

بررسی اثر تراکم بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک لوم

نوشین رضائی*^۱ - غلامعباس صیاد^۲ - عبدالرحمن برزگر^۳ - غلامحسین حق‌نیا^۴ - یعقوب منصوری^۵

تاریخ دریافت: ۹۰/۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۹۰/۸/۲۳

چکیده

ارزیابی کمی تراکم خاک به منظور بهبود روش‌های مدیریتی کشاورزی جهت کاهش مشکلات ناشی از تراکم در محیط زیست و سیستم‌های تولید محصول ضروری می‌باشد. تراکم خاک با تغییر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک، نفوذ آب به خاک و قابلیت دسترسی گیاهان به آب و هوا را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داده که مجموع اثرات مذکور باعث کاهش کیفیت خاک می‌گردند. بنابراین این مطالعه به منظور بررسی اثر تراکم بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک لومی در استان خوزستان صورت گرفت. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با پنج تیمار (شاهد (بدون عبور)، یک بار، دو بار، چهار بار و هشت بار عبور تراکتور) و در سه تکرار انجام شد. پارامترهای فیزیکی از قبیل جرم مخصوص ظاهری، تخلخل کل، شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، منحنی مشخصه رطوبتی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. پارامترهای هیدرولیکی شامل هدایت هیدرولیکی (اشباع و غیراشباع)، تعداد منافذ، درصد جریان عبوری از منافذ و تخلخل مؤثر با استفاده از دستگاه نفوذسنج صفحه‌ای در چهار پتانسیل (۰، -۳، -۵ و -۱۵ سانتی‌متر آب) در مزرعه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که در اثر تراکم ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک به‌طور معنی‌داری تغییر یافتند ($p < 0.01$). اثرات تراکم در تیمار هشت بار عبور تراکتور بیشتر از تیمارهای دیگر بود. میزان جرم مخصوص ظاهری در تیمار هشت بار عبور تراکتور نسبت به تیمار شاهد ۵/۵ درصد افزایش یافت. مقدار تخلخل کل و همچنین شاخص MWD در تیمار هشت بار عبور تراکتور نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۶ و ۴۶ درصد کاهش یافتند. نتایج به‌دست آمده توسط دستگاه نفوذسنج صفحه‌ای نشان داد که تعداد منافذ درشت و متوسط، درصد جریان عبوری و هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع در تیمار هشت بار عبور تراکتور نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۸۵، ۶۲/۵، ۴۷، ۷۱ و ۶۶/۵ درصد کاهش یافتند. بیشترین اثر تراکم در عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر بود و از این عمق به بعد تغییراتی در خصوصیات فیزیکی خاک در اثر تراکم ایجاد شده مشاهده نگردید.

واژه‌های کلیدی: خوزستان، درصد جریان عبوری از منافذ، شاخص MWD

مقدمه

نمی‌توان از ارکان مستقیم رشد گیاه شمرد، بلکه باید از ویژگی‌هایی به حساب آورد که عملاً در عوامل رشد گیاه مؤثر می‌باشند. ساختمان خاک بر روی اندازه منافذ و در نتیجه فضای رشد ریشه و حرکت آب و اکسیژن به طرف ریشه‌ها تأثیر دارد. تخریب ساختمان خاک باعث کاهش مقدار آب قابل استفاده گیاه می‌شود، زیرا در حالت مرطوب با کاهش تهویه خاک و در حالت خشک با افزایش مقاومت فروروی، رشد ریشه را محدود می‌نماید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان خاک از مهم‌ترین خصوصیات خاک بوده که بسیاری از خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را زیر تأثیر قرار می‌دهد.

تراکم خاک به‌ویژه به سبب پایداری و دشواری برای به‌سازی مسئله‌ساز است. نوسازی خاک به‌طور طبیعی ممکن است بر اثر فعالیت گیاهان و جانوران خاک و فرآیندهای غیر زنده از جمله انقباض ناشی از خشکی و یخبندان رخ دهد. با این حال پژوهش‌های مرور شده به‌وسیله هاکانوسن و ریدر (۱۱)، نشان می‌دهد که کارایی این فرآیندها همراه با عمق زیر ناحیه ریشه به سرعت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر سست کردن فیزیکی این خاک‌ها به وسیله شخم عمیق

امروزه ماشین‌ها و تراکتورهای بسیار پرتوان و سنگین‌وزن روی مزارع سرتاسر جهان در حرکتند و همین موضوع سبب شده است که تراکم به یک مشکل جهانی تبدیل شده و بسیاری از اراضی دنیا را در برگیرد (۴). این وضعیت با هدف کاهش نیروی انسانی همراه با افزایش اندازه مزرعه و نیاز به افزایش کارایی اپراتورهای فردی صورت گرفته است. با این حال، دشواری‌هایی نیز به سبب افزایش بار فشار روی سطح خاک به وجود آورده است. برخی از جدی‌ترین مشکلات در نتیجه افزایش اندازه ماشین‌ها به تغییر شکل خاک، فشردگی و انهدام ساختمان خاک می‌انجامد (۱۶). ساختمان خاک را

۳ و ۲۱- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

(* نویسنده مسئول: Email: Ramezani_nooshin@yahoo.com)

۴- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۵- استادیار گروه ماشین آلات کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

منطقه لوم بوده و ویژگی‌های اولیه خاک منطقه مورد مطالعه قبل از اعمال تیمارها در جدول ۱ ارائه شده است.

قبل از اجرای تیمارها، کرت‌ها پس از شخم سطحی و دیسک در یک زمان در معرض آبیاری سطحی قرار گرفتند، به گونه‌ای که در هنگام آزمایش تراکم (عبور تراکتور) رطوبت سطح خاک نزدیک به رطوبت ظرفیت مزرعه بود. میزان رطوبت خاک به روش وزنی در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. بعد از آبیاری، تیمارهای مورد نظر توسط تراکتور مدل MF399 (عرض تراکتور: ۲ متر، طول تراکتور: ۴/۳ متر، طول تحت فشردگی: ۱۸ متر و سرعت پیشروی ۵/۷ کیلومتر بر ساعت) اعمال شدند. تیمارها شامل (۱) شاهد (بدون عبور تراکتور)، (۲) یک بار عبور، (۳) دو بار عبور، (۴) چهار بار عبور و (۵) هشت بار عبور تراکتور بودند و همگی همزمان در یک مکان اعمال شدند.

یک روز پس از عبور تراکتور، نمونه‌های دست‌نخورده از محل عبور لاستیک تراکتور، از عمق‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰، ۳۰-۲۰، ۴۰-۳۰، ۵۰-۴۰ و ۶۰-۵۰ سانتی‌متری تهیه شدند. از هر عمق سه نمونه دست‌نخورده تهیه گردید و جرم مخصوص ظاهری توسط استوانه‌های فولادی اندازه‌گیری شد (۲). پس از محاسبه جرم مخصوص ظاهری، درصد تخلخل کل خاک نیز به کمک معادله ۱ محاسبه شد (۲).

$$f = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_b}\right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن f : درصد تخلخل کل خاک، ρ_b : جرم مخصوص ظاهری و ρ_s : جرم مخصوص حقیقی خاک (چگالی واقعی) می‌باشد که ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در مقابل اثر آب از روش الک تر^۱ استفاده شد (۲).

به‌جای اینکه مشکل را بر طرف سازد آن را تشدید می‌کند. فشردگی ثانوی خاک از تراکم نخست آن بدتر بوده زیرا ساختمان خاک بر اثر این گونه عملیات درهم شکسته و ضعیف می‌شود. لجن‌گراس (۱۵)، اثر تردد ماشین آلات را بر تراکم‌پذیری هشت خاک مورد مطالعه قرار داد و عنوان کرد که ۳ بار و در بعضی مواقع تا ۱۸ بار تردد ماشین آلات باعث افزایش تراکم خاک‌ها شد. راقاوان و همکاران (۲۱) نشان‌دادند که هر چه تعداد تردد تراکتور بیشتر شود نفوذ ریشه کاهش پیدا می‌کند و نیز زمانی که خاک در اثر ۱۵ بار عبور تراکتور متراکم گردید عمق نفوذ ریشه به یک سوم خاک غیر متراکم کاهش یافت.

در ایران از یک سو مشکلات خشکی و مقدار کم ماده آلی در خاک‌ها و از سوی دیگر تردد زیاد وسایل کشاورزی در مراحل مختلف کاشت محصولات (کشت محصول تا برداشت) باعث شده است تا تراکم خاک یکی از مشکلات مهم در کشاورزی باشد. تراکم خاک با ایجاد مشکلات مختلف تهویه‌ای و نفوذ آب در خاک باعث کاهش عملکرد و در برخی مواقع مرگ گیاهان می‌گردد. این مشکل به‌ویژه در خاک‌های با بافت سنگین نظیر خاک‌های استان خوزستان بیشتر وجود دارد. گزارش‌های موجود در برخی نقاط استان به طور مثال در کشت و صنعت کارون نشان دهنده وجود تراکم در خاک‌های استان و اهمیت توجه به این مسئله و حل آن است. بنابراین ارزیابی تراکم خاک و تغییرات مربوط به خلل و فرج در جلوگیری از تخریب خاک از اهداف این مطالعه است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در یکی از مزرعه‌های تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز با عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی و ارتفاع ۲۰ متر از سطح دریا انجام شد. تحقیق با استفاده از طرح آماری فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تیمار و در سه تکرار انجام شد. بافت

جدول ۱- برخی ویژگی‌های اولیه خاک مورد مطالعه^۱

عمق (cm)	شن	سیلت	رس	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	تخلخل	مواد آلی
		-----%				-----%	
۰-۱۰	۴۰/۵	۳۰/۵	۲۹	لوم	۱/۳۲	۵۰/۱	۰/۶۷
۱۰-۲۰	۴۷/۵	۳۴	۱۸/۵	لوم	۱/۳۴	۴۹/۴	۰/۳۷
۲۰-۳۰	۴۳/۵	۳۴	۲۲/۵	لوم	۱/۳۴	۴۹/۴	۰/۳۰
۳۰-۴۰	۴۵	۲۸	۲۷	لوم	۱/۳۵	۴۹/۰	۰/۲۲
۴۰-۵۰	۵۱	۲۰	۲۹	لومی رسی شن	۱/۳۳	۴۹/۴	۰/۱۷
۵۰-۶۰	۶۵	۲۰	۱۵	لومی شنی	۱/۳۶	۴۸/۶	۰/۱۳

می‌توان سرعت نفوذ را به وسیله معادله ۳ تخمین زد.

$$V_{\infty} = K_s + \frac{4\phi}{\pi z_0} \quad (3)$$

که در آن V_{∞} ، سرعت نفوذ آب به درون خاک (LT^{-1})، z_0 شعاع منبع مدور (L)، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (LT^{-1}) و پتانسیل ماتریک خاک می‌باشد (LT^{-1}).

پتانسیل ماتریک را می‌توان با انتگرال‌گیری از خصوصیات هیدرولیکی محاسبه نمود. بنابراین پتانسیل جریان ماتریک عبارت است از:

$$\phi_s = \int_{\theta_n}^{\theta_0} D(\theta) d\theta = \int_h^z K(h) dh \quad (4)$$

در معادله ۴ $K(h)$ ، هدایت هیدرولیکی غیراشباع (LT^{-1})، h_1 پتانسیل اولیه خاک غیرمربوط (L)، می‌باشد. طبق معادله ۴، معادله ۵ به دست می‌آید:

$$K(h) = K_s \exp(-\alpha h) \quad (5)$$

در معادله بالا α عدد جذب می‌باشد که از معادله ۶ به دست می‌آید:

$$\phi_s = \frac{K_s}{\alpha} \quad (6)$$

این فرمول به معادله وودینگ اجازه داد که برای نفوذ حجم پایدار از حوضچه مدور استفاده شود که به صورت معادله ۷ نوشته می‌شود:

$$\phi_{\infty} = K(h_0) \left(\pi r_0^2 + \frac{4z_0}{\alpha} \right) \quad (7)$$

که در اینجا ϕ_{∞} شدت نفوذ نهایی از دستگاه می‌باشد. آنکنی و همکاران یک تحلیل قرینه از معادله وودینگ (معادله ۷) ارائه دادند. در اینجا تحلیلی که از دو بار آبی استفاده شده است، شرح داده می‌شود. در این روش فرض شده است که خاک یک تابع هدایت نمایی (معادله ۵) دارد، در نتیجه از معادله ۵ داریم.

$$K_1 = K_s \exp(\alpha z_1) \quad (8)$$

$$K_2 = K_s \exp(\alpha h_2) \quad (9)$$

بنابراین از ترکیب دو معادله بالا و معادله ۷ خواهیم داشت:

$$\phi_1 = K_1 \left(\pi r_0^2 + \frac{4z_0}{\alpha} \right) \quad (10)$$

$$\phi_2 = K_2 \left(\pi r_0^2 + \frac{4z_0}{\alpha} \right) \quad (11)$$

و ترکیب آن‌ها نتیجه می‌دهد که:

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{K_1}{K_2} = \exp[\alpha(h_1 - h_2)] \quad (12)$$

بنابراین با توجه به معادله ۱۲ می‌توان اندازه موئینگی خاک را به دست آورد.

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)}{z_1 - z_2} \quad (13)$$

در هر تیمار از عمق‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متر نمونه برداری خاک با سه تکرار انجام شد. ۲۰ گرم خاک هوا خشک شد و از هر نمونه پس از عبور از الک ۴ میلی‌متر از سری الک‌های با قطر ۱، ۲، ۵، ۱۰ و ۲۵ میلی‌متر به مدت ۳ دقیقه در آب عبور داده شد. سپس خاک خشک باقی‌مانده در روی هر الک وزن شد و با استفاده از معادله ۲ شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها که به اختصار MWD^۱ نامیده می‌شود محاسبه شد (۲).

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (2)$$

در این رابطه: X_i ، میانگین قطر خاکدانه‌هایی که بر روی هر الک باقی می‌ماند (میانگین الک بالا و پائین)؛ W_i ، نسبت وزن خاکدانه‌ها در هر الک به وزن کل خاک به کار برده شده در ابتدای آزمایش و n تعداد الک به کار برده شده می‌باشد. همچنین درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر در هر تیمار محاسبه گردید.

منحنی رطوبتی در پتانسیل‌های صفر، ۱۰-، ۳۰-، ۱۰۰-، ۵۰۰- و ۱۵۰۰- کیلوپاسکال با استفاده از دستگاه صفحات فشاری^۲ رسم شد. هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع، توزیع اندازه منافذ، تخلخل مؤثر، درصد جریان عبوری آب از منافذ با استفاده از دستگاه نفوذسنج صفحه‌ای^۳ در پتانسیل‌های صفر، ۳-، ۵- و ۱۵- سانتی‌متر آب به شرح زیر اندازه‌گیری شدند. به منظور استفاده از دستگاه نفوذسنج صفحه‌ای مکانی ابتدا سطح از هر گونه گیاه، سنگ، کاه و کلش پاک شد و نسبتاً به سطح همواری تبدیل گردید. سپس برای تماس بهتر دیسک با سطح خاک از یک لایه ۳-۵ میلی‌متری از ماسه بسیار نرم بر سطح مورد نظر استفاده شد. زیرا سطح باید کاملاً تراز باشد تا دستگاه به صورت تراز بر روی سطح خاک قرار گیرد. پس از آماده شدن بستر خاک، دستگاه به آرامی بر روی سطح مورد نظر قرار گرفت و برای تماس بهتر کمی دستگاه با فشار بسیار کم (که موجب فشردگی خاک زیرین نشود) بر روی سطح آماده شده فشرده شد. با شروع خروج آب از مخزن دیسک افت سطح آب در مخزن در زمان‌های معین قرائت گردید. برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر-اشباع در هر پتانسیل میزان نفوذ نهایی آب به درون خاک اندازه‌گیری شد و سپس با استفاده از تحلیل‌های آنکنی^۴ و وودینگ (۵)، از اعداد قرائت شده در هر پتانسیل استفاده شد.

روش تحلیلی آنکنی و وودینگ برای محاسبه هدایت هیدرولیکی

وودینگ یک سری تحلیل ریاضی برای جریان پایدار از یک حوضچه کم عمق سطحی مدور آب آزاد ارائه نمود. طبق نظر ایشان

- 2- Mean Weight Diameter
- 3- Pressure Plate
- 4- Disc Infiltrometer
- 5- Ankeny

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی خاک

میزان رطوبت اولیه قبل از اعمال تیمارها در حدود $18/5 \pm 1$ درصد وزنی بود. رطوبت اولیه خاک از عوامل مهم و مؤثر بر تراکم و قابلیت تراکم‌پذیری خاک می‌باشد. مک ناب (۱۹)، بیان کرد در رطوبت زیاد خاک، اثر تراکم بر خصوصیات فیزیکی خاک (از جمله جرم مخصوص ظاهری و تخلخل) نسبت به خاک با رطوبت کمتر، افزایش می‌یابد. بافت خاک در هر ۵ تیمار شبیه هم بود. در عمق ۴۰-۰ سانتی‌متری لوم، در عمق ۵۰-۴۰ سانتی‌متری لومی رسی شنی و در عمق ۶۰-۵۰ سانتی‌متری لومی شنی گزارش شد.

شکل ۱ تغییرات جرم مخصوص ظاهری و درصد تخلخل کل را با عمق و در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. میانگین جرم مخصوص ظاهری از $1/34$ در تیمار شاهد به $1/42$ گرم بر سانتی‌متر مکعب در تیمار هشت بار عبور تراکتور رسید. با افزایش فشردگی خاک میانگین جرم مخصوص ظاهری در تیمار هشت بار عبور $5/32$ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. به دنبال افزایش جرم مخصوص ظاهری در اثر تراکم‌های ایجاد شده، درصد تخلخل کل کاهش یافت. در تیمار هشت بار عبور تراکتور، میانگین درصد تخلخل کل نسبت به تیمار شاهد ۶ درصد کمتر شد.

با توجه به شکل ۱ میزان جرم مخصوص ظاهری و درصد تخلخل کل تا عمق ۲۰ سانتی‌متری تغییر کرده است و عمده اثر تراکم در این عمق اعمال شده است. بیشترین مقدار جرم مخصوص ظاهری و به دنبال آن کمترین مقدار تخلخل کل مربوط به عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متر بود. مطابق نتایج تجزیه آماری تفاوت مقادیر پارامترهای مذکور در عمق ۲۰-۰ و ۳۰-۲۰ سانتی‌متر معنی‌داری شد و از این عمق به بعد در هر تیمار، همچنین بین تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد، که نتیجه می‌شود اثر تراکم ایجاد شده توسط تراکتور به عمق‌های سطحی محدود می‌شود.

بر اساس تئوری کاپیلاری، نفوذ آب در مکش‌های ۳-، ۵- و ۱۵- سانتی‌متر نشان دهنده این است که شعاع این منافذ به ترتیب بزرگتر از $0/5$ ، $0/3$ و $0/1$ میلی‌متر می‌باشد. درصد جریان آب عبوری از هر کلاس منافذ با استفاده از معادله ۱۴ محاسبه گردید (۲۶):

$$\varphi_1 (\%) = \frac{K[(\phi)_i] - K[(\phi)_{i-1}]}{K[(\phi)_0]} \times 100 \quad (14)$$

که در این فرمول n تعداد اندازه‌گیری‌های پی ϕ در پی، مکش، $K(\phi_{i-1})$ و $K(\phi_i)$ هدایت هیدرولیکی در دو مکش پی در پی و $K(\phi_0)$ هدایت هیدرولیکی اشباع می‌باشد.

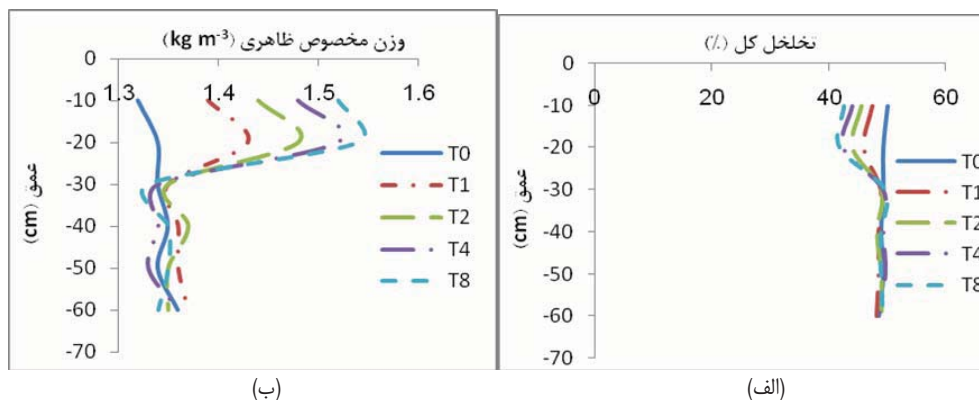
تعداد منافذ در واحد سطح (N) در هر کلاس با روش واتسن و لوکسمور (۲۸) یعنی کاربرد کوچکترین شعاع منافذ در هر کلاس R(L) و کاربرد معادله کاپیلاری پوازی با استفاده از معادله ۱۵ محاسبه شد:

$$N = \frac{8\mu K_d}{g\pi R^4 \rho_w} \quad (15)$$

که μ : ویسکوزیته آب $(ML^{-1}T^{-1})$ ، ρ_w : چگالی آب (ML^{-3}) و K_d : تفاوت هدایت هیدرولیکی در دو مکش متوالی (LT^{-1}) می‌باشد. تخلخل مؤثر $\theta_c (L^3L^{-3})$ به عنوان بخشی از منافذ درشت خاک که هدایت کننده آب هستند، تعریف می‌شود و از معادله ۱۶ به دست آمد (۲۸).

$$\theta_c = N\pi R^2(2) \quad (16)$$

در معادله ۱۶ فرض شده که جریان ورقه‌ای و منافذ درشت کاملاً پر از آب هستند و این منافذ پیوستگی و اعوجاج ندارند، بنابراین N تعداد دقیق منافذ را نشان نمی‌دهد اما می‌توان از آن به عنوان تخمین تقریبی منافذ استفاده نمود. در این مطالعه تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار MSTATC و سطوح معنی‌داری داده‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح $0/05$ تعیین گردید.



شکل ۱- تغییر جرم مخصوص ظاهری (الف) و درصد تخلخل کل (ب) با عمق در تیمارهای مختلف (اندیس‌ها بیان کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند).

درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر (ب) را با عمق در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است تیمار شاهد دارای بالاترین میزان پایداری و تیمار هشت بار عبور تراکتور دارای کمترین مقدار بود.

میانگین شاخص MWD در تیمار یک بار عبور نسبت به تیمار شاهد ۲۷ درصد کاهش یافت، در صورتی که با هشت بار عبور تراکتور نسبت به تیمار شاهد ۴۶ درصد کاهش داشت. اثر تراکم ایجاد شده بر درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر بیشتر از شاخص MWD بوده به نحوی که در تیمارهای یک بار و هشت بار عبور تراکتور به ترتیب ۴۲/۵ و ۷۰ درصد کاهش خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر نسبت به تیمار شاهد مشاهده گردید. برزگر و همکاران (۷)، گزارش کردند که افزایش تعداد عبور ماشین‌آلات کشاورزی به خصوص هنگامی که خاک خشک است می‌تواند به تشکیل خاکدانه‌هایی با اندازه کوچکتر منجر شود. به‌طور میانگین بیشترین درصد خاکدانه‌های پایدار مربوط به عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متری و کمترین میزان در عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متری بود. در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری به دلیل وجود مواد آلی، پوشش گیاهی و کاه و کلس بیشتر، نسبت به عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متری کمتر تحت تأثیر تراکم قرار گرفت. بویژارد و همکاران (۹) بیان نمودند که تراکم سبب تغییر خصوصیات فیزیکی خاک در عمق‌های سطحی خاک می‌شود.

نتایج تجزیه آماری اثر تراکم بر شاخص میانگین وزنی خاکدانه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. اثر تراکم بر شاخص MWD و درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار شد.

نتایج تجزیه آماری نشان داد که اختلاف شاخص MWD بین تیمار شاهد و تیمارهای متراکم معنی‌دار بوده، ولی بین تیمارهای متراکم اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

ژانگ و همکاران (۳۰)، عنوان کردند که تراکتورهای با چهار چرخ کوچک (۹۰۰ کیلوگرم) سبب ایجاد تراکم تا عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک می‌شود. نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد که تأثیر تراکم بر جرم مخصوص ظاهری و درصد تخلخل کل معنی‌دار شد ($p < 0.01$) (جدول ۲).

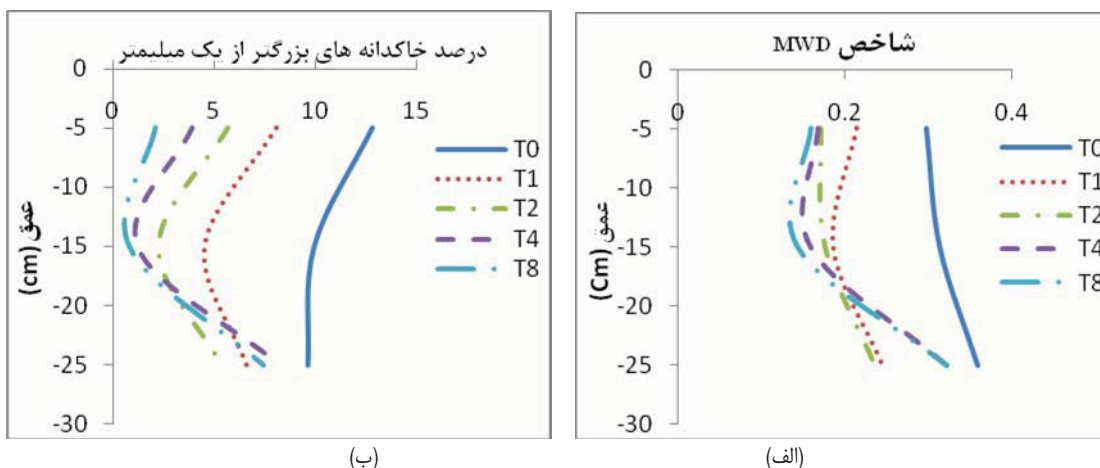
جدول ۲- نتایج تجزیه آماری تأثیر تراکم بر جرم مخصوص ظاهری و درصد تخلخل کل

منبع تغییرات	درجه آزادی	F-value	جرم مخصوص ظاهری	درصد تخلخل کل
تراکم	۴	۷۹/۶۴**	۷۹/۵۵**	
عمق	۵	۷۶/۱۱**	۱۷۵/۹۳**	
تراکم × عمق	۲۰	۳۰/۳۵**	۳۰/۳۳**	

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱

برتولینو و همکاران (۸)، افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک را با ایجاد تراکم به دلیل تغییر پیوستگی و توزیع اندازه منافذ و همچنین کاهش منافذ درشت خاک و در نتیجه کاهش حجم کل خاک مربوط می‌دانند. رازا و همکاران (۲۲) بیان کردند که تراکم به‌طور معنی‌داری میزان جرم مخصوص ظاهری و مقاومت فروروی را در لایه شخم افزایش می‌دهد. ریچارد و همکاران (۲۵)، گزارش کردند که اختلاف زیادی بین نسبت تخلخل خاک متراکم و غیرمتراکم وجود دارد که این تفاوت عمدتاً از کاهش درجه تخلخل ساختمانی ناشی از تراکم می‌باشد.

شکل ۲ تغییرات شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (الف) و



شکل ۲- تغییر شاخص MWD (الف) و درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر (ب) با عمق در تیمارهای مختلف (اندیس‌ها بیان‌کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند).

نگهداشت آب در تیمار شاهد گزارش شد. به طور میانگین با افزایش سطح فشردگی خاک مقدار آب نگهداری شده در خاک کاهش یافت. در تیمار هشت بار عبور تراکتور کمترین مقدار نگهداشت آب در خاک مشاهده گردید (شکل ۳).

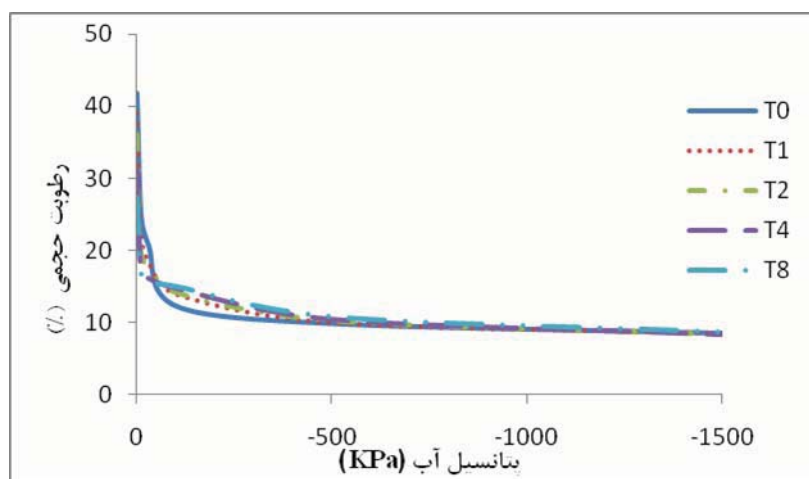
نتایج تجزیه آماری نشان داد اثر تراکم بر میزان نگهداشت آب در خاک معنی‌دار بود ($p < 0.01$). علاوه بر تراکم تأثیر پتانسیل آب بر میزان نگهداشت آب در سطح 0.01 معنی‌دار بود (جدول ۴). زیرا در طبق تئوری موئینگی تحت مکش‌های مختلف خروج آب از منافذ با شعاع متفاوت رخ می‌دهد.

در صورتی که اختلاف درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر علاوه بر بین تیمار شاهد و تیمارهای تراکم بین تیمارهای تراکم نیز معنی‌دار شد. با توجه به این که با ایجاد تراکم بخش عمده خاکدانه‌های درشت از بین می‌روند و از آن‌جایی که در اندازه‌گیری شاخص MWD، خاکدانه‌های بسیار ریز که کمتر تحت تأثیر تراکم خاک قرار می‌گیرند هم دخالت دارند، به همین دلیل اثر تراکم بر پایداری خاکدانه‌ها توسط درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر به طور مشخص‌تری نشان داده شد. منحنی مشخصه رطوبتی تیمارهای مختلف در شکل ۳ ارائه شده است. بیشترین میزان

جدول ۳- نتایج تجزیه آماری تأثیر تراکم بر پایداری خاکدانه‌ها

منبع تغییرات	درجه آزادی	F-value	شاخص MWD	درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی-متر
تراکم	۴	۶۸۰۲/۲۴**		۹۴/۳۹**
عمق	۲	۱۳۴۸۴/۴۵**		۲۳/۰۲**
تراکم × عمق	۸	۱۳۱۷/۱۶**		۵/۸۴**

** معنی‌داری در سطح 0.01



شکل ۳- منحنی مشخصه رطوبتی خاک سطحی تیمارهای مختلف (اندیس‌ها بیان‌کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند).

جدول ۴- تجزیه آماری مقدار نگهداشت آب در خاک در پتانسیل‌های مختلف

منبع تغییرات	درجه آزادی	F-value
تراکم	۴	۴۵۳۱/۸۸**
پتانسیل آب	۵	۱۳۳۰۲۲/۲۶**
تراکم × پتانسیل آب	۲۰	۲۰۷۱/۸۸**

** معنی‌داری در سطح 0.01

جدول ۵ - اثر متقابل تراکم و پتانسیل آب بر میزان نگهداشت آب در خاک در تیمارهای مختلف

تیمار	پتانسیل آب (کیلوپاسکال)					
	-۱۵۰۰	-۵۰۰	-۱۰۰	-۳۰	-۱۰	*
شاهد	۸/۴۵ ^{XYxy}	۹/۸ ^{Ww}	۱۲/۲۳ ^{Ss}	۲۰/۶۱ ^{Hh}	۲۵/۱۱ ^{Ff}	۴۱/۲۸ ^{Aa}
یک بار عبور	۸/۵۶ ^{Xx}	۱۰/۰۵ ^{Vv}	۱۳/۹۸ ^{Rr}	۱۸/۴۱ ^{Jj}	۲۲/۲۶ ^{Gg}	۳۹/۰۷ ^{Bb}
دو بار عبور	۸/۳۱ ^{Yy}	۱۰/۲۵ ^{UVuv}	۱۴/۱۴ ^{Rr}	۱۷/۶۵ ^{Kk}	۱۹/۴۳ ^{Ii}	۳۵/۷۳ ^{Cc}
چهاربار عبور	۸/۳۴ ^{Yy}	۱۰/۴۳ ^{Uu}	۱۴/۷۸ ^{Qq}	۱۶/۱۶ ^{Nn}	۱۷/۲۲ ^{Ll}	۳۱/۳۷ ^{Dd}
هشت بار عبور	۸/۳۶ ^{Yy}	۱۰/۷۹ ^{Tt}	۱۵/۰۲ ^{Pp}	۱۵/۵۹ ^{Oo}	۱۶/۸۶ ^{Mm}	۲۷/۴۶ ^{Ee}

حروف بزرگ نشان دهنده تأثیر تیمار تراکم بر میزان نگهداشت آب در خاک و حروف کوچک تفاوت بین پتانسیل‌های مختلف آب، معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ آزمون LSD

پتانسیل ۵۰۰- کیلوپاسکال نیز با افزایش سطح فشردگی خاک میزان نگهداشت آب در خاک زیاد شد. طبق رابطه $\frac{15}{\psi m}$ (۲) منافذی که در پتانسیل‌های پایین درگیر می‌باشند، بسیار ریز هستند. به طور کلی علت افزایش میزان نگهداشت آب در پتانسیل‌های پایین را افزایش تعداد منافذ بسیار ریز در اثر تراکم ایجاد شده بیان نمود. خاک متراکم شده به دلیل کاهش منافذ ساختمانی و افزایش منافذ بافتی نسبت به خاک غیرمتراکم مقدار بیشتری آب در خود نگه می‌دارد (۲۳). در پتانسیل ۱۵۰۰- کیلوپاسکال هیچ اختلاف معنی‌داری در مقادیر آب نگهداری شده در بین تیمارهای مختلف دیده نشد. زیرا رطوبت نگهداری شده در این پتانسیل به ماتریکس خاک بر می‌گردد و چون بافت خاک در همه تیمارها یکسان بود، این نتیجه منطقی می‌باشد. میزان آب نگهداری شده در پتانسیل‌های بالا که توزیع اندازه منافذ وابسته به ساختمان است، شدیداً تحت تأثیر تراکم قرار می‌گیرد، ولی در پتانسیل‌های پایین، آب نگهداری شده تحت تأثیر بافت و خصوصیات منطقه می‌باشد و به تراکم بستگی ندارد (۳۰). ژانگ و همکاران (۳۱) بیان کردند که سطوح مختلف تراکم بر منافذ بافتی اثر نمی‌گذارد، اما به طور واضحی منافذ ساختمانی را که محیط اصلی رشد ریشه می‌باشند تغییر می‌دهد.

ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

تعداد منافذ محاسبه شده بر واحد سطح (N) با استفاده از معادله ۱۵ در دو دسته اندازه منافذ شامل منافذ متوسط (>0.1) شعاع منافذ >0.5 میلی‌متر) و منافذ درشت (شعاع منافذ <0.5 میلی‌متر) هر تیمار در جدول ۶ ارائه شده است ($p < 0.01$). در محاسبه تعداد منافذ در هر دسته، کوچکترین شعاع منافذ در دو مکش متوالی در نظر گرفته شد، بنابراین حداکثر تعداد منافذ در هر دسته محاسبه گردید. بیشترین تعداد منافذ در هر دو دسته در تیمار شاهد و کمترین تعداد در تیمار هشت بار عبور تراکتور مشاهده گردید. در این مطالعه در همه تیمارها تعداد منافذ متوسط چندین برابر منافذ درشت بود.

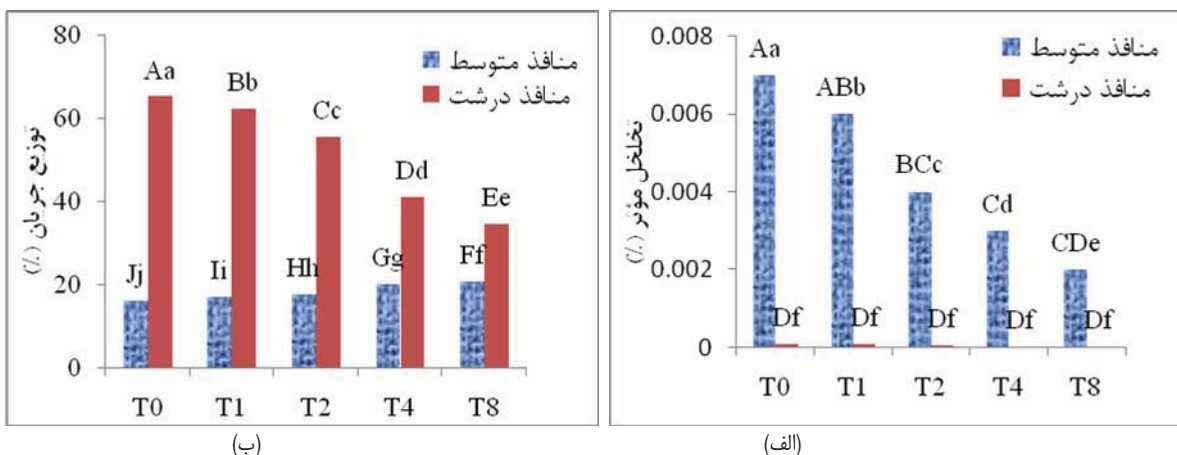
تأثیر متقابل تراکم خاک و پتانسیل بر درصد نگهداشت آب در خاک نیز معنی‌دار شد. همانطور که در جدول ۵ مشخص است، در پتانسیل صفر و سپس پتانسیل ۱۰- کیلوپاسکال بیشترین درصد نگهداشت رطوبت مربوط به تیمار شاهد و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار هشت بار عبور تراکتور می‌باشد.

اختلاف درصد رطوبت در پتانسیل صفر و ۱۰- کیلوپاسکال بین دو تیمار شاهد و هشت بار عبور تراکتور به ترتیب ۳۴ و ۳۲/۵ درصد گزارش شد. در پتانسیل ۳۰- کیلوپاسکال نیز روندی مانند پتانسیل‌های صفر و ۱۰ کیلوپاسکال مشاهده گردید. اختلاف بین میزان نگهداشت رطوبت در این پتانسیل در تیمار شاهد و هشت بار عبور تراکتور ۲۴ درصد بود. علت کاهش نگهداشت آب در خاک با افزایش پتانسیل از صفر به ۳۰- کیلوپاسکال را می‌توان خروج رطوبت از منافذ درشت و همچنین از بین رفتن و کوچکتر شدن شعاع منافذ و در نتیجه کاهش نگهداری آب توسط خاک را در اثر تراکم بیان نمود. در پتانسیل ۱۰۰- کیلوپاسکال با افزایش سطح تراکم میزان نگهداشت رطوبت در خاک به طور معنی‌داری زیاد شد، به گونه‌ای که در تیمار هشت بار عبور تراکتور مقدار رطوبت نگهداری شده در خاک در این پتانسیل حدود ۲۳ درصد افزایش یافت. شکسته شدن خاکدانه‌ها و کاهش حجم منافذ درشت بین آن‌ها و افزایش منافذ ریز در اثر تراکم ایجاد شده باعث افزایش سطح تماس بین خاکدانه‌ها می‌شود، که به دنبال آن پیوستگی بین منافذ در برگیرنده آب در خاک متراکم نسبت به خاک غیرمتراکم بیشتر می‌شود (۱۱). ریچارد و همکاران (۲۵)، نشان دادند که تراکم بر خصوصیات نگهداشت آب در پتانسیل بین ۵- تا ۸۰- کیلو پاسکال اثر می‌گذارد. همچنین بیان کردند که کاهش میزان نگهداشت آب در پتانسیل بین ۵- تا ۲۰- کیلو پاسکال وابسته به کاهش منافذ با قطر ۱۵ تا ۶۰ میکرون بوده و در مقابل افزایش میزان نگهداشت آب در پتانسیل ۲۰- تا ۸۰- کیلوپاسکال وابسته به افزایش منافذ با قطر ۴ تا ۱۵ میکرون می‌باشد. طبق نظر ایشان همخوانی بسیار خوبی بین میزان نگهداشت آب و تخلخل اندازه‌گیری شده در پتانسیل بین ۲۰- تا ۸۰- کیلو پاسکال وجود دارد، که به منافذ ساختمانی باقی‌مانده در شبکه بافتی خاک بر می‌گردد. در

جدول ۶- تعداد منافذ بر مترمربع (N) در تیمارهای مختلف

تیمار	کلاس اندازه منافذ	
	منافذ متوسط	منافذ درشت
شاهد	۱۹۰۵Aa	۱۲Ff
یک بار عبور	۱۶۶۳Bb	۱۰Ff
دو بار عبور	۱۳۵۰Cc	۷Ff
چهار بار عبور	۱۰۷۰Dd	۳Ff
هشت بار عبور	۷۱۶Ee	۲Ff

در هر ردیف حروف بزرگ نشان دهنده تفاوت تعداد منافذ بین دو کلاس در هر تیمار و حروف کوچک در هر ستون نشان دهنده تفاوت تعداد منافذ بین تیمارها. (معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ آزمون LSD می‌باشد.)



شکل ۴- درصد تخلخل مؤثر (الف) و توزیع جریان عبوری (ب) از هر دسته از منافذ خاک در تیمارهای مختلف (اندیس‌ها بیان کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند). حروف بزرگ نشان دهنده تأثیر تراکم بر تخلخل مؤثر (الف) و درصد جریان عبوری از منافذ (ب)، حروف کوچک تفاوت بین دو کلاس منافذ. معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ آزمون LSD

تیمار شاهد و کمترین مقدار آن در تیمار هشت بار عبور تراکتور مشاهده شد.

تأثیر تراکم خاک بر درصد تخلخل مؤثر در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بود. در همه تیمارها اختلاف درصد تخلخل مؤثر بین منافذ درشت و متوسط معنی‌دار بود و بیشترین مقدار مربوط به دسته منافذ متوسط بود. با توجه به اثر متقابل تراکم و کلاس اندازه منافذ، بیشترین درصد تخلخل مؤثر مربوط به دسته منافذ متوسط تیمار شاهد بود. با افزایش تراکم، درصد تخلخل مؤثر در این دسته از منافذ کاهش یافت. درصد تخلخل مؤثر در منافذ درشت نیز با افزایش سطح فشردگی کمتر شد ولی این تفاوت معنی‌دار نبود. با ایجاد تراکم و سست شدن خاکدانه‌ها منافذ با شعاع بزرگ تخریب شده و در نتیجه این منافذ درصد کمی از تخلخل کل خاک را تشکیل دادند.

شکل ۴ (ب) توزیع جریان عبوری از هر دو دسته از منافذ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است بیشترین درصد جریان عبوری از منافذ مربوط به تیمار شاهد و کمترین مقدار آن در

با ایجاد تراکم تعداد منافذ هر دو دسته کاهش یافتند. با یک بار عبور تراکتور، تعداد منافذ درشت و متوسط به ترتیب ۱۶/۵ و ۱۳ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافتند. همچنین کاهش منافذ درشت و متوسط در تیمار هشت بار عبور تراکتور که دارای بیشترین سطح فشردگی بودند به ۸۵ و ۶۲/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد رسید. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که با ایجاد تراکم، منافذ درشت با وجود کمتر بودن تعداد منافذ در خاک بیشتر از منافذ متوسط تحت تأثیر قرار گرفتند. لیبیک و هاگانسون (۱۳) نشان دادند که افزایش تراکم ایجاد شده توسط تردد ماشین‌آلات کشاورزی، حجم منافذ درشت خاک را (منافذ شرکت کننده در جریان اشباع) را بیشتر از منافذ ریز ($> 30 \mu m$) کاهش می‌دهد. کامیرا و همکاران (۱۰) بیان کردند که منافذ درشت حداقل پایداری را در کلاس اندازه منافذ دارند.

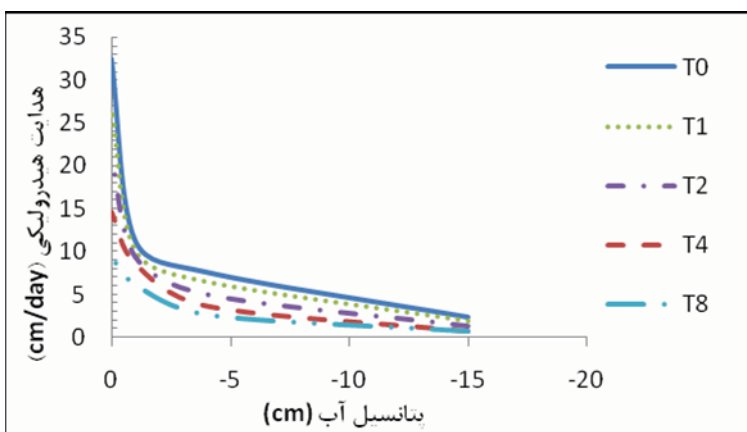
شکل ۴ (الف) درصد تخلخل مؤثر برای هر یک از کلاس منافذ را نشان می‌دهد. با افزایش تراکم درصد تخلخل مؤثر در هر دو کلاس اندازه منافذ کاهش یافت. بیشترین درصد تخلخل مؤثر در

در خاک شرکت دارند. همچنین بیان کردند که جریان آب خاک در کمتر از ۱۰-۱ درصد فضای خلل و فرج صورت می‌گیرد. مطالعات انجام شده در این زمینه، کاهش در نفوذپذیری را به وسیله تابع نمایی از اندازه منافذ بزرگ شرکت کننده در جریان آب نشان دادند (۲۸).

تغییرات هدایت هیدرولیکی در پتانسیل‌های مختلف در شکل ۵ ارائه شده است. با افزایش تراکم میزان هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع کاهش یافتند. بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی اشباع (پتانسیل صفر) مربوط به تیمار شاهد و کمترین میزان آن در تیمار هشت بار عبور تراکتور مشاهده شد (شکل ۵). در تیمار یک بار عبور تراکتور میزان هدایت هیدرولیکی اشباع نسبت به تیمار شاهد ۱۷/۳ درصد کمتر شد که در تیمار هشت بار عبور تراکتور این اختلاف به ۷۱ درصد رسید. این یافته‌ها نشان می‌دهد با افزایش تراکم، هدایت هیدرولیکی اشباع به صورت مشخصی تغییر کرده است. از آن جایی که اثر عمده تراکم بر منافذ درشت خاک می‌باشد در نتیجه با ایجاد تراکم شعاع منافذ درشت کاهش یافته و طبق قانون پوازی هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. با توجه به قانون پوازی هدایت هیدرولیکی با توان دوم شعاع منافذ خاک رابطه مستقیم دارد (۲). راب و همکاران (۲۰)، بیان کردند که افزایش تراکم و کاهش تعداد منافذ درشت، بر هدایت هیدرولیکی اشباع و در نتیجه بر جریان آب در خاک اثر می‌گذارد. هدایت هیدرولیکی اشباع به تراکم ایجادشده توسط عبور و مرور ادوات کشاورزی حساس است و عموماً به صورت تابعی از میزان آب خاک با تراکم کاهش پیدا می‌کند (۲۴).

با ایجاد تراکم هدایت هیدرولیکی غیراشباع نیز کاهش یافت، به طوری که در تیمار هشت بار عبور تراکتور کمترین میزان هدایت هیدرولیکی در هر چهار پتانسیل دیده شد (شکل ۵). همانطور که در شکل ۵ مشخص است در همه پتانسیل‌ها تیمار شاهد دارای بالاترین میزان هدایت هیدرولیکی غیراشباع و تیمار هشت بار عبور تراکتور دارای کمترین مقدار آن بود.

تیمار هشت بار عبور تراکتور می‌باشد. به طور میانگین اختلاف درصد جریان عبوری از منافذ (درشت و متوسط) بین این دو تیمار ۴۷ درصد بود و درصد جریان عبوری از منافذ تقریباً به نصف کاهش یافت. در همه تیمارها بیشترین درصد جریان عبوری از منافذ درشت و کمترین جریان عبوری از منافذ متوسط صورت گرفت. منافذ درشت با این که کمترین تعداد منافذ خاک بوده (جدول ۶) ولی بیشترین درصد جریان عبوری به خاک از این منافذ صورت گرفت. مارتینز و همکاران (۱۸)، بیان کردند که تراکم باعث تغییر پیوستگی و توزیع اندازه منافذ شده که منجر به کاهش میزان نفوذ و درصد جریان عبوری از منافذ می‌شود. همان گونه که در شکل ۴ (ب) مشخص است درصد جریان عبوری از منافذ متوسط با افزایش تراکم زیاد شد، به گونه‌ای که کمترین و بیشترین مقدار جریان عبوری از منافذ متوسط به ترتیب در تیمار شاهد و هشت بار عبور تراکتور مشاهده گردید. افزایش جریان عبوری از منافذ متوسط با افزایش سطح فشردگی خاک با وجود کاهش تعداد این منافذ (جدول ۶) به دلیل بزرگ‌تر شدن شعاع این منافذ در اثر تراکم ایجاد شده می‌باشد. زیرا در اثر تراکم ایجاد شده علاوه بر این که یک سری از منافذ از بین می‌روند، پیوستگی برخی منافذ افزایش یافته و قطر آن‌ها افزایش می‌یابد. طبق قانون پوازی تعداد منافذ با شعاع منافذ رابطه معکوس دارد (۱). لیبیک و هاتانو (۱۴)، بیان کردند که تراکم خاک نه تنها حجم منافذ درشت خاک را کاهش می‌دهد، بلکه پیوستگی منافذ را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش تراکم درصد جریان عبوری از منافذ درشت کاهش یافت. به طور کلی می‌توان گفت منافذ درشت علی‌رغم تعداد بسیار کم در خاک و با وجود درصد بسیار ناچیزی از تخلخل کل خاک، اصلی‌ترین مسیرهای جریان آب در خاک بوده و بیشترین سهم از جریان آب را به خود اختصاص می‌دهند (۲۹). لین و همکاران (۱۲)، گزارش کردند که ۱۰ درصد از منافذ درشت (ماکروپورها < 0.05 میلی‌متر) و منافذ متوسط (مزوپورها $0.05-0.06$ میلی‌متر) در ۸۹ درصد کل جریان آب



شکل ۵- هدایت هیدرولیکی در پتانسیل‌ها و تیمارهای مختلف (اندیس‌ها بیان کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند).

خلل و فرج، خصوصیات هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک را به طور مشخصی تغییر داد. آسولین و همکاران (۶) اثر تراکم را بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی بررسی نموده و نتیجه گرفتند که ارزیابی هدایت هیدرولیکی خاک به عنوان شاخصی جهت تعیین میزان تراکم خاک مناسب می‌باشد.

نتیجه‌گیری

ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک مورد مطالعه به صورت مشخصی تحت تأثیر تراکم قرار گرفتند. تراکم ایجاد شده سبب افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش درصد تخلخل کل در عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری شد. درصد خاکدانه‌های بزرگتر از یک میلی‌متر اثر تراکم را در کاهش پایداری خاکدانه‌ها با افزایش سطوح فشردگی در عمق ۲۰-۱۰ سانتی‌متری نشان داد. منحنی مشخصه رطوبتی به طور معنی‌داری با افزایش تراکم تغییر کرد. با افزایش سطح فشردگی مقدار آب نگهداری شده در خاک کاهش یافت. کاهش تعداد منافذ و درصد جریان عبوری از آن‌ها و همچنین تخلخل مؤثر با افزایش نیروی وارد شده بر سطح خاک نشان دهنده اثر تراکم بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک بود. کاهش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع با افزایش تراکم ایجاد شده مشاهده گردید. در مجموع نتایج نشان دادند که حتی سطوح پایین فشردگی خاک (تیمار یک بار عبور تراکتور) به طور معنی‌داری ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک را تغییر داده و عمده اثر تراکم بر این ویژگی‌های خاک در لایه سطحی خاک (۲۰-۰ سانتی‌متری) بود.

اختلاف مقادیر میانگین هدایت هیدرولیکی غیراشباع بین تیمار شاهد و تیمار یک بار عبور تراکتور ۱۷/۵ درصد بود که این اختلاف در تیمار هشت بار عبور تراکتور به ۶۶/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد رسید. این مطلب نشان می‌دهد که در پتانسیل‌های بالا (۰ تا ۱۵- سانتی‌متر) با افزایش تراکم هدایت هیدرولیکی غیراشباع کاهش می‌یابد. مارشال و همکاران (۱۷)، نشان دادند که در هر مقدار از پتانسیل آب خاک (ψ) فقط خلل و فرج کوچکتر از $\frac{15}{\psi m}$ (۲) دارای آب بوده و در حرکت آب دخالت دارند. اگر با توجه به نتایج مارشال و همکاران (۱۷) بخواهیم قطر خلل و فرجی که در این مطالعه در حرکت آب در خاک شرکت دارند را اندازه‌گیری کنیم در دسته منافذ (۱۰۰-۰) میکرون قرار می‌گیرد. این دامنه اندازه منافذ در دسته منافذ درشت (ماکروپورها) قرار می‌گیرد (۳). تراکم عمدتاً بر منافذ درشت اثر می‌گذارد و از طرف دیگر دستگاه نفوذسنج صفحه‌ای هدایت هیدرولیکی را در سطح خاک اندازه‌گیری کرده و بنابراین نمی‌تواند پیوستگی منافذ درشت و در نتیجه هدایت هیدرولیکی را با عمق خاک اندازه‌گیری کند (۱۳). پس منطقی به نظر می‌رسد که در پتانسیل‌های (۰ تا ۱۵- سانتی‌متر) هدایت هیدرولیکی غیراشباع با ایجاد تراکم کاهش یابد. والزاک و همکاران (۲۷)، بیان کردند که افزایش تراکم باعث کاهش میزان هدایت هیدرولیکی غیراشباع در پتانسیل ماتریک بالا (۰ تا ۱۶- کیلو پاسکال) می‌شود.

در اثر تراکم با افزایش پتانسیل آب از ۱۵- سانتی‌متر به طرف صفر سانتی‌متر آب، میزان هدایت هیدرولیکی در همه تیمارها چندین برابر افزایش یافت. به گونه‌ای که در هر تیمار بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی در پتانسیل صفر (هدایت هیدرولیکی اشباع) و کمترین مقدار در پتانسیل ۱۵- سانتی‌متر دیده شد. تراکم با کاهش حجم کل

منابع

- ۱- برزگر ع.ا. ۱۳۸۳. فیزیک خاک پیشرفته. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه چمران اهواز.
- ۲- برزگر ع.ا. ۱۳۸۹. مبانی فیزیک خاک. ویرایش دوم. چاپ اول. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.
- ۳- حاج عباسی م. ۱۳۸۶. خصوصیات فیزیکی خاک. چاپ اول. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
- 4- Alakukku L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil and Tillage Research*, 37:211-222.
- 5- Ankeny M.D., Ahmed M., Kasper T.C., and Horton R. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, 55:476-470.
- 6- Assouline S., and Tessier D. 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experiment results and modeling. *Soil Science Society of American Journal*, 61:390-398.
- 7- Barzegar A.R., Hashemi A.M., Herbert S.J., and Asoodar M.A. 2004. Interactive effects of tillage system and soil water content on aggregate size distribution for seedbed preparation in Fluvisols in southwest Iran. *Soil and Tillage Research*, 78:45-52.
- 8- Bertolino Ana V.F.A., Fernandes N., Miranda B., and Andréa P. 2010. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. *Journal of Hydrology*, 393:94-104.
- 9- Boizard H., Richard G., Roger-Estrade J., Dürr C., and Boiffin J. 2002. Cumulative effects of cropping systems on

- the structure of the tilled layer in northern France. *Soil and Tillage Research*, 64:149–164.
- 10- Cameria M.R., Fernando R.M., and Pereira L.S. 2003. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil and Tillage Research*, 70:131–140.
 - 11- Hakansson I., and Reeder G.W. 1994. Subsoil Compaction by vehicles with high axle load-extent persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 29:277–304.
 - 12- Lin H.S., McInnes K.J., Wilding L.P., and Hallmark C.T. 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties: I. Quantification of soil morphology. *Soil Science Society of American Journal*, 63:948–954.
 - 13- Lipiec J., and Hakansson I. 2000. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil and Tillage Research*, 53:87–94.
 - 14- Lipiec J., and Hatano R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116:107–136.
 - 15- Liungars A. 1977. Importance of different factors of soil compaction by tractors. Measurements in 1974-1976. *Agricultural. College Swedin, Soil Science*, 53:53–43.
 - 16- Lowery B., and Schuler R.T. 1991. Temporal effects of subsoil compaction on soil strength and plant growth. *Soil Science Society of American Journal*, 55:216–223.
 - 17- Marshall T.J., Holmes J.W., and Rose C.W. 1996. *Soil Physics*. 2nd edition. Cambridge University.
 - 18- Martinez E., Fuentes J.P., Silva P., Valle S., and Acevedo E. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil and Tillage Research*, 99:232–244.
 - 19- McNabb D.H. 2001. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65: 1238–1247.
 - 20- Rab M.A. 2004. Recovery of soil physical properties from compaction and soil profile disturbance caused by logging of native forest in Victorian Central Highlands, Australia. *Forest Ecology and Management*, 19:329–340.
 - 21- Raghavan G.S.V., Mckyes E., Taylor F., Richard P., and Watson A. 1979. The relationship between machinery traffic and corn yield reduction in successive years. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 22:1256–1259.
 - 22- Raza W., Yousaf S., Niaz A., Rashed M.Kh., and Hussain I. 2005. Subsoil compaction effects on soil properties, nutrient uptake and yield of maize fodder. *Pakistan Journal of Botany*, 37:933–940.
 - 23- Reicosky D.C., Millington R.J., Klute A., and Peters D.B. 1972. Patterns of water uptake and root distribution of soybeans in the presence of water table. *Agromony Journal*, 64:292–297.
 - 24- Reicosky D.C., Voorhees W.B., and Radke J.K. 1981. Unsaturated water flow through a simulated wheel track. *Soil Science Society of American Journal*, 45:3–8.
 - 25- Richard G., Cousin I., Sillon J.F., Brund A., and Guearif J. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52:49–58.
 - 26- Vos J.A., Hesterberg D., and Raats P.A.C. 2000. Nitrate leaching in a tile-drained silt loam soil. *Soil Science Society of American Journal*, 64:517–527.
 - 27- Walczak R.T., Witkowska-Walczak B., and Baranowski P. 1997. Soil structure parameters in models of crop growth and yield prediction. *Physical models. International Agrophysics*, 11:111–127.
 - 28- Watson K.W., and Luxmoore R.J. 1986. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Science Society of American Journal*, 50:578–582.
 - 29- Wilson G.V., and Luxmoore R.J. 1998. Infiltration, Macroporosity, Mesoporosity Distribution on two Forested Watershed. *Soil Science Society of American Journal*, 52:329–335.
 - 30- Zhang X.Y., Cruse R.M., Sui Y.Y., and Jhao Z. 2006. Soil Compaction induced by small tractor traffic in Northeast China. *Soil Science Society of American Journal*, 70:613–619.
 - 31- Zhang Sh., Grip H., and Lovdahl L. 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil and Tillage Research*, 90:117–125.

Effect of Compaction on Physical and Hydraulic Properties of a Loamy Soil

N. Ramezani^{1*} - A.R. Barzegar² - G. Sayyad³ - Gh. Haghnia⁴ - Y. Mansuri⁵

Received:3-7-2011

Accepted:4-11-2011

Abstract

Quantitative investigation of soil compaction seem essential to improve agricultural management practices for reducing difficulties related to compaction in the environment and crop production systems. Soil compaction can be significantly reduced with changes in physical and hydraulic characteristics of soil, water infiltration and availability of air and water to plants. Sum effects of the above may lead to reduced soil quality. This research was performed to study the effect of compaction on physical and hydraulic properties of a loamy soil in Khuzestan province in southern Iran. A completely randomized block was designed with three replications, applying Blank (No teraffic passing), once, twice, three times, four times and eight times of tractor passings. Physical parameters such as; bulk density, total porosity, Mean Weight Diameter index and soil moisture characteristic. hydraulic parameters including hydraulic conductivities (saturated and unsaturated), number of pores and percent flow through them with effective porosity was determined in the field using disc infiltrometer in four potentials (0, -3, -5 and -15 cm of water). Our Results revealed that soil physical and hydraulic properties changed significantly ($P<0.01$) with compaction. This effect was highest with eight times tractor passing. Soil bulk density in this treatment showed a increased 5.5 percent compared to blank. The value of total porosity and aggregates greater than one millimeter decreased 6 and 70 percent respectively with 8 tractor passings when compared to blank. Results of disc Infiltrometer showed that coarse and medium size pores, percent flow through pores and saturated and unsaturated hydraulic conductivities of 8 times tractor passings relative to blank decreased 85, 62.5, 47, 71, 66.5 percent respectively. The highest compaction effect was observed at 0-20 cm depth. From this depth downward no changes was seen in soil physical characteristics due to compaction.

Keywords: Khuzestan, MWD index, Percent flow through pores

1,2,3- Former MSc Student, Assistant Professor and Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ahwaz University, Respectively

(*-Corresponding Author Email: Ramezani_nooshin@yahoo.com)

4- Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

5- Assistant Professor of Machinery Agriculture, Faculty of Agriculture, Ahwaz University