌ها با بهینه‌سازی استفاده از نهاده‌ها و نظارت کارآمدتر بر پارامترهای سلامت خاک، از مدیریت دقیق و بهره‌وری منابع پشتیبانی می‌کنند و منجر به اکوسیستم کشاورزی پایدارترس می‌شوند. جدول ۴ فهرست فناوری‌های پیشرفته‌ای را ارائه می‌دهد که در سراسر جهان در شیوه‌های خاک‌ورزی پایدار برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به کار گرفته شده‌اند. این فناوری‌ها صرفاً ابزار نیستند، بلکه بخشی از استراتژی گسترده‌تری هستند برای حصول اطمینان از این که کشاورزی ضمن حفظ بهره‌وری و سودآوری برای کشاورزان در سراسر جهان، به طور مثبت به محیط زیست کمک می‌کند. ادغام سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی امکان نظارت دقیق بر سلامت خاک و شناسایی تأثیرات شیوه‌های مختلف خاک‌ورزی را فراهم می‌کند. این فناوری، همانطور که توسط اسمیت و همکاران (۲۰۱۴) مستند کرده‌اند، مدیریت دقیق را تسهیل می‌کند و بهره‌وری منابع را افزایش می‌دهد. حسگرهای خاک و اینترنت اشیا، نظارت پیشرفته‌ای بر رطوبت، دما و سطح مواد مغذی خاک ارائه می‌دهند و داده‌های آنی را ارائه می‌دهند که برای تنظیم شیوه‌های خاک‌ورزی بسیار مهم است. از مزایای این دستگاه‌ها می‌توان به بهبود تصمیم‌گیری و کاهش هزینه‌های ورودی اشاره کرد.

ماشین‌های خودکار که شامل ماشین های رباتیک و تجهیزاتی می شود که در اتوماسیون کاربرد دارند امکان اجرای عمق‌ها و الگوهای خاک‌ورزی دقیق را فراهم می‌کنند. این فناوری نه تنها باعث صرفه‌جویی در نیروی کار می‌شود، بلکه مصرف سوخت را نیز کاهش می‌دهد همان‌طور که میلوسنیک[2] و همکاران (۲۰۱۰) نشان داده اند. فناوری نرخ متغیر[3] امکان تنظیم عملیات خاک‌ورزی را بر اساس تغییرپذیری مکانی شرایط خاک، تنظیم شدت خاک‌ورزی با مناطق خاص خاک برای افزایش بهره‌وری و به حداقل رساندن تأثیر

[1] Teixeira
[2] Mileusnić
[3] Variable rate technology (VRT)

زیست‌محیطی فراهم می‌کند (صالحی و همکاران، ۲۰۱۲). علاوه بر این، سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری که برنامه‌های نرم‌افزاری پیچیده‌ای هستند و برای بهینه‌سازی تصمیمات خاک‌ورزی طراحی شده‌اند، داده‌های خاک را با پیش‌بینی‌های آب و هوا و نیازهای محصول ادغام می‌کنند. این سیستم‌ها، همانطور که وینجیر[1] و همکاران (۲۰۱۵) نشان داده‌اند، افزایش بهره‌وری و مدیریت پایدار مزرعه را ارتقا می‌دهند. در اصل، مداخلات فناوری نه تنها شکاف تحقیقاتی را پر می‌کنند، بلکه به طور فعال آینده‌ای را شکل می‌دهد که در آن کشاورزی پربارتر، سودآورتر و سازگارتر با محیط زیست باشد. این فناوری‌ها بخش جدایی‌ناپذیر از استراتژی‌ای هستند که هدف آن تبدیل کشاورزی به عاملی مثبت در محیط زیست است.

[1] Wingeyer

جدول ٤. تاثیر فناوری‌های مختلف در افزایش اثربخشی شیوه‌های خاک‌ورزی پایدار

فناوری/ابزار	توصیف	کاربرد در خاک‌ورزی	فواید	منبع
سنجش از دور و GIS	استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و سامانه اطلاعات جغرافیایی	آشکارسازی سلامت خاک، تشخیص اثرات خاک‌ورزی	مدیریت دقیق، بازدهی منابع	مککابه[1] و همکاران (۲۰۲۳) کاستالدی[2] و همکاران (۲۰۲۴)
حسگرهای خاک و تجهیزات اینترنت اشیاء	حسگرهای پیشرفته برای نظارت بر رطوبت، دما و سطح مواد مغذی خاک	داده‌های بلادرنگ برای تنظیم شیوه‌های خاک‌ورزی	بهبود تصمیم‌گیری، کاهش ورودی‌ها	رامسون[3] و همکاران (۲۰۲۱) شهاب و همکاران (۲۰۲۴)
ماشینهای اتوماتیک	رباتیک و اتوماسیون در ادوات خاک‌ورزی	اجرای عمق‌ها و الگوهای خاک‌ورزی عمیق	صرفه‌جویی در نیروی کار، کاهش مصرف سوخت	جیا[4] و همکاران (۲۰۱۶) گونزالز–د–سوتو[5] و همکاران (۲۰۱۶)
فناوری نرخ متغیر	تنظیم عملیات خاک‌ورزی بر اساس تغییرپذیری مکانی شرایط خاک	تنظیم شدت خاکورزی با توجه به مناطق خاص خاک	افزایش بهره‌وری، کاهش اثرات زیست‌محیطی	سلیم[6] و همکاران (۲۰۲۳) ثاقب و عثمان[7] (۲۰۲۳)
سامانه های پشتیبان تصمیم گیری	نرم‌افزارهای کاربردی برای بهینه‌سازی تصمیمات خاک‌ورزی	ادغام داده‌های خاک با پیش‌بینی‌های آب و هوا و نیازهای محصول	افزایش بهره‌وری، مدیریت پایدار زمین	نندل و زاندر[8] (۲۰۱۹) انزیگوهبا[9] و همکاران (۲۰۲۲)

[1] McCabe
[2] Castaldi
[3] Ramson
[4] Jia
[5] Gonzalez-de- Soto
[6] Saleem
[7] Saqib and Usman
[8] Nendel and Zander
[9] Nziguheba

۵ خاک‌ورزی موردی[1]

مطالعهٔ فراتحلیل نشان می‌دهد که خاک‌ورزی موردی یک راهبرد مؤثر برای کاهش آثار نامطلوب بی‌خاک‌ورزی طولانی‌مدت تحت شرایط خاص برای ترویج توسعهٔ پایدار کشاورزی است. با این حال، اتخاذ خاک‌ورزی موردی نیاز به ارزیابی دقیق شرایط محلی و محدودیت‌های خاص سیستم دارد تا اثربخشی و پایداری آن تضمین شود (یان[2] و همکاران، ۲۰۲۶). خاک‌ورزی موردی را می توان هرچند سال یکبار (سه سال و یا بیشتر) اجرا کرد (بی‌نام[3]، ۲۰۲۴).

روش بی‌خاک‌ورزی یکی از اجزای کلیدی کشاورزی حفاظتی است که با هدف تولید محصولات، با حداقل به‌هم‌زدن خاک صورت می‌گیرد. این شیوهٔ مدیریت مزرعه مزایای اقتصادی و محیط زیستی متعددی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم دارد. به‌طوریکه از دههٔ ۱۹۶۰ توسعه پیدا کرد و اکنون در ۱۵ درصد از زمین‌های زراعی جهان اجرا می‌شود. با این همه، محصولات مختلف حتی دهه‌ها پس از گذار به کشت بی‌خاک‌ورزی، کاهش مداوم عملکرد را نشان می‌دهند. شواهدی وجود دارد که به‌رغم مدیریت مفید و پایدار خاک در کشاورزی حفاظتی، ممکن است این موضوع با تهدید تدریجی و نامرئی تراکم خاک زیرین تضعیف شود. این خطر تراکم خاک زیرین بیشتر ناشی از تردد ماشین‌های سنگین (برای مثال، ماشین‌های برداشت) است. این تهدید ماهیتی پویا و نامتقارن دارد، هر زمان که رویدادهای تراکم بیشتر از میزان طبیعی بازیابی ساختار خاک رخ دهند و منجر به افزایش تدریجی تخریب خاک شوند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تقریباً ۴۰ درصد از زمین‌های غیرمسکونی جهان (۰/۸میلیون کیلومتر مربع) در معرض خطر بالای فشردگی خاک زیرین هستند (عمدتاً در کانادا، ایالات متحده آمریکا و برزیل که به شدت مکانیزه شده‌اند). اطلاع از فشردگی خاک زیرین و اقدام به کاهش آن با اجرای عملیات مزرعه‌ای به وسیله وسایل

[1] Occasional tillage (OT)
[2] Yan
[3] Anonymous

نقلیه رباتیک کوچکتر با توجه به محدودیت‌های مکانیکی خاک، به کشاورزی حفاظتی پایدار و جامع کمک خواهد کرد (کلر[1] و همکاران، ۲۰۲۵).

روش بی‌خاک‌ورزی در حال تکامل است و عملکرد آن به شرایط خاص محل (مانند نوع محصول، شرایط آب و هوایی و نحوه مدیریت مزرعه) بستگی دارد. مدیریت بی‌خاک‌ورزی ممکن است عملکرد محصول را افزایش یا کاهش دهد یا هیچ تاثیری بر عمکرد محصول نداشته باشد، اما روشی موثر برای حفاظت از خاک و آب است. این روش عموماً ویژگی‌های خاک را نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بهبود می‌بخشد (بلانکو و لل، ۲۰۲۳).

بی‌خاک‌ورزی، همراه با تناوب‌های زراعی پیچیده و متنوع و گیاهان پوششی، نسبت به بی‌خاک‌ورزی به تنهایی برای بهبود خواص و بهره‌وری خاک راهبرد بهتری است. خاک‌ورزی کاهش‌یافته (برای مثال، خاک‌ورزی با مالچ، خاک‌ورزی نواری، خاک‌ورزی عمودی) می‌تواند جایگزینی برای بی‌خاک‌ورزی در برخی شرایطی باشد که بی‌خاک‌ورزی عملکرد ضعیفی دارد. اگر دیگر شیوه‌های حفاظتی نتوانند چالش‌های فناوری بی‌خاک‌ورزی را برطرف کنند، می‌توان از خاک‌ورزی موردی خاک‌های تحت بی‌خاک‌ورزی بلندمدت هر ۵ یا ۱۰ سال یکبار استفاده کرد. مطالعات نشان داده‌اند که خاک‌ورزی موردی عموماً تأثیری بر ویژگی‌های خاک ندارد، در حالی که ممکن است عملکرد محصول را افزایش دهد یا ندهد. پیش از اجرای خاک‌ورزی موردی، باید نگرانی‌های اقتصادی و محیط زیستی در نظر گرفته شود (بلانکو و لل، ۲۰۲۳).

٦ چالش‌ها و فرصت‌ها

اجرای شیوه‌های خاک‌ورزی پایدار در کشاورزی، چالش‌های قابل توجهی را در کنار فرصت‌های نویدبخش ارائه می‌دهد. گذار به روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی، یعنی کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی، شامل هزینه‌های اولیه، از جمله سرمایه‌گذاری در تجهیزات تخصصی و تعدیل شیوه‌های مدیریتی است (کریچ[2] ۲۰۱۷). مطالعات نشان می‌دهد که این هزینه‌های گذار می‌تواند بسته به اندازه مزرعه، نوع خاک و سیاست‌های کشاورزی منطقه‌ای

[1] Keller

[2] Creech

بسیار متفاوت باشد (چیارلا[1] و همکاران، ۲۰۲۳؛ کریچ، ۲۰۱۷؛ پیتلکوو[2] و همکاران، ۲۰۱۵). یک چالش مهم، مدیریت تغییرپذیری عملکرد بالقوه در دورهٔ گذار است. کشاورزان ممکن است با کاهش عملکرد و تطبیق استراتژی‌های کنترل علف‌های هرز با شیوه‌های جدید، کاهش اولیه عملکرد را تجربه کنند (لل ۲۰۱۵). با این حال، مطالعات بلندمدت نشان می‌دهد که شیوه‌های خاک‌ورزی پایدار می‌توانند سلامت خاک را بهبود بخشند، احتباس آب را افزایش و فرسایش خاک را کاهش دهند. برای مثال، نشان داده شده است که سیستم‌های بدون شخم، در مقایسه با روش‌های مرسوم شخم، فرسایش خاک را به طور قابل توجهی یعنی تا تا ۹۰ درصد کاهش می‌دهند (درپش و همکاران ۲۰۱۰). پرداختن به این چالش‌ها از طریق تحقیقات هدفمند، حمایت از سیاست‌ها و آموزش کشاورزان می‌تواند پذیرش گسترده‌تر شیوه‌های شخم پایدار را تسهیل کند و منجر به سامانه‌های کشاورزی مقاوم‌تر و سازگارتر با محیط زیست شود.

علاوه بر این، وندن‌بیگارت و لیانگ[3] (۲۰۲۳) زیر ادعاهای اغراق‌آمیز مطرح‌شده در تحقیقات قبلی را به دلیل نقص در روش‌های نمونه‌برداری، فرضیات و تفاسیر خط کشیده و مورد سوال قرار می‌دهند. در این ارتباط مطالعات سریواستاوا (۲۰۲۵) از کاربرد محتاطانه‌تر اصطلاحات مربوط به کاهش تغییرات اقلیمی در چارچوب کشاورزی بی‌خاک‌ورزی حمایت می‌کند و بر لزوم اندازه‌گیری‌های دقیق و ارزیابی‌های واقعی از ظرفیت ترسیب کربن در چنین شیوه‌هایی تأکید دارد. در تکمیل این دیدگاه، نتایج یک فراتحلیل توسط مانگالاسری[4] و همکاران (۲۰۱۵) نشان می‌دهد که اگرچه بی‌خاک‌ورزی ممکن است کربن را در لایه‌های سطحی و زیرین خاک ترسیب کند، اما اثربخشی آن به عنوان یک استراتژی کاهش تغییرات اقلیمی مورد بحث است. علاوه بر این، برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد (۲۰۱۳) بر پیچیدگی‌های اثر تغییرات اقلیمی و ماهیت چندوجهی استراتژی‌های بالقوه کاهش اثرهای کشاورزی تأکید می‌کند. اسمیت[1] و همکاران (۲۰۱۴) عوامل تاب‌آوری را که به بهبود تنش

[1] Chiarella
[2] Pittellkow
[3] VandenBygaart and Liang
[4] Mangalassery

کمک می‌کنند بیشتر بررسی می‌کنند. عوامل تاب‌آوری می‌تواند به طور غیرمستقیم به شیوه‌های کشاورزی و نقش آنها در سازگاری و کاهش تغییرات اقلیمی مرتبط باشد. نتایج تحقیقات و پایلوت‌های مختلف در مناطق مختلف ایران با شرایط اقلیمی متفاوت نشان می‌دهد که کاربرد روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی مانند روش‌های کم خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی بر اساس دستورالعمل‌ها و توصیه‌های علمی و فنی، در حفظ رطوبت خاک، بهبود مواد آلی خاک تا ۳۰ درصد، کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی تا ۵۰ درصد، نگهداری رطوبت در خاک، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش زمان عملیات، مؤثر است (شریفی مالواجردی و همکاران، ۲۰۲۵، جوادی و همکاران، ۱۳۹۵، افضلی نیا، ۱۴۰۰). این بحث‌ها منعکس‌کننده اجماع گسترده‌تری در جامعهٔ علمی است که در حالی که شیوه‌های کشاورزی، از جمله کاشت بی‌خاک‌ورزی، ممکن است به مدیریت کربن کمک کند، تأثیر آنها بر کاهش تغییرات اقلیمی جهانی نیاز به بررسی دقیق و مطالعه بیشتر دارد.

۷ جمع‌بندی

در این نشریه یافته‌های تحقیقاتی موجود در دنیا مربوط به اثر خاک‌ورزی حفاظتی و خاکورزی مرسوم بر پارامترهای محیط زیستی شامل افزایش ترسیب کربن و انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی اکسید کربن، اکسید نیتروژن، گاز متان ارائه شد. همچنین اثرهای آنها بر مصرف سوخت، مصرف انرژی، پارامترهای سلامت خاک شامل حفظ و نگهداری آب در خاک، ماده آلی خاک، تنوع زیستی و سلامت خاک، فرسایش خاک و ساختمان خاک بررسی شد. به موضوعاتی که هنوز بدون پاسخ مانده و بعنوان خلاء تحقیقاتی مطرح است نیز اشاره شدند. موضوعی که اخیرا در دنیا به آن پرداخته شده است یعنی "خاک‌ورزی موردی" یا "یک بار خاک‌ورزی" بعد از مدت مشخص ۵ یا ۱۰ سال انجام عملیات بی‌خاک‌ورزی در یک مزرعه نیز پرداخته شد. به چالش‌هایی نظیر مدیریت تغییرپذیری عملکرد بالقوه در طول دوره گذار از خاک‌ورزی مرسوم به خاک‌ورزی حفاظتی اشاره شد. کشاورزان ممکن است در این خصوص با کاهش عملکرد و تطبیق استراتژی‌های کنترل علف‌های هرز با شیوه‌های جدید، کاهش عملکرد را تجربه کنند.

۸ منابع مورد استفاده

افضلی نیا، ص.، علوی منش، م.، زارع، م.a ۱۴۰۰. اثر خاک‌ورزی حفاظتی و روش آبیاری بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در تولید گندم آبی. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار. جلد ۱۳ شماره ۴.

افضلی‌نیا، ص.b ۱۴۰۰. خاک‌ورزی حفاظتی. انتشارات موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.۲۸۷ ص.

افصلی نیا، ص.، صلح‌جو، ع. ا.، شریفی مالواجردی.، اسدی خشوئی، ا.، اشرفی‌زاده، س. ر.، افضلی گروه، ه.، صادق‌نژاد، ح. ر.، هدایتی‌پور، ا.، تقی‌نژاد، ج.، حیدری، ا.، روزبه، م. ۱۴۰۲. گزارش برنامه بهبود مکانیزاسیون در کشاورزی حفاظتی. شماره فروست ۶۳۵۵۷. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

انگزی، ف.، مندنی، ف.، قبادی، م، یوسفی، م. ۱۴۰۳. اثر خاک‌ورزی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای در سیستمهای تولید گندم (Triticum aestivum L.) و نخود (Cicer arietinum) دیم تحت شرایط اقلیمی منطقه کرمانشاه. تولید و ژنتیک گیاهی. جلد ۵، شماره ۲، پاییز و زمستان، صفحه ۳۳۶-۳۲۵.

پرماه، د.، چقارزدی، ح. ر.، مندنی، ف.، بهشتی آل آقا، ع.، کهریزی، د. ۱۴۰۴.نقش مدیریت زراعی بر میزان مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای (Carthamus tinctorius L.) در مزارع گلرنگ. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی. دوره ۳۲ ، شماره ۱.

تقی نژاد ، ج . جوادی ، ا . ۱۳۹۳. اثر نظام‌های خاک ورزی بر برگردان کردن بقایای گیاهی ذرت دانه ای و عملکرد کلزا در مغان . نشریه علمی و پژوهشی ماشینهای کشاورزی . دانشگاه فردوسی مشهد. شماره ۲ : ۳۵۲-۳۵۹

جوادی، ا.، فتح الله طالقانی، د.، نوشاد، ح.، محمدیان، ر.، سراجه، ح.، شریفی مالواجردی، ۱.، حبیب خدائی، ع. ۱۳۹۶. بررسی اجرای روشهای خاک‌ورزی حفاظتی در کاشت

چغندرقند- گندم . گزارش پژوهشی نهایی. شماره ثبت ۱۱۸۱. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

جوادی، ا.، تاکی، ا.، افضلی نیا، ص.، صادق نژاد، ح. ر.، محمدی، د. ۱۳۹۵. ارزیابی جامع اثربخشی فنی ، اقتصادی و زیست محیطی اجرای سیستم های خاک ورزی حفاظتی در کشت گندم. گزارش پژوهشی نهایی. شماره فروست ۵۰۱۰۲. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

جوادی، ا. محمدی گل، ر. ۱۳۸۹. اصول و کاربرد ماشینهای کاشت حفاظتی. ترجمه جی آر موری، جی ان تولبرگ، بی بی باسنت. مرکز نشر دانشگاهی.

حیدری سلطان آبادی، م.، دهقانی. ۱۳۹۹. تعیین انرژی و آثار زیست محیطی مصرف آب در تولید گندم استان اصفهان. مجله پژوهش آب ایران. جلد ۱۴، شماره ۴، پیاپی ۳۹. صفحه ۱۳۳-۱۲۲.

رحیم زاده، ر.، عبدالله پور، ش.، عجب شیرچی، ی.، شریفی، ا و محمدی، ا. ۱۳۹۳. شیاربازکن نوین مخصوص خاک‌ورزی حفاظتی مناطق دیم. نشریه مکانیزاسیون کشاورزی. جلد ۲، شماره ۱. صفحه ۸۷-۹۶.

شریفی مالواجردی، ا. ۱۳۹۶. تحلیلی بر توسعه خاک‌ورزی حفاظتی در ایران (در: کتاب تحلیل‌های فنی در مدیریت و مهندسی کشاورزی ایران (جلد اول)). موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. صفحات ۱۳۹-۱۴۸.

شریفی، ا.، صادق نژاد، ح. ر و فرجی، ا. ۱۳۹۵. مقایسه پارامترهای عملکردی ماشین و شاخص های انرژی تولید سویای تابستانه در سامانه‌های خاک ورزی حفاظتی و مرسوم. نشریه ماشین‌های کشاورزی. ۶ (۲)، ۵۱۰-۵۲۳.

صلح جو، ع.ا. و جوادی، ا. ۱۳۹۳. تاثیر روش های خاک ورزی و کاشت در سیستم کاشت بر روی پشته های عریض بر عملکرد گندم آبی. پژوهش و سازندگی.

صیدی، ا. عبداله پور، ش. جوادی، ا. مقدم، م. ۱۳۹۰. بررسی الگوی حرکت خاک در بستر بذر به جا مانده از یک شیاربازکن نوین مناسب جهت استفاده در سیستم بی خاک–ورزی. دانش کشاورزی و تولید پایدار. جلد ۲۱.

Albrecht. 1994. Long term agricultural experiments report. USDA-ARS Pendleton, OR.

Anonymous. 2024. Occasional tillage strategies in dryland cropping systems. https://eupdate.agronomy.ksu.edu/article/occasional-tillage-strategies-in-dryland-cropping-systems-605-3. Accessed on 29/12/2025.

Basche, A. D., Archontoulis, S. V., Kaspar, T. C., Jaynes, D. B., Parkin, T. B., Miguez, F. E. 2016. Simulating long-term impacts of cover crops and climate change on crop production and environmental outcomes in the Midwestern United States. Agriculture, Ecosystems & Environment 218: 95–106.

Bayer, C., Gomes, J. Vieira, F. C. B., Zanatta, J. A., de Cassia Piccolo, M., and Dieckow, J. 2012. Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems. Soil and Tillage Research 124: 1–7.

Bayu, T. 2020. Review on contribution of integrated soil fertility management for climate change mitigation and agricultural sustainability. Cogent Environmental Science 6, no. 1: 1823631.

Blanco, H. and Lal, R. 2023. Soil conservation and management. Second Edition. eBook. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30341-8

Bossio, D. A., Cook-Patton, S. C., Ellis, P. W., Fargione, J., Sanderman, J., Smith, P., Wood, S., Zoomer, R. J., von Unger, M., Emmer, I. M., Griscom, B. W. 2020. The role of soil carbon in natural climate solutions. Nature Sustainability 3, no. 5: 391–398.

Chen, G., Kupke, P., and Baillie, C. 2008. Opportunities to enhance energy efficiency and minimize greenhouse gases in Queensland's intensive agricultural sector, in A Knapp & P Perkins (eds). Improving the Capacity of Queensland Intensive Agriculture to Manage Climate Change, Queensland Farmer's Federation, Brisbane.

Chen, G., and Baillie, C. 2009. Development of a framework and tool to assess on-farm energy uses of cotton production. Energ. Convers. Manage., 50(5): 1256-1263.

Chiarella, C., Meyfroidt, P., Abeygunawardane, D., and Conforti, P. 2023. Balancing the trade-offs between land productivity, labor productivity and labor intensity. Ambio 52, no. 10: 1618–1634.

Colunga, S. L., Wahab, L., Cabo, A. F., and Pereira, E. 2025. Carbon sequestration through conservation tillage in sandy soils of arid and semi-arid climates: A meta-analysis. Soil and Tillage Research 245: 106310.

Creech, E. 2017. Saving money, time and soil: The economics of no-till farming. | USDA.

Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., and Li, H. 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 3, No. 1: 1–25.

Feeney, C. J., Robinson, D. A., Thomas, A. R. Borrelli, P. Cooper, D. M. and May L. 2023. Agricultural practices drive elevated rates of topsoil decline across Kenya, but terracing and reduced tillage can reverse this. Science of the Total Environment 870: 161925.

Feng, J., Li, F., Zhou, X., Xu, C., Ji, L., Chen, Z., Fang, F. 2018. Impact of agronomy practices on the effects of reduced tillage systems on CH_4 and N_2O emissions from agricultural fields: A global meta-analysis. PLoS One 13, No. 5: e0196703.

French, E., Kaplan, I., Iyer-Pascuzzi, A., Nakatsu, C. H., and Enders, L.2021. Emerging strategies for precision microbiome management in diverse agroecosystems. Nature Plants 7, No. 3: 256–267.

Gupta, K., Kumar, R. Baruah, K. K. Hazarika, S. Karmakar, S. and Bordoloi, N. 2021. Greenhouse gas emission from rice fields: A review from Indian context. Environmental Science and Pollution Research 28, No. 24: 30551–30572.

Haddaway, N. R., Hedlund, K., Jackson, L. E., Katterer, T., Lugato, E., Thomsen, I. K., Jørgensen, H. B., Isberg , . 2017. How does tillage

intensity affect soil organic carbon? A systematic review. Environmental Evidence 6: 1–48.

Holland, J. M. 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: Reviewing the evidence. Agriculture, Ecosystems and Environment 103, Mo. 1: 1–25. https://doi.org/10.1016/j. agee.2003.12.018.

Huang, L., Levintal, E., Erikson, C. B., Coyotl , A., Horwath, W. R., Dahlke, H. E., Mazza Rodrigues, . . 2023. Molecular and dualIsotopic profiling of the microbial controls on nitrogen leaching in agricultural soils under managed aquifer recharge. Environmental Science and Technology 57, No. 30: 11084–11095.

Humphreys, E., Kukal, S. S. and Eberbach, P. L. 2016. effects of tillage and mulch on the growth, yield and irrigation water productivity of a dry seeded rice-wheat cropping system in North-West India. Field Crops Research 196: 219–236.

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. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_ Frontmatter_FINAL.pdf.

Javadi, A., Shahidzadeh, M. and Tabatabaee. A. 2004. Sustainable tillage methods for wheat production. Proceeding of CIGR International conference. Oct. 11-14 Oct., Beijing. China.

Keller. T., Bickel S., Or. D. 2025. The invisible subsoil compaction risk under no-till farming. PNAS. Agricultural Science Environmental Science. https://doi.org/10.1073/pnas.2515473122

Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impact on global climate change and food security. Science 304, No 5677: 1623-1627.

Lal, R. 2015. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. Journal of Soil and Water Conservation 70, No. 3: 55A–62A

Lal, R. 2018. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. Global Change Biology 24, No. 7: 3285–3301. https://doi.org/10.1111/gcb. 14054.

Li, Y., Song, D., Liang, S., Dang, P., Qin, X., Liao, Y., Siddique, K. H. M. 2020. Effect of no-tillage on soil bacterial and fungal community diversity: A meta-analysis. Soil and Tillage Research 204: 104721.

Li, H., Jin, X., Shan, W., Han, B., Zhou, Y., and Tittonell, P. 2024. Optimizing agricultural management in China for soil greenhouse gas emissions and yield balance: A regional heterogeneity perspective. Journal of Cleaner Production 452: 142255.

Liang, B. C., VandenBygaart, A. J., MacDonald, J. D., Cerkowniak, D., McConkey, B. G., Desjardins, R. L., Angers, D. A. 2020. Revisiting no-till's impact on soil organic carbon storage in Canada. Soil and Tillage Research 198: 104529

Mangalassery, S., Sjögersten, S., Sparkes, D. L., and Mooney, S. J. 2015. Examining the potential for climate change mitigation from zero tillage. Journal of Agricultural Science 153, No. 7: 1151–1173.

Martínez-Mena, M., Carrillo-López, E., Boix-Fayos, C., Almagro , M., Garcia-Franco , E., Diaz-Pereira, Montoya , I., de Vente , J. 2020. Long-term effectiveness of sustainable land management practices to control runoff, soil erosion, and nutrient loss and the role of rainfall intensity in mediterranean rainfed agroecosystems. Catena 187: 104352.

Mello, I., and Van Raij, B. 2006. No-till for sustainable agriculture in Brazil. Proceedings of World Association of Soil and Water Conservation Paper 1: 49–57. Merten, G. H., Araújo,A. G., Biscaia,R. C. M., Barbosa, G. M. C., and Conte, O. 2015. No-till surface runoff and soil losses in Southern Brazil. Soil and Tillage Research 152: 85–93.

Merten, G. H., Araújo, A. G., Biscaia, R. C. M., Barbosa, G. M. C., and Conte, O. 2015. No-till surface runoff and soil losses in Southern Brazil. Soil and Tillage Research 152: 85–93.

Mileusnić, Z. I., Petrović, D. V., and Đević, M. S. 2010. Comparison of tillage systems according to fuel consumption. Energy 35, No. 1: 221–228.

Moreno-García, M., de Torres, M. Á. R. R., González-Sánchez, E. J., Ordóñez-Fernández, R., Veroz-González, Ó., and Carbonell-

Bojollo, R. M. 2020. Methodology for estimating the impact of no tillage on the 4perMille initiative: The case of annual crops in Spain. Geoderma 371: 114381.

Nkongolo, K. K., and Narendrula-Kotha, R. 2020. Advances in monitoring soil microbial community dynamic and function. Journal of Applied Genetics 61, No. 2: 249–263.

Okeyo, A. I., Mucheru-Muna, M., Mugwe, J. Ngetich , F. J., Mugendi , D., Diels , J., Shisanya , C.. 2014. Effects of selected soil and water conservation technologies on nutrient losses and maize yields in the central highlands of Kenya." Agricultural Water Management 137: 52–58.

Page, K. L., Dang, Y. P., and Dalal, R. C. 2020. The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. Frontiers in Sustainable Food Systems 4: 31.

Pittelkow, C. M., Liang, X., Linquist, B. A. van Groenigen , K. J., Lee , J., Lundy , M. E., van Gestel , N., Six, J., Venterea , R. T., van Kessel , C. 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. Nature 517, No. 7534: 365–368.

Powlson, D. S., Stirling, C. M.. Jat, M. L., Gerard , B., Palm, C. A., Sanchez , P. A., Cassman , K. 2014a. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. Nature Climate Change 4, No. 8: 678–683.

Powlson, D. S., Stirling, C. M., Thierfelder, C., White, R. P., and Jat, M. L. 2014b. Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems? Agriculture, Ecosystems & Environment 187: 116–126.

Prasad, J. V. N. S., Rao, C. S., Srinivas, K., Jyothi , C. N., Venkateswarlu , B., Ramachandrappa , b. K., Nanjappa , D. G., Ravichandra , K. Mishra , P. 2016. Effect of ten years of reduced tillage and recycling of organic matter on crop yields, soil organic carbon and its fractions in Alfisols of semi arid tropics of southern India. Soil and Tillage Research 156: 131–139.

Salehi, S., Hayati, D., Karbalaee, F., and Chin, W. W. 2012. Factors affecting intention to use variable rate technology-tillage by structural equation modeling. International Journal of AgriScience 2, No. 9: 860–874.

Srivastava, R. K. 2025. Conservation tillage practices on GHG emissions, soil health and overall agricultural sustainability. Soil Use and Management, 41: e70096, https://doi.org/10.1111/sum.70096

Sekaran, U., Sagar, K. L., and Kumar, S. 2021. Soil aggregates, aggregate-associated carbon and nitrogen, and water retention as influenced by short and long-term no-till systems. Soil and Tillage Research 208: 104885.

Six, J., Ogle, S. M., Breidt, F. J., Conant, R. T., Mosier, A. R., and Paustian, K. 2004. The potential to mitigate global warming with no tillage management is only realized when practiced in the long term. Global Change Biology 10, No. 2: 155–160.

Schlüter, S., Großmann, C., Diel, J., Wu, G. M., Tischer , S., Deubel , A., Rücknagel , J. 2018. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. Geoderma 332: 10–19.

Sharifi, A. Sadeghnezhad, H. R., and Faraji, A. 2016. Effect of conservation tillage systems on growth, yield and yield components of soybean. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal. 18(3): 74-83.

Sharifi Malvajerdi, A., Sadeghnezhad, H. R., and Faraji, A. 2025. Effect of conservation tillage scenarios on energy consumption in soybean production in Iran: Case study (Golestan province). Agricultural Engineering International: the CIGR Journal, CIGR Journal 27(1):120-126.

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary , D., Janzen , H. H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara , F., Rice, C. W., Scholes , B., Sirotenko , O., Howden , S. M., Mcallister , T. a., Pan, g., Romanenkov , V., Schneider , U. A., Towprayoon, S., Wattenbach, M., Smith, J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture.

Philosophical Transactions of the Royal Society, B: Biological Sciences 363, No. 1492: 789–813.

Smith, P., Bustamante, M., Ahammad, H., Clark, h., Dong, H., Elsiddig , E. A., Habel, H., Harper, R., House, J. I., Jafari, M., Masera, O., Mbow, C., Ravindranath , N. H., Rice, C. W., Robledo, C. 2014. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 811–922. Cambridge University Press.

Tabatabaee, A. and Javadi. A. 2004. Sustainable tillage method in irrigation wheat land for different regions of Iran. Proceeding of ASAE Conference, 1-4 Aug., Ottawa, Canada.

Teixeira, F., Basch, G., Alaoui, A., Lemann, T., Wesselink, M., Sukkel, W., Lemesle, J., Ferreira, C., Veiga, A. M., Garcia-Orenes, F., Morugán, A., Mataix-Solera, J., Kosmas, C. Glavan, M., Tóth, Z., Hermann, T., Vizitiu, O., Lipiec, J., Frac, M., Reintam, E, Xu, M., Fu, H., fan, H., Fleskens, L. 2021. Manuring effects on visual soil quality indicators and soil organic matter content in different pedoclimatic zones in Europe and China. Soil and Tillage Research 212: 105033.

United Nations Environment Programme. 2013. UNEP 2013 annual report. Guidance on Citations, Referencing and Style Guide for UN Environment Publications and Reports | UNEP – UN Environment Programme.

Ussiri, D. A. N., and Lal, R. 2009. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an Alfisol in Ohio. Soil and Tillage Research 104, Nno. 1: 39–47.

VandenBygaart, A. J., and Liang, B. C. 2023. Crop yields under no-till in Canada: implications for soil organic carbon change. Canadian Journal of Soil Science 104, no. 1: 22–27

Van Eerd, L. L., Congreves, K. A. Hayes, A., Verhallen A., and Hooker, D. C. 2014. Long-term tillage and crop rotation effects on soil

quality, organic carbon, and total nitrogen. Canadian Journal of Soil Science 94, No. 3: 303–315.

Van Kessel, C., Venterea, R., Six, J. Adviento-Borbe, M. A., Linquist, B. and van Groenigen, K. J. 2013. Climate, duration, and N placement determine N_2O emissions in reduced tillage systems: A meta-Analysis. Global Change Biology 19, No. 1: 33-44.

Verhulst, N., Govaerts, B. Verachtert, E., Castellanos-Navarrete , A., Mezzalama , M., Patrick , W., Deckers, J., Sayre, K. D. 2010. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems. In Advances in Soil Science: Food security and soil quality, edited by Lal, R. and Stewart, B. A. 137–208. CRC Press.

Wingeyer, A. B., Amado, T. J. Pérez-Bidegain, M., Studdert , G. A., Perdomo, C., Garcia, F., Karlen, D. 2015. Soil quality impacts of current south American agricultural practices. Sustainability 7, No. 2: 2213–2242.

Yan. Y., Li, H., Zhang, M., Liu, X, Wang, Y., Zhang, L., Ma, Z., Jiang, Y., Yang, M., and Cai, R. 2026. Occasional tillage in no-till systems: A global meta-analysis on its frequency, causes, and agronomic implications. Soil and Tillage Research, Volume 258, May, 107022. https://doi.org/10.1016/j.still.2025.107022

Zhao, X., Liu, S. L., Pu, C., Zhang , X-Q., Xue, J. F., Zhang, R., Wang, W., Lal, R., Zhang, H., Chen, F. 2016. Methane and nitrous oxide emissions under no-till farming in China: A meta-analysis. Global Change Biology 22, No. 4: 1372–1384.

Zhu, Y., and Li, H. 2024. Methane emissions from rice paddies in the Yangtze River Delta Region of China: synthesis of new estimates. International Journal of Environmental Science and Technology 21: 1–6.

Zikeli, S., and Gruber, S. 2017. Reduced tillage and no0till in organic farming systems, Germany Status Quo, Potentials and Challenges. Agriculture 7, No. 4:35.