اثرات عملیات کشاورزی حفاظتی و تغییر فصل نمونه‌برداری بر بعضی از ویژگی‌های منفذی خاک

لطف‌اله عبداللهی*: *استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران*
عباس علیزاده شوشتری: *مربی گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران*
لارس جول مونخولم: *استاد گروه آگرواکولوژی، دانشگاه آرهوس، مرکز تحقیقاتی فولوم، دانمارک*

مقاله پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴)

چکیده

کشاورزی حفاظتی در نظر بسیاری از محققان، یکی از روش‌های پایدارسازی کشاورزی است. در این نوع کشاورزی، حداقل به‌هم‌خوردگی خاک و نگهداری حداکثر پوشش گیاهی در سطح آن از اجزای مهم است. این مطالعهٔ بلند مدت در یک طرح آزمایشی بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار، برای بررسی اثرات عملیات فوق بر ظرفیت نگهداری رطوبت (VWC) و جرم مخصوص ظاهری خاک (BD) در دو منطقه و در دو فصل پاییز و بهار در کشور دانمارک انجام شد. تناوب R2 تناوبی از گیاهان زمستانه با حفظ بقایای گیاهی، تناوب R3 مخلوطی از گیاهان زمستانه و بهاره با حذف بقایا، و تناوب R4 همان مخلوط گیاهان مشابه R3 با حفظ بقایای گیاهی است. هر تناوب شامل تیمارهای شخم گاوآهن سنتی تا عمق بیست سانتی‌متر (MP)، دیسک تا عمق ۸-۱۰ سانتی‌متر (H) و کشت مستقیم (D) است. در میانهٔ پاییز ۲۰۱۳، نمونه‌برداری خاک از عمق‌های ۸-۴ و ۱۶-۱۲ و در فصل بهار ۲۰۱۴ از عمق ۸-۴ سانتی‌متری انجام شد. سپس منحنی رطوبتی خاک و BD تعیین شد. تیمار شخم D، مقدار BD را در هر دو عمق به طور معنی‌داری افزایش داد (۱/۳۱ و ۱/۳۸ $gr.cm^{-3}$). در عمق ۸-۴ سانتی‌متر، تیمارهای شخم حداقل (D و H) در مقایسه با MP رطوبت بیشتری در خود نگهداری کردند (۳۸/۶ تا ۲۳ درصد در مقابل ۳۵/۸ تا ۲۲ درصد). رطوبت خاک در محدودهٔ رطوبت قابل استفاده برای گیاه، در تیمار کشت مستقیم به طور معنی‌داری بالاتر از تیمار کشت سنتی بود. نمونه‌برداری در دو فصل پاییز و بهار اثرات متفاوت داشت. اثر مثبت نگهداری بقایای گیاهی بر ظرفیت نگهداری آب در خاک در محدودهٔ رطوبتی حدود اشباع در منطقهٔ فولوم، می‌تواند به کاهش تولید روان آب و کمک به کنترل فرسایش آبی منجر شود.

واژگان کلیدی: بقایای گیاهی، جرم مخصوص ظاهری، شخم حفاظتی، فصل نمونه‌برداری، منحنی رطوبتی خاک.

۱ـ مقدمه

توجه به اجرای عملیات کشاورزی پایدار به دلیل افزایش تقاضای غذا و سوخت و اثرات کشاورزی بر محیط زیست و تغییرات آب و هوایی زمین، رو به افزایش است (Bais-Moleman et al, 2019 & FAO, from http://www.fao.org/ag/ca). عملیات مختلف کشاورزی برای دستیابی به عملکرد و برداشت بیشتر محصول، تغییرات زیاد و آسیب‌زننده‌ای در بافت خاک به وجود می‌آورد و تداوم رواج آنها به فرسایش شدید خاک، آسیب‌پذیری در برابر بارش‌های جوی (Montgomery, 2007 & García-Ruiz et al, 1995)، کاهش ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک، کاهش مواد مغذی در دسترس و تغییر بافت خاک منجر می‌شود (Bouchoms et al, 2019). مدیریت صحیح خاک از پیش زمینه‌های کشاورزی پایدار است؛ بنابراین، بر انتخاب استراتژی‌های مدیریت پایدار خاک برای کاهش تخریب و بهبود کیفیت آن تمرکز زیادی وجود دارد؛ از جمله این استراتژی‌ها، کشاورزی حفاظتی است که به بهبود سرویس‌های اکوسیستم خاک کمک می‌کند. به حداقل رساندن به هم خوردگی خاک (شخم حفاظتی)، تناوب گیاهی و حداکثر نگهداری بقایای گیاهی در سطح زمین، عناصر کلیدی کشاورزی حفاظتی است (Torres et al, 2001 & Verhulst et al, 2010 & Wall, 2007). ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک (VWC[1]) و جرم مخصوص ظاهری آن (BD[2])، از جمله شاخص‌هایی است که از آن برای مطالعهٔ رفتار فیزیکی خاک در سیستم‌های زراعی استفاده می‌شود (Tominaga et al, 2002). این دو ویژگی بر فرایندهای مهم گیاه و خاک مانند حرکت آب، تراکم خاک، شخم و رشد ریشه تأثیر اساسی دارد؛ بنابراین، شاخص‌های ارزشمندی برای ارزیابی تأثیر مدیریت‌های مختلف خاک و گیاه است (Tominaga et al, 2002). محتوای رطوبت خاک از عوامل اصلی مؤثر بر زمان شروع رواناب است و اقدامات حفاظتی خاک و آب، مزایای کلیدی را برای افزایش زمان شروع رواناب و کاهش فرسایش ناشی از آن در زمین‌های کشاورزی فراهم می‌کند و در نتیجه، از دست‌رفتن خاک حاصل‌خیز کاهش می‌یابد (Zhang et al, 2019).

بر اساس گزارش‌های مطالعاتی، شخم به تغییر توزیع اندازه ذرات و در نتیجه تغییر ویژگی‌های نگهداری آب (در دسترس بودن و ذخیرهٔ آن) منجر می‌شود (Bescansa et al, 2006 & Carter, 1994 & Hill et al, 1985). در مقایسه با شخم سنتی، شخم حفاظتی به افزایش VWC منجر می‌شود (Bescansa et al, 2006 & Blevins et al, 1971). بزرگ‌ترین چالشِ نهادینه شدن شخم حفاظتی در میان کشاورزان، ایجاد مشکل تراکم خاک است که به افزایش BD و در نتیجه ایجاد محدودیت در رشد ریشهٔ گیاهان منجر می‌شود (Beeler, 2001& Kooistra and Tovey, 1994 & Logsdon and Karlen, 2004 & Soane et al, 2012). کشاورزی پایدار، ترکیبی است از چندین عملیات که آگاهی از اثرات ناشی از هر کدام از این عملیات‌ها به طور جداگانه یا ترکیبی، برای توسعهٔ متوازن آن سیستم ضروری است. اگر چه در بعضی از مطالعات، فواید این عملیات روی محصول و ساختمان خاک گزارش شده‌است (Gaudin et al, 2015 & Munkholm et al, 2013 & Thierfelder et al, 2013)؛ با این حال، آزمایش‌های صحرایی بسیار کمی وجود دارد که همهٔ عملیات کشاورزی پایدار (شخم، تناوب و بقایای گیاهی) را به صورت یکجا بررسی می‌کند.

[1] Volumetric Water Content
[2] Bulk Density

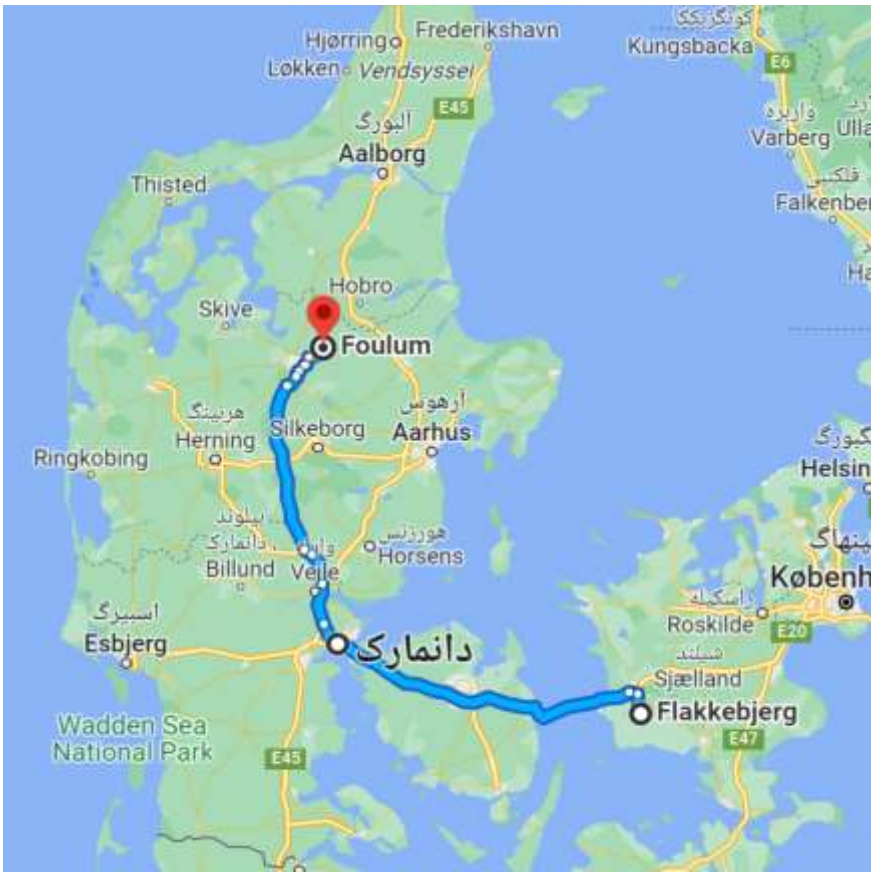
در پژوهشی که در سال ۲۰۱۷ در کالیفرنیای آمریکا انجام شد، اثر دمای محیط، مصرف آب، پوشش گیاهی، پوشش زمین و مدیریت خاک بر میزان افزایش و از دست دادن رطوبت خاک مطالعه شد. کرت‌هایی که در نگهداری آب ظرفیت بیشتری داشتند، اگرچه پس از هر بار آبیاری، افزایش رطوبت کندتری را نشان می‌دادند؛ با گذشت زمان، در از دست دادن رطوبت نیز درصد آهسته‌تری داشتند. در نهایت، مدیریت حفاظتی خاک با کاهش میزان از دست دادن رطوبت، مقاومت خاک را در برابر فرسایش افزایش می‌دهد (Lin et al, 2018). همچنین ترنر و کدالی (2020) دریافتند که رطوبت خاکدانه‌ها و محتوای پروتئین موجود در خاک ــ که در حفظ توان خاک برای ارائه سرویس به اکوسیستم‌های طبیعی و زیست‌مندان ساکن آنها (از جمله انواع گیاهان کشت‌شده) نقش مؤثری دارد ــ به شدت به عملیات مدیریت خاک حساس است (Turner and Kodali, 2020).

Ball و همکاران (1994) چهار نوع شخم شامل شخم با گاوآهن تا عمق بیست سانتی‌متر، شخم با کولتیواتور تا عمق پنج سانتی‌متر (بقایای گیاهی در سطح خاک پخش می‌شدند)، کشت مستقیم طولانی‌مدت (۲۳ ساله) و کشت مستقیم کوتاه‌مدت (هشت ساله) را در شرایط خاک در اسکاتلند بررسی کردند. کشت مستقیم طولانی مدت بر جرم مخصوص ظاهری خاک اثر افزایشی نداشت؛ با این حال، وضعیت تهویهٔ هوا، استحکام و ساختمان خاک در تیمار شخم سنتی (گاوآهن) بهتر از تیمار کشت مستقیم بود. Bescansa و همکاران (2006)، اثر سه نوع شخم حفاظتی را با شخم سنتی بر ظرفیت نگهداری آب در خاک و ویژگی‌های مربوط به آن را در یک خاک لوم رسی در اسپانیا مقایسه کردند. تیمارهای شخم عبارت بودند از: تیمار کشت مستقیم با حفظ بقایای گیاهی، تیمار کشت مستقیم بدون حفظ بقایای گیاهی، تیمار شخم با چیزل و تیمار شخم سنتی. جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر در تیمارهای کشت مستقیم با حفظ بقایای گیاهی و بدون آن، بیش از تیمارهای شخم سنتی و شخم چیزلی بود؛ اما در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری، جرم مخصوص ظاهری در شخم چیزلی بیش از سایر تیمارها بود. Schjonning و Rasmussen (2000)، اثر شخم سنتی و کشت مستقیم در سه منطقهٔ دانمارک را در خاک‌هایی با بافت‌های مختلف، بر ویژگی‌های منفذی و فیزیکی و مکانیکی خاک بررسی کردند. در همهٔ خاک‌ها کشت مستقیم، جرم مخصوص ظاهری خاک را در عمق‌های ۴-۸ و ۱۸-۱۴ سانتی‌متری افزایش داد. همچنین به طور کلی، تیمار کشت مستقیم در مقایسه با شخم سنتی، منافذ درشت یعنی منافذ با قطر متوسط بالاتر از سی میکرومتر در عمق‌های ۸-۴ و ۱۸-۱۴ سانتی‌متری کمتری ایجاد کرده بود.

در کشور دانمارک به دلیل کشت دیم غلات، ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک امری بسیار مهم است. از طرفی، اجرای عملیات کشاورزی حفاظتی از جمله اجرای سیستم شخم، حداقل به دلیل افزایش مقاومت خاک به نفوذ ریشه و افزایش جرم مخصوص ظاهری با محدودیت‌هایی روبرو است (Abdollahi et al, 2017). هدف این آزمایش، بررسی اثرات یازده سال اجرای عملیات کشاورزی پایدار از قبیل شخم حداقل، تناوب گیاهی و مدیریت بقایای گیاهی بر مقدار نگهداری رطوبت در خاک و جرم مخصوص ظاهری آن است. برای این منظور، اثرات مستقل و متقابل این مدیریت‌ها بررسی شد. فرض بر این است که اجرای عملیات کشاورزی پایدار، به بهبود شرایط و کیفیت خاک منجر می‌شود و این امر، از طریق جلوگیری از تراکم خاک و افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت در آن صورت می‌گیرد. همچنین در یک مطالعهٔ جانبی، اثرات احتمالی تغییر فصل نمونه‌برداری (پاییز و بهار) بر نتایج مطالعه نیز بررسی شد.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

محل کرت‌های آزمایشی در این مطالعه در دو مرکز تحقیقاتی فولوم[1] در عرض ۵۶ درجه و ۳۰ دقیقهٔ شمالی و طول ۹ درجه و ۳۵ دقیقهٔ شرقی و مرکز تحقیقاتی فلاگبیا[2] در عرض ۵۵ درجه و ۱۹ دقیقهٔ شمالی و طول ۱۱ درجه و ۲۳ دقیقهٔ شرقی است (شکل ۱). خاک محل آزمایش، شن لومی و متوسط دما و بارندگی (2012-2008) در منطقهٔ مورد آزمایش به ترتیب ۸/۳ درجهٔ سانتی‌گراد و ۵۵۰/۵ میلی‌متر برای فولوم و ۹/۰ درجهٔ سانتی‌گراد و ۴۶۱/۷ میلی‌متر برای فلاگبیا است. در عمق ۰ تا ۲۵ سانتی‌متری، بافت خاک در فولوم حاوی ۹/۵ درصد رس، ۱۳ درصد سیلت و ۷۷/۵ درصد شن و در فلاگبیا حاوی ۱۵ درصد رس، ۱۴ درصد سیلت و ۷۱ درصد شن است. مقدار ماده آلی خاک در فولوم و فلاگبیا به ترتیب ۳/۱ و ۲/۰ درصد است (Munkholm et al, 2008). خاک زراعی منطقهٔ فولوم در سیستم طبقه‌بندی فائو (WRB) در ردهٔ Mollic Luvisol و در منطقهٔ فلاگبیا در ردهٔ Glossic, Phaeozem قرار دارد (Krogh and Greve, 1999). همچنین خاک زراعی منطقهٔ فولوم در سیستم طبقه‌بندی آمریکایی در ردهٔ Typic Hapludalf و در منطقهٔ فلاگبیا در ردهٔ Oxyaquic Agriudoll قرار دارد.



شکل ۱: محل قرار گرفتن دو منطقهٔ مورد مطالعه فولوم و فلاگبیا در کشور دانمارک

[1] Foulum
[2] Flakkebjerg

۳ـ مواد و روش

در این مطالعه یک آزمایش صحرایی طولانی مدت که از سال ۲۰۰۲ شروع شده بود مورد استفاده قرار گرفت. طرح آزمایشی در قالب بلوک‌های کامل تصادفی خرد شده با چهار تکرار بود. نوع تناوب (سه تناوب)، کرت اصلی و سیستم شخم (سه سیستم)، کرت فرعی بود (Hansen et al, 2010). تناوب زراعی به گونه‌ای انتخاب شد که گیاهان مرسوم مورد استفاده در دانمارک را دربرگیرد. در این مطالعه از سه تناوب R2، R3 و R4 استفاده شد. تناوب R2 شامل فقط گیاهان زمستانه (به طور عمده غلات زمستانه) بود. در حالی که R3 و R4 ترکیبی مشابه از غلات زمستانه و بهاره بود. تنها تفاوت R3 و R4، مدیریت بقایای گیاهی بود. در تناوب گیاهی R3، بقایای گیاهی پس از برداشت از کرت حذف و در R4 بقایای گیاهی خرد شد و در کرت باقی ماند). بقایای گیاهی در R2 هم باقی می‌ماند. سیستم‌های شخم نیز عبارتند از شخم سنتی با گاوآهن تا عمق بیست سانتی‌متر (MP) و نوعی شخم حداقل با دیسک تا عمق ۱۰-۸ سانتی‌متر (H) که خاک را زیر رو نمی‌کرد. همچنین از سیستم کشت دیگری با نام کشت مستقیم (D) ـ که در آن حداقل به هم خوردگی خاک انجام می‌شود و چندان در دانمارک مرسوم نیست ـ استفاده شد. هر کرت از دو نوار شخم به عرض ۳ و طول ۷۲/۲ متر تشکیل شده‌است که اجازه می‌دهد ده زیر کرت با سطح خالص ۱۳/۷ در سه متر تشکیل شود. برای عملیات شخم در این آزمایش، از یک چیزل هفت شاخه (Chisel coulter) برای D و H و یک بذر کار Nordestan برای کشت سنتی پس از گاوآهن (MP) استفاده شد (Munkholm et al, 2008). عملیات شخم نیز سالی یک بار قبل از کشت انجام می‌شد. کرت‌های مربوط به شخم سنتی، در بهار قبل از کشت محصول شخم می‌شدند. همهٔ غلات کشت شده در کرت‌های آزمایشی، به طور متوسط ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار ازت (NH4-N) دریافت کردند. علف‌های هرز و آفات گیاهی نیز از طریق سم‌پاشی و بر اساس توصیه‌های مرکز برخط حفاظت محصول دانمارک کنترل شدند.

در پاییز سال ۲۰۱۳ (دو ماه پس از کاشت محصول) و در بهار سال ۲۰۱۴ در زمان استقرار گیاه در رطوبت نزدیک به ظرفیت زراعی، نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌برداری در فصل پاییز سال ۲۰۱۳ در عمق‌های ۸-۴ و ۱۶-۱۲ سانتی‌متر و در همهٔ تیمارهای مورد بررسی و در فصل بهار سال ۲۰۱۴ فقط در عمق ۸-۴ سانتی‌متر و در تیمارهای شخم D و MP در تناوب‌های R3 و R4 انجام شد.

نمونه‌ها با کمترین به هم خوردگی و توسط سیلندرهای استوانه‌ای با قطر ۶/۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۳/۴ سانتی‌متر (حجم= صد سانتی‌متر مکعب) برداشت شد. در مجموع، ۲۶۴ نمونه ـ ۲۱۶ نمونه در فصل پاییز و ۴۸ نمونه در فصل بهار ـ از کرت‌های آزمایشی برداشت و برای اندازه‌گیری ویژگی‌های منفذی خاک به آزمایشگاه منتقل شد. سپس این نمونه-ها روی جعبهٔ شن قرار گرفت تا از پایین اشباع شود. پس از آن، نمونه‌ها به طور متوالی به وسیلهٔ ستون آویزان آب و صفحات فشاری زهکشی شد تا به مکش‌های ۱-، ۳-، ۱۰-، ۳۰- و ۱۰۰- کیلوپاسکال برسد. جرم هر نمونه در هر توان مکشی، پس از خشک شدن در آون ۱۰۵ درجه و گذشت ۲۴ ساعت از آن ثبت شد. رطوبت حجمی (VWC)، از تفاوت وزن نمونهٔ مرطوب در هر مکش با وزن نمونهٔ خشک پس از خشک شدن در آون ۱۰۵ درجه و تقسیم آن بر حجم نمونه محاسبه شد. جرم مخصوص ظاهری نیز به روش استوانه تعیین شد. مقدار کربن کل خاک (TOC) به وسیلهٔ

یک دستگاه تجزیهٔ عنصری ماده آلی بـه نـام Flash 2000 سـاخت شـرکت Thermo Fisher Scientific و روش سوزاندن خشک انجام شد (Tiessen et al, 1981).

قبل از اجرای آنالیز آماری به وسیلهٔ آزمـون Shapiro-Wilk، از نرمـال بـودن توزیـع داده‌هـا اطمینـان حاصـل شد (Shapiro and Wilk, 1965). سپس میانگین و انحراف معیار هر کرت محاسبه و برای آنالیز آماری استفاده شد. آنالیز آماری داده‌ها بر اساس طرح کرت‌های خرد شده در قالب بلوک صورت گرفت. از یـک مـدل خطـی آمیختـه[1] شامل اثرات ثابت تیمار و اثرات تصادفی بلوک نیز برای بررسی اثرات تیمارهای آزمایشـی اسـتفاده شـد. بـرای ایـن منظـور، از روش PROC MIXED از نرم‌افـزار آمـاری SAS نسـخهٔ ۲۰۰۹ (SAS Institute Inc., 2009) اسـتفاده و مقایسهٔ میانگین‌ها با آزمون توکی انجام شد.

۴ـ یافته‌ها (نتایج) و بحث

۴ـ۱ـ جرم مخصوص ظاهری

سیستم شخم در هر دو منطقهٔ مورد مطالعه، جرم مخصوص ظاهری خاک را به طور معنی‌داری (p=0.01) تحت‌تأثیر قرار داد (جدول ۱ و ۲). در پاییز ۲۰۱۳ در منطقهٔ فولوم در عمق ۸-۴ سانتی‌متری، تیمار دیسک تا عمق ۱۰-۸ سـانتی‌متـر (H)، به کمترین مقدار BD (۱/۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در مقایسه با D (۱/۳۱ گرم بر سانتی‌متر مکعـب) و MP (۱/۲۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) منجر شد (D>MP>H). در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متـر، MP (۱/۲۸ گـرم بـر سـانتی‌متر مکعب) کمترین BD را در مقایسه با D (۱/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و H (۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعـب) ایجـاد کرد (D>H>MP). اثر تناوب نیز فقط در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متر معنی‌دار بود (جـدول ۱ و ۲)؛ جـایی کـه تیمارهـای دارای بقایای گیاهی (R2 و R4 به ترتیب با جرم مخصوص ظاهری ۱/۳۱ و ۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعـب) بـه ایجـاد کمترین جرم مخصوص ظاهری در مقایسه با تیمار بدون بقایای گیاهی (R3= ۱/۳۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) منجر شـد (جدول ۲). البته در عمق ۸-۴ سانتی‌متر نیز به سمت تأثیر معنی‌دار تناوب، گرایش وجود داشـت (p=0.078) و همـان روند موجود در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متر مشاهده شد. در همین منطقه در بهار ۲۰۱۴، باز هم اثر شخم بـر جـرم مخصـوص ظاهری معنی‌دار شد و جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار کشت مستقیم (D=۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بیش از تیمار کشت سنتی (MP=۱/۲۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود. اثر تناوب بـر جـرم مخصـوص ظـاهری در ایـن سـال، برخلاف پاییز ۲۰۱۳ معنی‌دار نشد (جدول ۱ و ۲).

[1] Linear Mixed Model

جدول ۱: تجزیه واریانس (میانگین مربعات) جرم مخصوص ظاهری تحت‌تأثیر تیمارهای تناوب و شخم مورد مطالعه در دو منطقهٔ تحقیقاتی فولوم و فلاگبیا

منطقهٔ مورد مطالعه	منابع تغییر	تاریخ نمونه‌برداری	عمق (سانتی‌متر)	درجه آزادی	جرم مخصوص ظاهری
فولوم	تناوب	پاییز ۲۰۱۳	۴-۸	۲	۴/۰۲^{ns}
			۱۲-۱۶	۲	۵/۹۳*
		بهار ۲۰۱۴	۴-۸	۱	۰/۰۱^{ns}
	شخم	پاییز ۲۰۱۳	۴-۸	۲	۴۲/۲۶**
			۱۲-۱۶	۲	۴۳/۲۱**
		بهار ۲۰۱۴	۴-۸	۱	۶/۹۱**
	تناوب*شخم	پاییز ۲۰۱۳	۴-۸	۴	۰/۲۵^{ns}
			۱۲-۱۶	۴	۱/۹۳^{ns}
		بهار ۲۰۱۴	۴-۸	۱	۵/۶۲*
فلاگبیا	تناوب	پاییز ۲۰۱۳	۴-۸	۲	۰/۳۶^{ns}
			۱۲-۱۶	۲	۰/۹۴^{ns}
		بهار ۲۰۱۴	۴-۸	۱	۱/۵۵^{ns}
	شخم	پاییز ۲۰۱۳	۴-۸	۲	۱/۲۱^{ns}
			۱۲-۱۶	۲	۴۸/۰۶**
		بهار ۲۰۱۴	۴-۸	۱	۸/۲۴**
	تناوب*شخم	پاییز ۲۰۱۳	۴-۸	۴	۵/۸۹**
			۱۲-۱۶	۴	۱/۴۱ns
		بهار ۲۰۱۴	۴-۸	۱	۲/۱۸ns

ns، ** و * به ترتیب بیانگر فقدان معنی‌داری و تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد است.

جدول ۲: مقایسهٔ میانگین*، جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای مختلف شخم و تناوب*****

موقعیت نمونه‌برداری	تاریخ نمونه‌برداری	عمق (سانتی‌متر)	نوع تناوب			سیستم شخم		
			R4	R3	R2	MP	H	D
فولوم	پاییز ۲۰۱۳	۴-۸	۱/۲۲^{a}	۱/۲۸^{a}	۱/۲۵^{a}	۱/۲۳^{b}	۱/۲۰^{c}	۱/۳۱^{a}
		۱۲-۱۶	۱/۳۲^{b}	۱/۳۷^{a}	۱/۳۱^{b}	۱/۲۸^{c}	۱/۳۴^{b}	۱/۳۸^{a}
	بهار ۲۰۱۴	۴-۸	۱/۲۹^{a}	۱/۳۱^{a}	-	۱/۲۷^{b}	-	۱/۳۲^{a}
فلاگبیا	پاییز ۲۰۱۳	۴-۸	۱/۳۹^{a}	۱/۴۰^{a}	۱/۴۲^{a}	۱/۴۰^{a}	۱/۳۹^{a}	۱/۴۲^{a}
		۱۲-۱۶	۱/۴۴ ^{a}	۱/۴۹^{a}	۱/۵۰^{a}	۱/۳۸^{c}	۱/۵۱^{b}	۱/۵۴^{a}
	بهار ۲۰۱۴	۴-۸	۱/۴۴^{a}	۱/۴۲^{a}	-	۱/۴۱^{b}	-	۱/۴۵^{a}

*مقایسهٔ میانگین‌ها برای هر گروه تیماری سیستم شخم و نوع تناوب، جداگانه و به صورت ردیفی انجام شده‌است.

**تیمارهای شخم شامل MP: شخم سنتی با گاوآهن تا عمق ۲۰ سانتی‌متر، H: شخم حداقل با دیسک تا عمق ۱۰-۸ سانتی‌متر و D: سیستم کشت مستقیم.

***تیمارهای تناوب شامل R2: فقط غلات زمستانه که بقایای گیاهی در کرت‌ها نگه داشته شده‌است، R3 و R4: ترکیبی مشابه از غلات زمستانه و بهاره که در R3 بقایای گیاهی حذف و در R4 بقایای گیاهی نگه داشته شده‌است.

در منطقهٔ فلاگبیا در پاییز ۲۰۱۳ در عمق ۸-۴ سانتی‌متری، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای شخم و تیمارهای تناوب وجود نداشت. همچنین اثر تناوب در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متر فاقد معنی‌داری بود (جدول ۱ و ۲). در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متری، اثر تیمار شخم بر جرم مخصوص ظاهری معنی‌دار بود و تیمار MP (۱/۲۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، به کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری در مقایسه با D (۱/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و H (۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب) منجر شد (D>H>MP). در همین منطقه در بهار ۲۰۱۴، اثر شخم بر جرم مخصوص ظاهری معنی‌دار شد و جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار کشت مستقیم (D=۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بیش از تیمار کشت سنتی (MP=۱/۴۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب) بود. اثر تناوب بر جرم مخصوص ظاهری نیز همانند پاییز ۲۰۱۳ در این منطقه فاقد معنی‌داری بود (جدول ۱ و ۲). مشاهدات بالا با توجه به عمقی از خاک که در سیستم‌های مختلف شخم در این مطالعه به هم زده می‌شود، منطقی به نظر می‌رسد. در تیمار H که در منطقهٔ فولوم در عمق ۸-۴ سانتی‌متر، کمترین تراکم را ایجاد می‌کند و جرم مخصوص ظاهری کمتری دارد، عملیات شخم (بدون برگردان) به وسیلهٔ دیسک تا عمق ۱۰-۸ سانتی‌متر انجام می‌شود. بدیهی است که عمق ۸-۴ سانتی‌متری در این محدوده قرار دارد و کاهش تراکم خاک مورد انتظار است. در تیمار D نیز که حداقل به هم‌خوردگی خاک در این عمق اتفاق می‌افتد، انتظار می‌رود تراکم خاک بیشتر باشد و بیشتر بودن جرم مخصوص ظاهری آن نیز منطقی به نظر می‌رسد. در عمق پایین‌تر خاک یعنی ۱۶-۱۲ سانتی‌متری، MP کمترین تراکم خاک را در مقایسه با دو تیمار شخم حداقل یعنی D و H ایجاد کرده‌است. دلیل آن می‌تواند عمق بیست سانتی‌متری شخم و برگردان خاک در این تیمار باشد. این مشاهدات با نتایج چند مطالعهٔ دیگر مطابقت دارد (Ball et al, 1994 & Bescansa et al, 2006 & Hill et al, 1985 & Schjønning and Rasmussen, 2000). در همین رابطه، Tollner و همکاران (1984) تأثیر سیستم بدون شخم و شخم با گاوآهن برگردان‌دار را بر جرم مخصوص ظاهری خاک آزمایش کردند و گزارش دادند که در عمق ۱۵ تا ۲۵ سانتی‌متری خاک، جرم مخصوص ظاهری در

سیستم بدون شخم از شخم برگردان‌دار بیشتر بود؛ در حالی که این جرم در عمق سی تا چهل سانتی‌متری در سیستم شخم برگردان‌دار بیش از سیستم بدون شخم بود.

در مورد اثر تناوب، تفاوت مشخصی بین دو نوع تناوب تحت بررسی یعنی R2 (تناوب متنوع) در مقابل R3/R4 (تناوب تک محصولی غلات) وجود ندارد و به نظر می‌رسد، برای مشخص شدن کامل تفاوت این تناوب‌ها به زمان بیشتری نیاز باشد. Munkholm و همکاران (2013) نیز اثر متفاوتی از تناوب متنوع در مقابل تناوب تک محصولی ذرت پس از سی سال در یک زمین سیلتی لوم در کانادا گزارش کردند. در مطالعهٔ Munkholm و همکاران (2013) در مقایسه با مطالعهٔ حاضر از تناوب متنوع‌تری استفاده شده بود؛ از این رو، به نظر می‌رسد بهتر است برای رعایت اصول کشاورزی حفاظتی در تیمارهای R3 و R4، با اضافه کردن تناوب حبوبات تنوع بیشتری ایجاد کرد. از طرف دیگر، تیمار نگهداری بقایای گیاهی (R4) در مقابل تیمار حذف بقایای گیاهی (R3) بر کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک در عمق ۱۲ـ ۱۶ سانتی‌متر اثر مثبت و معنی‌داری داشت. این اثر مثبت با نتایج ارائه شده توسط Blanco-Canqui and Lal (2007) و Lal (2000) مطابقت داشت. آنها نشان دادند که تخلخل خاک بعد از ده سال کاربرد هشت و شانزده تن در هکتار در سال از بقایای گندم و برنج به خاک سطحی، افزایش معنی‌دار داشت.

۴ـ۲ـ نگهداری رطوبت در خاک

سیستم شخم و مدیریت بقایای گیاهی در فولوم، مقدار نگهداری رطوبت در خاک (VWC) را در مکش‌های مختلف به طور معنی‌داری تحت‌تأثیر قرار داده‌است (شکل ۲).

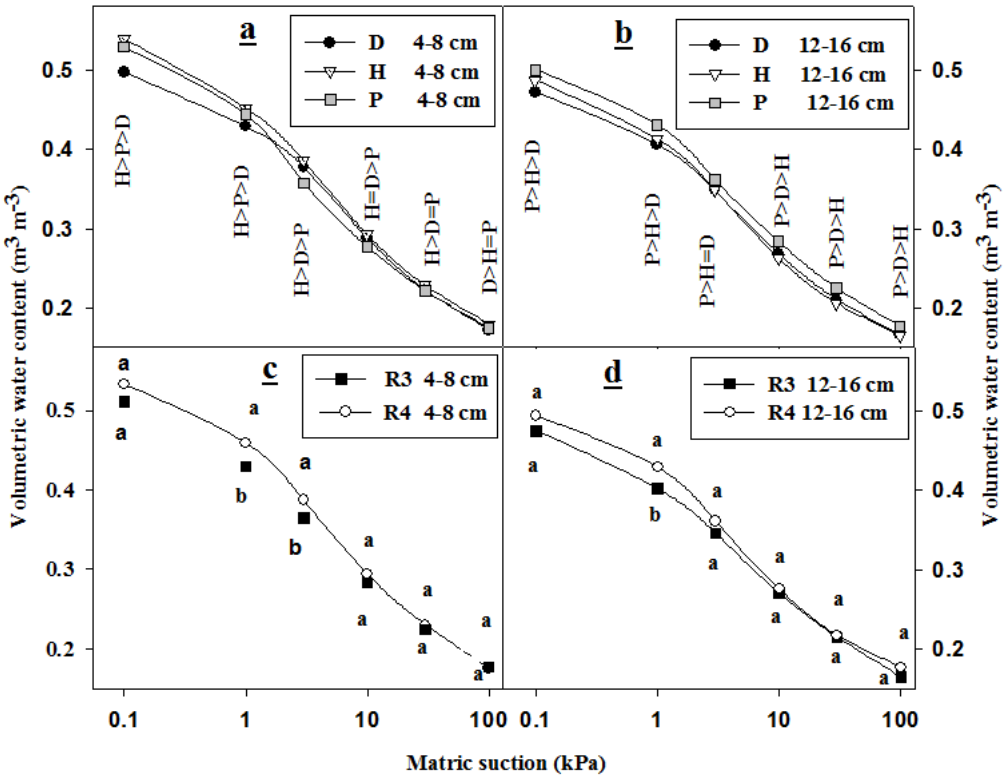
در پاییز سال ۲۰۱۳ در منطقهٔ فولوم در عمق ۸-۴ سانتی‌متری، در مکش‌های سه تا ده کیلو پاسکال عموماً تیمارهای شخم حداقل (D و H≤۳۸/۶ تا ۲۳ درصد) در مقایسه با شخم سنتی (MP=۳۵/۸ تا ۲۲ درصد)، رطوبت خاک بیشتری را در خود نگه داشته‌است. با این وجود در مکش‌های کمتر و حالت اشباع، مقدار VWC در خاک در تیمار کشت مستقیم (D=۵۰ درصد) به طور معنی‌داری از دو سیستم کشت دیگر (۵۳ و ۵۴ درصد به ترتیب برای MP و H) کمتر است. این روند در عمق پایین‌تر یعنی ۱۶-۱۲ سانتی‌متر معکوس است و تیمار تحت کشت سنتی (MP) در تمام مکش‌ها، رطوبت خاک را به طور معنی‌داری (پنج تا ده درصد بیشتر) بیش از دو تیمار دیگر در خود نگه داشته‌است (شکل ۲). در نمونه‌برداری سال ۲۰۱۴ در فولوم (شکل ۳) که فقط در عمق ۴-۸ سانتی‌متر انجام شد، نتیجه تقریباً مشابه نتیجهٔ به دست آمده در همین عمق در سال ۲۰۱۳ بود و رطوبت خاک در محدودهٔ رطوبت قابل استفاده برای گیاه و در محدودهٔ رطوبت ظرفیت مزرعه (در این منطقه مکش ده کیلوپاسکال را معادل ظرفیت مزرعه در نظر می‌گیرند) در تیمار کشت مستقیم (۲۳ تا ۳۴ درصد)، به طور معنی‌داری بالاتر از تیمار کشت سنتی (۲۱ تا ۳۰ درصد) بود؛ این بدان معنی است که تیمار کشت مستقیم، کارایی مصرف آب را در مکش‌هایی بالا می‌برد که بیشترین قابلیت را برای استفادهٔ گیاه دارد. در نمونه‌برداری پاییز سال ۲۰۱۳ در منطقهٔ فولوم، اثر مدیریت بقایای گیاهی بر ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک در هر دو عمق مورد بررسی در مکش‌های نزدیک به اشباع دیده شد. در عمق ۸-۴ سانتی‌متر در مکش‌های اشباع تا سی کیلوپاسکال و در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متر در مکش ده کیلو پاسکال، تیمار دارای بقایای گیاهی (R4) در مقایسه با تیمار حذف بقایای گیاهی (R3) به افزایش مقدار نگهداری رطوبت در خاک منجر شد (شکل ۲). افزایش رطوبت در این مکش‌ها به این معنی است که تیمار نگهداری بقایای گیاهی به افزایش مقدار رطوبت قابل

نگهداری در منافذ درشت (ماکروپروزیته) منجر شده‌است. نتایج به دست آمده در آزمایش، با نتایج به دست آمدهٔ قبلی از همین کرت‌های آزمایشی بلند مدت به خصوص در مکش‌های پایین‌تر (منافذ درشت) مطابقت داشت. Abdollahi و همکاران (2014) گزارش دادند که کمتر بودن جرم مخصوص ظاهری در تیمار MP را می‌توان به وجود حجم بیشتر منافذ درشت (قطر معادل منافذ >۳۰ میکرون) در این تیمار نسبت داد؛ به این معنی که خاک در تیمار MP مقدار بیشتری آب را در منافذ درشت‌تر از سی میکرون نگهداری می‌کند. توضیح اینکه بر اساس معادلهٔ پیشنهاد شده توسط Carter و Ball (1993) یعنی:

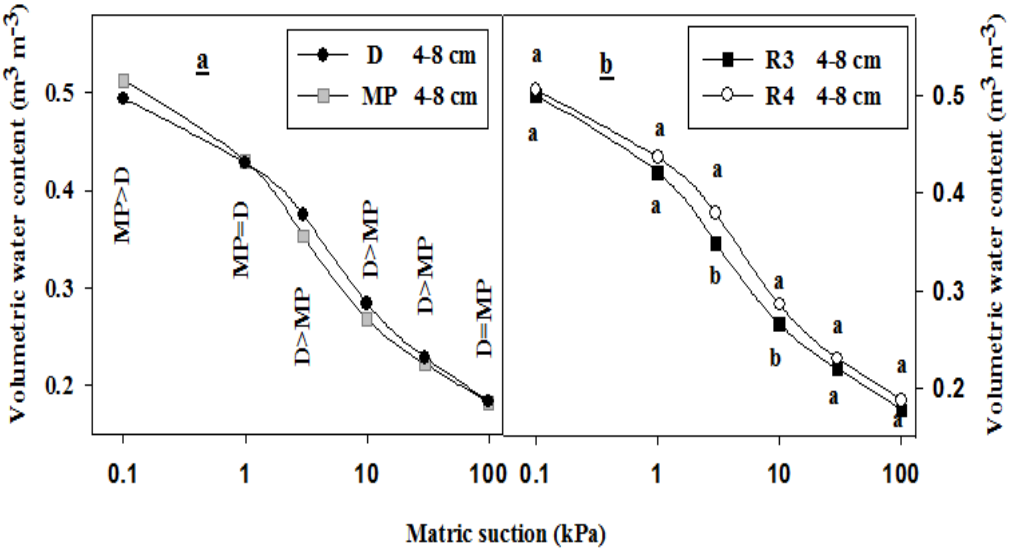
$$D= (-3000)/\varphi m$$ رابطهٔ ۱

می‌توان قطر معادل منافذ خاک را در هر مکش به دست آورد. در این معادله، D نمایندهٔ قطر منافذ بر حسب میکرومتر و φm مکش خاک بر حسب هکتوپاسکال یا سانتی‌متر است. بررسی‌های قبلی نشان داد که سیستم شخم، بر ذخیرهٔ رطوبتی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به طور مستقیم تأثیر می‌گذارد. De Vita و همکاران (2007) و Habtegebrial و همکاران (2007) نیز در آزمایش خود نشان دادند که شخم، حداقل باعث افزایش رطوبت خاک می‌شود.

در بهار سال ۲۰۱۴ در منطقهٔ فولوم، تیمار دارای بقایای گیاهی (R4) در مقایسه با تیمار حذف بقایای گیاهی (R3) به افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک در مکش‌های سه تا ده کیلوپاسکال منجر شد (۱۸ تا ۳۸ درصد برای R4، در مقابل ۱۷ تا ۳۴ درصد برای R3) (شکل ۳).



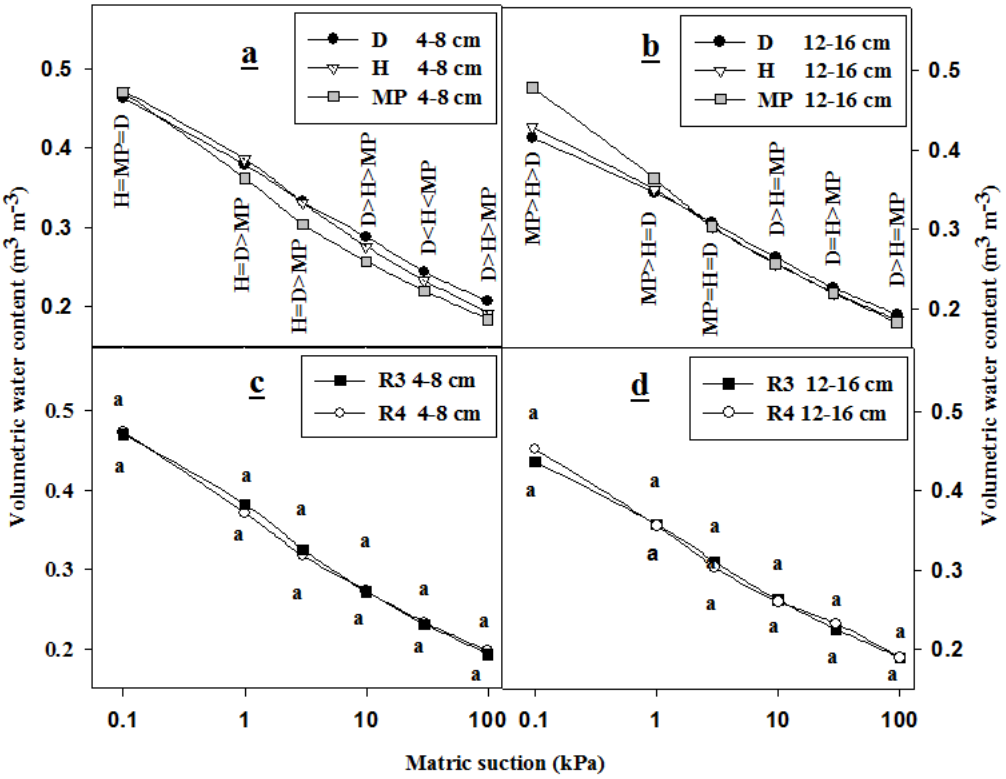
شکل ۲: نمودار نگهداری رطوبت در خاک در تیمارهای مختلف شخم (D, H و MP) و مدیریت بقایای گیاهی (R3 (تیمار حذف بقایای گیاهی) و R4 (تیمار نگهداشت بقایای گیاهی)) در عمق‌های ۸-۴ و ۱۶-۱۲ سانتی‌متر در فولوم در پاییز سال ۲۰۱۳. نمودار a اثر تیمارهای شخم را در عمق ۴ تا ۸ سانتی‌متر، نمودار b اثر تیمارهای شخم را در عمق ۱۲ تا ۱۶ سانتی‌متر، نمودار c اثر تیمارهای مدیریت بقایای گیاهی را در عمق ۴ تا ۸ سانتی‌متر و نمودار d اثر تیمارهای مدیریت بقایای گیاهی را در عمق ۱۲ تا ۱۶ سانتی‌متر نشان می‌دهد. در شکل‌های a و b علامت بزرگ‌تر بین علایم اختصاری تیمارها به معنی تفاوت معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد است. در شکل‌های c و d حروف کوچک متفاوت به معنی تفاوت آماری در سطح پنج درصد در داده‌ها است.



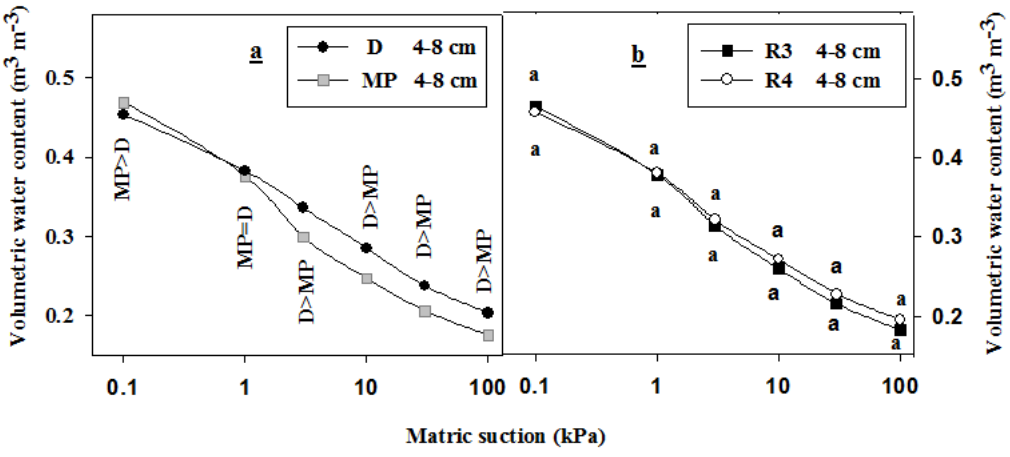
شکل ۳: نمودار نگهداری رطوبت در خاک در تیمارهای شخم D و MP و مدیریت بقایای گیاهی (R3 (تیمار حذف بقایای گیاهی) و R4 (تیمار نگهداشت بقایای گیاهی)) در عمق ۸-۴ سانتی‌متر در فولوم در بهار سال ۲۰۱۴. نمودار a اثر تیمارهای شخم و نمودار b اثر تیمارهای مدیریت بقایای گیاهی را نشان می‌دهد. در بهار سال ۲۰۱۴، نمونه‌برداری فقط در عمق ۸-۴ سانتی‌متر و در تیمارهای D و MP و تناوب‌های R3 و R4 انجام شد.

در پاییز سال ۲۰۱۳ در منطقهٔ فلاگبیا در عمق ۸-۴ سانتی‌متری، به جز در مکش اشباع در سایر محدودهٔ منحنی رطوبتی، تیمارهای شخم حداقل (D و H≤۳۸/۶ تا ۲۰ درصد) در مقایسه با شخم سنتی (MP=۳۶/۲ تا ۱۸ درصد) رطوبت خاک بیشتری در خود نگه داشته‌است (شکل ۴). این نتایج، مشابه اثر شخم در منطقهٔ فولوم در همان سال است. این روند در عمق پایین‌تر یعنی ۱۶-۱۲ سانتی‌متر نیز دیده می‌شود؛ با این تفاوت که تیمار تحت کشت سنتی (MP) در مکش نزدیک به اشباع یعنی ده کیلوپاسکال هم به طور معنی‌داری رطوبت خاک را در خود بیش از دو تیمار دیگر نگه داشته‌است (۴۳/۱ درصد برای MP در مقابل ۴۱ درصد برای H و D) (شکل ۴). نتایج به دست آمده در این دو عمق، یک بار دیگر نتایج به دست آمده در مورد نگهداری رطوبت در منافذ درشت در شخم سنتی را تأیید می‌کند. ضمن اینکه تیمارهای شخم حداقل در این منطقه، کارایی خود را در افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت در مکش‌های محدودهٔ ظرفیت زراعی تا قبل از نقطهٔ پژمردگی یعنی در منطقهٔ رطوبت سهل‌الوصول نشان دادند. در نمونه‌برداری سال ۲۰۱۴ در فلاگبیا (شکل ۵) که فقط در عمق ۸-۴ سانتی‌متر انجام شده‌است، نتیجه تقریباً مشابه نتیجهٔ به دست آمده در همین عمق در سال ۲۰۱۳ بود و رطوبت خاک در محدودهٔ رطوبت قابل استفاده برای گیاه و در محدودهٔ رطوبت ظرفیت مزرعه در تیمار کشت مستقیم، به طور معنی‌داری بالاتر از تیمار کشت سنتی بود (۲۰ تا ۳۴ درصد برای D در مقابل ۱۷/۵ تا ۳۰ درصد برای MP). در نمونه‌برداری پاییز سال ۲۰۱۳ در منطقهٔ فلاگبیا، اثر مدیریت بقایای گیاهی بر ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک در هر دو عمق مورد بررسی ناچیز بود؛ در حالی که در نمونه‌برداری سال ۲۰۱۴ در عمق ۸-۴ سانتی‌متر در مکش‌های ده تا سی کیلو پاسکال یعنی محدودهٔ رطوبت سهل‌الوصول، تیمار دارای بقایای گیاهی (R4=۲۲/۷ تا ۲۷/۱ درصد) در مقایسه با تیمار حذف بقایای گیاهی (R3=۲۱/۵ تا ۲۵/۹ درصد) به افزایش مقدار نگهداری رطوبت در خاک

منجر شد (شکل ۵). افزایش رطوبت در این مکش‌ها به این معنی است که نگهداری بقایای گیاهی، بـه افـزایش مقـدار رطوبت قابل نگهداری در منافذ ریزتر (میکروپروزیته) منجر شده‌است.



شکل ۴: نمودار نگهداری رطوبت در خاک در تیمارهای مختلف شخم (D, H و MP) و مدیریت بقایای گیاهی (R3 (تیمار حذف بقایای گیاهی) و R4 (تیمار نگهداشت بقایای گیاهی)) در عمق‌های ۸-۴ و ۱۶-۱۲ سانتی‌متر در فلاگبیا در پاییز سال ۲۰۱۳. نمودار a اثر تیمارهای شخم را در عمق ۴ تا ۸ سانتی‌متر، نمودار b اثر تیمارهای شخم را در عمق ۱۲ تا ۱۶ سانتی‌متر، نمودار c اثر تیمارهای مدیریت بقایای گیاهی را در عمق ۴ تا ۸ سانتی‌متر و نمودار d اثر تیمارهای مدیریت بقایای گیاهی را در عمق ۱۲ تا ۱۶ سانتی‌متر نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار نگهداری رطوبت در خاک در تیمارهای شخم D و MP و مدیریت بقایای گیاهی (R3 (تیمار حذف بقایای گیاهی) و R4 (تیمار نگهداشت بقایای گیاهی)) در عمق ۸-۴ سانتی‌متر در فلاگبیا در بهار سال ۲۰۱۴. نمودار a اثر تیمارهای شخم و نمودار b اثر تیمارهای مدیریت بقایای گیاهی را نشان می‌دهد. در بهار سال ۲۰۱۴، نمونه‌برداری فقط در عمق ۸-۴ سانتی‌متر و در تیمارهای D و MP و تناوب‌های R3 و R4 انجام شد.

اثر مثبت نگهداری بقایای گیاهی بر افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک در محدوده‌ای از رطوبت که برای گیاه قابل استفاده باشد، فقط در نمونه‌برداری سال ۲۰۱۴ در هر دو منطقهٔ مورد بررسی نشان داده شد. در نمونه‌برداری سال ۲۰۱۳ نیز این اثر فقط در منطقهٔ فولوم و در مکش‌های کم (منافذ درشت یا ماکروپروزیته) مشاهده شد. نگهداری رطوبت خاک در این مکش‌ها از نظر برآورده کردن نیازهای گیاهی چندان تأثیری ندارد، ولی از نظر کاهش تولید رواناب و کمتر کردن فرسایش آبی در هنگام بارندگی مطلوب است.

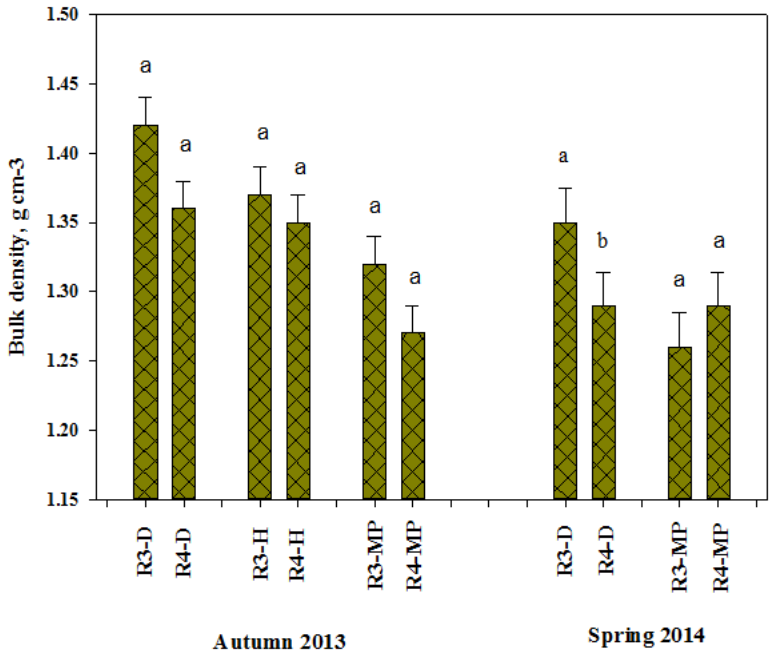
گزارش‌هایی وجود دارد که اثرگذاری تیمارهای استفاده شده در آزمایش‌های مختلف را به نسبت بین درصد رس و درصد کربن آلی درون خاک وابسته می‌داند. در بررسی‌های انجام شده در این زمینه، Dexter et al (2008) و Schjønning et al (2012) نسبت رس به کربن آلی ۱۰ را به عنوان حد بحرانی بیان کردند و معتقدند فقط هنگامی‌که این نسبت بزرگ‌تر از ۱۰ باشد، انتظار می‌رود تیمارهای افزایش ماده آلی اثر مثبتی داشته باشد و در غیر این صورت، نباید از این تیمارها انتظار تأثیر مثبت داشت. در کرت‌های آزمایشی این مطالعه، نسبت بین درصد رس (۹/۲ درصد) به درصد کربن آلی (۱/۸ درصد)، ۵/۱ و بسیار کوچک‌تر از عدد ده یعنی حد بحران گزارش شد. این نتایج نشان می‌دهد که در این خاک‌ها با وجود نسبت کم رس به کربن، می‌توان انتظار داشت که افزودن کربن آلی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک اثر مثبتی داشته باشد. این تأثیر مثبت از کربن می‌تواند از بخش ناپایدار کربن به خصوص پلی‌ساکاریدها سرچشمه گرفته باشد (Abdollahi et al, 2014).

۴-۳- اثر متقابل شخم و بقایای گیاهی

با توجه به یکسان بودن گیاهان موجود در تناوب‌های R3 و R4 و اینکه تنها تفاوت آنها در نگهداری یا حذف بقایای گیاهی است، می‌توان اثر متقابل شخم و مدیریت بقایا را به طور مشخص بررسی کرد. شکل ۶، نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. اثر متقابل شخم و مدیریت بقایای گیاهی در سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که نگهداری بقایا در ترکیب با کشت مستقیم (R4-D=۱/۳۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) نسبت به تیمار حذف بقایا در کشت مستقیم (R3-D=۱/۴۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، به کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری در خاک منجر شده‌است. همچنین با وجود اینکه اثر متقابل شخم و بقایای گیاهی در منطقهٔ مورد بررسی فولوم در سطح پنج درصد معنی‌دار نشده‌است (p=0.073)، اما روند تأثیر تیمارها نشان می‌دهد که تیمار نگهداری بقایای گیاهی در ترکیب با D و MP (R4-D و R4-MP) نسبت به تیمار حذف بقایای گیاهی (R3-D و R3-MP)، جرم مخصوص ظاهری کمتری ایجاد کرده‌است (شکل ۶). در مطالعهٔ اجرا شده از همین محل (Abdollahi and Munkholm, 2017) نشان دادند که نگهداری بقایای گیاهی در سیستم کشت مستقیم (D)، به افزایش ۷۹ درصدی نفوذپذیری خاک به هوا[1] و کاهش ۱۵۰ درصدی مقدار منافذ مسدود شدهٔ خاک[2] منجر می‌شود. این اثر متقابل نشان می‌دهد که نگهداری بقایای گیاهی در سیستم کشت مستقیم می‌تواند به بهبود

[1] Air Permeability
[2] Blocked Air Porosities

جابه‌جایی آب و هوا در خاک منجر شود و محدودیت‌های مربوط به اجرای شخم حفاظتی را برطرف کند یا کاهش دهد.



شکل ۶: اثر متقابل تیمارهای شخم (D, H و MP) و مدیریت بقایای گیاهی (R3 و R4) بر جرم مخصوص ظاهری خاک در فولوم. پاییز ۲۰۱۳ در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متر و بهار ۲۰۱۴ در عمق ۸-۴ سانتی‌متر. در بهار سال ۲۰۱۴، نمونه‌برداری فقط در عمق ۸-۴ سانتی متر و در تیمارهای D و MP و تناوب‌های R3 و R4 انجام شد. حروف کوچک متفاوت در هر فصل نمونه‌برداری به معنی تفاوت آماری در سطح پنج درصد در داده‌ها است.

۴-۴- اثر فصل نمونه‌برداری بر نتایج آزمایش

مقایسهٔ نتایج در دو فصل نمونه‌برداری یعنی فصل پاییز (دو ماه پس از کاشت محصول) و بهار (در زمان استقرار گیاه) در رطوبت نزدیک به ظرفیت زراعی نشان داد که فصل نمونه‌برداری تا حدودی می‌تواند نتایج را تحت‌تأثیر قرار دهد (جدول ۳). جرم مخصوص ظاهری در فصل پاییز (۱/۳۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب) به طور معنی‌داری کمتر از فصل بهار (۱/۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) است. ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک نیز تا حدودی از تغییرات جرم مخصوص ظاهری پیروی می‌کند و در دو نقطهٔ رطوبتی اشباع و ظرفیت زراعی، روند موجود دربارهٔ جرم مخصوص ظاهری مشاهده می‌شود و ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک، در فصل پاییز تقریباً بیش از فصل بهار است. اثر تغییر فصل نمونه‌برداری، بیشتر دربارهٔ ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله بخش‌های فعال کربن و نیتروژن خاک بررسی شده‌است (Franzluebbers, Hons & Zuberer, 1996). اما در این مطالعه، تغییرات احتمالی در ویژگی‌های منفذی خاک در دو فصل نمونه‌برداری بررسی شد. با توجه به فاصلهٔ شش ماهه بین دو نمونه‌برداری و با توجه به اینکه در طول پاییز و زمستان به دلیل سرمای شدید هوا فعالیت زراعی چندانی در منطقه صورت نگرفته‌است، تغییرات ویژگی‌های منفذی خاک را می‌توان به دلایل دیگری غیر از فعالیت‌های زراعی و عبور و مرور ماشین‌آلات نسبت داد (Moreira et

Moreira (2016) و همکاران (2016 ,al). نیز معتقدند این تغییرات، تحت‌تأثیر دوره‌های تر و خشک شدن خاک به وجود آمده‌است. آنها نمونه‌های دست نخوردهٔ خاک را از بین ردیف‌ها و روی ردیف‌های کشت گیاه ذرت، در یک سیستم کشت مستقیم از عمق‌های ۱۰-۰ و ۲۰-۱۰ سانتی‌متر و با ثبت موقعیت جغرافیایی نقاط، برداشت کرده بودند. در گزارش مطالعهٔ آنها بر خلاف مطالعهٔ حاضر، جرم مخصوص ظاهری خاک در نمونه‌برداری دوم کاهش یافته بود. آنها علاوه بر مکانیسم تر و خشک شدن خاک، اثرات کوتاه مدت مربوط به محصولات و شرایط آب و هوایی را در نتیجهٔ به دست آمده دخیل دانسته‌اند.

جدول ۳: ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری در دو منطقهٔ فولوم و فلاگبیا برای دو مرحلهٔ نمونه‌برداری در پاییز سال ۲۰۱۳ و بهار سال ۲۰۱۴ در عمق ۴-۸ سانتی‌متر

ویژگی خاک	فصل بهار ۲۰۱۴	فصل پاییز ۲۰۱۳
جرم مخصوص ظاهری، گرم بر سانتی متر مکعب	۱/۳۶^{a}	۱/۳۳^{b*}
درصد رطوبت خاک در مکش صفر کیلوپاسکال (حالت اشباع)	۴۸/۲^{a}	۴۸/۴^{a}
درصد رطوبت خاک در مکش یک کیلوپاسکال	۴۰/۲^{a}	۴۰/۶^{a}
درصد رطوبت خاک در مکش سه کیلوپاسکال	۳۴/۰^{a}	۳۴/۴^{a}
درصد رطوبت خاک در مکش ده کیلوپاسکال (ظرفیت زراعی)	۲۷/۱^{a}	۲۷/۸^{a}
درصد رطوبت خاک در مکش سی کیلوپاسکال	۲۲/۳^{a}	۲۲/۸^{a}
درصد رطوبت خاک در مکش صد کیلوپاسکال	۱۸/۶^{a}	۱۸/۴^{a}

*حروف کوچک متفاوت به معنی تفاوت آماری دادها در ردیف و در سطح پنج درصد در داده‌ها است.

۵ـ نتیجه‌گیری

هدف این آزمایش، بررسی اثرات یازده سال اجرای عملیات کشاورزی حفاظتی و کشاورزی پایدار از قبیل شخم حداقل، تناوب گیاهی، مدیریت بقایای گیاهی بر جرم مخصوص ظاهری و ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک است.

سیستم شخم، هر دو شاخص مورد بررسی را به طور معنی‌داری تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. سیستم کشت مستقیم در مقایسه با شخم سنتی و شخم به وسیلهٔ دیسک، جرم مخصوص ظاهری را در هر دو عمق به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد.

مقدار رطوبت حجمی خاک نیز به طور معنی‌داری در تیمارهای شخم و بقایای گیاهی متفاوت بود؛ در عمق ۸-۴ سانتی‌متر، تیمارهای شخم حداقل (D و H) در مقایسه با شخم سنتی (MP) رطوبت بیشتری را در خود حفظ کرد. این روند در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متر متفاوت بود و تیمار MP در تمام مکش‌ها بیشترین مقدار رطوبت را در خاک نگه می‌داشت.

تیمار نگهداری بقایای گیاهی (R4) نیز به خصوص در عمق ۱۶-۱۲ سانتی‌متر به ایجاد کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری منجر شد. رطوبت خاک در محدودهٔ رطوبت قابل استفاده برای گیاه یعنی در فاصلهٔ ظرفیت زراعی تا نقطهٔ پژمردگی، در تیمار کشت مستقیم به طور معنی‌داری بالاتر از تیمار کشت سنتی بود.

اثر فصل نمونه‌برداری بر نتایج به دست آمده هم معنی‌دار بود؛ جرم مخصوص ظاهری در فصل پاییز به طور معنی‌داری کمتر و ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک به طور معنی‌داری بیش از فصل بهار بود.

اثر مثبت نگهداری بقایای گیاهی بر افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک در محدودهٔ رطوبتی حدود اشباع (مکش‌های کم/ منافذ درشت) در منطقهٔ فولوم، می‌تواند به کاهش تولید رواناب و کمتر کردن فرسایش آبی در سطح مزرعه منجر شود. بنابراین، کشاورزی حفاظتی علاوه بر فوایدی که پیش از این ذکر شد، می‌تواند با کاهش تولید رواناب و خطرات فرسایش آبی، به حفاظت از خاک به عنوان یکی از اجزای اصلی اکوسیستم منجر شود و توان و ظرفیت تولید خاک را در جهت رسیدن به کشاورزی پایدار افزایش دهد؛ از این‌رو، آموزش و ترویج این نوع کشاورزی ضروری است.

منابع

1. Abdollahi, L.; Getahun, G. T.; & L. J. Munkholm, 2017. Eleven Years' Effect of Conservation Practices for Temperate Sandy Loams: I. Soil Physical Properties and Topsoil Carbon Content, *Soil Science Society of America Journal*, 81(2), 380-391. https://doi.org /10. 2 136/sssaj2016.06.0161

2. Abdollahi, L., & L. J. Munkholm., (2017). Eleven Years' Effect of Conservation Practices for Temperate Sandy Loams: II. Soil Pore Characteristics. *Soil Science Society of America Journal*. 81(2), 392-403. https://doi.org/10.2136sssaj2016.07.0221

3. Abdollahi, L.; Munkholm, L. J.; & A. Garbout, 2014. Tillage System and Cover Crop Effects on Soil Quality: II. Pore Characteristics, *Soil Science Society of America Journal*, 78(1), 271-279. https://doi.org/DOI 10.2136/sssaj2013.070302

4. Abdollahi, L.; Schjønning, P.; Elmholt, S.; & L. J. Munkholm, 2014. The effects of organic matter application and intensive tillage and traffic on soil structure formation and stability, *Soil and Tillage Research*, 136, 28-37.

5. Bais-Moleman, A. L.; Schulp, C. J. E.; & P. H. Verburg, 2019. Assessing the environmental impacts of production- and consumption-side measures in sustainable agriculture intensification in the European Union, *Geoderma*, 338, 555-567. https://doi.org /https :// doi. org /10.1016/j.geoderma.2018.11.042

6. Ball, B. C.; Lang, R. W.; Robertson, E. A. G.; & M. F. Franklin, 1994. Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20–25 years of conventional tillage or direct drilling, *Soil and Tillage Research*, 31(2–3), 97-118. https://doi.org/http:// dx.doi. org/ 1 0.1016/0167-1987(94)90074-4

7. Beeler, L., 2001. IRMP Tillage Survey Summary, 1999-2000 (USDA-NRCS, Des Moines, IA, Issue.

8. Bescansa, P.; Imaz, M. J.; Virto, I.; Enrique, A.; & W. B. Hoogmoed, 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain, *Soil and Tillage Research*, 87(1), 19-27. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.02.028

9. Blanco-Canqui, H., & R. Lal., (2007). Impacts of Long-Term Wheat Straw Management on Soil Hydraulic Properties under No-Tillage. *Soil Science Society of America Journal*. 71(4). https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0411

10. Blevins, R. L.; Doyle Cook, S. H. Philips, & R. E. Philips, 1971. influence of no-tillage on soil moisture, *Agronomy Journa*, 63, 593-596.

11. Bouchoms, S.; Wang, Z.; Vanacker, V.; & K. Oost, 2019. Evaluating the effects of soil erosion and productivity decline on soil carbon dynamics using a model-based approach. https://doi.org/10.5194/soil-5-367-2019

12. Carter, M. R., 1994. Strategies to overcome impediments to adoption of conservation tillage. Conservation tillage in temperate agroecosystems, 3-19. CRC press. Boca Raton, FL.
13. Carter, M. R., & B. C. Ball., (1993). Soil porosity. In M. R. C. (ed.) (Ed.), Soil sampling and methods of analysis. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
14. De Vita, P.; Elvio, D. P.; Fecondo, G.; Fonzo, N.; & M. Pisante, 2007. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy, *Soil and Tillage Research*, 92, 69-78. https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.012
15. Dexter, A. R.; Richard, G.; Arrouays, D.; Czyż, E. A.; Jolivet, C.; & O. Duval, 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties, *Geoderma*, 144(3-4), 620-627. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.022
16. FAO. (http://www.fao.org/ag/ca/). Conservation Agriculture. http://www.fao.org/ag/ca/
17. Gaudin, A. C.; Tolhurst, T. N.; Ker, A. P.; Janovicek, K.; Tortora.; R. C. Martin, & W. Deen, 2015. Increasing crop diversity mitigates weather variations and improves yield stability, *PLoS One*, 10 (2), e0113261 https://doi.org/10:e0113261. doi:10.1371/
18. Franzluebbers, A. J.; Hons, F. M.; & D. A. Zuberer, 1996. Seasonal dynamics of active soil carbon and nitrogen pools under intensive cropping in conventional and no tillage, Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 159(4), 343-349. doi: https://doi.org /10.1002 /jp ln. 1 996.3581590406
19. García-Ruiz, J.; Lasanta, T.; Martí, C.; & C. González, 1995. Sediment yield under different land uses in the spanish pyrenees, *Mountain Research and Development*, https://doi.org /10. 2307 /3673930
20. Habtegebrial, K.; Singh, B.; & M. Haile, 2007. Impact of tillage and nitrogen fertilization on yield, nitrogen use efficiency of tef (Eragrostis tef (Zucc.) Trotter) and soil properties, *Soil and Tillage Research*, 94, 55-63. https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.002
21. Hansen, E. M.; Munkholm, L. J.; Melander, B.; & J. E. Olesen, 2010. Can non-inversion tillage and straw retainment reduce N leaching in cereal-based crop rotations?, *Soil and Tillage Research*, 109(1), 1-8. https://doi.org/DOI 10.1016/j.still.2010.04.001
22. Hill, R. L.; Horton, R.; & R. Cruse, 1985. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols, *Soil Science Society of America Journal*, 49(5), 1264-1270.
23. Kooistra, M. J., & N. K. Tovey., (1994). Effects of compaction on soil microstructure. In: Soane, B.D ,.Van Ouwerkerk, C. (Eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. *Elsevier*, New York, pp. 91-111.
24. Krogh, L., & M. H. Greve., (1999). Evaluation of world reference base for soil resources and FAO soil map of the world using nationwide grid soil data from Denmark. *Soil Use and Management*. 15(3), 157-166. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1999.tb00082.x
25. Lal, R., 2000. Mulching effects on soil physical quality of an alfisol in western Nigeria, *Land Degradation & Development*, 11(4), 383-392. https://doi.org/1099-145/10/1002X(200007/08) 11 :4<383::AID-LDR393>3.0.CO;2-6
26. Lin, B.; Egerer, M.; Liere, H.; Jha, S.; & S. Philpott, 2018. Soil management is key to maintaining soil moisture in urban gardens facing changing climatic conditions, Scientific Reports.
27. Logsdon, S. D., & D. L. Karlen., (2004). Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*. 78(2), 143-149. https://doi.org/DOI 10.1016/ j.still.2004/02/003
28. Montgomery, D., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability, Proceedings of the National Academy of Sciences. https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104
29. Moreira, W. H.; Tormena, C. A.; Karlen, D. L.; Silva, Á. P. d.; Keller, T.; & E. Betioli Jr, 2016. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage, *Soil and Tillage Research*, 160, 53-64. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.02.007

30. Munkholm, L. J.; Hansen, E. M.; & J. E. Olesen, 2008. The effect of tillage intensity on soil structure and winter wheat root/shoot growth, *Soil Use and Management*, 24(4), 392-400. https://doi.org/DOI 10.1111/j.1475-2743.2008.00179.x
31. Munkholm, L. J.; Heck, R. J.; & B. Deen, 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield, *Soil and Tillage Research*, 127, 85-91. https://doi.org/DOI 10.1016/j.still.2012.02.007
32. SAS Institute Inc., C., NC, USA, (2009). User's Guide: Statistics. SAS Inst., *Cary, NC*. In.
33. Schjønning, P.; de Jonge, L. W.; Munkholm, L. J.; Moldrup, P.; Christensen, B. T.; & J. E. Olesen, 2012. Clay dispersibility and soil friability-testing the soil clay-to-carbon saturation concept, *Vadose Zone Journal*, (1) 11. https://doi.org/10.2136/vzj2011.0067
34. Schjønning, P., & K. J. Rasmussen., (2000). Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil and Tillage Research*. 57(1-2), 69-82. https://doi.org /10. 1016/s0167-1987(00)00149-5
35. Shapiro, S. S., & M. B. Wilk., (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. 52(3-4), 591-611.
36. Soane, B. D.; Ball, B. C.; Arvidsson, J.; Basch, G.; Moreno, F.; & J. Roger-Estrade, 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment, *Soil and Tillage Research*, 118(0), 66-87. https://doi .org/http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015
37. Thierfelder, C.; Mombeyarara, T.; Mango, N.; & L. Rusinamhodzi, 2013. Integration of conservation agriculture in smallholder farming systems of southern Africa: identification of key entry points, *International Journal of Agricultural Sustainability*, 11(4), 317-330. https:// doi.org/10.1080/14735903.2013.764222
38. Tiessen, H.; Bettany, J. R.; & J. W. B. Stewart, 1981. An improved method for the determination of carbon in soils and soil extracts by dry combustion, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 12, 211- 218.
39. Tollner, E. W.; Hargrove, W. L.; & G. W. Langdale, 1984. Influence of conventional and no-till practices on soil physical properties in the southern Piedmont, *Journal of Soil and Water Conservation*, 39(1), 73-76. http://www.jswconline.org/content/39/1/73.abstract
40. Tominaga, T.; Cássaro, F.; Bacchi, O. O. S.; Reichardt, K.; Oliveira, J.; & L. Timm, 2002. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field, *Soil Research*, 40(4), 604-614.
41. Torres, L. G.; Benites, J. R.; & A. M. Vilela, 2001. Conservation agriculture: a worldwide challenger. XUL. http://books.google.co.uk/books?id=yCenMQAACAAJ
42. Turner, B., & Kodali, S. (2020). Soil system dynamics for learning about complex, feedback-driven agricultural resource problems: model development, evaluation, and sensitivity analysis of biophysical feedbacks. Ecological Modelling, 428, 109050. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109050.
43. Verhulst, N.; Govaerts, B.; Verachtert, E.; Castellanos-Navarrete, A.; Mezzalama, M.; Wall, P.; & K. D. Sayre, 2010. Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems? In R. Lal & B. A. E. Stewart (Eds.), *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality*. (pp. 137-208.). CRC Press, Boca Raton, FL.
44. Wall, P. C., 2007. Tailoring conservation agriculture to the needs of small farmers in developing countries, *Journal of Crop Improvement*, 19(1-2), 137-155. https://doi.org /10.1300/J411v19n01_07
45. Zhang, J.; Zhou, L.; Ma, R.; Jia, Y.; Yang, F.; Zhou, H.; & X. Cao, 2019. Influence of soil moisture content and soil and water conservation measures on time to runoff initiation under different rainfall intensities, *CATENA*, https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2019.104172.

The Effect of Conservation Agriculture Practices and Two Sampling Seasons on Some Soil Pore Characteristics

Lotfollah Abdollahi[1]: *Assistant professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran*
Abbas Alizadeh Shooshtari: *Instructor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran*
Lars Juhl Munkholm: *Professor, Department of Agroecology, Aarhus University, Research Centre Foulum, Denmark*

Received: 2023/05/14 **Accepted: 2023/07/15**

Extended abstract

1- Introduction

Conservation agriculture is considered by many researchers as a sustainable agriculture strategy. In this type of agriculture, continuous minimum mechanical soil disturbance (no tillage or reduced tillage), permanent organic soil cover (residues or cover crops) and diversification of crop species grown in sequences and/or associations are important components. This 11-year long-term (longitudinal) study was conducted to investigate and quantify individual and combined effects of conservation agriculture measurements (namely, plant rotation, crop residue retention, and conservation tillage) on soil volumetric water content (VWC) and soil bulk density (BD) of two sandy loam soils in a temperate region, Denmark. The possible effects of different sampling seasons (autumn and spring) on the study results are also investigated. It was hypothesized that there would be a positive effect of residue retention and diverse rotation on especially the no-tillage treatment.

2- Methodology

In a randomized complete block experimental design with four replications, an 11-year experiment was conducted in two research areas of Denmark. Three crop rotations/residue management treatments were compared. Tillage was included as a split plot factor. The rotation R2 is a rotation of winter crops (mainly cereals) with the retention of plant residues, the rotation R3 is a mixture of winter and spring plants (mainly cereals) with the removal of residues, and the rotation R4 is the same mixture of plants similar to R3 with the retention of residues. Each rotation includes traditional plowing treatments to a depth of 20 cm (MP), harrowing to a depth of 8-10 cm (H) and direct drilling (D). In mid-autumn of 2013, and early spring of 2014, soil samples were taken by cylinder from the depths of 4-8 and 12-16 cm (in 2014 only 4-8 cm depth were sampled). The amount of VWC, in matric potentials from 0 to 100 kilopascals, as well as the apparent soil bulk density were measured. Also, the possible effects of different sampling seasons (autumn and spring) on the study results are investigated.

3- Results

Tillage system and residue management, significantly affected soil properties studied. Direct drilling significantly increased bulk density at both depths (1.31 and 1.38 $gr.cm^{-3}$). The amount of VWC of the soil was also significantly different in tillage and plant residue treatments. At the depth of 4-8 cm, minimum tillage treatments (D and H) retained more moisture compared to MP (38.6-23% vs 35.8-22%). This trend was different in the depth of 12-16 cm and MP treatment showed the highest VWC in all suctions. The treatment of plant residue retention (R4) also caused the lowest amount of BD, especially at the depth of 12-16 cm. This treatment also significantly increased the VWC of the soil in macroporosity at both depths. The interaction effect of tillage and residue management showed a trend of lower BD where D and MP were combined with residue retention (R4) compared to their combination with residue removal (R3). The positive effect of retaining plant residues on increasing the water holding capacity in soil in a range of moistures that are available for plants was shown only in the spring sampling (2014) in both investigated areas. In the autumn sampling (2013), this effect was observed only at Foulum area and in low suctions (macroporosity).

[1] Corresponding Author: l.abdollah@pnu.ac.ir

4- Discussion & Conclusions

The above observations seem reasonable considering the depth of soil that is disturbed in different tillage systems of this study. In the H treatment, which creates the lowest bulk density at Foulum area, at a depth of 4-8 cm and has a lower bulk density, plowing (without turning) is done with a disk to a depth of 8-10 cm. It is obvious that the depth of 4-8 cm is located in this depth range and the reduction of bulk density is expected. In treatment D, where minimum soil disturbance occurs at this depth, higher bulk density is expected. In the lower soil depth, i.e. 12-16 cm, MP has resulted in the lowest soil bulk density compared to the two minimum tillage systems, D and H. The cause may be attributed to the plowing and soil inversion at a depth of 20 cm in this treatment. These observations are consistent with the results of several other studies (Ball et al., 1994; Bescansa et al., 2006; Hill et al., 1985; Schjønning & Rasmussen, 2000). In this regard, Tollner et al. (1984) studied the effect of no tillage and plowing with a mouldboard on the soil bulk density and reported that at a depth of 15 to 25 cm, bulk density in the no tillage system was higher than that of the mouldboard plowing, while at a depth of 30 to 40 cm, bulk density of the soil was higher in the mouldboard plowing system than no tillage system.
The positive effect of plant residues on reducing the soil bulk density after 11 years of implementing the treatments corresponds with the results presented by Blanco-Canqui and Lal (2007) and Lal (2000). They reported a significant increase in soil porosity after 10 years of application of 8 and 16 tons/ha per year of wheat and rice residues to topsoil. However, at zero kPa suction (saturation) and 1 kPa suction, the R4 treatment shows an increasing trend in the amount of water retention in the soil at both investigated depths. This means that plant residue management has increased the amount of moisture that can be stored in macropores. The results of this study are consistent with the results obtained previously from the same long-term test, especially at lower suctions (Abdollahi et al., 2014). Maintaining soil moisture in low suctions (macroporosity) in spring sampling (2014) at both sites and in autumn 2013 at Foulum is not very effective in terms of meeting plant needs. However, it is a desirable feature from the point of view of reducing the amount of runoff production and water erosion.

Key Words: bulk density, conservation tillage, plant residues, sampling season, soil water retention curve