اثر عملیات کشاورزی پایدار بر وزن مخصوص ظاهری و نگهداری رطوبت در خاک

لطف‌اله عبداللهی[۱] و هادی عامری خواه[۲]
۱- استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ۲- عضو هیأت علمی گروه خاکشناسی دانشگاه شهید چمران اهواز

چکیده

یک مطالعه بلند مدت برای بررسی اثر عملیات کشاورزی حفاظتی بر ظرفیت نگهداری رطوبت (VWC) و نیز وزن مخصوص ظاهری (*bd*) انجام گردید. 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 با حفظ بقایا است. هر تناوب شامل تیمارهای شخم سنتی (P)، دیسک کم عمق(H) و کشت مستقیم (D) است. میزان VWC در مکشهای ۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال و نیز *bd* اندازه‌گیری شد. تیمار شخم D، *bd* را افزایش داد. میزان VWC 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 P رطوبت بیشتری در خود نگهداری کردند. با اینحال در عمق ۱۶-۱۲ سانتیمتر تیمار P بیشترین VWC را باعث شد. تیمار نگهداری بقایای گیاهی (R4) نیز بخصوص در عمق ۱۶-۱۲ سانتیمتر باعث ایجاد کمترین مقدار *bd* گردید. این تیمار همچنین در هر دو عمق به طور معنی‌داری باعث افزایش VWC خاک در منافذ درشت گردید.

کلمات کلیدی: کشاورزی پایدار، تناوب گیاهی، شخم حفاظتی، بقایای گیاهی، منحنی رطوبتی خاک،

مقدمه

کشاورزی حفاظتی است که به بهبود سرویسهای اکوسیستم خاک کمک می‌کند (Palm et al., 2014). حداقل نمودن بهم خوردگی خاک (شخم حفاظتی) ، تناوب گیاهی و نگهداری بقایای گیاهی در زمین بعنوان عناصر کلیدی کشاورزی حفاظتی در نظر گرفته می‌شوند (Verhulst et al., 2010).

ظرفیت نگهداری رطوبت در خاک (VWC) و وزن مخصوص ظاهری (*bd*) از جمله فاکتورهایی هستند که برای مطالعه رفتار فیزیکی خاک در سیستمهای زراعی استفاده می‌شوند. این دو تأثیر اساسی بر روی فرایندهای مهم گیاه و خاک مانند حرکت آب، تراکم خاک، شخم و رشد ریشه دارند و بنابراین فاکتورهای ارزشمندی برای ارزیابی تأثیرات مدیریتهای مختلف خاک و گیاه محسوب می‌شوند (Tominaga et al., 2002). بر اساس گزارشهای مطالعاتی شخم باعث تغییر توزیع اندازه ذرات و در نتیجه تغییر خصوصیات نگهداری آب (در دسترس بودن و ذخیره آن) می‌شود (Bescansa et al., 2006, Hill et al., 1985). در مقایسه با شخم سنتی، مشاهده شده که شخم حفاظتی باعث افزایش VWC شده است (Bescansa et al., 2006). در میان کشاورزان بزرگترین چالش نهادینه شدن شخم حفاظتی، ایجاد مشکل تراکم خاک است که منجر به افزایش *bd* و در نتیجه ایجاد محدودیت در رشد ریشه گیاهان می‌شود (Logsdon and Karlen, 2004; Soane et al., 2012). کشاورزی پایدار ترکیبی است از چندین عملیات که آگاهی از اثرات ناشی از استفاده از هر کدام از این عملیات به طور جداگانه یا ترکیبی، برای توسعه متوازن آن سیستم ضروری است. اگر چه در بعضی از مطالعات انجام شده فواید این عملیات بر روی محصول و نیز ساختمان خاک گزارش شده است(Gaudin et al., 2015; Munkholm et al., 2013)، با این حال آزمایشهای صحرایی بسیار کمی همه عملیات کشاورزی پایدار (شخم، تناوب و بقایای گیاهی) را به صورت یکجا مورد بررسی قرار داده است. در کشور دانمارک به دلیل انجام کشت دیم غلات، VWCخیلی مهم است. از طرفی اجرای عملیات کشاورزی حفاظتی از جمله اجرای سیستم شخم حداقل به دلیل افزایش مقاومت خاک به نفوذ ریشه و نیز افزایش *bd* با محدودیتهایی روبروست (Abdollahi et al., 2017). هدف این آزمایش بررسی اثرات ۱۱ سال اجرای عملیات کشاورزی پایدار از قبیل شخم حداقل، تناوب گیاهی و مدیریت بقایای گیاهی بر روی VWC و *bd* می‌باشد. برای این منظور اثرات مستقل و نیز متقابل این مدیریتها بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

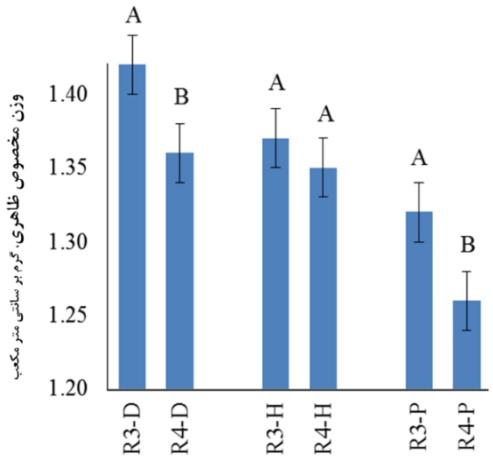
محل کرتهای آزمایشی در این مطالعه در مرکز تحقیقاتی Foulum در عرض ´56°30 شمالی و طول ´9°35 شرقی قرار داشت. خاک آزمایش لومی شنی با درصد ماده آلی ۳/۱ بود. متوسط میزان دما و بارندگی در منطقه مورد آزمایش به ترتیب ۷/۳ و ۶۲۶ میلیمتر بود. در این مطالعه یک آزمایش صحرایی طولانی مدت که از سال ۲۰۰۲ شروع شده بود مورد استفاده قرار گرفت. طرح آزمایشی یک طرح بلوکهای کامل تصادفی خرد شده با چهار تکرار بود. نوع تناوب (۳ تناوب) کرت اصلی و سیستم شخم (۳ سیستم) کرت فرعی بود (Hansen et al., 2010). تناوب زراعی به گونه ای انتخاب شده بود که در بر گیرنده گیاهان مرسوم مورد استفاده در دانمارک باشد. در این مطالعه سه تناوب R3, R2 و R4 مورد استفاده قرار گرفت. تناوب R2 شامل فقط گیاهان زمستانه (به طور عمده غلات زمستانه) می‌شد 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 شده و در کرت باقی می‌ماند). بقایای گیاهی در R2 هم باقی می‌ماند. سیستمهای شخم عبارت بودند از شخم سنتی با گاوآهن تا عمق ۲۰ سانتیمتر (P)، و نیز نوعی شخم حداقل با دیسک تا عمق ۱۰-۸ سانتیمتر (H) که خاک را زیر رو نمی‌کرد. همچنین سیستم کشت دیگری با نام کشت مستقیم (D) که حداقل بهم خوردگی خاک انجام می‌شود و چندان در دانمارک مرسوم نیست بکار گرفته شد. عملیات شخم سالی یکبار قبل از کشت انجام می‌شد. کرتهای مربوط به شخم سنتی در بهار قبل از کشت محصول، شخم می‌شدند. نمونه‌برداری در پاییز و از دو عمق ۸-۴ و ۱۶-۱۲ سانتیمتری انجام گردید. در مجموع ۲۱۶ نمونه برداشت گردید. رطوبت حجمی از طریق جعبه شن برای پنج مکش (۱- ، ۳- ، ۱۰- ، ۳۰- و ۱۰۰- کیلو پاسکال) و وزن مخصوص ظاهری به روش استوانه تعیین شد. آنالیز آماری داده ها بر اساس طرح کرت های خرد شده در قالب بلوک با نرم افزار SAS صورت گرفت.

نتایج و بحث

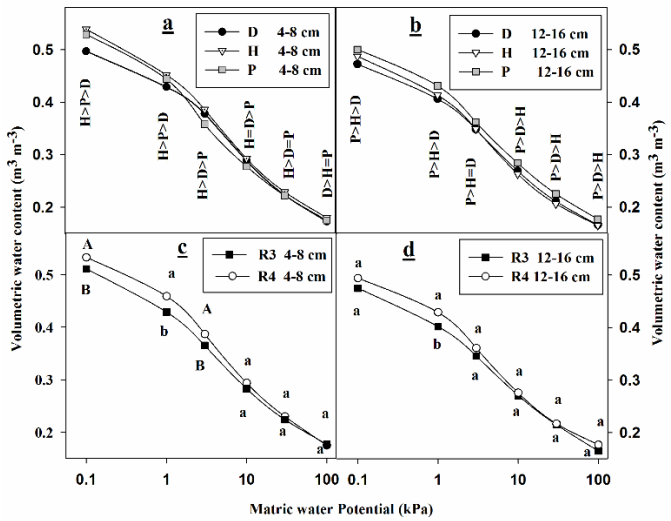
سیستم شخم *bd* را در هر دو عمق خاک به طور معنی‌داری (p=0.05) تحت تأثیر قرار داد (جدول ۱). در عمق ۸-۴ سانتیمتری دیسک تا عمق ۱۰-۸ سانتیمتر (H) کمترین میزان *bd* را در مقایسه با D و P موجب گردید (D>P>H). در عمق ۱۶-۱۲ سانتیمتر P کمترین *bd* را در مقایسه با D و H ایجاد کرد (D>H>P). اثر تناوب نیز فقط در عمق ۱۶-۱۲ سانتیمتر معنی‌دار بود، جایی که نگهداری بقایای گیاهی (R2 و R4) باعث ایجاد کمترین *bd* در مقایسه با تیمار حذف بقایای گیاهی (R3) گردید (جدول ۱). البته در عمق ۸-۴ سانتیمتر نیز گرایش به سمت تأثیر معنی‌دار تناوب وجود داشت (p=0.078) و همان روند موجود در عمق ۱۶-۱۲ سانتیمتر مشاهده شد. اثر متقابل شخم و مدیریت بقایا در شکل ۱ نشان داده شده است. اگر چه این اثر معنی‌دار نشده است (p=0.10)، با این حال روند تأثیر تیمارها نشان می‌دهد که تیمار نگهداری بقایای گیاهی در ترکیب با D و P (R4-D و R4-P) باعث کاهش *bd* خاک نسبت به تیمار حذف بقایای گیاهی (R3-D و R3-P) شده است (شکل ۱). سیستم شخم و مدیریت بقایای گیاهی میزان VWC در مکشهای مختلف را به صورت معنی‌داری تحت تأثیر قرار داده است (شکل ۲). در عمق ۸-۴ سانتیمتری، در مکش های ۳ تا ۳۰ کیلو پاسکال عموماً تیمارهای شخم حداقل (D و H) در مقایسه با P، رطوبت خاک بیشتری در خود نگهداشته اند.

جدول ۱. وزن مخصوص ظاهری خاک در تیمارهای مختلف شخم (D, H و P) و تناوب (R2، R3 و R4). حروف کوچک و بزرگ نشان دهنده تفاوت آماری تیمارها در سه سیستم شخم یا سه نوع تناوب به ترتیب در سطح معنی‌داری ۵ و ۱۰ درصد می‌باشد.

عمق	سیستم شخم			نوع تناوب		
(سانتیمتر)	D	H	P	R2	R3	R4
۸-۴	۱/۳۱^{a}	۱/۲۰^{c}	۱/۲۳^{b}	۱/۲۵^{AB}	۱/۲۸^{A}	۱/۲۲^{B}
۱۶-۱۲	۱/۳۸^{a}	۱/۳۴^{b}	۱/۲۸^{c}	۱/۳۱^{b}	۱/۳۷^{a}	۱/۳۲^{b}



شکل ۱. اثر متقابل تیمارهای شخم (D, H و P) و مدیریت بقایای گیاهی (R3 و R4) بر *bd* خاک. حروف بزرگ نشان دهنده اثر تیمارها در سطح ۱۰ درصد می‌باشد. مقایسه بین دو تیمار همجوار انجام شده است. میله ها نشان دهنده انحراف معیار استاندارد می‌باشد.



شکل ۲. نمودار نگهداری رطوبت در خاک در تیمارهای مختلف شخم (D, H و P) و مدیریت بقایای گیاهی (R3 و R4) در عمق های ۸-۴ و ۱۶-۱۲ سانتیمتر. در شکلهای a و b علامتهای > بین دو تیمار شخم به معنای تفاوت معنی‌دار آنها در سطح ۵ درصد می باشد. در شکلهای c و d حروف کوچک و بزرگ نشان دهنده تفاوت آماری تیمارها در مکشهای مشخص به ترتیب در سطح معنی‌داری ۵ و ۱۰ درصد می‌باشد.

در مکشهای کمتر و اشباع با این حال میزان VWC در خاک در تیمارهای کشت مستقیم (D) به طور معنی‌داری از دو سیستم کشت دیگر کمتر است. این روند در عمق پایینتر (۱۶-۱۲سانتیمتر) معکوس می‌شود. در این عمق تیمارهای تحت کشت سنتی (P) در تمام مکشها به طور معنی‌داری بیشتر از دو تیمار دیگر، رطوبت خاک را در خود نگهداشته‌اند (شکل ۲). اثر مدیریت بقایای گیاهی در هر دو عمق مورد بررسی تقریبا یکسان است و در مکشهای ۳ تا ۱۰۰ کیلو پاسکال تفاوتی بین تیمارهای مدیریت بقایا دیده نمی‌شود. با این حال در مکشهای صفر (اشباع) و ۱ کیلو پاسکال، تیمار R4 باعث افزایش VWC در هر دو عمق مورد بررسی شده است (شکل ۲).

سیستم شخم، *bd* خاک را در دو عمق مورد بررسی تحت تأثیر قرار داد (جدول ۱). در عمق ۸-۴ سانتیمتر، D تراکم خاک را در مقایسه با P و H افزایش داد و H کمترین تراکم را ایجاد نمود (D بیشترین *bd* و H کمترین *bd* را ایجاد نمود). این

مشاهده با توجه به عمقی از خاک که سیستمهای شخم در این مطالعه بهم می‌زنند منطقی به نظر می‌رسد. در تیمار H که کمترین تراکم ایجاد شده است عملیات شخم (بدون برگردان) بوسیله دیسک تا عمق ۱۰-۸ سانتیمتر انجام می‌شود. بدیهی است که عمق ۸-۴ سانتیمتر در این محدوده قرار دارد و کاهش تراکم خاک مورد انتظار می‌باشد. در تیمار D نیز که حداقل بهم خوردگی خاک در این عمق اتفاق می‌افتد تراکم بیشتر خاک منطقی به نظر می‌رسد. در عمق پایین‌تر خاک یعنی ۱۶-۱۲ سانتیمتر، P کمترین تراکم را در مقایسه با دو تیمار شخم حداقل (D و H) ایجاد کرد. دلیل آن می‌تواند عمق ۲۰ سانتیمتری شخم و برگردان خاک در این تیمار باشد. این مشاهدات با نتایج چند مطالعه دیگر مطابقت دارد (Ball et al., 1994; Hill et al., 1985; Schjonning and Rasmussen, 2000). سیستم شخم همچنین VWC خاک را به طور معنی‌داری تغییر داد. البته نحوه اثر انواع شخم در دو عمق مورد مطالعه متفاوت بود (شکل ۲). به این معنی که با وجود اثر مثبت تیمارهای شخم حداقل (D و H) نسبت به تیمار شخم سنتی (P)، در افزایش VWC بخصوص در مکشهای ۳ تا ۱۰ کیلوپاسکال در عمق ۸-۴ سانتیمتر، در عمق ۱۶-۱۲ سانتیمتر، این تیمار P بود که در تمام مکشهای مورد مطالعه نسبت به تیمارهای شخم حداقل، بیشترین VWC را داشت (شکل ۲). نتایج این آزمایش با نتایج بدست آمده قبلی از همین آزمایش بلند مدت، بخصوص در مکشهای پایین‌تر مطابقت دارد. Abdollahi و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که کمتر بودن *bd* در تیمار P 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 P میزان بیشتری آب را در منافذ درشت‌تر از ۳۰ میکرون نگهداری می‌کند. توضیح اینکه بر اساس معادله پیشنهاد شده توسط Carter and Ball (1993) یعنی:

$$D = \frac{-3000}{\varphi m} \qquad (۱)$$

می‌توان قطر معادل منافذ خاک در هر مکش را بدست آورد. در این معادله D، نماینده قطر منافذ بر حسب میکرومتر و φm مکش خاک بر حسب هکتوپاسکال یا سانتیمتر است.

بطور کلی می‌توان گفت تفاوت واضحی بین دو نوع تناوب (R2 در مقابل R3/R4) وجود نداشته است. با اینحال مدیریت بقایای گیاهی (R3 در مقابل R4)، *bd* و VWC خاک را به طور معنی‌داری تغییر داد (جدول ۱ و شکل ۲).تناوب R4 (نگهداری بقایا)، *bd* را در هر دو عمق نسبت به R3 (حذف بقایا) کاهش داد. این مشاهده با نتایج تعدادی مطالعه دیگر مطابقت دارد (Blanco-Canqui and Lal, 2007; Lal, 2000). آنها کاهش معنی‌دار *bd* خاک را ۱۰ سال بعد از بکار بردن ۸ تا ۱۶ تن در هکتار در سال بقایای گندم و برنج به خاک سطحی گزارش کردند. اثر مثبت نگهداری بقایای گیاهی بر افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک در هر دو عمق مورد بررسی در مکشهای کم قابل توجه است. در هر دو عمق، تیمار R4 به طور معنی‌داری باعث افزایش VWC خاک در مناقذ درشت (ماکروپروزیته) شده است. علی رغم اینکه در کرتهای آزمایشی در این مطالعه، نسبت بین درصد رس (۹/۲٪) به کربن آلی (۱/۸٪) ۵/۱ و بسیار کوچکتر از ۱۰ یعنی حد بحرانی گزارش شده توسط (Dexter et al., 2008) و (Schjonning et al., 2012) برای تأثیر پذیری خاکها از تیمارهای افزایش ماده آلی است (به این معنی که مطابق این گزارشها خاکهای با نسبت رس به کربن آلی کمتر از ۱۰ به تیمارهای افزایش ماده آلی پاسخ مثبت نمی‌دهند). نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در این خاکها با وجود نسبت کم رس به کربن هم می‌توان بدست آمدن نتایج مثبت از افزودن کربن بر خصوصیات فیزیکی خاک را انتظار داشت. این اثر مثبت از کربن می‌تواند ناشی از بخش ناپایدار کربن بخصوص پلی ساکاریدها باشد که البته در این آزمایش اندازه‌گیری نشده است.

نگهداری بقایای گیاهی (R4) بخصوص در ترکیب با D و P باعث بهبود شرایط تهویه‌ای خاک از طریق کاهش *bd* گردید (شکل ۱). در مطالعه انجام شده از همین محل Abdollahi و Munkholm (۲۰۱۷) نشان دادند که نگهداری بقایای گیاهی در سیستم کشت مستقیم (D) باعث افزایش ۷۹ درصدی نفوذپذیری خاک به هوا (air permeability) و کاهش ۱۵۰ درصدی میزان منافذ مسدود شده خاک (blocked air porosities) گردیده است. این اثر متقابل نشان می‌دهد که نگهداری بقایای گیاهی در سیستم کشت مستقیم می‌تواند باعث بهبود جابجایی آب و هوا در خاک شود و محدودیتهای مربوط به اجرای شخم حفاظتی را بر طرف نموده یا کاهش دهد.

منابع:

Abdollahi, L., and Munkholm, L. J. (2017). Eleven Years' Effect of Conservation Practices for Temperate Sandy Loams: II. Soil Pore Characteristics. Soil Science Society of America Journal 81, 392-403.

Abdollahi, L., Getahun, G. T., and Munkholm, L. J. (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, 380-391.

Abdollahi, L., Munkholm, L. J., and Garbout, A. (2014). Tillage System and CoverCrop Effects on Soil Quality: II. Pore Characteristics. *Soil Science Society of America Journal*78, 271-279.

Ball, B. C., Lang, R. W., Robertson, E. A. G., and Franklin, M. F. (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, 97-118.

Bescansa, P., Imaz, M. J., Virto, I., Enrique, A., and Hoogmoed, W. B. (2006). Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil and Tillage Research*87, 19-27.

Blanco-Canqui, H., and Lal, R. (2007). Impacts of Long-Term Wheat Straw Management on Soil Hydraulic Properties under No-Tillage. *Soil Science Societyof America Journal*71.

Blevins, R. L., Doyle Cook, S. H. Philips, and Philips, R. E. (1971). influence of no-tillage on soil moisture. *Agron. J.*63, 593-596.

Carter, M. R., and Ball, B. C. (1993). Soil porosity. *In* "Soil sampling and methods of analysis" (M. R. C. (ed.), ed.). Lewis Publishers, Boca Raton, Fl.

Dexter, A. R., Richard, G., Arrouays, D., Czyz ,E. A., Jolivet, C., and Duval, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma*144, 620-627.

Gaudin, A. C., T.N. Tolhurst, A.P. Ker, K. Janovicek, C. Tortora, R.C. Martin, and Deen, W. (2015). Increasing crop diversity mitigates weather variations
and improves yield stability. *PLoS One*.

Hansen, E. M., Munkholm, L. J., Melander, B., and Olesen, J. E. (2010). Can non-inversion tillage and straw retainment reduce N leaching in cereal-based crop rotations? *Soil & Tillage Research*109, 1-8.

Hill, R. L., Horton, R., and Cruse, R. (1985). Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*49, 1264-127.۰

Lal, R. (2000). Mulching effects on soil physical quality of an alfisol in western Nigeria. *Land Degradation & Development*11, 383-392.

Logsdon, S. D., and Karlen, D. L. (2004). Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil & Tillage Research*78, 143-149.

Munkholm, L. J., Heck, R. J., and Deen, B. (2013). Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil & Tillage Research*12.۹۱-۸۵ ,۷

Palm, C., Blanco-Canqui, H., DeClerck, F., Gatere, L., and Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment*187, 87-105.

SAS Institute Inc., C., NC, USA (2009). User's Guide: Statistics. SAS Inst., Cary, NC.

Schjonning, P., de Jonge, L. W., Munkholm, L. J., Moldrup, P., Christensen, B. T., and Olesen, J. E. (2012). Clay Dispersibility and Soil Friability-Testing the Soil Clay-to-Carbon Saturation Concept. *Vadose Zone Journal*11.

Schjonning, P., and Rasmussen, K. J. (2000). Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil & Tillage Research*57, 69-82.

Soane, B. D., Ball, B. C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., and Roger-Estrade, J. (20 .(۱۲No-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, 66-87.

Tominaga, T. T., Cassaro, F. A. M., Bacchi, O. O. S., Reichardt ,K., Oliveira, J. C. M., and Timm, L. C. (2002). Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. *Australian Journal of Soil Research*40, 605-614.

Verhulst, N., Govaerts, B., Verachtert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P., Deckers, J., and Sayre, K. D. (2010). Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems? *In* "Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality." (R. Lal and B. A. E. Stewart, eds.), pp. 137-208. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Effects of conservation agriculture practices on bulk density and soil water retention

L. Abdollahi[1]and H. Amerikhah[2]

1. Assistant professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran
2. Faculty member of soil science group, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran

Abstract

A long term study was conducted in a sandy loam soil in Denmark to investigate the effects of conservation practices including rotation, residue management and conservation tillage on volumetric water content (VWC) and bulk density (*bd*). Rotation R2 is a rotation of winter crops with residue retained, rotation R3 a mix of winter and spring crops with residue removed, and rotation R4 the same mix of crops like R3, but with residue retained. In each rotation the following tillage systems were included: moldboard plowing to a depth of 20 cm (P), harrowing to 8-10 cm depth (H), and direct drilling (D). Soil cores were taken from the 4-8 and 12-16 cm depth in autumn 2013. Water retention was determined in matric potentials ranging from 0 to 100 kPa. Direct drilling resulted in a larger *bd* at both sampling depths. At 4-8 cm depth, VWC was larger in reduced tillage systems (D and H) especially at 3 to 10 kPa matric potentials compared to P. At 12-16 cm depth, however this was the opposite and P resulted in a larger amount of VWC compared to H and D. Residue retention treatment (R4) enhanced the ability of soil to hold water (VWC) especially in macro-porosity, and decreased *bd* at both sampling depths.

Keywords: Sustainable agriculture, Crop rotation, Conservation tillage, crop residue and water retention curve