

کشاورزی حفاظتی در اراضی دیم ایران، از یافته‌های پژوهشی تا راهبردهای پایداری

رامین لطفی^{۱*}، جعفر جعفرزاده^۱، محمد اسماعیل اسدی^۲، ایرج اسکندری^۳

۱- سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، مراغه، ایران

۲- پژوهشگر ارشد آب و خاک و کشاورزی حفاظتی، گرگان، ایران

۳- ناظر ارشد پروژه ملی جهش تولید در دیمزارها، محقق سابق موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، مراغه، ایران

چکیده مبسوط

اراضی دیم با تهدید جدی تغییرات اقلیمی، از جمله خشکسالی‌های متوالی و فرسایش خاک مواجه هستند که پایداری تولید را به مخاطره انداخته‌اند. آینده زراعت دیم ایران در گرو اتخاذ مدیریتی خردمندانه است که در آن، سلامت خاک به عنوان اساس تولید پایدار بایستی مورد توجه جدی قرار گیرد. کشاورزی حفاظتی به عنوان یک نظام مدیریتی پایدار که بر سه رکن اصلی «حداقل دست‌کاری مکانیکی خاک»، «حفظ پوشش دائمی خاک» و «تناوب زراعی» استوار است، راهکاری کارآمد برای مقابله با این چالش‌ها شناخته می‌شود. این مقاله مروری بر یافته‌های حاصل از چهار دهه تحقیق میدانی مراکز پژوهشی، تحلیل و بررسی آثار زیست‌محیطی و بهره‌وری تولید در نظام کشاورزی حفاظتی در اقلیم‌های مختلف ایران می‌پردازد. یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهند که نظام‌های کشاورزی حفاظتی با افزایش ماده آلی و فعالیت میکروبی خاک، قابلیت نگهداری رطوبت و دسترسی به عناصر غذایی را ارتقا داده و فرسایش خاک را کاهش می‌دهند. قرارگیری گیاهان زراعی خانواده لگوم (حبوبات و علوفه)، در تناوب با غلات در اراضی دیم ضمن کاهش نیاز غذایی گیاهان غلات، منجر به پایداری تولید در دیمزارها می‌شود. نظام بی‌خاک‌ورزی با کاهش مصرف انرژی مستقیم، بهبود کارایی مصرف آب و مدیریت بقایا، پایداری تولید را افزایش می‌دهند. هرچند هدف اصلی در کشاورزی حفاظتی، نه افزایش عملکرد، بلکه پایداری عملکرد و حفظ منابع تولید است، با وجود این، بر اساس یافته‌های تحقیقاتی اثر اقلیم روی پایداری تولید محصولات زراعی دیم در نظام کشاورزی حفاظتی معنی‌دار بوده و در اقلیم معتدل و نیمه گرم نسبت به اقلیم سرد، سریعتر اتفاق می‌افتد. در سال‌های نخست اجرای نظام بی‌خاک‌ورزی مخصوصاً در اقلیم سرد، ممکن است افت عملکرد رخ دهد که با رعایت تناوب زراعی مناسب (مانند نخود-گندم) و مدیریت پوشش بقایا در سطح خاک و کنترل علف‌های هرز، این کاهش در میان‌مدت جبران می‌شود. در نتیجه، انتخاب نظام کشاورزی حفاظتی متناسب با شرایط اقلیمی (نوع خاک‌ورزی یا تناوب)، راهکاری مؤثر برای دستیابی به کشاورزی پایدار و مقاوم در برابر تغییر اقلیم است. با وجود این، توسعه این سیستم با موانع متعددی از جمله نظام زراعی غلات-محور، کمبود کارنده‌های تخصصی، چالش مدیریت علف‌های هرز در محصولات تناوبی، وابستگی معیشتی به بقایای گیاهی و نبود سیاست‌های حمایتی مؤثر روبرو است. در این مقاله، بر لزوم تدوین یک راهبرد ملی یکپارچه شامل توسعه مکانیزاسیون بومی، تقویت نظام‌های ترویجی-آموزشی، طراحی مشوق‌های اقتصادی و اصلاح الگوی کشت برای تسهیل حرکت به سمت کشاورزی حفاظتی و پایدار در اراضی دیم ایران تأکید می‌شود.

کلمات کلیدی: بهره‌وری تولید، پوشش بقایا، حاصلخیزی خاک، زراعت دیم، کشت مستقیم



* نگارنده مسئول: r.lotfi2025@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

مقدمه

کشاورزی حفاظتی به عنوان راهبردی به بحران های ناشی از فرسایش خاک و کاهش بهره‌وری در نظام های خاک‌ورزی مرسوم شکل گرفت. ریشه های این رویکرد به بحران «کاسه گرد و غبار» در دهه ۱۹۳۰ آمریکا بازمی‌گردد؛ دوره ای که طوفان های گسترده گرد و غبار موجب تخریب شدید اراضی کشاورزی شد و سیاست‌گذاران و متخصصان را به این نتیجه رساند که پایداری کشاورزی تنها با کاهش دست‌کاری خاک و به‌کارگیری اصول کشاورزی حفاظتی ممکن است. این نگرش نوین در دهه های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰، با پیشرفت فناوری های مرتبط و حمایت نهادهای بین‌المللی مانند FAO و CIMMYT رسمیت یافت. پس از پذیرش و تأیید این سازمان ها، گسترش کشاورزی حفاظتی شتاب بیشتری گرفت؛ به گونه ای که تا سال ۲۰۱۹، سطح جهانی اراضی تحت این شیوه به ۲۰۵ میلیون هکتار در بیش از ۱۰۰ کشور رسید (Kassam et al., 2019). در ایران نیز این رویکرد از اواخر دهه ۱۳۷۰ معرفی شد و نخستین پروژه های آزمایشی آن در استان های شمال غرب و غرب کشور اجرا گردید. متوسط سطح زیرکشت سالیانه اراضی دیم در ایران حدود ۶ میلیون هکتار برآورد شده است، اراضی که میزان بارش سالیانه در آن از ۱۵۰ میلی‌متر در مناطق خشک و کویری تا ۵۰۰ میلی‌متر در دامنه های غرب و شمال غرب زاگرس و برخی نقاط شمال کشور متغیر است. کشاورزی دیم در ایران، به دلیل شرایط خشک و نیمه خشک و همچنین ضعف حاصلخیزی خاک، در صورت عدم بهره‌گیری از دانش فنی نوین می‌تواند به یکی از پرریسک‌ترین بخش های تولیدات کشاورزی تبدیل شود. کاهش رطوبت قابل استفاده خاک، فرسایش شدید و ضعف مواد آلی، محدودیت هایی جدی بر عملکرد محصولات زراعی تحمیل کرده و ضرورت اتخاذ رویکردهای پایدار مدیریتی را برجسته ساخته است.

کشاورزی حفاظتی که شامل کاهش یا حذف خاک‌ورزی و دست‌کاری مکانیکی خاک، جایگزینی روش های سنتی با کاشت بدون خاک‌ورزی، حفظ بقایای گیاهی و اجرای تناوب زراعی معرفی شده است، به عنوان مؤثرترین راهکار برای بهبود بهره‌وری خاک و منابع آب شناخته شده است (Lal, 2015; Asadi, 2021; Derpsch et al., 2024; Lotfi et al., 2024). این نظام ها به ویژه در اراضی دیم می‌توانند با افزایش رطوبت قابل استفاده برای گیاه، بهبود تغذیه آن و کاهش مصرف انرژی و نیروی انسانی، تولیدی پایدارتر و اقتصادی تر فراهم کنند (Hoyle et al., 2011).

در سال های اخیر، مطالعات متعددی در ایستگاه های تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم ایران در مورد ارزیابی اثرات نظام های خاک‌ورزی حفاظتی و تناوب بر ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که حفظ بقایای گیاهی و کاهش عملیات خاک‌ورزی می‌تواند ذخایر کربن خاک را افزایش داده، فعالیت میکروبی را تقویت کرده و دسترسی ریشه به عناصر غذایی حیاتی مانند نیتروژن و فسفر را بهبود بخشد (Eskandari A. 1998; Eskandari et al., 2015; Lotfi and Pessarakli, 2023; Lotfi et al., 2024). با این حال، پذیرش کشاورزی حفاظتی در اراضی دیم با چالش های همراه است که نادیده گرفتن آن ها می‌تواند نه تنها به کاهش عملکرد و سودآوری منجر شود، بلکه اثرات منفی بلندمدت بر ساختار و حاصلخیزی خاک بر جای بگذارد. هدف اصلی این مقاله، بررسی اثرات کشاورزی حفاظتی بر حاصلخیزی و کیفیت خاک، تغذیه گیاهی، مدیریت علف های هرز، بهره‌وری انرژی و عملکرد محصولات زراعی دیم است. مقاله با مرور مطالعات داخلی و خارجی، شواهد علمی مرتبط با عملکرد اقتصادی و زیست محیطی این نظام ها را ارائه می‌دهد و به تبیین چالش ها و فرصت های توسعه کشاورزی حفاظتی در اراضی دیم ایران می‌پردازد. یافته های این مقاله

شامل شواهد و مشاهدات میدانی از مدیریت علف‌های هرز، استفاده از ماشین‌های کشاورزی حفاظتی و محدودیت‌های اجرایی گردآوری و دسته‌بندی شدند. این رویکرد تلفیقی امکان بررسی جامع و شفاف مزایا و محدودیت نظام‌های کشاورزی حفاظتی در شرایط دیم ایران را فراهم ساخت.

در نهایت، مرور مطالعات با تمرکز بر استخراج پیامدهای عملی و مدیریتی برای کشاورزی حفاظتی انجام شد. هدف از این مرحله، ارائه اطلاعات کاربردی برای انتخاب روش‌های بهینه خاک‌ورزی، بهبود مدیریت تغذیه گیاه، کاهش فشار علف‌های هرز و افزایش بهره‌وری انرژی و منابع آب بود. به این ترتیب، مرور حاضر نه تنها تحلیل علمی بلکه توصیه‌های مدیریتی و راهکارهای اجرایی برای توسعه کشاورزی حفاظتی و پایدار در اراضی دیم ایران را ارائه می‌دهد.

یافته‌ها

مدیریت خاک‌ورزی و اثر آن بر ویژگی‌های خاک
روش‌های بی‌خاک‌ورزی می‌توانند رطوبت خاک، ماده آلی، مقاومت به نفوذ و شاخص کیفیت خاک را نسبت به خاک‌ورزی مرسوم متکی بر گاوآهن برگرداندار بهبود دهند. افزایش ماده آلی و بهبود ساختار خاک به دلیل حفظ بقایای گیاهی و کاهش دستکاری مکانیکی خاک رخ می‌دهد. انتخاب نظام مناسب خاک‌ورزی در اراضی دیم، متناسب با شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک و نوع محصول، برای بهبود پایداری تولید و حفظ منابع خاکی اهمیت دارد (جدول ۱).

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های کشاورزی در ایران، به‌ویژه در اراضی دیم، به شمار می‌آید و پیامدهای آن شامل کاهش حاصلخیزی خاک، افت تولید و تخریب منابع طبیعی است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که روش‌های کشاورزی حفاظتی، از جمله بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک، می‌توانند به شکلی مؤثر فرسایش خاک را کاهش داده و رطوبت و ماده آلی

می‌تواند به برنامه‌ریزان و کشاورزان برای انتخاب راهبردهای بهینه کشاورزی حفاظتی کمک کند و سیاست‌های حمایتی مناسب در این حوزه را تقویت نماید.

روش مرور مطالعات

برای تدوین این مقاله، از روش مرور نظام‌مند منابع داخلی و بین‌المللی استفاده شد. ابتدا گزارش‌های نهایی آزمایش‌های میدانی انجام گرفته در ایستگاه‌های تحقیقاتی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور از سال ۱۳۷۲ مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع، ۱۱۱ گزارش نهایی در مورد موضوعات مختلف کشاورزی حفاظتی استخراج شد. سپس پایگاه‌های داده علمی شامل Scopus، Web of Science، Google Scholar و SID برای مقالات منتشر شده در موضوع کشاورزی حفاظتی در اراضی دیم ایران با کلید واژه‌های کشت مستقیم، بدون خاک‌ورزی، تناوب زراعی و پوشش بقایا جستجو شدند. معیار انتخاب مقالات، تمرکز بر اثرات نظام‌های حفاظتی بر خاک، تغذیه گیاه، مدیریت علف‌های هرز، بهره‌وری انرژی و عملکرد محصولات زراعی دیم بود. در مرحله دوم، مطالعات انتخاب شده بر اساس کیفیت علمی، روش‌شناسی، پوشش زمانی و تنوع اقلیمی طبقه‌بندی شدند. مقاله‌ها و گزارش‌های علمی با تأکید بر نظام‌های بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم و همچنین اثرات تناوب زراعی بر غلات، حبوبات و دانه‌های روغنی تحلیل شدند. داده‌ها شامل شاخص‌های فیزیکی خاک (رطوبت، جرم مخصوص، نفوذپذیری)، شاخص‌های شیمیایی (کربن آلی و نیتروژن خاک)، شاخص‌های زیستی (فعالیت میکروبی) و عملکرد محصولات دیم گردآوری و در جدول‌ها و نمودارهای مقایسه‌ای خلاصه شدند. تحلیل داده‌ها به صورت کمی و کیفی انجام شد. داده‌های کمی از طریق مقایسه آماری میان روش‌های خاک‌ورزی و تناوب‌ها، میزان بهره‌وری آب و انرژی و عملکرد محصولات ارزیابی شدند. داده‌های کیفی نیز

مطالعات نشان می‌دهند که در اراضی شیب‌دار دیم، تیمار خاک‌ورزی مرسوم در مقایسه با دیگر روش‌ها، بیشترین حجم رواناب را تولید می‌کند و این روند در هر دو جهت موازی و عمود بر شیب خاک‌ورزی به طور معنی‌داری متفاوت نیست. در مقابل، کم‌خاک‌ورزی حتی در جهت شیب رواناب کمتری نسبت به خاک‌ورزی مرسوم و عمود بر شیب ایجاد می‌کند (شکل ۲). بنابراین، انجام خاک‌ورزی مرسوم در اراضی دیم شیب‌دار حتی در جهت عمود بر شیب از نظر حجم رواناب بسیار بالا بوده و می‌تواند آثار منفی بر مدیریت منابع آب و خاک داشته باشد. کمترین میزان رواناب در این مطالعات مربوط به نظام بدون خاک‌ورزی بود (Khorsandi, 2024).

علت اصلی فرسایش خاک را می‌توان به تغییرات تدریجی در ساختمان خاک و کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها نسبت داد که به مرور زمان تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند خاک‌ورزی مکرر، کاهش ماده آلی، چرای بی‌رویه توسط دام و تغییرات اقلیمی ایجاد می‌شود. این تغییرات موجب کاهش چسبندگی بین ذرات خاک، افت تخلخل مفید و در نهایت افزایش حساسیت خاک به جداشدگی و جابجایی توسط آب و باد می‌گردد (Lal, 2015; Boardman and Poesen, 2018; Bahrami et al., 2021).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران، کمبود پوشش گیاهی سبب کاهش پایداری خاک‌دانه‌ها و افزایش آسیب‌پذیری در برابر نیروهای فرساینده می‌شود، در حالی که رگبارهای شدید مستقیماً خاک‌دانه‌ها را متلاشی کرده و با ایجاد لایه سطحی سفت، نفوذپذیری خاک را کاهش می‌دهند. این عوامل در کنار هم، منجر به افزایش قابل توجه رواناب و تشدید فرسایش سطحی در این مناطق می‌گردند، پدیده‌ای که به طور مستند در پژوهش‌های مختلف مورد تأیید قرار گرفته است (Jalalian et al., 2002; Zare et al., 2023).

خاک را افزایش دهند (Hajabbasi et al., 2005; Asadi, 2021; Veisi et al., 2022).

تجربه‌های عملی در استان‌های خوزستان، گلستان و کردستان نیز نشان می‌دهد که اجرای این روش‌ها در اراضی دیم، علاوه بر کاهش فرسایش، موجب افزایش پایداری تولید و حفاظت از منابع پایه خاک می‌شود. متأسفانه خاک‌ورزی‌های مکرر در اراضی دیم کشور، ساختمان طبیعی خاک را تخریب کرده و این اراضی را به شدت مستعد فرسایش بادی کرده است. به طور میانگین، فرسایش خاک در آسیا حدود ۶ تن در سال به ازای هر هکتار برآورد می‌شود، در حالی که این رقم در ایران حدود ۱۶ تن در سال به ازای هر هکتار گزارش شده است (Mohammadi et al., 2021) و مجموع فرسایش خاک در کشور بیش از ۲/۷ میلیارد تن در سال برآورد می‌شود (Soleimani-Murchehkourti et al., 2024).

در اراضی دیم جنوب استان آذربایجان شرقی، حتی وزش بادهای ملایم نیز قادر به جابجایی خاک است؛ این وضعیت ناشی از تخریب خاک‌دانه‌ها به دلیل انجام مکرر خاک‌ورزی مرسوم است. بعنوان نمونه شواهد میدانی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، در مزارع گندم کشت‌شده در شرایط بی‌خاک‌ورزی یا کم‌خاک‌ورزی، در برابر تندبادهای اوایل بهار وضعیت پایدارتر و مقاوم‌تری از خود نشان دادند (شکل ۱).

ارزیابی‌ها نشان داده‌اند که مؤثرترین سیستم خاک‌ورزی و کاشت برای کاهش میزان روان‌آب، به ویژه در اراضی شیب‌دار که بخش عمده‌ای از اراضی دیم کشور را تشکیل می‌دهند، استفاده از سیستم بی‌خاک‌ورزی همراه با کاشت عمود بر شیب است. این روش در شیب‌های ۶ تا ۸ درصد تقریباً ۴۸ درصد و در شیب‌های ۱۰ تا ۱۲ درصد حدود ۴۲ درصد روان‌آب را کاهش می‌دهد (Mehdizadeh et al., 2013). از سوی دیگر، میزان فرسایش خاک ارتباط مستقیم با درصد ماده آلی خاک دارد؛ به گونه‌ای که افزایش یک درصد ماده آلی، فرسایش خاک را حدود ۵ درصد کاهش می‌دهد (Bahrami, 2025).

جدول ۱- اثر روش‌های کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی بر ویژگی‌های خاک در اراضی دیم ایران

Table 1. Effect of reduced tillage and no-tillage methods on soil characteristics in Iranian rainfed lands.

منابع References	تأثیر روش‌های کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی Effect of Reduced Tillage and No-Tillage Methods	ویژگی خاک Soil Property
Hajabbasi <i>et al.</i> , 2005	افزایش ۱۸ درصد در روش بی خاک‌ورزی و ۱۱ درصد در روش کم خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم 18% increase under no-tillage and 11% increase under reduced tillage compared to conventional tillage	رطوبت خاک Soil Moisture
Hajabbasi <i>et al.</i> , 2005	افزایش مقاومت به نفوذ خاک در روش بی خاک‌ورزی نسبت به روش‌های دیگر Increased soil penetration resistance under no-tillage compared to other methods	مقاومت به نفوذ Penetration Resistance
Kiani <i>et al.</i> , 2024	افزایش ماده آلی خاک در روش‌های کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم Increase in soil organic matter under minimum and no-tillage compared to conventional tillage	ماده آلی خاک Soil Organic Matter
Veisi <i>et al.</i> , 2022	افزایش شاخص کیفیت خاک در روش بی خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم Increase in soil quality index under no-tillage compared to conventional tillage	شاخص کیفیت خاک Soil Quality Index
Heidari, 2024	افزایش عملکرد گندم در روش کم خاک‌ورزی و کاهش آن در روش بی خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم Increase in wheat yield under minimum tillage and decrease under no-tillage compared to conventional tillage	عملکرد محصول Crop Yield



شکل ۱- وضعیت پوشش سطح سبز ارقام گندم نان زمستانه در مرحله پنجه‌دهی بعد از وقوع طوفان در روش‌های

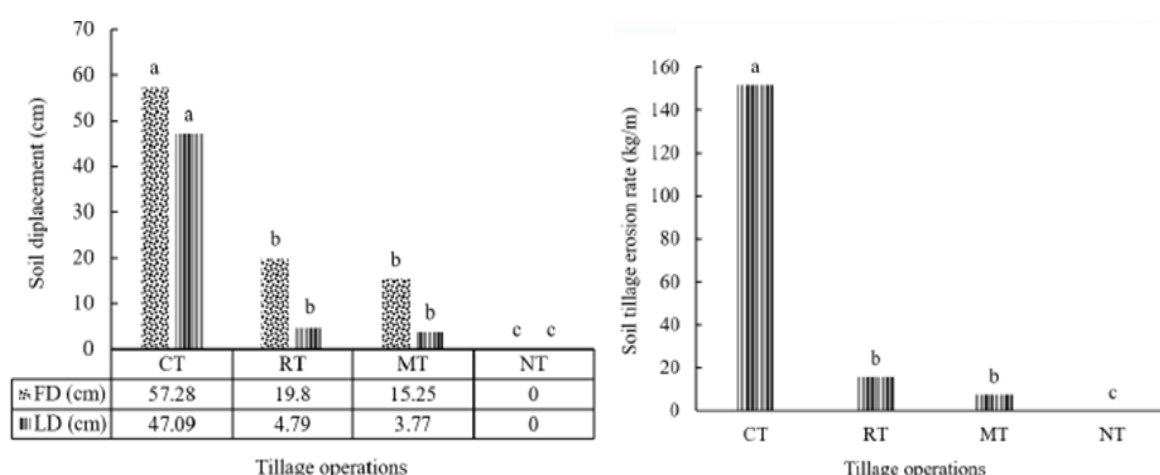
بی خاک‌ورزی (NT) و خاک‌ورزی مرسوم (CT) در تناوب نخود- گندم در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹

Figure 1. Status of the green cover level of winter bread wheat varieties at the tillering stage after a storm event in no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) methods in a chickpea-wheat rotation during the 2020-2021 crop year.

روش‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی معمولاً باعث کاهش تراکم خاک و حفظ ساختار طبیعی آن می‌شوند، در حالی که خاک‌ورزی مرسوم و خاک‌ورزی عمیق می‌تواند پایداری خاک‌دانه‌ها را کاهش داده و جرم مخصوص ظاهری را افزایش دهد. در اراضی دیم و مناطق خشک، کاهش دستکاری خاک و حفظ بقایای گیاهی روی سطح خاک، باعث افزایش تخلخل، نفوذپذیری و تهویه خاک می‌شود؛ عواملی که رشد ریشه و بهره‌وری محصول را بهبود می‌بخشند.

در مطالعه‌ای (شکل ۳) در شرایط دیم مشخص شد که میانگین جابجایی خاک در اثر خاک‌ورزی با گاوآهن برگرداندار به ترتیب ۵۷ سانتی‌متر رو به جلو و ۴۷ سانتی‌متر جانبی است. این میزان جابجایی در سیستم خاک‌ورزی کاهش یافته به ۲۰ سانتی‌متر رو به جلو و ۵ سانتی‌متر جانبی و در کم‌خاک‌ورزی به ۱۵ سانتی‌متر رو به جلو و ۴ سانتی‌متر جانبی کاهش یافت. در کشت مستقیم نیز جابجایی خاک تقریباً ناچیز بود (Eskandari, 1998).

نوع خاک‌ورزی تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک به‌ویژه جرم مخصوص ظاهری دارد.



شکل ۳- تغییرات جابجایی خاک در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی در شرایط دیم. FD و LD به ترتیب عبارتند از جابجایی رو به جلو جانبی خاک. خاک‌ورزی‌های CT، RT، MT و NT به ترتیب عبارتند از خاک‌ورزی مرسوم (گاوآهن برگرداندار+دیسک)، خاک‌ورزی کاهش یافته (خاک‌ورز مرکب)، کم‌خاک‌ورزی (گاوآهن قلمی) و کشت مستقیم (بدون عملیات خاک‌ورزی و کاشت در داخل بقایای گیاهی).

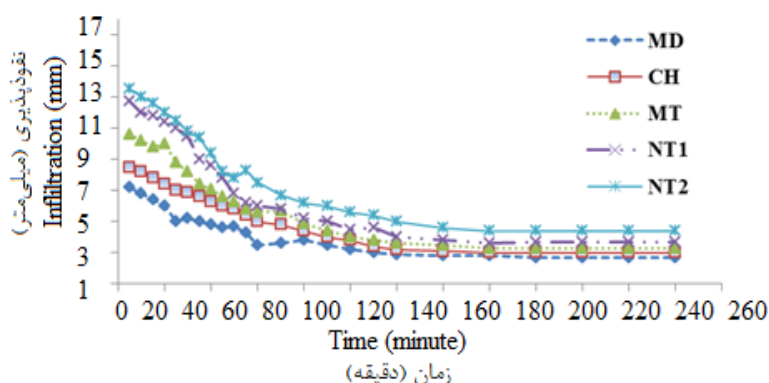
Figure 3. Soil displacement variations under different tillage practices in dryland conditions. FD and LD represent forward soil displacement and lateral soil displacement, respectively. The tillage treatments CT, RT, MT, and NT refer to conventional tillage (moldboard plow + disk harrow), reduced tillage (combination tiller), minimum tillage (chisel plow), and no-till (direct drilling without tillage operations, performed on standing crop residues), respectively.

بقایا و پوشش گیاهی روی سطح خاک نقش مهمی در کاهش تبخیر سطحی و حفظ رطوبت خاک دارند. مطالعات نشان می‌دهند که حفظ بقایای گیاهی می‌تواند میزان تبخیر را تقریباً ۳۴ تا ۵۰ درصد کاهش دهد، به‌ویژه در اراضی دیم و مناطق خشک که مدیریت رطوبت خاک اهمیت حیاتی دارد (Sauer et al., 1996; Klocke et al., 2009;)

گزارش شده است که بی‌خاک‌ورزی می‌تواند جرم مخصوص ظاهری خاک را تا ۱۰-۵ درصد نسبت به خاک‌ورزی مرسوم کاهش دهد و در نتیجه، فرسایش را کاهش داده و ذخیره آب خاک را افزایش دهد (Havlin et al., 2014; Bahrami et al., 2021;) (Veisi et al., 2022).

سرعت نفوذ آب در بی خاک‌ورزی ۲۰-۳۰ درصد نسبت به خاک‌ورزی مرسوم افزایش یافته است (Bahrami et al., 2021; Veisi et al., 2022). افزایش نفوذپذیری علاوه بر کاهش روان آب سطحی، به حفظ رطوبت خاک، کاهش فرسایش و بهبود شرایط رشد ریشه کمک می‌کند. با این حال، بسیاری از کشاورزان به اشتباه تصور می‌کنند که انجام عملیات خاک‌ورزی مرسوم باعث افزایش سرعت نفوذ و ذخیره آب در خاک می‌شود. میزان نفوذپذیری آب در خاک در تیمار بی‌خاک‌ورزی (شکل ۴) حدود ۱/۵۸ برابر بیشتر از تیمار خاک‌ورزی مرسوم بود (Eskandari, 2017). افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در زیر لایه شخم با گاواهن برگرداندار (حدود ۲۵ سانتی‌متر) علت کاهش نفوذپذیری در سیستم خاک‌ورزی مرسوم است (Osunbitan, 2005).

(Derpsch et al., 2024). این کاهش تبخیر ناشی از جلوگیری از برخورد مستقیم پرتو خورشید به خاک، کاهش دمای سطح خاک و کاهش تأثیر باد است. به این ترتیب، بقایای گیاهی نه تنها به حفظ رطوبت کمک می‌کنند، بلکه با کاهش فرسایش سطحی و بهبود ساختار خاک، به افزایش پایداری تولید در نظام‌های کشاورزی حفاظتی نیز منجر می‌شوند. در ارزیابی جرم مخصوص ظاهری خاک و رطوبت وزنی خاک در مرحله گلدهی گندم دیم، در نظام بی‌خاک‌ورزی همراه با حفظ کامل بقایا، کمترین میزان جرم مخصوص ظاهری (۵/۶ درصد) و بیشترین درصد رطوبت وزنی خاک (۱۷ درصد) نسبت به خاک‌ورزی مرسوم ثبت شد (Eskandari, 2017). نظام‌های بی‌خاک‌ورزی تأثیر قابل توجهی بر نفوذ آب در خاک دارند. به عنوان نمونه، در اراضی دیم ایران،

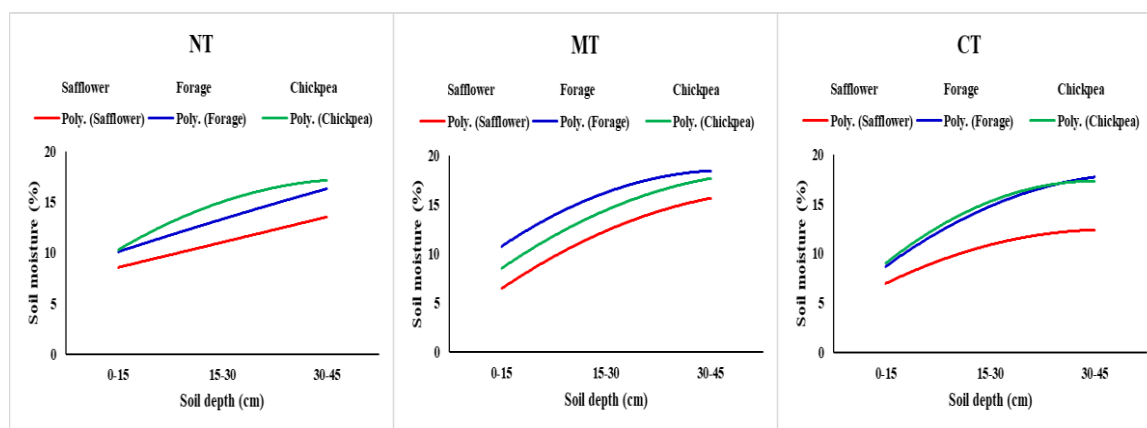


شکل ۴- نفوذپذیری آب در خاک تحت تیمارهای خاک‌ورزی در شرایط دیم. NT1، NT2، MT، CH، MD به ترتیب عبارتند از عملیات بدون خاک‌ورزی با حفظ کل بقایا، بدون خاک‌ورزی با حفظ بقایای ایستاده (جمع‌آوری بقایای ریزش یافته از کمباین)، خاک‌ورزی کاهش یافته (خاک‌ورز مرکب)، کم خاک‌ورزی (گاواهن قلمی) و خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + دیسک).

Figure 4. Water infiltration in soil under different tillage practices under dryland conditions. NT1, NT2, MT, CH, and MD represent no-till with full residue retention, no-till with standing residue retention (with removal of loose crop residues left by the combine harvester), reduced tillage (combination tiller), minimum tillage (chisel plow), and conventional tillage (moldboard plow + disk harrow), respectively.

مشخص شد که کمترین درصد رطوبت وزنی خاک در هر سه نظام خاک‌ورزی به تناوب گلرنگ-گندم مربوط می‌شود. این امر احتمالاً به دوره رشد طولانی گلرنگ، سیستم ریشه عمیق آن و تخلیه بیشتر رطوبت از خاک برمی‌گردد (Lotfi, 2025).

در مطالعه‌ای، اثر تیمارهای مختلف خاک‌ورزی (بدون خاک‌ورزی، کم خاورزی و خاک‌ورزی مرسوم) و تناوب زراعی (گلرنگ-گندم، نخود-گندم و نخود علوفه‌ای-گندم) بر رطوبت وزنی خاک تا عمق ۴۵ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵) و



شکل ۵- تغییرات رطوبت عمق‌های مختلف خاک بعد از برداشت محصولات مختلف تناوبی شامل گلرنگ، علوفه و نخود در نظام‌های مختلف خاک‌ورزی در اقلیم سردسیر دیم، CT، MT و NT به ترتیب شامل خاک‌ورزی مرسوم (گاواهن برگرداندار + دیسک)، کم خاک‌ورزی (خاک‌ورز مرکب) و بدون خاک‌ورزی (کشت مستقیم).

Figure 5. Variations in soil moisture at different depths after harvesting different rotational crops: safflower, forage, and chickpea under various tillage systems in a cold dryland climate. CT, MT, and NT refer to conventional tillage (moldboard plow + disk harrow), minimum tillage (combination tiller), and no-till (direct seeding), respectively.

تجزیه شده و ماده آلی کمی به خاک افزوده می‌شود؛ بنابراین، مقادیر کربن آلی غالباً کمتر از ۰/۵ درصد است (Mesgaran *et al.*, 2017). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که نظام‌های بدون خاک‌ورزی (کشت مستقیم) به‌طور معنی‌داری میزان کربن آلی خاک را نسبت به نظام‌های کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم به‌ویژه در لایه‌های سطحی خاک (۱۰-۰ سانتی‌متر) افزایش می‌دهند، در حالی که با افزایش عمق خاک، تفاوت بین نظام‌های خاک‌ورزی کاهش می‌یابد (Six *et al.*, 2002; Al-Kaisi *et al.*, 2005). این افزایش عمدتاً ناشی از تجمع بقایای گیاهی و مواد آلی در سطح خاک و کاهش اختلاط عمقی آن است که منجر به ترسیب بیشتر کربن در لایه‌های سطحی می‌شود (Franzluebbers, 2010).

در نظام‌های کشاورزی حفاظتی که کمترین مقدار عملیات خاک‌ورزی انجام می‌شود، چرخه کربن خاک متعادل‌تر بوده و ورودی بقایای گیاهی بیشتر از میزان تجزیه آن‌ها است؛ بنابراین، تجمع کربن آلی در لایه سطحی خاک سریع‌تر رخ می‌دهد (Haddaway *et al.*, 2017). به‌طور میانگین، در نظام‌های زراعی بلندمدت با مدیریت حفاظتی، میزان کربن آلی خاک طی حدود ۳۰ سال به‌طور سالانه حدود ۰/۳۳ مگاگرم

مدیریت بقایای گیاهی و ترسیب کربن

کمبود کربن آلی خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده کشاورزی در ایران شناخته می‌شود (Mesgaran *et al.*, 2017; Asadi *et al.*, 2025). کربن آلی خاک، شاخصی کلیدی برای سلامت و حاصلخیزی خاک است و نقش اساسی در پایداری کشاورزی ایفا می‌کند. در خاک‌های کشاورزی ایران به‌ویژه در اراضی دیم، میزان کربن آلی بسیار پایین است (زیر ۱ درصد) که این امر موجب کاهش حاصلخیزی، تضعیف ساختار خاک و افزایش حساسیت آن به فرسایش می‌شود (Azimzadeh, 2023). توزیع و تغییرات مکانی کربن آلی خاک تابعی از عوامل متعدد طبیعی و مدیریتی است. از جمله عوامل طبیعی مؤثر می‌توان به اقلیم (به‌ویژه رژیم بارش و دما)، ویژگی‌های خاک (مانند بافت)، توپوگرافی (شیب و ارتفاع) اشاره کرد. همچنین، روش‌های مدیریت زمین از جمله نوع خاک‌ورزی، الگوی تناوب زراعی و مدیریت پوشش گیاهی، تأثیر مستقیمی بر تغییرپذیری مکانی این پارامتر حیاتی خاک دارند (Jafari *et al.*, 2018). در مناطق دیم عمدتاً معتدل تا گرمسیر، به دلیل بارش محدود و تبخیر زیاد، بقایای گیاهی به سرعت

پایبتری در تولید ماده خشک دارند، یکی از عوامل اصلی برداشت بیش از حد بقایای محصول محسوب می‌شود (Jalalian *et al.*, 2018; Rezaverdinejad *et al.*, 2021). برداشت بیش از حد بقایای گیاهی، چالشی جدی برای اجرای کشاورزی حفاظتی ایجاد کرده است؛ چرا که یکی از اصول این نظام پوشش حداقل ۳۰ درصدی سطح خاک با بقایای محصول به منظور کاهش فرسایش، حفظ رطوبت و افزایش ماده آلی است (FAO, 2011; Derpsch *et al.*, 2024). در شرایط کنونی، برداشت کامل بقایا در اراضی دیم ایران دستیابی به این هدف را با محدودیت‌های اقتصادی، اجتماعی و فنی مواجه ساخته است.

تناوب زراعی و نقش آن در پایداری سیستم

تناوب زراعی یکی از قدیمی‌ترین و در عین حال بنیادی‌ترین ارکان کشاورزی پایدار و حفاظتی به شمار می‌آید. اثرات مثبت رعایت تناوب زراعی شامل بهبود عملکرد محصولات، استفاده بهینه از منابع محیطی، تقویت تعاملات و مکمل‌بودن بین جنبه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و ارتقای بهره‌وری نهاده‌های تولید است. در واقع، انتخاب تناوب مناسب با تلفیق اصول پایداری محیط، اقتصاد و تولید بهینه در درازمدت، زمینه‌ساز تضمین تولید پایدار می‌شود. در مطالعه‌ای روی خلاء عملکرد گندم دیم در جنوب استان آذربایجان شرقی مشخص شد که تناوب‌های رایج دیمکاران غالباً به ترتیب آیش-گندم، نخود-گندم، گندم-گندم، علوفه-گندم و سایر محصولات هستند. در این مطالعه، بیشترین عملکرد دانه گندم در تناوب آیش-گندم مشاهده گزارش شد (شکل ۶)، با این حال دامنه عملکرد در این تناوب گسترده بوده که اهمیت مدیریت سال آیش را در اراضی دیم برای ذخیره رطوبت و استفاده در سال بعد برجسته می‌کند (Mohamadzadeh *et al.*, 2025). با این وجود، این نوع سیستم تناوبی به دلیل نکاشت و استراحت زمین طی یک سال زراعی از نظر اقتصادی چندان مقرون به صرفه نیست (Jafari *et al.*, 2024). از سوی دیگر،

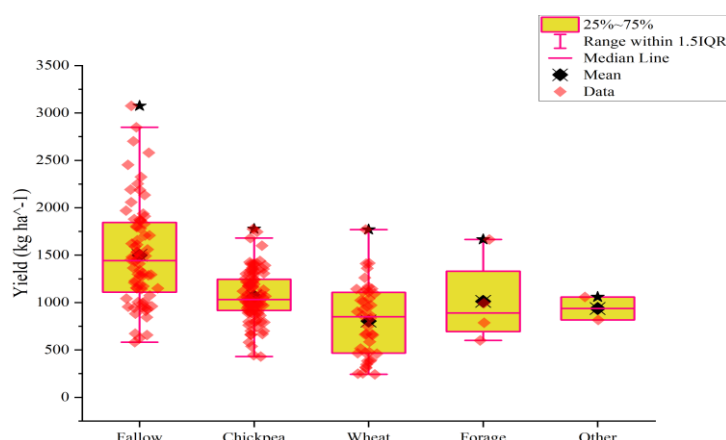
(۳۳۰ کیلوگرم) در هکتار افزایش یافته است (West and Post, 2002; Powlson *et al.*, 2014). مطالعات فراتحلیلی نشان داده‌اند که تأثیر نظام‌های حفاظتی بر ترسیب کربن خاک بسته به اقلیم، بافت خاک و الگوی تناوب زراعی متفاوت است، اما در اغلب موارد، منجر به افزایش معنی‌دار ذخیره کربن آلی نسبت به نظام‌های خاک‌ورزی مرسوم می‌شود (Lal, 2015; Kopittke *et al.*, 2022). از این رو، استمرار در به‌کارگیری کشاورزی حفاظتی می‌تواند در سطح جهانی نقش مؤثری در افزایش کربن آلی خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا کند.

در شرایط دیم، اجرای تناوب گندم-نخود همراه با حفظ بقایای گیاهی نسبت به تناوب‌های ساده یا بدون بقایا، تا ۲۵ درصد افزایش عملکرد دانه را به دنبال داشته است (Ghahramani *et al.*, 2020). در مقابل، در تناوب‌های گندم-گندم، افزایش بقایای گندم نه تنها اثر مثبتی بر عملکرد ندارد، بلکه در بسیاری از موارد باعث کاهش عملکرد محصول سال بعد شده است (Kirkegaard *et al.*, 2008; Peltzer *et al.*, 2009). این یافته در مطالعه مشابهی روی عملکرد گندم دیم در دو الگوی تناوبی علوفه-گندم و گندم-گندم نیز تأیید شد؛ به‌طوری که با حفظ بیش از ۲ تن بقایای گیاهی گندم در هکتار، عملکرد ارقام مختلف گندم کاهش یافت (Lotfi *et al.*, 2024). نسبت بالای کربن به نیتروژن در بقایای گندم، اثرات آللوپاتیک ترکیبات فنولی و اسیدهای آلی حاصل از تجزیه بقایا و مشکلات فنی ناشی از حجم زیاد بقایا در سطح خاک، از عوامل کاهش عملکرد در تناوب گندم-گندم هستند (Bhowmik and Inderjit, 2003; Walters and Moorman, 2011; Lotfi *et al.*, 2024).

تلفیق دام با زراعت در اراضی دیم و کمبود خوراک دام در کشور موجب شده است که بقایای گیاهی پس از برداشت به‌طور گسترده به‌عنوان منبع تغذیه دام استفاده شود. این موضوع، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که از نظر شرایط اکولوژیکی پتانسیل

بنابراین، انتظار می‌رود که با توسعه کشت پاییزه حبوبات و علوفه دیم، اثرات مثبت تناوب این محصولات بر عملکرد غلات بیشتر و ملموس‌تر شود.

نخود و علوفه کشت‌شده توسط دیمکاران آن منطقه عمدتاً به صورت بهاره هستند و مدیریت زراعی آن‌ها غالباً از جنبه فنی به شکل کامل انجام نمی‌شود.



شکل ۶- ارزیابی تناوب‌های رایج و ارتباط آن با عملکرد دانه گندم دیم در استان آذربایجان شرقی
Figure 6. Evaluation of common crop rotations and their relationship with dryland wheat grain yield in East Azerbaijan province.

سطحی را کاهش می‌دهند. در اراضی دیم که بارندگی محدود و نامنظم است، استفاده از تناوب‌های مناسب به جای کشت مداوم یک محصول می‌تواند سطح خاک را محافظت کرده و روان‌آب و فرسایش را کاهش دهد (USDA NRCS, 2023). در این راستا، نتایج تحقیقی در دیمزارهای اقلیم سردسیر ایران نشان داد که بیشترین فرسایش خاک در تناوب‌های گندم-گندم و کشت متوالی گندم-آیش-گندم رخ داده و کمترین آن در تناوب نخود-گندم بوده است که با میزان جرم مخصوص ظاهری خاک نیز همخوانی داشت (Eskandari, 1988).

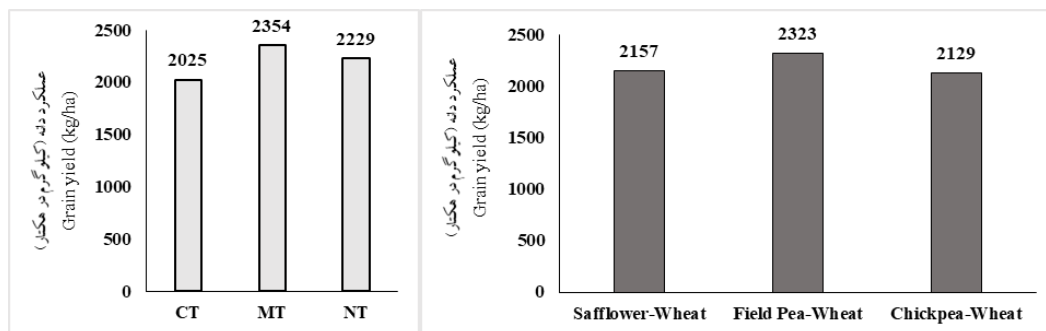
در مطالعه‌ای چهارساله در مراغه، بهره‌وری بارش و عملکرد دانه در مدیریت‌های مختلف زراعی شامل تناوب و خاک‌ورزی بررسی شد و نتایج نشان داد که میزان بهره‌وری بارش و عملکرد دانه در سال آخر آزمایش در کشت مستقیم و تناوب نخود-گندم نسبت به تناوب‌های علوفه-گندم و گلرنگ-گندم برتر بود (Lotfi and Pessarkli, 2023). همچنین، ارزیابی اثر فاکتور محصولات تناوبی در نظام‌های مختلف خاک‌ورزی بعد از هفت سال در اقلیم سردسیر مراغه نشان داد (شکل ۷) که عملکرد دانه

بررسی کشاورزی حفاظتی در اقلیم نیمه‌گرمسیر به مدت پنج سال نشان داد که بیشترین عملکرد گندم و جو در تناوب با کلزا حاصل می‌شود، به‌طوری که عملکرد گندم ۴۲ درصد و جو ۶۸ درصد نسبت به کشت متوالی این دو محصول افزایش یافت (Heidarpour, 2024). مطالعه دیگر نشان داد که تنوع در تناوب‌های زراعی می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در عملکرد و پایداری تولید ایجاد کند (Liu et al., 2023). به‌ویژه، استفاده از تناوب‌های حبوبات مانند نخود و عدس به‌عنوان محصولات پیش‌کشت، به‌طور متوسط موجب افزایش ۲۶ تا ۵۲ درصدی عملکرد گندم شده است (Liu et al., 2023). مطالعه‌ای در چین نشان داد که تناوب‌های دو ساله متنوع باعث کاهش تلفات نیتروژن و بهبود عملکرد گندم می‌شود که اهمیت تنوع در تناوب‌های زراعی برای بهبود کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری محصول را برجسته می‌کند (Yang et al., 2024).

تناوب‌های زراعی شامل گیاهان پوششی یا حبوبات، سطح خاک را در طول سال پوشش می‌دهند و با کاهش شدت برخورد باران به خاک، کاهش حجم روان‌آب سطحی و افزایش نفوذپذیری خاک، فرسایش

فاکتور نظام‌های مختلف خاک‌ورزی نیز نشان داد که تیمار کشت مستقیم با عملکرد دانه ۲۲۲۹ کیلوگرم در هکتار نسبت به خاک‌ورزی مرسوم حدود ۱۰ درصد عملکرد بالاتر دارد (Lotfi, 2025).

گندم در تناوب‌های گلرنگ-گندم، نخود-گندم و علوفه-گندم به ترتیب ۲۱۵۷، ۲۱۲۹ و ۲۳۲۳ کیلوگرم در هکتار بود. اگرچه اختلاف زیادی بین تیمارهای مختلف تناوب وجود نداشت ولی بیشترین عملکرد دانه از تناوب علوفه-گندم به دست آمد. اثر



شکل ۷- عملکرد گندم در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی و تناوب در نظام کشاورزی حفاظتی و مرسوم در سال هفتم تحت شرایط اقلیم سردسیر مراغه. CT، MT و NT به ترتیب شامل خاک‌ورزی مرسوم (گاوآهن برگرداندار + دیسک)، کم خاک‌ورزی (خاک‌ورز مرکب) و بدون خاک‌ورزی (کشت مستقیم).

Figure 7. Wheat yield under different tillage and crop rotation treatments in conservation and conventional farming systems during the seventh year under cold-climate conditions of Maragheh. CT, MT, and NT denote conventional tillage (moldboard plow + disk harrow), minimum tillage (combination tiller), and no-till (direct seeding), respectively.

تولید خود را حفظ کرده‌اند. اثر متقابل رقم در نظام خاک‌ورزی در سال‌های با شرایط نرمال غیرمعنی‌دار بود. تناوب زراعی گندم-نخود، به شرط کنترل مؤثر علف‌های هرز، به‌عنوان یک تناوب مناسب برای مناطق دیم سرد و خشک شناخته می‌شود. اختلاف عملکرد بین نظام بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم در سال شروع آزمایش (۱۳۹۶-۱۳۹۷) در تناوب گندم-گندم حداکثر و برابر با ۷۵۹ کیلوگرم در هکتار بود، در حالی که در سال آخر آزمایش (۱۳۹۹-۱۴۰۰) در تناوب نخود-گندم تفاوت عملکرد بین نظام بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم ۳۷ کیلوگرم بود. این اختلاف اولیه عمدتاً به دلیل تراکم بالای علف‌های هرز مانند بروموس و چمن پیازی در نظام بی‌خاک‌ورزی بود که به شکل کپه‌ای و با اثرات آللوپاتیک موجب کاهش سبزی و تعداد بوته گندم در واحد سطح شد. با اجرای راهبرد کنترل علف‌های هرز در سیستم بی‌خاک‌ورزی، شامل استفاده از علف‌کش‌های غیرانتخابی «رانداپ» در سال آیش،

در مطالعه‌ای بر نظام‌های مختلف تناوب و آیش در سیستم کشاورزی حفاظتی در اراضی دیم کردستان گزارش شد که با گذشت زمان از اجرای کشاورزی حفاظتی، کمترین عملکرد دانه مربوط به تناوب آیش-گندم در سیستم بی‌خاک‌ورزی است (Rohi, 2021). از سوی دیگر، گزارش شده است که در دوره آیش، خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بی‌خاک‌ورزی اثر بیشتری بر بهبود عملکرد گندم دیم دارد که این امر عمدتاً ناشی از بهبود ساختار خاک و افزایش نفوذپذیری آب در خاک است (Feng et al., 2021). لذا تناوب آیش-گندم به‌عنوان تناوب زراعی مناسب برای نظام کشاورزی حفاظتی نمی‌تواند باشد.

انتخاب ژنوتیپ‌های سازگار با نظام‌های حفاظتی

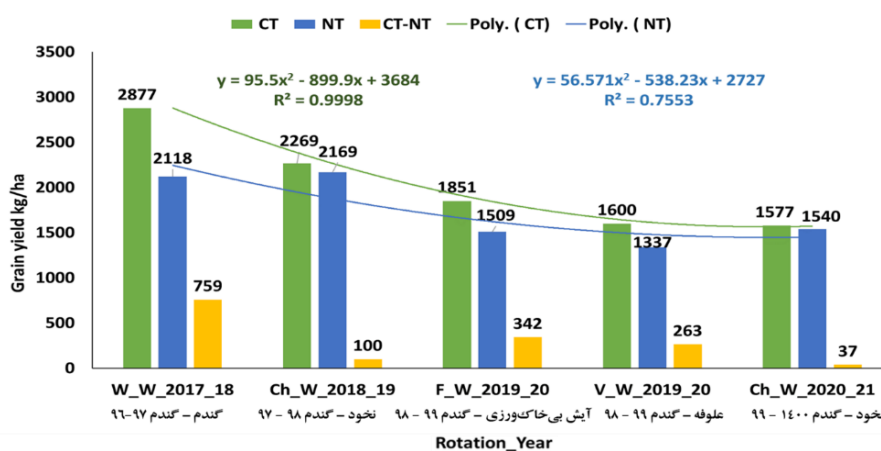
با بررسی اثرات متقابل ارقام گندم نان زمستانه دیم در نظام‌های کشاورزی حفاظتی و مرسوم گزارش شده است (شکل ۸) که ارقام و لاین‌های گندم معرفی شده که در نظام خاک‌ورزی مرسوم پتانسیل تولید بالایی دارند، در سیستم بی‌خاک‌ورزی نیز توانایی

غلات، کاهش عملکرد گندم در نظام بی خاک‌ورزی کمترین میزان را دارد (۶/۲ درصد) و با رعایت اصول کشاورزی حفاظتی، این اختلاف طی ۳ تا ۱۰ سال به حداقل می‌رسد.

گزارش شده است که در ابتدای شروع کشاورزی حفاظتی کاهش عملکرد گندم در نظام بی خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم ۲۶/۴ درصد بود، اما پس از چهار سال با حفظ بقایا، رعایت تناوب زراعی و کنترل علف‌های هرز، این اختلاف در به ۲/۴ درصد کاهش یافت (Jafarzadeh, 2023). همچنین، ارزیابی شش رقم گندم نان و دو رقم گندم دوروم در نظام‌های بی خاک‌ورزی و مرسوم در سرارود کرمانشاه نشان داد که کاهش معنی‌دار عملکرد (۳۵ درصد) در سال اول در سال دوم به ۹ درصد و در سال سوم به ۴ درصد کاهش یافت (Mohammadi et al., 2021).

«گالانت سوپر» در نخود و «برومایسید ام‌آ» در گندم، جمعیت و تراکم علف‌های هرز کاهش یافت و در نتیجه اختلاف عملکرد بین نظام خاک‌ورزی مرسوم و حفاظتی کاهش یافت (Jafarzadeh, 2023).

مطالعات فراتحلیلی جهانی نیز نشان داده‌اند که نظام بی خاک‌ورزی همراه با تناوب زراعی، در مقایسه با نظام خاک‌ورزی مرسوم، موجب افزایش بهره‌وری محصولات در اراضی دیم می‌شود و کشاورزی حفاظتی می‌تواند یک راهبرد مؤثر برای مدیریت محصول و کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم در محیط‌های مستعد خشکسالی باشد (Pittelkow et al., 2015). با این حال، جمع‌بندی ۶۷۸ مطالعه در ۵۰ محصول و ۶۳ کشور نشان داد که استفاده از نظام بی خاک‌ورزی به تنهایی می‌تواند کاهش ۱/۵ درصدی عملکرد ایجاد کند، اما حفظ بقایای محصول و رعایت تناوب مناسب در نظام بی خاک‌ورزی، این کاهش را به حداقل می‌رساند. این تحلیل نشان داد که در میان



شکل ۸- میانگین عملکرد ارقام گندم نان زمستانه دیم در نظام خاک‌ورزی مرسوم (CT) و بی خاک‌ورزی (NT) در تناوب‌های زراعی گندم-گندم (w-w)، نخود-گندم (ch-w)، آیش-گندم (f-w)، علوفه-گندم (v-w) در مراغه.

Figure 8. Mean of grain yield of winter bread dryland wheat genotypes under conventional tillage (CT) and no-tillage (NT) in wheta-wheat (w-w), chickpea-wheat (ch-w), fallow-wheat (f-w), vetch-wheat (v-w) rotations in Maragheh.

کشاورزی حفاظتی، اثرات آن بر فعالیت زیستی و تنوع ریزجانداران خاک است. مطالعات بلندمدت در مناطق مختلف جهان نشان داده‌اند که حذف عملیات خاک‌ورزی و حفظ بقایای گیاهی موجب افزایش زیست‌توده میکروبی و ارتقای سلامت زیستی خاک

حاصلخیزی خاک و پویایی عناصر غذایی

فعالیت‌های زیستی خاک شامل فعالیت ریزجانداران، تنفس میکروبی، تجزیه بقایای گیاهی و چرخه عناصر غذایی، نقش کلیدی در افزایش حاصلخیزی خاک و عملکرد محصولات دیم دارند. یکی از جنبه‌های مهم

که در تولید گندم دیم و در نظام کم‌خاک‌ورزی، مصرف اوره به طور متوسط ۱۰ کیلوگرم در هکتار و در نظام بی‌خاک‌ورزی ۲۰ کیلوگرم در هکتار بیشتر از نظام خاک‌ورزی مرسوم باشد تا تعادل کربن و نیتروژن خاک حفظ و بهره‌وری کود بهبود یابد و از اتلاف نیتروژن جلوگیری شود (Jafarzadeh et al., 2025). در تعیین نیاز غذایی علوفه دیم در تناوب با گندم نیز مشخص شده است که نیاز نیتروژنی علوفه دیم (ماشک علوفه‌ای) در شرایط حفظ کامل بقایای گیاهی گندم به ۷۵ کیلوگرم اوره در هکتار می‌رسد، حال آنکه در سیستم مرسوم برای تولید علوفه دیم، کاربرد ۴۰ کیلوگرم اوره در هکتار توصیه شده است (Lotfi, 2025). گزارش‌ها نشان می‌دهند که در کوتاه‌مدت، کشاورزی حفاظتی ممکن است به دلیل تثبیت نیتروژن در بقایا، نیاز به مصرف نیتروژن بیشتری داشته باشد، اما در بلندمدت، کارایی مصرف نیتروژن بهبود می‌یابد (Devkota et al., 2022).

مدیریت تلفیقی علف‌های هرز

مدیریت علف‌های هرز یکی از پیچیده‌ترین و حیاتی‌ترین چالش‌ها در توسعه کشاورزی حفاظتی به شمار می‌رود. کاهش یا حذف خاک‌ورزی که از اصول کلیدی این نظام‌ها است، موجب باقی‌ماندن بذر علف‌های هرز در سطح یا نزدیکی سطح خاک می‌شود و فشار و تراکم علف‌های هرز را افزایش می‌دهد (Liebman and Dyck, 1993). این چالش به‌ویژه در تولید محصولات ردیفی مانند حبوبات (نخود، عدس) و دانه‌های روغنی (کلزا، گلرنگ، بالنگوی شهری و کاملینا) برجسته است، زیرا این محصولات نسبت به علف‌های هرز قدرت رقابت کمتری دارند و فاصله بین ردیف‌ها، نور و فضا را برای رشد علف‌های هرز فراهم می‌کنند.

برخی از گونه‌های چندساله با ریشه‌های عمیق در شرایط بی‌خاک‌ورزی توانایی بازگشت و تداوم بیشتری دارند و کنترل آن‌ها نیازمند ترکیبی از روش‌های مکانیکی، شیمیایی و مدیریتی است

می‌شود (Six et al., 2006; Franzluebbers, 2010; Derpsch et al., 2024).

در یک مطالعه ۱۷ ساله در استرالیا، کربن زیست‌توده میکروبی خاک در سیستم کشاورزی حفاظتی از ۲۱۵ به ۵۳۸ میکروگرم بر گرم افزایش یافت که بیانگر رشد قابل‌توجه فعالیت زیستی خاک در مقایسه با سیستم مرسوم بود (Hoyle et al., 2011). نتایج پژوهش انجام‌شده در اراضی دیم سرد مراغه نیز این روند را تأیید می‌کند؛ به‌طوری‌که میزان تنفس میکروبی در تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی با حفظ بقایا به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و مرسوم گزارش شد (Shahbazi et al., 2019). در این نظام‌ها، تجمع بقایا و افزایش تدریجی ماده آلی خاک، منجر به افزایش منبع کربن قابل‌دسترس برای ریزجانداران و در نتیجه ارتقای فعالیت و تنفس میکروبی می‌شود (Lal, 2015). این یافته‌ها نشان می‌دهند که توسعه کشاورزی حفاظتی علاوه بر حفظ منابع خاک، نقش مؤثری در بهبود پویایی زیستی و پایداری بوم‌سازگان زراعی دارد.

مطالعات مقایسه‌ای نیز نشان داده‌اند که نظام‌های کشاورزی حفاظتی می‌توانند تغذیه گیاهی و دسترسی ریشه به عناصر غذایی را نسبت به نظام‌های مرسوم بهبود دهند (Lal, 2015). افزایش تجمع مواد آلی و فعالیت میکروبی در این نظام‌ها موجب آزادسازی تدریجی نیتروژن، فسفر و سایر عناصر غذایی شده و دسترسی ریشه به مواد غذایی را ارتقا می‌دهد (Hoyle et al., 2011). تناوب غلات با لگوم‌ها در سیستم کشاورزی حفاظتی، علاوه بر بهبود حاصلخیزی خاک، بخشی از نیاز غذایی غلات را کاهش می‌دهد؛ به‌طور مثال، نیاز نیتروژنی گندم در تناوب با نخود و علوفه به ترتیب حدود ۱۵ و ۲۵ کیلوگرم اوره در هکتار کاهش می‌یابد (Khorsandi, 2019).

با توجه به غالبیت نظام کشت غلات محور در اراضی دیم، گندم اغلب در سیستم آیش یا تناوب گندم-گندم کشت می‌شود. بر این اساس، توصیه شده است

بذری آن‌ها را کاهش دهد (Liebman and Dyck, 1993; Fried *et al.*, 2008). در شرایط دیم مراغه نیز بررسی جمعیت علف‌های هرز در تناوب‌های مختلف نشان داد کمترین تنوع علف‌های هرز در تناوب نخود-گندم و بیشترین آن در تناوب گندم-گندم است (Pourheidar, 2022).

مدیریت شیمیایی در غلات با استفاده از علف‌کش‌های انتخابی مناسب، نظیر کنترل علف‌های باریک‌برگ و پهن‌برگ، به خوبی انجام می‌شود. در مقابل، مدیریت علف‌های هرز در محصولات تناوبی مانند حبوبات و دانه‌های روغنی با محدودیت‌ها و هزینه‌های بالای علف‌کش‌های انتخابی مواجه است. یکی از مؤثرترین روش‌های کنترل علف‌های هرز در کشاورزی حفاظتی، مدیریت فاصله خطوط کاشت و استفاده از ادوات مناسب است (شکل ۹). استفاده از ردیف‌کارها یا ادواتی که فاصله حداقل ۵۰ سانتی‌متری بین ردیف‌ها ایجاد کنند، عملیات بین‌ردیفی مؤثر را ممکن می‌سازد. به‌عنوان مثال، آرایش کاشت ۱۷×۵۳ سانتی‌متر (دو ردیف نخود با فاصله ۱۷ سانتی‌متر و فاصله ۵۳ سانتی‌متر نکاشت بین آن‌ها) به‌عنوان روش موفق در مدیریت علف‌های هرز بین ردیف در تولید نخود دیم در اراضی سردسیر توصیه شده است (Ghahramanian, 2018).

(O'Donovan *et al.*, 2001). محدودیت استفاده از علف‌کش‌ها در محصولات مانند حبوبات و دانه‌های روغنی و تعداد محدود علف‌کش‌های اختصاصی، به همراه تأثیر بقایای گیاهی بر شرایط رطوبتی و میکروکلیمایی، این چالش را پیچیده‌تر می‌کند. برای مقابله با این مشکلات، اجرای راهبردهای یکپارچه مدیریت علف‌های هرز ضروری است. این راهبردها شامل استفاده از تناوب‌های زراعی متنوع، زمان‌بندی دقیق کاشت و مدیریت بقایا و کاربرد محدود و هدفمند کنترل شیمیایی است (Fried *et al.*, 2008). به‌عنوان مثال، مدیریت علف‌های پهن‌برگ در مزارع غلات می‌تواند فشار علف‌های هرز را در حبوبات کاشته شده در تناوب کاهش دهد و عملکرد محصولات ردیفی را بهبود بخشد.

عدم مدیریت مؤثر علف‌های هرز می‌تواند اثرات منفی قابل‌توجهی بر عملکرد اقتصادی و نهایی محصولات دیم داشته باشد و حتی کل سیستم کشاورزی حفاظتی را تحت‌تأثیر قرار دهد (Liebman and Dyck, 1993; O'Donovan *et al.*, 2001). فشار بیش از حد علف‌های هرز باعث کاهش رشد گیاهان زراعی، افت عملکرد و افزایش هزینه‌های کنترل می‌شود که پذیرش این نظام‌ها را برای کشاورزان دشوار می‌کند. با این حال، اجرای تناوب حتی در میان‌مدت می‌تواند تراکم و تنوع علف‌های هرز و بانک



شکل ۹- مدیریت شیمیایی علف‌های بین ردیف در نخود دیم در نظام کشاورزی حفاظتی.

Figure 9. Chemical management of inter-row weeds in dryland chickpea under conservation agriculture systems.

اسفند ماه مورد تأیید قرار گرفت. این یافته‌ها اهمیت استفاده دقیق و زمان‌بندی شده از علف‌کش‌ها در مدیریت مؤثر علف‌های هرز در نخود دیم، به‌ویژه در نظام‌های خاک‌ورزی حفاظتی را برجسته می‌سازد (Pourheidar, 2025).

مکانیزاسیون و ادوات کشاورزی حفاظتی

ماشین‌های کشاورزی، به‌ویژه خاک‌ورزها و کارنده‌ها، نقش کلیدی و حیاتی در اجرای مؤثر نظام‌های کشاورزی حفاظتی ایفا می‌کنند. این تجهیزات با کاهش تخریب خاک، حفظ بقایای گیاهی و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت، به بهبود ساختار خاک و افزایش عملکرد محصولات کمک می‌کنند (Franzluebbers, 2010).

اهمیت انتخاب ماشین‌های مناسب در اراضی دیم، جایی که حفظ رطوبت و کاهش تبخیر از بستر بذر عوامل تعیین‌کننده در موفقیت کاشت هستند، به‌مراتب بیشتر است. شیاربازکن‌ها به عنوان ابزارهای کلیدی کشاورزی حفاظتی شناخته می‌شوند. انواع شیاربازکن‌ها، از جمله شیاربازکن تی وارون، با حفظ بیشترین میزان رطوبت در محل قرارگیری بذر و کاهش تبخیر، شرایط بهینه‌ای برای جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاه فراهم می‌کنند (شکل ۱۰). در مقابل، شیاربازکن‌های جفت دیسک نسبت به سایر انواع، موجب افزایش تبخیر در بستر بذر می‌شوند (Eskandari et al., 2015).

در اراضی دیم مناطق کرمانشاه و کردستان، تجربه موافقی در مدیریت علف‌های هرز نخود پاییزه با روش تلفیقی علف‌کش با خاک وجود دارد. در این روش، علف‌کش خاک‌کابرد روی سطح خاک پاشیده شده و سپس کاشت بذر با کارنده انجام می‌گیرد. در این عملیات، سرعت تراکتور و پهنای کارنده برای پرتاب خاک مسموم به طرفین و جلوگیری از تماس مستقیم با خطوط کاشت اهمیت ویژه‌ای دارد. استفاده از کارنده‌های کاردی با پهنای باریک به جای دیسکی نیز توصیه شده است، زیرا تماس مستقیم سم با بذر کاهش یافته و ایمنی و کارایی عملیات افزایش می‌یابد.

در مطالعه‌ای پیرامون کارایی علف‌کش‌های پیش‌رویشی و پس‌رویشی در نخود دیم تحت شرایط خاک‌ورزی مرسوم و حفاظتی مشخص شد که به دلیل حساسیت نخود به کاربرد علف‌کش‌های پس‌رویشی، استفاده از علف‌کش‌های خاک‌کابرد با ماندگاری بالا مناسب است. در تحقیق مذکور، با توجه به میزان کنترل علف‌های هرز و عملکرد نخود، در کرمانشاه، علف‌کش تریفلورالین (ترفلان) به صورت پیش‌کاشت و مخلوط با خاک به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار و ایزوکسافلوتل (مرلین فلکس) پس از کاشت و پیش از سبز شدن نخود به میزان ۲۰۰ میلی‌لیتر در هکتار توصیه شد. همچنین، در مراغه، استفاده از علف‌کش فلوروکلریدون (ریسر) پس از کاشت و پیش از سبز شدن نخود، به مقدار ۲/۵ لیتر در هکتار در



شکل ۱۰- شیار بازکن‌های نوع تیغه‌ای تی وارون (سمت راست) و بشقابی (سمت چپ).
Figure 10- Seed drill openers inverted T-shaped type (right) and disc type (left).

کشاورزی حفاظتی با کاهش دفعات عبور تراکتور در مزرعه، علاوه بر صرفه جویی در سوخت، موجب کاهش زمان و استهلاک ماشین‌های کشاورزی شده و در نتیجه، شدت انرژی (انرژی ورودی به ازای واحد محصول) کاهش می‌یابد (Nandan et al., 2020). علاوه بر این، بقایای گیاهی سطح خاک با حفظ رطوبت و کاهش تبخیر، موجب افزایش کارایی مصرف آب و انرژی می‌شوند (Krupnik et al., 2022).

تحقیقات انجام شده در نظام‌های دیم مناطق نیمه خشک نشان می‌دهند که نسبت انرژی خروجی به ورودی در سامانه‌های کشاورزی حفاظتی معمولاً بالاتر از نظام‌های خاک‌ورزی مرسوم است (Moreno et al., 2011). برای نمونه در اسپانیا گزارش شده است که سیستم بدون خاک‌ورزی در گندم دیم باعث افزایش ۱۸ درصدی بهره‌وری انرژی نسبت به سیستم مرسوم شد (Moreno et al., 2011). ترکیب کشاورزی حفاظتی با مدیریت بهینه بقایا و تناوب مناسب، مصرف انرژی کل در واحد سطح را ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد (Nandan et al., 2020). با این حال، تأثیر کشاورزی حفاظتی بر بهره‌وری انرژی در شرایط دیم کاملاً یکنواخت نیست و به عوامل اقلیمی، نوع محصول، نحوه مدیریت بقایا و سطح مکانیزاسیون بستگی دارد (Kassam et al., 2019). در برخی شرایط، باقی ماندن بقایا یا نیاز به استفاده بیشتر از علف‌کش‌ها می‌تواند انرژی غیرمستقیم ورودی را افزایش دهد و بخشی از صرفه جویی انرژی مستقیم را جبران نماید (Hatfield et al., 2018).

با وجود این محدودیت‌ها، کشاورزی حفاظتی، به‌ویژه در نظام‌های دیم، پتانسیل بالایی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی، افزایش پایداری تولید و کاهش اثرات زیست‌محیطی دارد. پژوهشی که در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه انجام شد (شکل ۱۱)، مقایسه روش‌های مختلف خاک‌ورزی نشان داد که کمترین انرژی مصرف شده برای تولید یک کیلوگرم گندم متعلق به تیمار کشت به روش بی‌خاک‌ورزی با

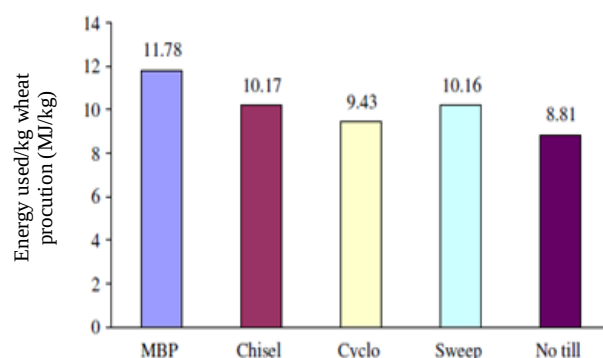
در شرایطی که بقایای گیاهی سنگین هستند و جمع‌آوری آن‌ها محدود است، شیاربازکن‌های بشقابی به عنوان گزینه‌ای مناسب برای کاشت محصولات دیم و حبوبات مورد استفاده قرار می‌گیرند. کارنده‌های کشت مستقیم نیز امکان کاشت بذر بدون نیاز به خاک‌ورزی عمیق را فراهم می‌کنند. این کارنده‌ها با ایجاد شیارهای باریک و قرار دادن بذر در عمق مناسب، تماس آن با بقایای گیاهی و خاک آلوده به علف‌کش‌ها را کاهش داده و رطوبت بستر بذر را حفظ می‌کنند. استفاده از کارنده‌های کشت مستقیم برای غلات و حبوبات عملکرد مناسبی دارد، اما کاشت محصولات دانه‌ریز، به‌ویژه دانه‌های روغنی، هنوز با محدودیت‌هایی همراه است. علاوه بر نقش مکانیکی، کارنده‌های کشت مستقیم با کاهش فشار تراکتور روی خاک و به حداقل رساندن اختلاط غیرضروری، موجب کاهش فرسایش و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌شوند. این مزایا نه تنها عملکرد محصولات را افزایش می‌دهند، بلکه به پایداری بلندمدت نظام‌های کشاورزی حفاظتی نیز کمک می‌کنند (FAO, 2019; USDA NRCS, 2017). به طور خلاصه، انتخاب و استفاده از ماشین‌ها و خاک‌ورزهای مناسب، به‌ویژه شیاربازکن‌ها و کارنده‌های کشت مستقیم، یکی از ارکان اساسی موفقیت کشاورزی حفاظتی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ رطوبت، کنترل بقایا، کاهش فرسایش و افزایش بهره‌وری در اراضی دیم دارد.

بهره‌وری انرژی در سیستم کشاورزی حفاظتی

افزایش هزینه‌های انرژی، کاهش منابع سوخت فسیلی و ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، موجب شده است که بهره‌وری انرژی در نظام‌های تولید کشاورزی به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی پایداری مورد توجه قرار گیرد (FAO, 2015). در این میان، نظام کشاورزی حفاظتی با تأکید بر کاهش خاک‌ورزی، به عنوان یکی از رویکردهای مؤثر برای افزایش کارایی مصرف انرژی در تولیدات کشاورزی شناخته می‌شود (Hobbs et al., 2007).

خاک‌ورزی مرسوم بود (Tabatabaeefar *et al.*, 2009).

۸/۸ مگاژول بر کیلوگرم و بیشترین انرژی مصرف شده، به میزان ۱۱/۸ مگاژول بر کیلوگرم مربوط به



شکل ۱۱- مصرف انرژی (مگاژول بر هر کیلوگرم گندم تولیدی) در روش‌های مختلف خاک‌ورزی در شرایط دیم. MBP، Chisel، Cyclo، Sweep و No-till به ترتیب عبارتند از کاربرد گاواهن برگرداندار، چیزل، دیسک دوار، پنجه‌غازی و بدون خاک‌ورزی.

Figure 11. Energy consumption (megajoule per kilogram of wheat produced) under different tillage methods under rainfed conditions. MBP, Chisel, Cyclo, Sweep, and No-till refer to the use of moldboard plow, chisel plow, rotary disk, sweep plow, and no-till, respectively.

کشورهای در حال توسعه است (Kassam, 2022; Madzivanzira *et al.*, 2024).

از منظر اقلیمی، نوسانات آب و هوایی و تغییرات شدید الگوی بارش در مناطق دیم، پایداری تولید زراعت دیم در نظام‌های حفاظتی را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که در اقلیم‌های خشک، عملکرد محصولات تحت نظام بدون خاک‌ورزی در سال‌های اولیه توسعه کاهش می‌یابد و این موضوع موجب تردید کشاورزان نسبت به پذیرش بلندمدت این روش می‌شود (Krupnik *et al.*, 2022). علاوه بر آن، ویژگی‌های خاک‌های دیم که اغلب کم‌عمق و فقیر از مواد آلی هستند و تجزیه کند بقایا در دماهای پایین یا رطوبت کم، کارایی این روش‌ها را محدود می‌کند (Araya, 2024). از دیدگاه اقتصادی و اجتماعی نیز هزینه بالای تجهیزات اولیه، محدودیت دسترسی به سرمایه و نبود نظام‌های حمایتی مالی یا بیمه‌ای، از جمله موانع عمده در پذیرش کشاورزی حفاظتی به شمار می‌آیند (Knowler and Bradshaw, 2007). مطالعه‌ای در استان آذربایجان شرقی نشان داد که مهم‌ترین دلایل عدم استفاده کشاورزان از کشاورزی حفاظتی شامل نبود دسترسی به کارنده‌های کشت مستقیم، عدم

چالش‌های توسعه کشاورزی حفاظتی

در اراضی دیم، نظام کشاورزی حفاظتی با هدف حفظ رطوبت خاک، کاهش فرسایش آبی و بادی و بهبود کارایی مصرف انرژی و آب معرفی شده است. با وجود مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی، پذیرش و توسعه این نظام در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک با موانع و چالش‌های متعددی مواجه است.

از منظر فنی و مدیریتی، مهم‌ترین چالش‌ها به مدیریت بقایای گیاهی و کنترل علف‌های هرز مربوط می‌شود. باقی‌ماندن بقایا در سطح خاک، با وجود اینکه موجب حفاظت خاک می‌شود، می‌تواند عملیات کاشت و جوانه‌زنی را دشوار کرده و مشکلاتی در تهویه خاک یا سبز شدن بذر ایجاد کند (Puniya *et al.*, 2023). تغییرات فیزیکی خاک و رطوبت سطحی همچنین الگوهای رشد علف‌های هرز و آفات را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد که در صورت نبود دانش و فناوری مناسب، نیاز به استفاده بیشتر از علف‌کش‌ها و سموم را افزایش می‌دهد (Hatfield *et al.*, 2018). کمبود تجهیزات مکانیزاسیون ویژه کشت مستقیم، از جمله بذرکارهای مخصوص و ماشین‌های سبک برای زمین‌های خرد، یکی دیگر از موانع مهم به‌ویژه در

آشنایی با دانش فنی بسته‌های کشاورزی حفاظتی، پایین بودن عملکرد در آغاز استفاده از سیستم، مدیریت دشوار علف‌های هرز و فقدان حمایت دولتی است (Ferdowsi *et al.*, 2023). بسیاری از کشاورزان خرد توانایی خرید بذر کارهای مخصوص و تغییر نظام تولید را ندارند. علاوه بر این، کشاورزی حفاظتی یک سیستم پیچیده است که نیازمند دانش و مهارت مدیریتی جدید می‌باشد؛ بنابراین، نبود خدمات ترویجی و آموزش عملی در شرایط خود بهره‌برداران، سرعت توسعه آن را کاهش می‌دهد. در سطح نهادی و سیاستی، فقدان سیاست‌های حمایتی منسجم، مشوق‌های اقتصادی و سازوکارهای بازار برای جبران منافع زیست‌محیطی، از جمله چالش‌های جهانی توسعه کشاورزی حفاظتی محسوب می‌شود (Kassam *et al.*, 2022).

در بسیاری از کشورها، سیاست‌های کشاورزی بیشتر بر افزایش تولید کوتاه‌مدت تمرکز دارند و برای مدیریت پایدار خاک و حفظ منابع طبیعی، پاداش یا مشوق کافی ارائه نمی‌شود. مرور منابع نشان می‌دهد که توسعه کشاورزی حفاظتی در اراضی دیم علاوه بر چالش‌های فنی و اقلیمی، با موانع اقتصادی، اجتماعی و نهادی نیز روبه‌رو است. رفع این موانع مستلزم رویکردی تلفیقی شامل مکانیزاسیون مناسب مقیاس کوچک، آموزش و ترویج پایدار، حمایت مالی هدفمند و سیاست‌های تشویقی مبتنی بر خدمات اکوسیستمی است. همچنین انجام پژوهش‌های بلندمدت و مقایسه‌ای در شرایط اقلیمی مختلف و در مزارع خود کشاورزان برای ارزیابی پایداری عملکرد و سودآوری این نظام در اراضی دیم ضروری به نظر می‌رسد.

بحث و نتیجه‌گیری

مرور جامع مطالعات انجام‌شده در اراضی دیم ایران به وضوح نشان می‌دهد که گذار از نظام‌های خاک‌ورزی مرسوم به سمت کشاورزی حفاظتی نه تنها یک راهکار فنی، بلکه یک ضرورت اکولوژیک و اقتصادی برای تضمین پایداری تولید در این اکوسیستم‌های

شکنده است. یافته‌ها حاکی از آن است که نظام‌های بی‌خاک‌ورزی، با حفظ یکپارچگی ساختمان خاک و افزایش پوشش بقایا، به طور معنی‌داری منجر به افزایش ذخیره رطوبت خاک، افزایش ماده آلی (به‌ویژه در لایه‌های سطحی)، کاهش جرم مخصوص ظاهری و در نهایت ارتقای شاخص کیفیت خاک شده‌اند. این بهبودها به نوبه خود، نفوذپذیری آب را افزایش و رواناب و فرسایش را به طور چشمگیری کاهش می‌دهند. با توجه به میزان فرسایش بسیار بالای خاک در ایران، نقش این نظام‌ها در حفاظت از این سرمایه ملی غیرقابل انکار است. در حالی که خاک‌ورزی مرسوم در کوتاه‌مدت ممکن است عملکردی مشابه یا در مواردی بالاتر داشته باشد، شواهد بلندمدت (مانند مطالعه ۷ ساله در مراغه) نشان می‌دهد که نظام‌های کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی در نهایت می‌توانند به عملکردی پایدارتر و حتی برتر دست یابند. کاهش عملکرد اولیه در بی‌خاک‌ورزی، اغلب ناشی از نیاز به یک دوره گذار برای تعدیل اکوسیستم خاک و غلبه بر چالش‌هایی مانند مدیریت علف‌های هرز است. بنابراین، ارزیابی موفقیت این نظام‌ها باید مبتنی بر دیدگاه بلندمدت و در نظرگیری معیارهای پایداری باشد.

این مرور بر نقش حیاتی تناوب‌های زراعی متنوع، به‌ویژه تلفیق غلات با حبوبات (مانند نخود) و گیاهان علوفه‌ای تأکید می‌کند. چنین تناوب‌هایی نه تنها با کاهش فشار آفات و علف‌های هرز و بهبود حاصلخیزی خاک از طریق تثبیت زیستی نیتروژن، بلکه با شکستن چرخه بیماری‌ها، به پایداری سیستم کمک شایانی می‌کنند. جایگزینی سیستم آیش-گندم با تناوب‌های پربازده‌تر، از نظر اقتصادی و اکولوژیک به صرفه‌تر است.

با این حال، توسعه کشاورزی حفاظتی در اراضی دیم با موانع جدی روبرو است. کاهش خاک‌ورزی، بوم‌شناسی علف‌های هرز را تغییر می‌دهد و نیازمند مدیریت تلفیقی هوشمند، شامل تناوب، استفاده از علف‌کش‌های مناسب و مکانیزاسیون دقیق

برای شتاببخشیدن به توسعه کشاورزی حفاظتی، پژوهش‌های بلندمدت میدانی برای بومی‌سازی بسته‌های فنی در اقلیم‌های مختلف، تقویت پیوند بین تحقیقات، ترویج و بخش خصوصی برای توسعه مکانیزاسیون مناسب و اجرای برنامه‌های ترویجی مؤثر برای نمایش مزایای اقتصادی و کاهش ریسک پذیرش برای کشاورزان، امری حیاتی است. آینده زراعت دیم ایران در گرو اتخاذ مدیریتی خردمندانه است که در آن، سلامت خاک به عنوان اساس تولید پایدار، در کانون تمامی تصمیم‌گیری‌ها قرار گیرد.

سیاسگرای

این مطالعه بر اساس نتایج تحقیقات انجام گرفته با حمایت مالی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور است. نویسندگان عمیقاً از همکاری و مساعدت محققین و متخصصان ایستگاه‌های تحقیقاتی استان‌های مختلف که در فرآیند جمع‌آوری داده‌های میدانی نقش اساسی ایفا نمودند، سپاسگزارند.

(مانند ردیف‌کارهای با فاصله مناسب برای سمپاشی بین‌ردیفی) است. از طرفی، تعارض بین نیاز به حفظ بقایا برای حفاظت خاک و استفاده از آن به عنوان خوراک دام، یک چالش بزرگ است. یافتن راه‌حل‌های اقتصادی برای تأمین علوفه و ترویج حفظ بقایای گیاهی که حداقل ۳۰ درصد خاک را پوشش دهد، ضروری است. کمبود و گرانی ردیف‌کارها و ادوات کشت مستقیم سازگار با شرایط مزارع دیم ایران، از موانع اصلی است. توسعه و بومی‌سازی این ادوات باید در اولویت قرار گیرد. موفقیت این نظام نیازمند آموزش و ترویج مستمر برای تغییر نگرش کشاورزان و همچنین تدوین سیاست‌های حمایتی مانند یارانه برای خرید ادوات یا پرداخت برای خدمات اکوسیستمی از سوی دولت است. کشاورزی حفاظتی در اراضی دیم ایران یک راهبرد برد-برد است که همزمان امنیت غذایی، پایداری محیط‌زیست و بهره‌وری اقتصادی را هدف می‌گیرد. این سیستم با محافظت از خاک در برابر فرسایش، ذخیره‌سازی هر قطره باران و افزایش تدریجی حاصلخیزی، تاب‌آوری نظام‌های زراعی را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش می‌دهد.

منابع

- Al-Kaisi MM, Yin X, Licht MA. 2005. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105(4): 635–647.
- Araya T. 2024. Challenges and constraints of conservation agriculture: A review. *Scientific Reports*, 14(1): 1121.
- Asadi ME. 2021. Conservation Agriculture in Iran. In: *Advances in Conservation Agriculture*, Volume 3, Adoption and Spread; Kassam A (Ed.). Burleigh Dodds: Cambridge, UK, Chapter 11: 375–393.
- Asadi ME, Faghani M, Razaghi MH. 2025. Conservation Agriculture: An Ecosystem-Based Approach to Sustainable Farming. Amertat Publishing: 148 pp.
- Azimzadeh Y. 2023. The Role of Biochar in Soil Fertility and Crop Productivity in Arid and Semi-Arid Regions: Challenges and Opportunities. *International Journal of Water and Soil Resources*, 12: 36–52 (In Persian)
- Bahrami HA. 2025. Relationship between soil productivity and erodibility in Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 27(4): 123–135.
- Bahrami HA, Sadeghi SHR, Ghadiri H. 2021. The effect of soil structural degradation on water erosion in semi-arid regions of Iran. *Catena*, 203: 105353.
- Bhowmik PC, Inderjit. 2003. Challenges and opportunities in implementing allelopathy for natural weed management. *Crop Protection*, 22(4): 661–671.
- Boardman J, Poesen J. 2018. Soil erosion in Europe: Major processes, causes and consequences. Wiley-Blackwell.

- Derpsch R, Kassam A, Reicosky D, Friedrich T, Calegari A, Basch G, Gonzalez-Sanchez E, Rheinheimer dos Santos D. 2024. Nature's laws of declining soil productivity and Conservation Agriculture. *Soil Security*, 14: 100127.
- Devkota M, Devkota KP, Gupta RK, Sayre KD, Martius C, Lamers JPA. 2022. Conservation agriculture farming practices for optimizing water and fertilizer use efficiency in Central Asia. In: *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification*: 242–257.
- Eskandari A. 1998. Evaluation of the Effects of Conventional and Direct Seeding Methods on Chickpea Yield under Rainfed Conditions. Dryland Agricultural Research Institute Publications (In Persian).
- Eskandari A. 2017. Evaluation and Selection of Suitable Conservation Tillage Methods in Wheat-Forage Rotation and Estimation of Crop Residues Using Spectral and Conventional Methods under Rainfed Conditions. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 51274 (In Persian).
- Eskandari I, Navid H, Moradi F. 2015. Evaluation of conservation and conventional tillage systems using infrared thermal imagery in a cold and arid region of Iran. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, 25(3): 244–253.
- Extension SD State. 2022. Conserving Soil Moisture during Dry Conditions. South Dakota State University.
- FAO. 2011. Save and Grow: A Policymaker's Guide to the Sustainable Intensification of Smallholder Crop Production. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. 2015. Conservation Agriculture: A sustainable approach to food security and climate change adaptation and mitigation. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. 2017. Conservation Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ferdowsi R. 2023. Challenges of Developing Conservation Agriculture in Rainfed and Irrigated Lands of East Azerbaijan Province. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 63998 (In Persian).
- Feng X, Li Q, Zhang W, Wang Y. 2021. Effects of conventional tillage and no-till on soil structure, water infiltration, and wheat yield during fallow period in rainfed systems. *Soil & Tillage Research*, 213: 105–115.
- Franzluebbers AJ. 2010. Soil organic carbon in cropland and grassland under conservation management. *Soil and Tillage Research*, 107(2): 99–107.
- Fried G, Chauvel B, Reboud X, Gasquez J. 2008. Ecological and agronomic consequences of weed management in conservation tillage systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 123(1–3): 106–112.
- Ghahramani A, Asadi H, Shahsavari N. 2020. Effect of crop rotation and residue management on wheat yield under dryland farming systems in western Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 24(2): 89–101.
- Ghahremanian G. 2018. Evaluation and Optimization of Backpack Sprayer for Weed Control Between Rows in Mechanized Chickpea Cultivation under Rainfed Conditions. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 54945 (In Persian).
- Haddaway NR, Hedlund K, Jackson LE, Kätterer T, Lugato E, Thomsen IK, Isberg PE. 2017. How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence*, 6(1): 30.
- Hajabbasi MA, Afyuni M, Hemmat A. 2005. Soil physical properties under different tillage systems in dryland wheat cultivation. *Cereal Research Communications*, 33(1): 37–45.
- Hatfield JL, Sauer TJ, Prueger JH. 2018. Managing soils to achieve greater water and energy efficiency: A review. *Agronomy Journal*, 110(5): 2077–2089.
- Heidari A. 2024. Meta-analysis of the effect of minimum tillage and no-tillage on wheat yield in Iran's rainfed conditions. *Journal of Agricultural Mechanization*, 8(4): 27–40.
- Heydarpour N. 2021. Investigation of Soil Physicochemical Properties and Crop Yield in Different Rotations under Conservation and Conventional Agriculture in a Semi-Warm Climate. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 61939 (In Persian).
- Hobbs PR, Sayre K, Gupta R. 2007. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491): 543–555.

- Hoyle FC, Murphy DV, Fillery IRP. 2011. Temperature and stubble management influence microbial CO₂-C evolution and microbial biomass in a sandy soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(4): 622–631.
- Jafari H, Alipour H, Inanlu P, Tourji MR. 2024. Promotable Findings of the Agriculture and Natural Resources Sector, 1401 (In Persian).
- Jafarzadeh J. 2023. Evaluation of Reciprocal Effects and Grain Yield of Winter Rainfed Bread Wheat under Conservation and Conventional Agricultural Systems. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 65024 (In Persian).
- Jafarzadeh J, Roustaei M, Feyzi-Asl V, Zadhassan A, Pourheydar-Ghaffarbi S, Rahimzadeh R, Ghahremanian GR. 2025. Technical Guidelines for Bread Wheat Cultivation in Cold Semi-Arid Rainfed Regions of Iran. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Registration No. 67266 (In Persian).
- Jalalian A, Homaei M, Abbaspour KC. 2002. Effects of soil structural instability on erosion potential in Iranian drylands. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 16(2): 85–97 (In Persian).
- Jalalian A, Homaei M, Asadi H. 2018. The role of livestock-crop integration in dryland farming systems of Iran: Challenges and opportunities. *Iranian Journal of Agronomy and Plant Production*, 32(4): 91–102 (In Persian).
- Kassam A, Friedrich T, Shaxson F, Pretty J. 2022. Global adoption and spread of conservation agriculture. *Soil and Tillage Research*, 223: 105447.
- Kassam A, ed. 2022. *Advances in Conservation Agriculture, Volume 3: Adoption and Spread*. Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing.
- Khorsandi H. 2019. Investigation of the Effects of Tillage and Different Nitrogen Fertilizer Levels on Rainfed Wheat Yield in Chickpea Rotation. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 56476 (In Persian).
- Khorsandi H. 2024. Investigation of the Effects of Different Agricultural Practices and Crop Residues on Soil Erosion in Sloping Rainfed Lands. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 66074 (In Persian).
- Kiani M, Pirzad A, Dadvand M, et al. 2024. Biochar and conservation tillage affect the agronomic and soil properties in dryland wheat production. *Scientific Reports*, 14: 12345.
- Klocke NL, Currie RS, Aiken RM. 2009. Soil water evaporation and crop residues. *Transactions of the ASABE*, 52(1): 103–107.
- Knowler D, Bradshaw B. 2007. Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Global Environmental Change*, 17(1): 25–37.
- Kopittke PM, Menzies NW, Wang P, McKenna BA, Lombi E. 2022. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132: 105078.
- Krupnik TJ, et al. 2022. Adapted conservation agriculture practices can increase crop energy productivity and reduce greenhouse gas emissions in rainfed systems. *Agricultural Systems*, 197: 103371.
- Lal R. 2015. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5): 5875–5895.
- Liebman M, Dyck E. 1993. Crop rotation and intercropping strategies for weed management. *Ecological Applications*, 3(1): 92–122.
- Lotfi R. 2020. Evaluation of Physiological Parameters and Yield of Rainfed Wheat Cultivars under Conservation Agriculture. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 57609 (In Persian).
- Lotfi R. 2020. Investigation of Rainfall Use Efficiency under Different Agricultural Managements on Wheat Cultivar Yield. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 58543 (In Persian).
- Lotfi R. 2025. Nitrogen and Phosphorus Fertilization in Rainfed Forage Mungbean Cultivation in Rotation with Wheat under Conservation Tillage Systems. Dryland Agricultural Research Institute Publications, In Press (In Persian).
- Lotfi R, Golkari S, Abbasi A, Rahimzadeh R, Mohammadzadeh A, Pessarakli M. 2024. Pre-Crop and Residue Management Effects on Photosynthesis Efficiency and Grain Yield of Dryland Wheat Genotypes. *Crops*, 4(3): 426–439.

- Lotfi R, Pessarakli M. 2023. Effects of Crop Rotation and Tillage on Winter Wheat Growth and Yield under Cold Dryland Conditions. *Crops*, 3(2): 88-100.
- Madzivanzira T, Mupangwa W, Mutenje M. 2024. A review of appropriate mechanisation systems for smallholder conservation agriculture. *Heliyon*, 10(3): e25845.
- Mehdizade B, Asadi H, Shabanpour M, Ghadiri H. 2013. Impact of erosion and tillage on the productivity and quality of selected semiarid soils of Iran. *International Agrophysics*, 27(4): 291–297.
- Mohammadi S, et al. 2021. Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran. *Environmental Science and Technology*, 55(12): 7890–7899.
- Mohammadzadeh A, Azimzadeh Y, Lotfi R, Zadhasan E, Alizadeh K, Hassaneian Khoshro H. 2025. Analyzing the rainfed wheat yield gap in Northwest Iran. *Farming System*, 3(2): 100126.
- Moreno MM, Lacasta C, Meco R, Moreno C. 2011. Rainfed crop energy balance of different farming systems and crop rotations in a semi-arid environment: Results of a long-term trial. *Soil and Tillage Research*, 114(1): 18–27.
- Nandan R, Singh V, Singh SS, Kumar V, Hazra KK, Poonia T, Kumar N. 2020. Potential of conservation agriculture modules for energy and greenhouse gas savings in rice-based cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 199: 104596.
- O'Donovan JT, Harker KN, O'Donovan L, Blackshaw RE. 2001. Integrated weed management in conservation tillage systems. *Weed Technology*, 15(4): 869–877.
- Osunbitan JA. 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and soil porosity of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 82(2): 57–64.
- Peltzer SC, Douglas A, D'Antuono M. 2009. Managing stubble retention systems in dryland agriculture. *Agronomy Journal*, 101(1): 20–26.
- Pittelkow CM, Liang X, Linquist BA, van Groenigen KJ, Lee J, Lundy ME, van Gestel N, Six J, Venterea RT, van Kessel C. 2015. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534): 365–368.
- Pourheidar S. 2022. Investigation of the Effects of Agricultural Management on Weed Distribution and Providing Control Methods at the Dryland Agricultural Research Institute of Iran. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 61641 (In Persian).
- Powlson DS, Stirling CM, Jat ML, Gerard BG, Palm CA, Sanchez PA, Cassman KG. 2016. Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 6(5): 570–574.
- Puniya R, Singh G, Yadav MR, Singh S, Dheri GS. 2023. Effect of residue and weed management practices on soil and crop performance under conservation agriculture. *Soil and Tillage Research*, 225: 105543.
- Rezaverdinejad V, Karimi B, Amiri E. 2021. An analysis of crop residue removal and its impacts on soil physical and chemical properties in dryland farming systems of Iran. *Journal of Arid Environments*, 184: 104306.
- Rohi A. 2021. Effects of Tillage Methods on Quantitative and Qualitative Traits of Rainfed Wheat and Soil Physicochemical Properties in Agricultural Rotation Systems of Kurdistan. Dryland Agricultural Research Institute Publications, Report No. 59530 (In Persian).
- Sauer TJ, Hatfield JL, Prueger JH. 1996. Crop residue effects on water conservation. In: *Advances in Soil Science*: 41–57. CRC Press.
- Shahbazi F, Koocheki A, Ghaffari A. 2019. Long-term effects of conservation tillage on soil biological properties under dryland conditions in northwest Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(3): 721–734.
- Six J, Feller C, Denef K, Ogle SM, de Moraes Sa JC, Albrecht A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils—Effects of no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 61(1–2): 33–75.
- Soleimani-Murchehkourti A, Joraghi M, Maadi-Roodsari MH, Fayyazi MT, Babaei M, Hajizadeh F, Atardi Z, Mehman-Nawaz Norouzmahalleh A. 2024. Investigation of the Implementation of the Soil Protection Law with Emphasis on the Soil Erosion Crisis in Iran (Environmental Perspective). Tehran: Research Center of the Iranian Parliament (In Persian).

- Tabatabaeefar A, Emamzadeh H, Ghasemi-Varnamkhasti M, Rahimizadeh R, Karimi M. 2009. Comparison of energy of tillage systems in wheat production. *Energy*, 34(1): 41–45.
- USDA NRCS. 2019. Plant Materials for Conservation Agriculture. Natural Resources Conservation Service.
- Veisi A, Farahani HA, Jalalian A. 2022. Influence of conservation tillage systems on soil physical properties in rainfed wheat fields. *Soil and Tillage Research*, 220: 105318.
- Walters DT, Moorman TB. 2011. Role of crop residue management in nitrogen dynamics and environmental outcomes. *Soil and Tillage Research*, 114(2): 104–113.
- West TO, Post WM. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6): 1930–1946.
- Yang H, Li Y, Wang Z, Liu K, Cheng K, Zhang J, Zheng X. 2024. Diversified two-year rotations improve soil nitrogen availability and wheat yield by shaping root-associated microbial communities. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 365: 108456.
- Zare S, Sadeghi SHR, Khaledi Darvishan A. 2023. Soil aggregate stability and erodibility in different land uses of western Iran. *Journal of Hydrology and Soil Conservation*, 30(1): 21–32.



Conservation Agriculture in Iran's Drylands: From Research Findings to Sustainability Strategies

Ramin Lotfi^{1*}, Jafar Jafarzadeh¹, Mohammad Esmaeil Asadi², Iraj Eskalndari³

1- Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran

2- Senior Soil and Water Research Scientist, Conservation Agriculture, Golestan, Iran

3- Senior Supervisor of the National Project for Production Leap in Drylands, Former Researcher at Dryland Agricultural Research Institute, Maragheh, Iran

ABSTRACT

Dryland farming face severe threats from climate change, including recurrent droughts and intense soil erosion, jeopardizing production sustainability. The future of Iran's dryland farming depends on adopting a wise management approach in which soil health, as the foundation of sustainable production, must be placed at the core of all decision-making processes. Conservation agriculture (CA) is recognized as an effective sustainable management system to address these challenges, built on three core pillars: minimum soil mechanical disturbance, permanent soil cover, and crop rotation. This article reviews findings from four decades of field research by scientific centers, analyzing the environmental impacts and productivity outcomes of conservation agriculture systems across different Iranian climates. The evidence clearly demonstrates that conservation systems enhance soil organic matter and microbial activity, improve moisture retention and nutrient availability, and reduce soil erosion. Integrating leguminous crops (pulses and forages) into cereal-based rotations in drylands reduces the nutritional demand of cereal crops and contributes to production stability. No-till systems enhance sustainability by lowering direct energy input, improving water use efficiency, and managing crop residues. Although the primary goal of conservation agriculture is not yield maximization but rather yield stability and resource conservation, research confirms a significant climatic effect on the stability of rainfed crop production under such systems. Yield stabilization occurs more rapidly in temperate and semi-warm climates compared to cold regions under conservation practices. While initial yield reduction may occur during early years of no-till adoption particularly in cold climates appropriate crop rotation (e.g., chickpea–wheat) and effective management of residue cover and weeds can compensate for these losses in the medium term. Consequently, adopting climate-adapted conservation agriculture systems (tailored tillage and rotation practices) represents an effective strategy for achieving climate-resilient sustainable agriculture. However, scaling up these systems faces multiple barriers, including cereal-dominated cropping systems, shortage of specialized planting equipment, weed management challenges in rotational crops, livelihood dependence on crop residues, and lack of effective supportive policies. This paper emphasizes the need for an integrated national strategy encompassing development of local mechanization, strengthening extension–education systems, designing economic incentives, and reforming cropping patterns to facilitate the transition toward conservation-based sustainable agriculture on Iran's drylands.

Keywords: Production Efficiency, Residue Cover, Soil Fertility, Dryland Farming, No-Till Cultivation

* Corresponding author: r.lotfi2025@gmail.com
Submit date: 2025/10/31 Accept date: 2025/12/21

