

ارزیابی کارایی روش‌های مختلف خاک‌ورزی در کنترل فرسایش و حفظ کیفیت خاک در اراضی دیم شیب‌دار

هادی خرسندی^{۱*}، یاسر عظیم زاده جواد حصار^۱، رامین لطفی^۱، مهدی رحمتی^۲، مهدی کوسه لو^۱

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

۲- دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.

چکیده مبسوط

مقدمه: فرسایش آبی خاک به عنوان یکی از چالش‌های اساسی کشاورزی پایدار و تهدیدی جدی برای ثبات اکوسیستم‌های طبیعی محسوب می‌شود. پوشش گیاهی و مدیریت اراضی نقش مهمی در کنترل فرسایش آبی خاک ایفا می‌کند. سیستم‌های مختلف خاک‌ورزی و کاشت بر میزان فرسایش خاک و عملکرد محصول به‌ویژه در اراضی شیب‌دار مؤثر هستند.

روش‌شناسی پژوهش: این پژوهش با هدف بررسی تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر کنترل فرسایش آبی، به‌صورت آزمایش بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شیب ۶ تا ۱۲ درصد طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه اجرا شد. تیمارها شامل پنج روش خاک‌ورزی شامل ۱-کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب (با پنجه‌غازی غلتک‌دار)، ۲-کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب، ۳-خاک‌ورزی مرسوم در جهت شیب (با گاوآهن برگردان‌دار و دیسک)، ۴-خاک‌ورزی مرسوم عمود بر شیب و ۵-بدون خاک‌ورزی بودند. از باران‌ساز با شدت بارش ۴۵ میلی‌متر بر ساعت استفاده شد و حجم رواناب، وزن رسوب، جرم مخصوص ظاهری و غلظت فسفر و پتاسیم قابل جذب در رسوبات اندازه‌گیری شد.

یافته‌های پژوهش: نتایج نشان داد که خاک‌ورزی مرسوم در جهت شیب به‌طور میانگین بیشترین رواناب (۲۲۲۲ میلی‌لیتر) و رسوب (۱۴۸ گرم) را تولید کرد؛ در حالی‌که تیمار بدون خاک‌ورزی به‌ترتیب با ۳۵۰ میلی‌لیتر رواناب و ۱۱ گرم رسوب، کمترین مقادیر را داشت. روش‌های عمود بر شیب رواناب و رسوب را به‌طور معنی‌دار کاهش دادند (به‌ترتیب ۱۱۴۲-۱۴۹۸ میلی‌لیتر و ۲۹-۵۳ گرم)، اما کارایی آن‌ها در سال دوم کاهش یافت (به‌جز خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب که عملکرد بهتری در سال دوم نشان داد). جرم مخصوص ظاهری رسوبات در تیمار مرسوم در جهت‌شیب (۱/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بیشترین و در بدون خاک‌ورزی (۱/۰۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) کمترین مقادیر را داشت. همچنین هدررفت پتاسیم قابل جذب در تیمار خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب (۱۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌طور معنی‌دار بیشتر از بدون خاک‌ورزی (۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. به‌طور کلی، تیمار بدون خاک‌ورزی به‌عنوان مؤثرترین روش در کاهش رواناب، رسوب و هدررفت عناصر غذایی شناسایی شد و کاربرد روش‌های خاک‌ورزی عمود بر شیب نیز می‌تواند به‌عنوان راهکاری میانی در مدیریت فرسایش اراضی دیم مورد توجه قرار گیرد.



* نگارنده مسئول: hkhorsandy@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی: خاک‌ورزی، بقایای گیاهی، شدت بارندگی، شیب

مقدمه

۶۰ درصدی سطح خاک نشان داد که این روش باعث کاهش معنی‌دار ظرفیت برداشت ذرات خاک و افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش شیلی می‌شود. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که فرسایش‌پذیری شیلی در خاک‌های دارای پوشش سله بیولوژیکی (خزه و مخلوط خزه-سیانوباکتر) به ترتیب ۷۴ و ۱۶۵ برابر کمتر از خاک بایر بود. همچنین مشخص شده است که ظرفیت برداشت ذرات خاک در خاک‌های دارای پوشش سله بیولوژیکی به طور قابل توجهی (۴۸-۳ برابر برای خزه و ۱۵۰-۵ برابر برای سله مخلوط) کمتر از خاک لخت بود. از سوی دیگر، مطالعه سیتز و همکاران (Seitz et al., 2019) نشان داد که خاک‌ورزی حفاظتی تأثیر قابل توجهی در کاهش فرسایش خاک دارد. آنان گزارش کردند که در شرایط بارندگی شدید (۶۰ میلی‌متر بر ساعت)، کشاورزی حفاظتی در مقایسه با روش مرسوم موجب کاهش ۳۰ درصدی (معادل ۰/۵۴ تن بر هکتار در ساعت) در تحویل رسوب شد. همچنین، کاربرد خاک‌ورزی حداقل در این سیستم، کاهش ۶۱ درصدی تحویل رسوب را نسبت به خاک‌ورزی متراکم به همراه داشت. همچنین، اگرچه کرت‌های کشاورزی مرسوم با خاک‌ورزی متراکم بیشترین میزان رسوبدهی را نشان دادند، اما ترکیب کشاورزی مرسوم با روش بدون خاک‌ورزی منجر به کمترین شدت فرسایش گردید.

ویژگی‌های خاک نقش مهمی در میزان فرسایش دارند. به عنوان مثال، واعظی و وطنی (Vaezi and Vatani, 2015) با بررسی هشت خاک با بافت‌های مختلف در استان زنجان و تحت باران شبیه‌سازی‌شده با شدت ۶۰ میلی‌متر در ساعت، نشان دادند که فرسایش‌پذیری شیلی در میان

مطالعات متعدد تأثیر پوشش گیاهی و مدیریت اراضی را بر کنترل فرسایش آبی مورد بررسی قرار داده‌اند. تحقیقات نشان می‌دهد که بین مشخصات هیدرولوژیکی مانند حجم رواناب، بار رسوب و ضریب هرزآب با میزان پوشش گیاهی رابطه معنی‌داری وجود دارد (Gyssels et al., 2005)؛ در حالی که سیستم‌های آیش طولانی‌مدت به دلیل کاهش پوشش سطحی، موجب تشدید فرسایش می‌شوند (Iwara, 2014). همچنین، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که ترکیب گیاهان گراس و بوته‌ها به دلیل سیستم ریشه‌ای متراکم، در مقایسه با کشت‌های تک‌گانه مانند گندم یا ذرت، کارایی بیشتری در کاهش ضریب رواناب و تثبیت رسوبات دارد. علاوه بر آن، کاهش پوشش گیاهی نه‌تنها باعث افزایش هدررفت خاک می‌شود، بلکه منجر به انتقال مقادیر قابل توجهی از کربن آلی و عناصر غذایی خاک نیز می‌شود (Liu et al., 2014). از سوی دیگر، نتایج مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد مالچ، اثرات قابل توجهی بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک و کاهش فرسایش دارد. بر اساس پژوهش‌ها، مالچ‌پاشی نه‌تنها جرم مخصوص ظاهری خاک را کاهش می‌دهد، بلکه از طریق افزایش کربن آلی موجب بهبود پایداری خاکدانه‌ها و در نتیجه کاهش فرسایش‌پذیری خاک می‌شود (Iwara, 2014). این روش مدیریتی قادر است زمان آغاز رواناب را به تأخیر انداخته و شدت دبی رواناب را کاهش دهد؛ به طوری که بر اساس گزارش لین و همکاران (Lin et al., 2018)، مالچ‌پاشی می‌تواند هدررفت خاک را بین ۰/۱۳ تا ۳۰/۹۰ درصد نسبت به خاک بایر کاهش دهد. مطالعات لیو و همکاران (Liu et al., 2016) بر روی سله‌های بیولوژیکی با پوشش ۷۰-

خاک‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری داشت. نتایج پژوهش آنان نشان داد که فرسایش‌پذیری شیاری با درصد اجزای معدنی خاک، از جمله شن، رس و سنگریزه و همچنین درصد سدیم تبدلی ارتباط داشت. افزایش درصد شن و سنگریزه با افزایش نفوذپذیری خاک و کاهش تولید جریان متمرکز همراه بود. در مقابل، خاک رسی که مقدار سدیم تبدلی بیشتری داشت، بیشترین فرسایش‌پذیری را نشان داد. بنابراین، در ارزیابی حساسیت خاک به فرسایش نمی‌توان تنها به شیب زمین توجه کرد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نیز باید هم‌زمان در نظر گرفته شوند. این یافته‌ها با پژوهش‌شن و همکاران (Shen et al., 2017) که نشان دادند فرسایش‌پذیری را می‌توان با متغیرهای درصد سیلت و شن، میانگین هندسی قطر ذرات، ظرفیت تبادل کاتیونی و ماده آلی خاک به خوبی پیش‌بینی کرد، همخوانی دارد. بات و خیرا (Bhatt and Khera, 2006) در هند دو سیستم خاک‌ورزی (مرسوم و کم‌خاک‌ورزی) را در ترکیب با پنج روش مختلف توزیع مالچ مورد ارزیابی قرار دادند. آنان گزارش کردند که سیستم خاک‌ورزی مرسوم در مقایسه با کم‌خاک‌ورزی، ۳۸ درصد از رخدادهای بارندگی را به رواناب تبدیل کرد، در حالی که این مقدار در سیستم کم‌خاک‌ورزی ۳۳ درصد بود. همچنین، کاربرد مالچ با ایجاد پوشش سطحی مؤثر، از برخورد مستقیم قطرات باران با خاک جلوگیری نمود. نتایج آنان نشان داد که کارایی مالچ در کاهش رواناب مستقیماً به درصد پوشش سطحی آن وابسته است. بیشترین اختلاف در تولید رواناب بین سیستم‌های خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی در تیمارهای فاقد مالچ مشاهده شد. از جنبه هدررفت خاک، سیستم خاک‌ورزی مرسوم با تولید ۴۴ تن رسوب در هکتار، در مقایسه با ۳۱ تن در هکتار در سیستم کم‌خاک‌ورزی، تأثیر منفی بیشتری بر فرسایش‌پذیری خاک نشان داد. مطالعه

جین و همکاران (Jin et al., 2008) در اراضی ژانگ ژاوون چین نشان داد که سیستم‌های مدیریت خاک تأثیر معنی‌داری بر کنترل فرسایش آبی داشت. بر اساس نتایج آنان که تحت شرایط باران شبیه‌سازی شده انجام شد، تیمار بی‌خاک‌ورزی همراه با مالچ‌پاشی به عنوان مؤثرترین روش در کاهش فرسایش خاک شناسایی شد. یافته‌های این تحقیق حاکی از آن بود که ترکیب خاک‌ورزی عمیق با کاربرد مالچ می‌تواند هدررفت خاک را در مقایسه با روش خاک‌ورزی مرسوم تا بیش از ۸۵ درصد کاهش دهد.

با وجود پژوهش‌های گسترده در زمینه تأثیر خاک‌ورزی بر فرسایش، همچنان شکاف قابل توجهی در خصوص اثر همزمان نوع خاک‌ورزی و جهت انجام آن بر کنترل رواناب و هدررفت خاک در اراضی دیم و تحت باران‌های شبیه‌سازی‌شده با شدت بالا وجود دارد. بیشتر مطالعات پیشین یا بدون در نظر گرفتن جهت خاک‌ورزی، صرفاً به مقایسه سیستم‌های خاک‌ورزی پرداخته‌اند یا در شرایط اقلیمی و خاک‌های متفاوتی انجام شده‌اند که قابل تعمیم به مناطق دیم نیمه‌خشک ایران نیست. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی اثر تلفیقی روش‌های خاک‌ورزی و جهت آن بر کنترل رواناب و هدررفت خاک در شرایط باران‌های شدید طراحی و اجرا شد تا راهکارهای عملی برای کاهش فرسایش در اراضی شیب‌دار ارائه نماید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر کنترل فرسایش آبی در شرایط دیم، به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در شیب ۶ تا ۱۲ درصد طی دو سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه اجرا شد. قبل از اجرای آزمایش، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

غلظت فسفر و پتاسیم قابل جذب در رسوبات اندازه‌گیری شد.

برای اندازه‌گیری رواناب و رسوب ناشی از بارندگی در هر کرت، از پشته‌های خاکی فشرده شده در اطراف کرت‌ها استفاده شد. ابتدا پشته پایین هر کرت با پلاستیک پوشانده شد و رواناب حاصل از بارندگی از طریق لوله‌های پلی‌اتیلن به درون ظرف جمع‌آوری هدایت شد. بعد از هر بار اعمال بارندگی، نمونه‌های رواناب و رسوب جمع شده در داخل ظرف‌ها به وسیله ترازوی دقیق در آزمایشگاه توزین شد. پس از تبخیر کامل رواناب داخل ظرف‌ها، نمونه‌ها مجدد به وسیله ترازوی دقیق در آزمایشگاه توزین شدند. سپس میزان رواناب تولیدی در هر پلات، از اختلاف وزن اولیه نمونه‌ها (وزن رواناب و رسوب تولیدی + وزن ظرف) و وزن ثانویه آنها (وزن رسوب + وزن ظرف) به دست آمد و میزان رسوب تولیدی در هر کرت، از اختلاف وزن ثانویه نمونه‌ها و وزن ظرف به دست آمد. برای تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار R ویرایش 4.5.1 استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش PLSD انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس: نتایج تجزیه واریانس مرکب داده‌ها نشان داد که اثر سال بر رواناب و فسفر قابل جذب خاک فرسایش یافته در سطح ۵ درصد و بر رسوب (RTS)، آهک، ماده آلی و پتاسیم قابل جذب در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود و بر جرم مخصوص ظاهری رسوب اثر معنی‌دار نداشت (جدول ۲). نوع خاک‌ورزی بر رواناب، رسوب، آهک، ماده آلی و پتاسیم قابل جذب در سطح ۱ درصد و بر جرم مخصوص ظاهری در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی‌دار داشت و بر میزان فسفر قابل جذب اثر معنی‌دار نداشت. همچنین برهم‌کنش سال و نوع خاک‌ورزی بر رسوب، جرم مخصوص ظاهری و

خاک مزرعه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های معمول آزمایشگاهی تعیین شد (Dane and Topp, 2020; Sparks et al., 2025) (جدول ۱). تیمارهای آزمایشی شامل پنج روش خاک‌ورزی شامل (۱) کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب (با پنجه‌غازی غلتک‌دار)، (۲) کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب، (۳) خاک‌ورزی مرسوم در جهت شیب (با گاواهن برگردان‌دار و دیسک)، (۴) خاک‌ورزی مرسوم عمود بر شیب و (۵) بدون خاک‌ورزی بودند. در پاییز هر سال، بعد از برداشت گندم سال قبل با کمباین، کرت‌های آزمایشی در ابعاد ۱۰×۱۰ متر جدا شدند و نوع خاک‌ورزی مورد نظر در هر کرت اعمال و بقایای گیاهی آن مدیریت شد. فاصله کرت‌ها از یکدیگر ۵ متر و فاصله تکرارها برای سهولت عملیات خاک‌ورزی ۵ متر در نظر گرفته شد. در تیمار خاک‌ورزی مرسوم، بقایای باقیمانده در سطح خاک با استفاده از گاواهن برگردان‌دار بطور کامل برگردان شده و میزان پوشش گیاهی در سطح خاک به صفر درصد رسید. درصد پوشش بقایای گیاهی در تیمارهای کم‌خاک‌ورزی و بدون خاک‌ورزی با روش ترانسکت خطی اندازه‌گیری شد (Shelton et al., 1993)؛ به طوری که در تیمار کم‌خاک‌ورزی حدود ۳۰ درصد و در تیمار بدون خاک‌ورزی حدود ۴۰ درصد از سطح خاک توسط مجموع بقایای ایستاده و خوابیده پوشش داده شد.

برای ایجاد باران مصنوعی از دستگاه باران‌ساز قابل حمل با شدت ثابت ۴۵ میلی‌متر بر ساعت استفاده شد. باران‌سازی تا دستیابی به رواناب پایدار (حدود ۴۵-۴۰ دقیقه) ادامه یافت و در هر کرت، تنها یک بار در پاییز هر سال زراعی (مجموعاً ۳۰ واقعه باران‌سازی در دو سال) انجام شد تا از تغییر ساختار خاک جلوگیری شود. پس از هر باران‌سازی که در پاییز انجام شد، حجم رواناب و میزان خاک حمل شده توسط رواناب (RTS) اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن، میزان آهک، ماده آلی، وزن مخصوص ظاهری و

میزان آهک در سطح احتمال ۱ درصد و بر میزان رواناب و ماده آلی در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی دار داشت و بر فسفر و پتاسیم قابل جذب اثر معنی دار نداشت. تأثیر نوع خاک‌ورزی بر مقدار و ترکیب مواد منتقل شده همراه با رواناب و رسوب، به‌ویژه فسفر، پتاسیم و ماده آلی، در مطالعات مزروعی نیز گزارش شده است (Bertol et al., 2007).

جدول ۱- برخی ویژگی‌های خاک مزروعی مورد مطالعه طی دو سال زراعی

Table 1- Results of physicochemical soil analyses at the experimental site

سال	Texture	TNV (%)	OM (%)	Ava. P (mg/kg)	Ava. K (mg/kg)
۱۴۰۱-۱۴۰۰	Clay loam	3.57	0.95	3.35	520.50
۱۴۰۲-۱۴۰۱	Clay loam	4.75	0.89	3.42	518.17

جدول ۲- تجزیه واریانس مرکب اثر نوع خاک‌ورزی بر میزان رواناب و خاک حمل شده توسط رواناب (RTS) و بر جرم مخصوص ظاهری (BD)، آهک (TNV)، ماده آلی (OM) و فسفر (Ava. P) و پتاسیم قابل جذب (Ava. K) در خاک حمل شده توسط رواناب در دو سال

Table 2- Combined analysis of variance for the effects of tillage type on runoff volume and runoff-transported soil (RTS), and on bulk density (BD), total neutralizing value (TNV), organic matter (OM), available phosphorus (Ava. P), and available potassium (Ava. K) in runoff-transported soil over two years.

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی	میانگین مربعات Mean Square					
		Ava. K	Ava. P	OM	TNV	BD	RTS
سال	1	68318.1 **	0.296 *	0.076 **	2.64 **	0.0013	2048.8 **
Year							
خاک‌ورزی	4	4148.6 **	0.126	0.145 **	9.41 **	0.0082*	17011.6 **
Tillage							
سال × خاک‌ورزی	4	649.1	0.124	0.009 *	0.94 **	0.0199**	398.2 **
Tillage×Year							
سال (بلوک)	4	123.5	0.065	0.008	0.04	0.0044	31.0
Block (Year)							
خطای کل	16	227.9	0.42	0.003	0.07	0.0020	62.2
Error							
ضریب تغییرات (%)		2.70	6.04	4.56	10.55	4.16	12.53
Coefficient of variation %							7.89

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد می باشد.

مربوط به تیمار خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب (۲۳۳۳ میلی لیتر) بود که به‌طور معنی دار بیشتر از کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب (۲۰۲۸ میلی لیتر) بود و این تیمار نیز رواناب بیشتری نسبت به تیمارهای کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب (۱۶۴۸ میلی لیتر)، خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب (۱۱۹۲ میلی لیتر)

مقایسه میانگین رواناب: در هر دو سال، تیمار خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب بیشترین میزان رواناب را تولید کرد، درحالی که تیمار بدون خاک‌ورزی کمترین میزان رواناب را داشت و به‌عنوان کارآمدترین روش در کنترل رواناب شناسایی شد (شکل ۱). در سال ۱۴۰۲، بیشترین حجم رواناب

همچنین نشان دادند که اثر خاک‌ورزی عمود بر شیب با افزایش شیب زمین کاهش می‌یابد که بیانگر وابستگی کارایی این روش به شرایط توپوگرافی است.

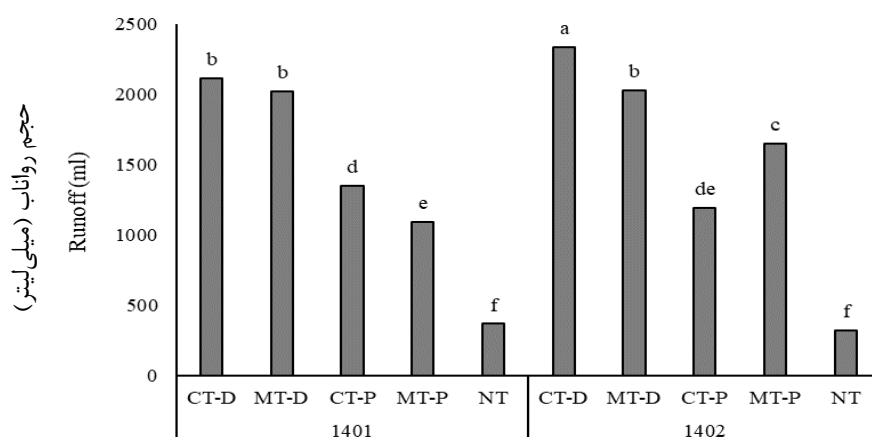
عملکرد پایدار و برتر تیمار بدون خاک‌ورزی در هر دو سال، مزیت این سیستم را در کاهش رواناب در شرایط آزمایش حاضر نشان می‌دهد. این نتیجه با مطالعات انجام‌شده درباره خاک‌ورزی حفاظتی نیز همخوان است. برای مثال، ملا و همکاران (Molla *et al.*, 2022) در آزمایشی دو ساله در یونان نشان دادند که ترکیب بدون خاک‌ورزی و خاک‌ورزی در امتداد خطوط تراز توانست رواناب را در هر دو سال به میزان ۸۵ درصد نسبت به تیمار بدون خاک‌ورزی فاقد پوشش گیاهی کاهش دهد. نتایج آنان نیز نشان می‌دهد که اثر خاک‌ورزی حفاظتی بر رواناب به تعامل میان سیستم خاک‌ورزی، جهت مدیریت سطح زمین و پوشش گیاهی وابسته است.

مقایسه میانگین رسوب: الگوی تغییرات وزن رسوب در تیمارهای مختلف خاک‌ورزی مشابه حجم رواناب بود، به‌طوری‌که تیمار خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب که بیشترین رواناب را تولید کرد، به‌طور متناظر بالاترین میزان رسوب را نیز نشان داد (شکل ۲). در سال ۱۴۰۱، بیشترین وزن رسوب مربوط به تیمار خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب (۱۲۷ گرم) و کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب (۶۴ گرم) بود که به‌طور معنی‌دار بیشتر از تیمارهای خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب (۴۶ گرم)، کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب (۲۷ گرم) و بدون خاک‌ورزی (۱۰ گرم) بودند. در سال ۱۴۰۲ نیز الگوی مشابهی مشاهده شد، به‌طوری‌که خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب (۱۶۹ گرم) و کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب (۸۴ گرم) بیشترین و بدون خاک‌ورزی (۱۲ گرم) کمترین وزن رسوب را داشتند؛ با این تفاوت که در سال ۱۴۰۲، خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب (۳۱ گرم) رسوب

و بدون خاک‌ورزی (۳۲۱ میلی‌لیتر) داشت. در سال ۱۴۰۱ نیز الگوی مشابهی مشاهده شد، به‌طوری‌که خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب (۲۱۱۲ میلی‌لیتر) و کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب (۲۰۲۳ میلی‌لیتر) بیشترین و بدون خاک‌ورزی (۳۷۹ میلی‌لیتر) کمترین رواناب را داشتند؛ با این تفاوت که در این سال، خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب (۱۳۴۹ میلی‌لیتر) رواناب بیشتری نسبت به کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب (۱۰۹۳ میلی‌لیتر) تولید کرد. درحالی‌که در سال قبل این رابطه معکوس بود. روش‌های خاک‌ورزی عمود بر شیب در هر دو سال نسبت به روش‌های جهت‌شیب، رواناب کمتری داشتند که اهمیت مدیریت جهت خاک‌ورزی را در اراضی شیب‌دار نشان می‌دهد. این الگو با نتایج کوینتون و کات (Quinton and Catt, 2004) همخوانی دارد؛ آنان در یک آزمایش بلندمدت نشان دادند که میانگین رواناب در خاک‌ورزی در جهت شیب (۳۲/۱ میلی‌متر) به‌طور معنی‌داری بیشتر از خاک‌ورزی عمود بر شیب (۸۲/۰ میلی‌متر) بود. همچنین، ترکیب خاک‌ورزی حداقل و جهت عمود بر شیب با میانگین رواناب ۵۸/۰ میلی‌متر، کمترین مقدار رواناب را در میان تیمارهای مورد بررسی ایجاد کرد.

اگرچه کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب در سال اول عملکرد بهتری نسبت به خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب داشت، اما در سال دوم این برتری از بین رفت. چنین تفاوتی میان سال‌ها می‌تواند به تغییر شرایط رطوبتی، وضعیت سطح خاک و تغییرات پوشش و ساختمان خاک در طول فصل‌های زراعی مربوط باشد. واعظی و همکاران (Vaezi *et al.*, 2021) نیز در مطالعه‌ای روی گندم دیم در اراضی شیب‌دار استان زنجان نشان دادند که جهت خاک‌ورزی بر تولید رواناب اثر قابل‌توجهی دارد؛ در این مطالعه، رواناب در خاک‌ورزی عمود بر خطوط تراز حدود ۴/۶ برابر کمتر از خاک‌ورزی در جهت شیب بود. آنان

کمتری نسبت به کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب (۶۰ گرم) تولید کرد، در حالی که در سال ۱۴۰۱ این



شکل ۱- برهم‌کنش اثر سال و نوع خاک‌ورزی بر حجم رواناب (CT-D: خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب، MT-D: کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب، CT-P: خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب، MT-P: کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب، NT: بدون خاک‌ورزی)

Figure 1. Interaction between year and tillage type on runoff volume (CT-D: conventional tillage along the slope; MT-D: minimum tillage along the slope; CT-P: conventional tillage perpendicular to the slope; MT-P: minimum tillage perpendicular to the slope; NT: no-tillage).

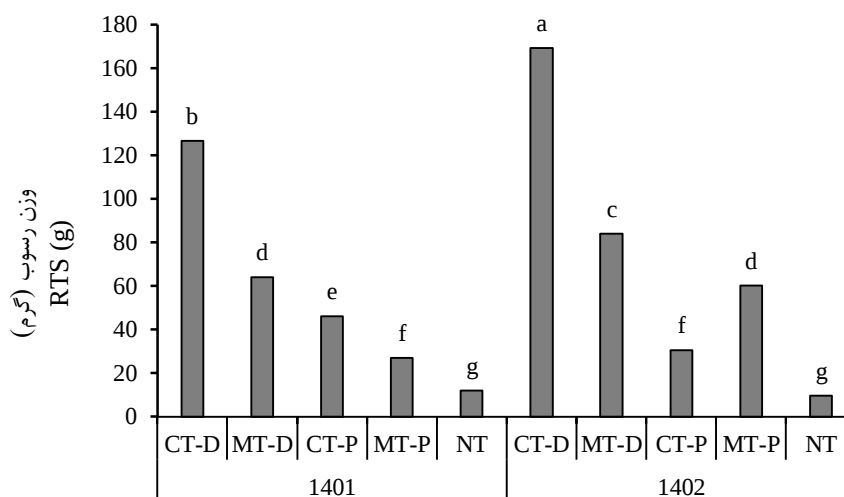
۳۳ درصدی رسوب در سال دوم). در مقابل، کاهش رسوب در تیمارهای عمود بر شیب را می‌توان به کاهش سرعت و پیوستگی جریان سطحی و افزایش فرصت ته‌نشینی ذرات در پشت پستی‌وبلندی‌های ایجادشده در سطح خاک نسبت داد. این تفسیر با نتایج کوتی و ایوموجی (Kuti and Ewemoje, 2021) نیز همخوانی دارد؛ وی نشان داد که خاک‌ورزی موازی با شیب اثر بیشتری بر تولید رسوب دارد و ایجاد پشته‌ها در جهت شیب می‌تواند مسیر مناسبی برای انتقال جریان و رسوب فراهم کند. از دیدگاه سازوکارهای فرسایش، خاک‌ورزی در جهت شیب با ایجاد شیارهای موازی با جهت شیب، پیوستگی هیدرولیکی بیشتری برای حرکت آب و انتقال ذرات فراهم می‌کند، در حالی که خاک‌ورزی عمود بر شیب با ایجاد ناهمواری‌های عرضی، جریان را کند کرده و شرایط مناسب‌تری برای نفوذ و ته‌نشینی رسوب ایجاد می‌کند. شواهد تجربی نیز نشان می‌دهد که جهت کشت و خاک‌ورزی عمود بر

رابطه معکوس بود (۴۶ در مقابل ۲۷ گرم). این الگوی همراهی رواناب و رسوب با نقش جریان سطحی در انتقال ذرات خاک سازگار است. مطالعات مزرعه‌ای نشان داده‌اند که جهت ایجاد شیارها و ناهمواری‌های ناشی از خاک‌ورزی می‌تواند مسیر و تمرکز جریان سطحی را تغییر دهد و در نتیجه بر انتقال رسوب اثر بگذارد. برای نمونه، وچا و همکاران (Wacha et al., 2020) نشان دادند که در خاک‌ورزی موازی با جهت شیب، شیارهای ناشی از عملیات خاک‌ورزی موجب تمرکز جریان و افزایش ضریب رواناب شدند، در حالی که شیارهای ایجادشده در امتداد خطوط تراز مانند موانع کوچک در برابر جریان عمل کردند؛ در مطالعه آنان، نرخ فرسایش در تیمار خطوط تراز حدود ۹۷ درصد کمتر از تیمار موازی با شیب بود.

روش خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب نه‌تنها بیشترین مقدار رسوب را تولید کرد، بلکه بیشترین حساسیت به تغییرات سالانه را نیز نشان داد (افزایش

معنی‌دار رسوب، بیش از ۹۰ درصد نسبت به خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب، را در هر دو سال نشان داد، به‌عنوان برترین روش در کنترل فرسایش معرفی می‌شود. این نتیجه با مطالعات انجام‌شده درباره خاک‌ورزی حفاظتی سازگار است. برای مثال، ملا و همکاران (Molla et al., 2022) در یک آزمایش دوساله تحت بارندگی طبیعی نشان دادند که تیمار بدون خاک‌ورزی همراه با کشت عمود بر خطوط شیب توانست رواناب را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد و هم‌زمان هدررفت عناصر غذایی و خاک را محدود کند.

شیب می‌تواند هدررفت خاک را به میزان قابل‌توجهی نسبت به عملیات در جهت شیب کاهش دهد. در یک آزمایش باران شبیه‌سازی‌شده، جاسا و همکاران (Jasa et al., 1986) گزارش کردند که میانگین هدررفت خاک در عملیات انجام‌شده روی خطوط تراز ۷۴ درصد کمتر از عملیات در جهت بالا و پایین شیب بود. بنابراین، در اراضی شیب‌دار، تغییر جهت خاک‌ورزی از جهت شیب به امتداد خطوط تراز می‌تواند یکی از اقدامات مؤثر برای کاهش انتقال رسوب باشد. با این حال، برای دستیابی به نتایج پایدارتر، روش بدون خاک‌ورزی که در مطالعه حاضر کاهش



شکل ۲- برهمکنش اثر سال و نوع خاک‌ورزی بر وزن رسوب (RTS) (CT-D: خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب، MT-D: کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب، CT-P: خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب، MT-P: کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب، NT: بدون خاک‌ورزی)

Figure 2. Interaction between year and tillage type on runoff-transported soil (RTS) (CT-D: conventional tillage along the slope; MT-D: minimum tillage along the slope; CT-P: conventional tillage perpendicular to the slope; MT-P: minimum tillage perpendicular to the slope; NT: no-tillage).

با سایر تیمارها داشت؛ در حالی که کمترین مقدار مربوط به تیمار بدون خاک‌ورزی (۱/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود. در سال ۱۴۰۲ نیز الگوی مشابهی مشاهده شد، به‌طوری‌که تیمار خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب با مقدار ۱/۱۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب بیشترین و تیمار بدون خاک‌ورزی با مقدار ۰/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب کمترین جرم

مقایسه میانگین جرم مخصوص ظاهری: نتایج مقایسه میانگین جرم مخصوص ظاهری رسوبات تولیدشده نشان داد که در سال ۱۴۰۱، بیشترین مقدار جرم مخصوص ظاهری رسوبات در تیمار خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب (۱/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری

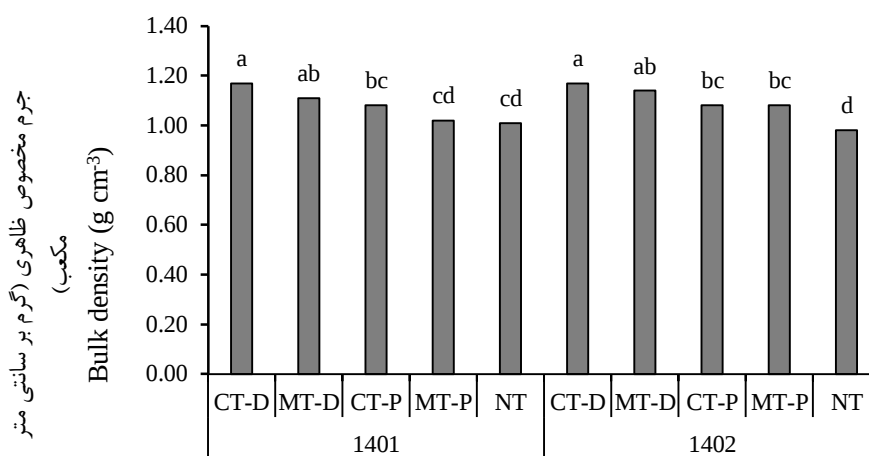
مخصوص ظاهری را داشتند (شکل ۳). در هر دو سال، جرم مخصوص ظاهری رسوبات در سیستم بدون خاک‌ورزی به‌طور معنی‌دار کمتر از کم‌خاک‌ورزی و در کم‌خاک‌ورزی کمتر از خاک‌ورزی سنتی بود. همچنین در هر دو نوع خاک‌ورزی، روش‌های عمود بر شیب جرم مخصوص ظاهری کمتری نسبت به روش‌های جهت شیب تولید کردند و این اختلاف در هر دو سال معنی‌دار بود.

تفاوت مشاهده‌شده در جرم مخصوص ظاهری رسوبات را می‌توان در ارتباط با تفاوت در میزان آشفته‌گی خاک، پایداری خاکدانه‌ها و وضعیت ماده آلی در سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی تفسیر کرد. عملیات خاک‌ورزی با برهم‌زدن ساختمان خاک می‌تواند توزیع منافذ و پایداری خاکدانه‌ها را تغییر دهد، در حالی که در سامانه‌های حفاظتی، حفظ بقایای گیاهی و کاهش آشفته‌گی خاک به حفظ ساختار خاک و پایداری بیشتر خاکدانه‌ها کمک می‌کند. حسین و همکاران (Hussain *et al.*, 1998) در یک آزمایش هشت‌ساله روی خاک فرسایش‌یافته و شیب‌دار نشان دادند که نظام خاک‌ورزی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله جرم مخصوص ظاهری و تخلخل اثر می‌گذارد و تفاوت‌های مشاهده‌شده با وضعیت فرسایش‌یافتگی و حفظ بقایای گیاهی ارتباط دارد. با این حال، نتایج آنان نشان داد که اثر بدون خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری همیشه یکسان نیست و در برخی شرایط می‌تواند به افزایش جرم مخصوص ظاهری لایه سطحی نیز منجر شود؛ بنابراین تفسیر جرم مخصوص ظاهری باید با توجه به نوع خاک، سابقه مدیریتی و شرایط فرسایش انجام شود (Hussain *et al.*, 1998). از سوی دیگر، لوگسدون و کارلین (Logsdon and Karlen, 2004) جرم مخصوص ظاهری را یکی از شاخص‌های مهم برای ارزیابی تغییرات فیزیکی خاک در جریان گذار از خاک‌ورزی

مرسوم به بدون خاک‌ورزی معرفی کردند و نشان دادند که نظام خاک‌ورزی می‌تواند از طریق تغییر وضعیت تراکم و ساختار خاک بر ویژگی‌های فیزیکی آن اثر بگذارد. از این رو، کمتر بودن جرم مخصوص ظاهری رسوبات در تیمارهای حفاظتی مطالعه حاضر می‌تواند با تفاوت در ساختار خاک، میزان پایداری خاکدانه‌ها و ترکیب ذرات جداشده ارتباط داشته باشد (Logsdon and Karlen, 2004). بنابراین، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که روش خاک‌ورزی نه‌تنها بر مقدار رسوب تولیدشده، بلکه بر برخی ویژگی‌های فیزیکی رسوب نیز اثرگذار است. با این حال، نمی‌توان صرفاً بر اساس جرم مخصوص ظاهری کمتر نتیجه گرفت که رسوب تولیدشده در تیمارهای حفاظتی الزاماً سرعت ته‌نشینی کمتری دارد یا ظرفیت نگهداری آب بیشتری خواهد داشت؛ زیرا این ویژگی‌ها علاوه بر جرم مخصوص ظاهری به توزیع اندازه ذرات، درصد رس و سیلت، پایداری خاکدانه‌ها و ویژگی‌های تخلخل رسوب نیز وابسته‌اند. بنابراین، برای اثبات چنین نتیجه‌ای، اندازه‌گیری مستقیم بافت رسوب، توزیع اندازه ذرات و ویژگی‌های هیدرولیکی آن نیز ضروری است.

مقایسه میانگین ماده آلی: در هر دو سال، خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب با بیشترین مقدار ماده آلی در رسوب (۱/۴۳ درصد در ۱۴۰۱ و ۱/۰۵ درصد در ۱۴۰۲) همراه بود (شکل ۴) که می‌تواند با فرسایش انتخابی ذرات ریز و غنی از کربن آلی مرتبط باشد. پژوهش‌های انجام‌شده نشان داده‌اند که رسوب حاصل از فرسایش آبی معمولاً نسبت به خاک اولیه از نظر کربن آلی غنی‌شده است، زیرا ذرات ریز و مواد آلی سطح خاک به‌صورت انتخابی جدا و همراه جریان رواناب منتقل می‌شوند (Nie *et al.*, 2014). در مقابل، تیمار بدون خاک‌ورزی کمترین میزان ماده آلی رسوب را نشان داد (۱/۰۹)

درصد در ۱۴۰۱ و ۱/۰۰ درصد در ۱۴۰۲). این نتیجه را می‌توان با کاهش مقدار رسوب تولیدشده



شکل ۳- برهمکنش اثر سال و نوع خاک‌ورزی بر جرم مخصوص ظاهری رسوب (CT-D: خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب، MT-D: کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب، CT-P: خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب، MT-P: کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب، NT: بدون خاک‌ورزی)

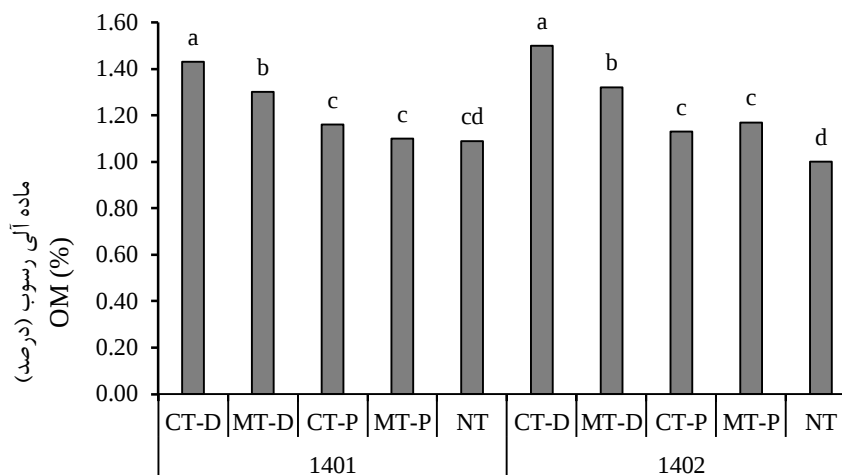
Figure 3. Interaction between year and tillage type on the bulk density of runoff-transported sediment (CT-D: conventional tillage along the slope; MT-D: minimum tillage along the slope; CT-P: conventional tillage perpendicular to the slope; MT-P: minimum tillage perpendicular to the slope; NT: no-tillage).

فرآیندهای انتخابی فرسایش قرار می‌گیرد. در مطالعه آنان، اگرچه غلظت و ضریب غنی‌شدگی کربن آلی در برخی شرایط در سامانه کم‌خاک‌ورزی بیشتر بود، مقدار کل کربن آلی منتقل‌شده همراه رسوب در خاک‌ورزی سنتی بیشتر بود که به هدررفت بالاتر خاک و رواناب در این سامانه نسبت داده شد. این الگو با نتایج مربوط به میزان رسوب و رواناب در مطالعه حاضر همخوانی دارد و نشان می‌دهد که روش خاک‌ورزی می‌تواند نه‌تنها بر مقدار فرسایش، بلکه بر ترکیب و غنی‌شدگی مواد آلی رسوب نیز اثر بگذارد. از این رو، کاهش فرسایش در سامانه‌های حفاظتی می‌تواند به کاهش انتقال کربن آلی از سطح خاک کمک کند؛ هرچند برای اثبات کاهش هدررفت واقعی ماده آلی باید غلظت ماده آلی در رسوب در جرم کل رسوب ضرب و بار ماده آلی از دست‌رفته محاسبه شود. مطالعات بلندمدت نیز نشان داده‌اند که کاهش شدت خاک‌ورزی و استفاده

در این تیمار و تفاوت در فرآیند انتخاب و انتقال ذرات تفسیر کرد در واقع، کاهش فرسایش در سامانه‌های بدون خاک‌ورزی الزاماً به معنی کاهش غلظت ماده آلی در رسوب نیست؛ زیرا رسوب حاصل از فرسایش می‌تواند حتی در شرایط کاهش هدررفت کل خاک، نسبت به خاک اولیه از کربن آلی غنی‌تر باشد (Nie et al., 2014).

روش‌های خاک‌ورزی عمود بر شیب، شامل خاک‌ورزی سنتی و کم‌خاک‌ورزی، با مقادیر متوسط ماده آلی (۱/۱۰ تا ۱/۱۷ درصد) وضعیت بینابینی داشتند. افزایش ماده آلی رسوبات در سال دوم در تیمارهای خاک‌ورزی سنتی، به‌ویژه در جهت شیب، می‌تواند نشان‌دهنده افزایش انتقال ذرات سطحی غنی از ماده آلی در اثر افزایش رواناب و هدررفت خاک باشد. اندال و همکاران (Endale et al., 2017) نیز نشان دادند که غلظت کربن آلی و نیتروژن آلی در رسوب به‌شدت تحت‌تأثیر نوع خاک‌ورزی و

از بدون خاک‌ورزی می‌تواند هدررفت کربن آلی همراه رسوب را کاهش دهد (Chowaniak *et al.*, 2020).



شکل ۴- برهمکنش اثر سال و نوع خاک‌ورزی بر ماده آلی رسوب (CT-D: خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب، MT-D: کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب، CT-P: خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب، MT-P: کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب، NT: بدون خاک‌ورزی)

Figure 4. Interaction between year and tillage type on the organic matter content of runoff-transported sediment (CT-D: conventional tillage along the slope; MT-D: minimum tillage along the slope; CT-P: conventional tillage perpendicular to the slope; MT-P: minimum tillage perpendicular to the slope; NT: no-tillage).

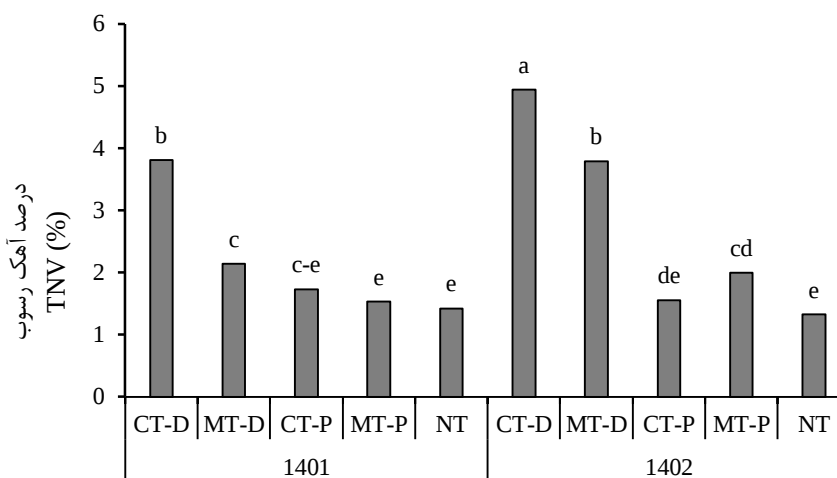
پیش‌بینی بار رسوب بودند. مورینو و همکاران (Moreno *et al.*, 2006) در یک مطالعه بلندمدت در شرایط نیمه‌خشک مدیترانه‌ای، نشان دادند که مقدار از دست‌رفت کربنات کلسیم تحت خاک‌ورزی سنتی به‌طور معنی‌داری بیشتر از خاک‌ورزی حفاظتی بود. آنان همچنین افزایش تجمع کربن آلی و برخی عناصر غذایی در لایه سطحی خاک تحت خاک‌ورزی حفاظتی را گزارش کردند که به کاهش آشفستگی خاک و حفظ بقایای گیاهی نسبت داده شد.

تیمار بدون خاک‌ورزی با کمترین میزان آهک در رسوب همراه بود (۱/۴۲ درصد در ۱۴۰۱ و ۱/۳۲ درصد در ۱۴۰۲). این نتیجه با کاهش مقدار خاک فرسایش‌یافته در این تیمار سازگار است و می‌تواند نشان‌دهنده کاهش جدایش و انتقال ذرات غنی از کربنات از سطح خاک باشد. روش‌های خاک‌ورزی

مقایسه میانگین آهک: در هر دو سال، خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب با بیشترین میزان آهک در رسوبات همراه بود (۳/۸۱ درصد در ۱۴۰۱ و ۴/۹۴ درصد در ۱۴۰۲) (شکل ۵) که می‌تواند ناشی از فرسایش انتخابی ذرات غنی از کربنات کلسیم و انتقال آنها از بخش‌های سطحی و در معرض فرسایش خاک باشد. از آنجا که کربنات کلسیم یکی از اجزای مهم خاک‌های مناطق نیمه‌خشک است و مقدار آن می‌تواند با ویژگی‌های رسوب و فرسایش‌پذیری خاک ارتباط داشته باشد، تغییر در ترکیب رسوب می‌تواند اطلاعاتی درباره منشأ و فرآیند انتقال ذرات فراهم کند. مظلوم و همکاران (Mazloom *et al.*, 2016) در مطالعه‌ای در شمال‌شرق ایران نشان دادند که کربنات کلسیم، همراه با ویژگی‌هایی مانند سیلت، رس و شاخص پایداری ساختمان خاک، از متغیرهای مؤثر در

آلی و مقدار کل رسوب، نشانه‌ای از کاهش انتقال انتخابی برخی اجزای خاک دانست. شواهد حاصل از آزمایش‌های بلندمدت نشان می‌دهد که خاک‌ورزی حفاظتی می‌تواند نسبت به خاک‌ورزی سنتی، از کاهش کربنات کلسیم و تخریب ویژگی‌های سطح خاک بکاهد؛ در مطالعه مورینو و همکاران (Moreno *et al.*, 2006) کاهش CaCO_3 در خاک‌ورزی سنتی بیشتر از خاک‌ورزی حفاظتی بود.

عمود بر شیب، با مقادیر متوسط آهک (۱/۵۳ تا ۱/۹۹ درصد)، وضعیت بینابینی داشتند؛ با این حال، تفاوت معنی‌داری بین خاک‌ورزی سنتی و کم‌خاک‌ورزی در این جهت مشاهده نشد. در مجموع، نتایج حاضر نشان می‌دهد که نوع و جهت خاک‌ورزی می‌تواند علاوه بر مقدار رسوب، ترکیب شیمیایی آن را نیز تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین، کاهش محتوای آهک در رسوبات سیستم‌های حفاظتی را می‌توان در کنار کاهش ماده



شکل ۵- برهمکنش اثر سال و نوع خاک‌ورزی بر میزان آهک رسوب (CT-D: خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب، MT-D: کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب، CT-P: خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب، MT-P: کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب، NT: بدون خاک‌ورزی)

Figure 5. Interaction between year and tillage type on the total neutralizing value (TNV) of runoff-transported sediment (CT-D: conventional tillage along the slope; MT-D: minimum tillage along the slope; CT-P: conventional tillage perpendicular to the slope; MT-P: minimum tillage perpendicular to the slope; NT: no-tillage).

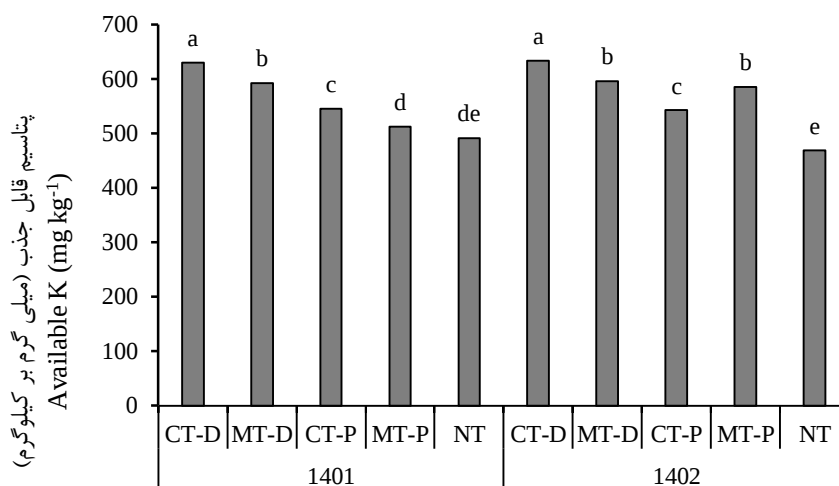
رسوب با اندازه ذرات آن رابطه دارد. آنان همچنین نشان دادند که در خاک‌ورزی مرسوم، به دلیل مقدار بیشتر خاک ازدست‌رفته، مجموع هدررفت پتاسیم می‌تواند افزایش یابد. ثبات نسبی مقادیر پتاسیم در سال دوم برای تیمار خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب می‌تواند بیانگر تداوم فرآیندهای فرسایشی و انتقال ذرات حاوی این عنصر باشد. در مقابل، تیمار بدون خاک‌ورزی کمترین میزان پتاسیم را نشان داد که در شرایط مطالعه حاضر با کاهش مقدار رواناب و رسوب تولیدی سازگار است. با این حال، کاهش

مقایسه میانگین پتاسیم قابل جذب: در هر دو سال، خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب با بیشترین میزان پتاسیم همراه بود (شکل ۶) که می‌تواند نشان‌دهنده انتقال انتخابی ذرات حاوی پتاسیم در اثر افزایش رواناب و هدررفت خاک در این سیستم باشد. اهمیت رسوب در انتقال پتاسیم نیز در مطالعات میدانی تأیید شده است؛ برتول و همکاران (Bertol *et al.*, 2007) نشان دادند که غلظت پتاسیم در رسوبات رواناب تحت نظام‌های مختلف خاک‌ورزی تفاوت دارد و مقدار پتاسیم موجود در

هدررفت پتاسیم به شرایط هیدرولوژیکی و نوع خاک‌ورزی وابسته است و رواناب سطحی یکی از مسیرهای مهم انتقال پتاسیم از اراضی کشاورزی است. در مطالعه آنان، اثر خاک‌ورزی بر بار پتاسیم در رواناب در سال‌های مختلف یکسان نبود که اهمیت شرایط سالانه را در تفسیر هدررفت عناصر غذایی نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که خاک‌ورزی در جهت شیب در شرایط مطالعه حاضر نه تنها با افزایش مقدار رواناب و رسوب همراه بوده، بلکه می‌تواند انتقال انتخابی عناصر غذایی مانند پتاسیم را نیز افزایش دهد. در مقابل، عملکرد بهتر تیمار بدون خاک‌ورزی در کاهش رواناب و رسوب، ظرفیت این سیستم را برای کاهش هدررفت کل پتاسیم همراه با فرسایش نشان می‌دهد. در مطالعه حاضر، اگر مقدار پتاسیم موجود در رسوب و جرم رسوب تولیدی هر تیمار به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شود، می‌توان میزان واقعی هدررفت پتاسیم را بر حسب جرم در واحد سطح محاسبه و مقایسه کرد. این رویکرد از نظر تفسیر حاصلخیزی خاک دقیق‌تر از مقایسه صرف درصد یا غلظت پتاسیم در رسوب است.

غلظت پتاسیم در رسوب را نباید به تنهایی معادل کاهش هدررفت کل پتاسیم دانست؛ زیرا هدررفت عنصر تابعی از غلظت آن در رواناب یا رسوب و مقدار کل رواناب یا رسوب است. برای نمونه، برتول و همکاران (Bertol et al., 2007) نشان دادند که سامانه‌های بدون خاک‌ورزی می‌توانند غلظت‌های بیشتری از فسفر و پتاسیم را در لایه سطحی خاک و رسوبات داشته باشند، اما به دلیل تفاوت در مقدار خاک و رواناب ازدست‌رفته، بار کل عناصر می‌تواند روند متفاوتی داشته باشد.

روش‌های خاک‌ورزی عمود بر شیب در سال اول کاهش معنی‌داری در هدررفت پتاسیم نشان دادند، اما در سال دوم، کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب به سطح تیمارهای جهت شیب نزدیک شد. این تفاوت بین سال‌ها می‌تواند تحت تأثیر تغییرات مقدار و شدت رواناب، وضعیت رطوبتی خاک و مقدار رسوب تولیدشده قرار گرفته باشد و بدون اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های ساختمان خاک نمی‌توان آن را صرفاً به تخریب تدریجی ساختمان خاک نسبت داد. پیسانی و همکاران (Pisani et al., 2020) نیز در یک مطالعه چندساله نشان دادند که مسیر و مقدار



شکل ۶- برهمکنش اثر سال و نوع خاک‌ورزی بر میزان پتاسیم قابل جذب در رسوب (CT-D: خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب، MT-D: کم‌خاک‌ورزی در جهت شیب، CT-P: خاک‌ورزی سنتی عمود بر شیب، MT-P: کم‌خاک‌ورزی عمود بر شیب، NT: بدون خاک‌ورزی)

Figure 6. Interaction between year and tillage type on available potassium content in runoff-transported sediment (CT-D: conventional tillage along the slope; MT-D: minimum tillage along

the slope; CT-P: conventional tillage perpendicular to the slope; MT-P: minimum tillage perpendicular to the slope; NT: no-tillage).

نتیجه‌گیری کلی

خاک‌ورزی علاوه بر مقدار فرسایش، بر ترکیب رسوب و انتقال برخی از اجزای خاک نیز اثر می‌گذارد. خاک‌ورزی عمود بر شیب نیز در مقایسه با خاک‌ورزی در جهت شیب موجب کاهش رواناب و رسوب شد، هرچند کارایی آن بین سال‌ها و تیمارها یکسان نبود. بر این اساس، در شرایط این مطالعه، کاهش برهم خوردگی خاک، حفظ بقایای گیاهی و استفاده از سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی، به‌ویژه بدون خاک‌ورزی، در کنار مدیریت جهت عملیات نسبت به شیب، رویکرد مناسب‌تری برای کاهش رواناب و فرسایش و حفاظت از کیفیت خاک در اراضی شیب‌دار دیم به شمار می‌آید.

نتایج این مطالعه نشان داد که نوع و جهت خاک‌ورزی تأثیر معنی‌داری بر رواناب، فرسایش خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی رسوبات تولیدشده در اراضی شیب‌دار دارد؛ به‌طوری‌که خاک‌ورزی سنتی در جهت شیب در هر دو سال بیشترین رواناب و رسوب را ایجاد کرد، در حالی‌که بدون خاک‌ورزی با کمترین مقادیر این دو شاخص، پایدارترین عملکرد را در کنترل رواناب و فرسایش نشان داد. همچنین، تفاوت بین تیمارها در ویژگی‌هایی مانند جرم مخصوص ظاهری، ماده آلی، آهک و پتاسیم رسوبات نشان داد که نظام

منابع

- Bertol I, Engel FL, Mafra AL, Bertol OJ, Ritter SR. 2007. Phosphorus, potassium and organic carbon concentrations in runoff water and sediments under different soil tillage systems during soybean growth. *Soil and Tillage Research* 94(1): 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.008>
- Bhatt R, Khera KL. 2006. Effect of tillage and mode of straw mulch application on soil erosion in the submontaneous tract of Punjab, India. *Soil and Tillage Research* 88(1-2): 107-115. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.05.004>
- Chowaniak M, Głab T, Klima K, Niemiec M, Zaleski T, Zuzek D. 2020. Effect of tillage and crop management on runoff, soil erosion and organic carbon loss. *Soil Use and Management* 36: 581-593. <https://doi.org/10.1111/sum.12606>
- Dane JH, Topp CG. (Eds.). 2020. *Methods of soil analysis, Part 4: Physical Methods*. John Wiley & Sons.
- Endale DM, Potter TL, Strickland TC, Bosch DD. 2017. Sediment-bound total organic carbon and total organic nitrogen losses from conventional and strip tillage cropping systems. *Soil and Tillage Research* 171: 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.04.004>
- Gyssels G, Poesen J, Bochet E, Li Y. 2005. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review. *Progress in Physical Geography* 29(2): 189-217.
- Hussain I, Olson KR, Siemens JC. 1998. Long-term tillage effects on physical properties of eroded soil. *Soil Science* 163(12): 970-981. <https://doi.org/10.1097/00010694-199812000-00007>
- Iwara AI. 2014. Evaluation of the variability in runoff and sediment loss in successional fallow vegetation of Southern Nigeria. *Soil & Water Research* 9(2): 77.
- Jasa PJ, Dickey EC, Shelton DP. 1986. Soil erosion from tillage and planting systems used in soybean residue: Part II—Influences of row direction. *Transactions of the ASAE* 29(3): 761-766.
- Jin K, Cornelis WM, Gabriëls D, Schiettecatte W, De Neve S, Lu J, Buysse T, Wu H, Cai D, Jin J, Harmann R. 2008. Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation. *CATENA* 75(2): 191-199. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.06.002>
- Kuti IA, Ewemoje TA. 2021. Effects of tillage direction on sediment yield in the Chanchaga Basin.

- Lin J, Zhu G, Wei J, Jiang F, Wang MK, Huang Y. 2018. Mulching effects on erosion from steep slopes and sediment particle size distributions of gully colluvial deposits. *CATENA* 160: 57-67.
- Liu F, Zhang GH, Sun L, Wang H. 2016. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms* 41(7): 875-883.
- Liu YJ, Wang TW, Cai CF, Li ZX, Cheng DB. 2014. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Science of the Total Environment* 485: 93-102.
- Logsdon SD, Karlen DL. 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research* 78(2): 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.003>
- Mazlloom U, Emami H, Haghnia GH. 2016. Prediction the soil erodibility and sediments load using soil attributes. *Eurasian Journal of Soil Science* 5(3): 201-208. <https://doi.org/10.18393/ejss.2016.3.201-208>
- Molla A, Skoufogianni E, Lolas A, Skordas K. 2022. The impact of different cultivation practices on surface runoff, soil and nutrient losses in a rotational system of legume-cereal and sunflower. *Plants* 11(24): 3513. <https://doi.org/10.3390/plants11243513>
- Moreno F, Murillo JM, Pelegrín F, Girón IF. 2006. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO_3 . *Soil and Tillage Research* 85(1-2): 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.12.001>
- Nie X, Li Z, Huang J, Liu L, Xiao H, Liu C, Zeng G. 2014. Soil organic carbon loss and selective transportation under field simulated rainfall events. *PLOS ONE* 9(8): e105927. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105927>
- Pisani O, Liebert D, Bosch DD, Coffin AW, Endale DM, Potter TL, Strickland TC. 2020. Element losses from fields in conventional and conservation tillage in the Atlantic Coastal Plain, Georgia, United States. *Journal of Soil and Water Conservation* 75(3): 376-386. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.3.376>
- Quinton JN, Catt JA. 2004. The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yield in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England. *Soil Use and Management* 20(3): 343-349. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00379.x>
- Seitz S, Goebes P, Loaiza Puerta V, Pujol Pereira EI, Wittwer R, Six J, van der Heijden MGA, Scholten T. 2019. Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. *Agronomy for Sustainable Development* 39: 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0545-z>
- Shen N, Wang Z, Guo Q, Cao W, Yin Z, Yan Q, Shan Z. 2017. Quantifying the contribution of sediment load to soil detachment rate by sediment-laden rill flow. *Soil Science Society of America Journal* 81(6): 1526-1536. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.03.0092>
- Shelton DP, Kanable R, Jasa PJ. 1993. Estimating percent residue cover using the line-transect method. University of Nebraska-Lincoln, Institute of Agriculture and Natural Resources, NebGuide G93-1133.
- Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH. (Eds.). 2020. *Methods of soil analysis, Part 3: Chemical Methods*. John Wiley & Sons.
- Vaezi AR, Vatani A. 2015. Determining rill erodibility in some soils in Zanjan Province under simulated rainfall. *Journal of Water and Soil Science* 19(71): 59-68. (In Persian)
- Vaezi A, Zarrinabadi E, Salehi Y. 2021. Rain water use efficiency of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by tillage direction in slope. *Journal of Water and Soil Science* 25(3): 289-304. (In Persian)
- Wacha KM, St. John SM, others. 2020. The impact of tillage row orientation on physical and chemical sediment enrichment. *Agrosystems, Geosciences & Environment*. <https://doi.org/10.1002/agg2.20007>.



Evaluation of the Effectiveness of Different Tillage Methods in Erosion Control and Soil Quality Conservation in Sloping Dryland condition

Hadi Khorsandy^{1*}, Yaser Azimzadeh¹, Ramin Lotfi¹, Mahdi Rahmati², Mahdi Kooselou¹

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

2- University of Maragheh, Maragheh, Iran.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Water erosion poses a fundamental challenge to sustainable agriculture and threatens the stability of natural ecosystems. Vegetation cover and land management play an important role in controlling water induced soil erosion. Soil erosion by water is a major challenge to sustainable agriculture and a serious threat to the stability of natural ecosystems.

Methodology: This study was conducted to evaluate the effects of different tillage methods on controlling water erosion, using a randomized complete block design with three replications on slopes of 6–12% over two cropping years (2022–2023) at the Maragheh Dryland Agricultural Research Station, Iran. The treatments included five tillage systems: (1) reduced tillage along the slope (using a roller-chisel plough), (2) reduced tillage perpendicular to the slope, (3) conventional tillage along the slope (moldboard plough + disc), (4) conventional tillage perpendicular to the slope, and (5) no-tillage. Rainfall was simulated at a constant intensity of 45 mm h⁻¹, and runoff volume, sediment weight, sediment bulk density, and the concentrations of available phosphorus and potassium in the sediments were measured.

Research findings: The results showed that conventional tillage along the slope produced the highest runoff (2222 ml) and sediment (148 g), while no-tillage resulted in the lowest values (350 ml and 11 g, respectively). Tillage perpendicular to the slope significantly reduced runoff and sediment (ranging from 1142 to 1498 ml and 29 to 53 g, respectively); however, their efficiency declined in the second year, except for conventional tillage perpendicular to the slope, which performed better in the second year. Sediment bulk density was highest under conventional tillage along the slope (1.17 g cm⁻³) and lowest under no-tillage (1.01 g cm⁻³). Likewise, available potassium loss was significantly higher under conventional tillage along the slope (121 mg kg⁻¹) compared to no-tillage (46 mg kg⁻¹). Overall, no-tillage was identified as the most effective practice for reducing runoff, sediment, and nutrient loss, while tillage perpendicular to the slope may serve as an intermediate strategy for erosion management in dryland sloping areas.

Keywords: Crop residues, Rainfall intensity, Slop, Tillage

* Corresponding author: hkhorsandy@yahoo.com

Submit date: 2026/04/16 Accept date: 2026/09/22

