

# بررسی تأثیر تراکم بر تعداد و نوع منافذ فعال در هدایت آب یک خاک لوم با استفاده از دستگاه نفوذسنج صفحه‌ای

نوشین رضائی<sup>۱\*</sup>، غلامعباس صیاد<sup>۲</sup>، عبدالرحمن برزگر<sup>۳</sup> و یعقوب منصوری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> - نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران

<sup>۲</sup> - استادیار علوم خاک دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۳</sup> - استاد علوم خاک دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۴</sup> - استادیار گروه خاک دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۹

## چکیده

موضوع مهم و اصلی در مطالعه تراکم، اندازه و نوع منافذ خاک است. در اثر تراکم حجم منافذ خاک، نفوذ آب به خاک و قابلیت دسترسی گیاهان به آب و هوا کاهش یافته و مجموع اثرهای مذکور باعث کاهش کیفیت خاک می‌گردند. به همین منظور مطالعه مزرعه‌ای جهت ارزیابی تأثیر تراکم بر منافذ فعال در حرکت آب (منافذ متوسط و درشت) در دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی، در پنج تیمار و سه تکرار انجام شد. بافت خاک لوم و تیمارها شامل تراکم حاصل از یک، دو، چهار، هشت بار عبور تراکتور و همچنین بدون عبور تراکتور (شاهد) بودند. تعداد منافذ (در دو دسته متوسط و درشت) و درصد جریان عبوری از آنها، تخلخل مؤثر و هدایت هیدرولیکی (اشباع و غیراشباع)، در چهار پتانسیل (+، -۳، -۵، -۱۵ سانتی متر) توسط نفوذسنج صفحه‌ای اندازه‌گیری شدند. در همه تیمارها تعداد منافذ متوسط چندین برابر منافذ درشت بود. با ایجاد تراکم تعداد منافذ هر دو دسته کاهش یافتند. تعداد منافذ درشت و متوسط در تیمار هشت بار عبور تراکتور که دارای بیشترین سطح فشردگی بودند، به ترتیب ۸۵ و ۶۲/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافتند. عمده اثر تراکم بر منافذ درشت خاک بود، زیرا با ایجاد تراکم منافذ درشت با وجود کمتر بودن تعداد این منافذ در خاک، بیشتر از منافذ متوسط تحت تأثیر قرار گرفتند.

*کلید واژه‌ها: تخلخل مؤثر، تعداد منافذ، درصد جریان عبوری از منافذ، هدایت هیدرولیکی*

## مقدمه

پارامترهای بررسی اثر تراکم بر جریان آب می‌باشد، نظر به این که بر اساس آن میزان وفور آب در منافذ درشت و انصالات آنها بررسی می‌شود (۱۴ و ۱۸)، بنابراین تغییرات این دسته منافذ (منافذ درشت) اثر زیادی بر مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع دارد. هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از میزان آب خاک، عموماً با تراکم کاهش می‌یابد (۱۲). عواملی از قبیل تعداد تردد ماشین‌های کشاورزی، نوع عملیات شخم، جرم مخصوص ظاهری و میزان رطوبت بر هدایت هیدرولیکی آب در خاک تأثیر دارند. لیبیک و همکاران<sup>۲</sup> با ایجاد سطوح مختلف فشردگی در یک خاک لومی گزارش کردند که تراکم با تغییرات درصد حجمی رطوبت خاک در یک پتانسیل معین بر هدایت هیدرولیکی اثر می‌گذارد (۱۴). ژانگ و همکاران<sup>۳</sup> با بررسی اثر تراکم بر هدایت هیدرولیکی بیان کردند که میزان هدایت هیدرولیکی اشباع در اثر سطوح تراکم ایجاد شده به میزان زیادی کاهش یافت (۳۰). تراکم بیش از حد خاک بر اثر عبور و مرور حاصل از کار کردن ماشین‌آلات کشاورزی عامل

تراکم به معنی کاهش حجم خاک در اثر بار گذاری به سطح آن می‌باشد. در اثر تراکم نه تنها حجم منافذ خاک کاهش می‌یابد، بلکه ممکن است منافذ به هم پیوسته خاک مسدود گردند. تراکم باعث کاهش تخلخل کل خاک می‌شود (۲) و این کاهش مربوط به تغییرات شکل خلل و فرج (۲۹) و توزیع اندازه منافذ می‌باشد (۱۰). نسبت خلل و فرج ریز به خلل و فرج درشت تعیین کننده میزان انحراف از حد مطلوب خصوصیات ساختمانی است. خلل و فرج عامل ظرفیت نگهداری آب و خلل و فرج درشت عامل تعیین کننده میزان نفوذپذیری و ظرفیت هوای خاک است. اندازه و پیوستگی منافذ نقش بسیار مهمی در خصوصیات جریان آب و حرکت املاح دارد. ورورت و همکاران<sup>۱</sup> بیان کردند که بین پیوستگی افقی (نه عمودی) منافذ و هدایت هیدرولیکی رابطه خوبی برقرار است که نشان دهنده اهمیت ساختمان خاک و پیوستگی منافذ می‌باشد (۲۳). هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از

1- Vervoort et al

2- Lipiec et al.

3- Zhang et al.

جدول ۱- توزیع اندازه ذرات و درصد مواد آلی منطقه مورد مطالعه

| عمق (cm) | شن (%) | سیلت (%) | رس (%) | بافت           | جرم مخصوص ظاهری (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|--------|----------|--------|----------------|--------------------------------------|
| ۰-۱۰     | ۴۰/۵   | ۳۰/۵     | ۲۹     | لوم            | ۱/۳۲                                 |
| ۱۰-۲۰    | ۴۷/۵   | ۳۴       | ۱۸/۵   | لوم            | ۱/۳۴                                 |
| ۲۰-۳۰    | ۴۳/۵   | ۳۴       | ۲۲/۵   | لوم            | ۱/۳۴                                 |
| ۳۰-۴۰    | ۴۵     | ۲۸       | ۲۷     | لوم            | ۱/۳۵                                 |
| ۴۰-۵۰    | ۵۱     | ۲۰       | ۲۹     | لومی رسی<br>شن | ۱/۳۳                                 |
| ۵۰-۶۰    | ۶۵     | ۲۰       | ۱۵     | لومی شنی       | ۱/۳۶                                 |

دستگاه نفوذ سنج صفحه‌ای و در چهار پتانسیل (۰، ۳، ۵، ۱۵- سانتی‌متر آب) اندازه‌گیری شدند. در هر پتانسیل میزان نفوذ نهایی آب به درون خاک اندازه‌گیری شد و سپس از تحلیل‌های آنکنی و وودینگ<sup>۱</sup> (۱)، برای محاسبه هدایت هیدرولیکی و از روش واتسون و لوکس مور<sup>۲</sup> (۲۷) برای محاسبه تعداد منافذ درشت و متوسط، تخلخل مؤثر، درصد جریان عبوری از هر دسته منافذ در هر چهار پتانسیل مذکور استفاده گردید. در این مطالعه تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها داده‌ها با استفاده از آزمون LSD و در سطح یک درصد تعیین گردید.

#### محاسبه هدایت هیدرولیکی (روش وودینگ و آنکنی) و توزیع اندازه منافذ (روش واتسون و لوکس مور)

وودینگ یک سری تحلیل ریاضی برای جریان پایدار از یک حوضچه کم عمق سطحی مدور آب آزاد ارائه نمود. طبق نظر ایشان می‌توان سرعت نفوذ را به وسیله معادله (۱) تخمین زد.

$$V_{\infty} = K_s + \frac{4\phi}{\pi r_0} \quad (1)$$

که در آن  $V_{\infty}$ ، سرعت نفوذ آب به درون خاک ( $LT^{-1}$ )،  $r_0$  شعاع منبع مدور ( $L$ )،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع ( $LT^{-1}$ ) و  $\phi$  پتانسیل ماتریک خاک می‌باشد ( $LT^{-1}$ ). پتانسیل ماتریک را می‌توان با انتگرال‌گیری از خصوصیات هیدرولیکی محاسبه نمود. بنابراین پتانسیل جریان ماتریک عبارت است از:

$$\phi_s = \int_{\theta_s}^{\theta_0} D(\theta) d\theta = \int_h^0 K(h) dh \quad (2)$$

مهمی در تخریب خاک می‌باشد. با مکانیزه شدن کشاورزی و افزایش تعداد و وزن ماشین‌ها، تراکم خاک‌ها افزایش یافته است. تراکم علاوه بر سطح خاک، لایه‌های عمیق‌تر را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. لازم به ذکر است اگرچه فرآیندهای اصلاح زیستی و غیرزیستی می‌توانند اثر تراکم سطحی را کاهش دهند (۲۸)، اما تراکم خاک‌های زیرین ممکن است ده‌ها سال و حتی قرن‌ها باقی بماند (۲۲). بنابراین ارزیابی تراکم خاک و تغییرات مربوط به خلل و فرج (تعداد و نوع منافذ) در جلوگیری از تخریب خاک بسیار مهم بوده (۷) و از اهداف این مطالعه می‌باشد.

#### مواد و روش‌ها

این مطالعه در یکی از مزرعه‌های تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. این مزرعه در جنوب غربی شهر اهواز و در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی قرار داشته و ارتفاع آن از سطح دریا ۲۰ متر می‌باشد. ابتدا پروفیل خاک در مزرعه تشریح شد و برخی خواص اولیه خاک قبل از اجرای تیمارها تا عمق ۶۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری گردید (جدول ۱). قبل از اجرای تیمارها، کرت‌ها پس از شخم سطحی و دیسک در یک زمان در معرض آبیاری قرار گرفتند، به گونه‌ای که در هنگام آزمایش تراکم (عبور تراکتور) رطوبت سطح خاک نزدیک به رطوبت ظرفیت مزرعه (گاوری) بود. بعد از آبیاری، تیمارهای مورد نظر به منظور ارزیابی تراکم توسط تراکتور مدل MF399 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. یک روز پس از عبور تراکتور، نمونه‌های دست نخورده از محل عبور لاستیک، از عمق‌های ۱، ۰-۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰، ۴۰-۵۰ و ۵۰-۶۰ سانتی‌متری تهیه شدند. از هر عمق سه نمونه دست نخورده تهیه گردید و جرم مخصوص ظاهری توسط استوانه‌های فولادی اندازه‌گیری شد (۱).

برای اندازه‌گیری برخی پارامترهای هیدرولیکی از قبیل تعداد منافذ در دو دسته متوسط و درشت و درصد جریان عبوری از آن‌ها، تخلخل مؤثر و هدایت هیدرولیکی (اشباع و غیراشباع) با استفاده از

1- Ankeny and wooding

2- Watson and Luxmoore

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)}{h_1 - h_2} \quad (11)$$

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 ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۱ میلی‌متر می‌باشد. درصد جریان آب عبوری از هر کلاس منافذ با استفاده از معادله (۱۲) محاسبه گردید:

$$\phi_i(\%) = \frac{K(\phi_i) - k(\phi_{i-1})}{k(\phi_0)} \times 100 \quad (12)$$

در این فرمول n تعداد اندازه‌گیری‌های پی در پی،  $\phi$  مکش،  $K(\phi_i)$  و  $k(\phi_{i-1})$  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 یعنی کاربرد کوچکترین شعاع منافذ در هر کلاس و R(L) و کاربرد معادله کاپیلاری پوازوی با استفاده از معادله (۱۳) محاسبه شد (۲۷):

$$N = \frac{8\mu k_d}{g\pi R^4 \rho_w} \quad (13)$$

که  $\mu$ ، ویسکوزیته آب ( $ML^{-1}T^{-1}$ )،  $\rho_w$  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 با معادله (۱۴) به دست آمد (۲۷).

$$\theta_c = N\pi R^2 \quad (14)$$

در معادله (۱۴) 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.

### نتایج

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<sup>۱</sup>، بیان کرد در

در معادله (۲)،  $K(h)$ ، هدایت هیدرولیکی غیراشباع ( $h_i(LT^{-1})$ ) پتانسیل اولیه خاک غیرمرطوب (L) می‌باشد. طبق معادله (۲)، معادله (۳) به دست می‌آید:

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h) \quad (3)$$

در معادله بالا  $\alpha$  عدد جذب می‌باشد که از معادله ۴ به دست می‌آید:

$$S = \frac{K_s}{\alpha} \quad (4)$$

این فرمول به معادله وودینگ اجازه داد که برای نفوذ حجم پایدار از حوضچه مدور استفاده شود که به صورت معادله (۵) نوشته می‌شود:

$$\phi_{\infty} = K(h_0)\left(\pi r_0^2 + \frac{4r_0}{\alpha}\right) \quad (5)$$

در اینجا  $\phi_{\infty}$  شدت نفوذ نهایی از دستگاه می‌باشد. آنکنی و همکاران<sup>۱</sup> یک تحلیل قرینه از معادله وودینگ (معادله ۵) ارائه دادند (۴). 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 ۳) دارد، در نتیجه از معادله (۳) داریم.

$$K_1 = K_s \exp(\alpha h_1) \quad (6)$$

$$K_2 = K_s \exp(\alpha h_2) \quad (7)$$

بنابراین از ترکیب دو معادله بالا و معادله (۵) خواهیم داشت:

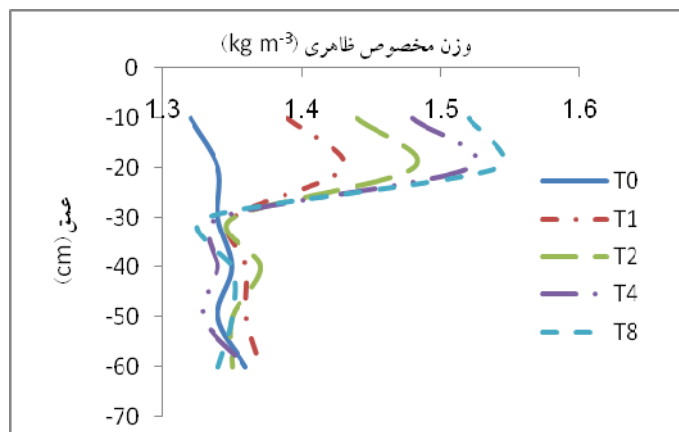
$$\phi_1 = K\pi r_0^2 + \frac{4r_0}{\alpha} \quad (8)$$

$$\phi_2 = K_2\left(\pi r_0^2 + \frac{4r_0}{\alpha}\right) \quad (9)$$

و ترکیب آن‌ها نتیجه می‌دهد:

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = \frac{K_1}{K_2} = \exp[\alpha(h_1 - h_2)] \quad (10)$$

بنابراین با توجه به معادله ۱۰ می‌توان اندازه موئینگی خاک را به دست آورد:



شکل ۱- تغییرات جرم مخصوص ظاهری با عمق در تیمارهای مختلف (اندیس‌ها بیان کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند)

| F-value   | درجه آزادی | منبع تغییرات |
|-----------|------------|--------------|
| ۷۹/۶۴۴ ** | ۴          | تراکم        |
| ۷۶/۱۱۴ ** | ۵          | عمق          |
| ۳۰/۳۵ **  | ۲۰         | تراکم*عمق    |

\*\* معنی داری در سطح یک درصد.

در تیمار شاهد در عمق ۱۰-۲۰ و ۰-۱۰ سانتی متر کمترین مقدار میانگین جرم مخصوص ظاهری دیده شد که دلیل آن را می‌توان به شخم سطحی که قبل از اعمال تیمارها انجام شد مرتبط دانست. در تیمارهای متراکم شده، جرم مخصوص ظاهری تا عمق ۲۰ سانتی‌متر افزایش داشت اما از این عمق به بعد بین تیمار شاهد و تیمارهای متراکم تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین اثر تراکم مربوط به عمق ۰-۲۰ سانتی متر می‌باشد و از این عمق به بعد اثر تراکم بر خاک ناچیز است. آندریین و همکاران<sup>۳</sup> گزارش کردند که در اثر تراکم ایجادشده جرم مخصوص ظاهری در عمق ۰-۳۰ سانتی متر ۲۷ درصد افزایش یافت (۳).

#### توزیع اندازه منافذ، تخلخل مؤثر، درصد جریان عبوری آب از منافذ و هدایت هیدرولیکی اندازه گیری شده توسط دستگاه نفوذ صفحه ای

تعداد منافذ فعال در حرکت آب محاسبه شده بر واحد سطح (N) با استفاده از معادله (۱۳) در دو کلاس اندازه منافذ شامل منافذ متوسط ( $>0.1$ ) شعاع منافذ  $>0.5$  میلی‌متر) و منافذ درشت (شعاع منافذ  $<0.5$  میلی‌متر) هر تیمار در جدول (۳) آورده شده است. نتایج نشان داد که تفاوت تعداد منافذ بین تیمارها در سطح یک درصد معنی‌دار است. در محاسبه تعداد منافذ در هر

رطوبت زیاد خاک، اثر تراکم بر خصوصیات فیزیکی خاک (از جمله جرم مخصوص ظاهری و تخلخل) نسبت به خاک با رطوبت کمتر، افزایش می‌یابد (۱۷). بافت خاک در هر پنج تیمار شبیه هم بود. در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متری لوم، در عمق ۴۰-۵۰ سانتی‌متری لومی رسی و در عمق ۵۰-۶۰ سانتی‌متری لومی شنی گزارش شد.

شکل (۱) تغییرات جرم مخصوص ظاهری با عمق را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. تجزیه آماری داده‌ها نشان داد که تأثیر تراکم بر جرم مخصوص ظاهری در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). با افزایش تراکم، جرم مخصوص ظاهری به طور معنی‌داری افزایش یافت. کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری مربوط به تیمار شاهد (۱/۳۲) و بیشترین میزان جرم مخصوص ظاهری در تیمار هشت بار عبور تراکتور (۱/۵۲) مشاهده شد. افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک را با ایجاد تراکم با توجه به نتایج برتولینو و همکاران<sup>۱</sup> می‌توان این گونه توجیه کرد که تراکم باعث تغییر پیوستگی و توزیع اندازه منافذ و همچنین کاهش منافذ درشت خاک شده، در نتیجه حجم کل خاک را کاهش داده و باعث افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک می‌شود (۶). فرولیچ و مک ناب<sup>۲</sup> گزارش کردند که تراکم عموماً باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل می‌گردد (۹).

1- Bertolino et al.

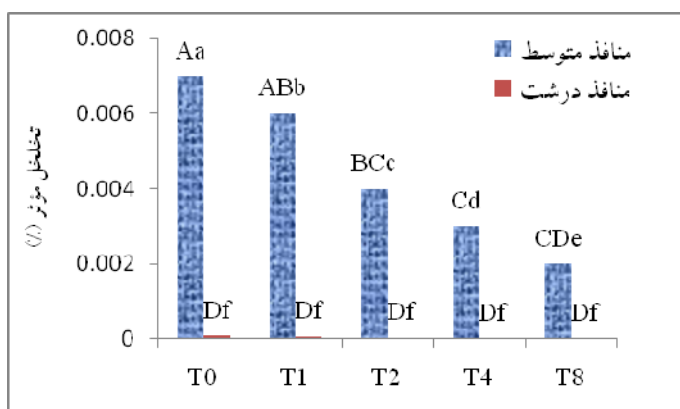
2- Froehlich and Mc Nabb

3- Andrian et al.

جدول ۳- تجزیه واریانس تعداد منافذ بر متر مربع (N) در تیمارهای مختلف.

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

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 (معنی دار در سطح یک درصد می باشد).

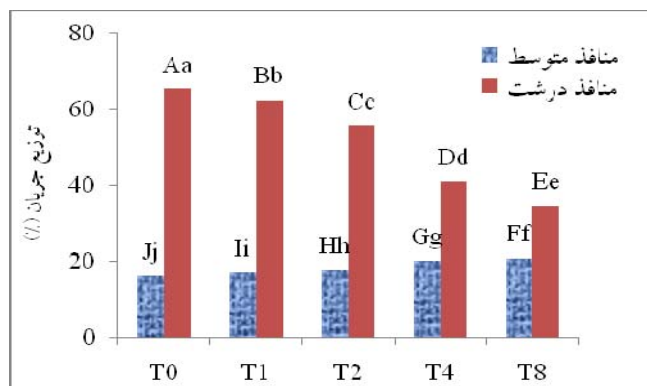


شکل ۲- درصد تخلخل مؤثر هر دسته از منافذ خاک در تیمارهای مختلف

اندیس‌ها بیان کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند، حروف بزرگ نشان دهنده تأثیر تراکم بر تخلخل مؤثر و حروف کوچک تفاوت بین دو کلاس منافذ می‌باشد. (معنی دار در سطح یک درصد بر اساس آزمون LSD).

درشت و ریز 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 می توان گفت با ایجاد تراکم منافذ درشت با وجود کمتر بودن تعداد منافذ در خاک بیشتر از منافذ متوسط تحت تأثیر قرار گرفتند. لیپیک و هاگانسون<sup>۸</sup> نشان دادند که افزایش تراکم ایجاد شده توسط تردد ماشین آلات کشاورزی، حجم منافذ درشت خاک را (منافذ شرکت کننده در جریان اشباع) را بیشتر از منافذ ریز ( $>30\mu\text{m}$ ) کاهش داد (۱۳). سهم هر کلاس اندازه منافذ از تخلخل کل خاک با محاسبه درصد تخلخل مؤثر با استفاده از معادله (۱۴) مشخص گردید. شکل (۲) درصد تخلخل مؤثر برای هر یک از کلاس منافذ را در هر تیمار نشان می دهد. تأثیر تراکم خاک بر درصد تخلخل مؤثر در سطح یک درصد معنی‌دار بود. با افزایش تراکم، درصد تخلخل مؤثر در هر دو کلاس اندازه منافذ به طور معنی‌دار کاهش یافت. در همه

کلاس کوچکترین شعاع در هر کلاس در دو مکش متوالی استفاده شد، بنابراین حداکثر تعداد منافذ در هر کلاس محاسبه گردید. بیشترین تعداد منافذ در هر دو کلاس در تیمار شاهد و کمترین تعداد در تیمار هشت بار عبور تراکتور مشاهده گردید. ریچارد و همکاران<sup>۲</sup> در گزارشی اعلام کردند که اختلاف بین حجم منافذ کل خاک قبل و بعد از تراکم ۱۹ درصد بود که نشان می‌دهد با افزایش تراکم حجم منافذ کل خاک کاهش می‌یابد (۲۱). معنی‌دار بودن اثر تراکم بر تعداد منافذ را می توان با معنی‌دار اثر تراکم بر جرم مخصوص ظاهری توجیه کرد. با افزایش تراکم و افزایش معنی دار جرم مخصوص ظاهری، بدیهی است که تعداد منافذ خاک به صورت معنی دار کاهش یابد. تعداد منافذ با افزایش شعاع نسبت معکوس دارد (۸). در این مطالعه نیز تعداد منافذ ریز در همه تیمارها چندین برابر منافذ درشت بود و همانطور که گفته شد با ایجاد تراکم تعداد منافذ هر دو دسته کاهش یافتند. با یک بار عبور تراکتور، تعداد منافذ درشت و ریز به ترتیب ۱۶/۵ و ۱۳ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. همچنین کاهش منافذ



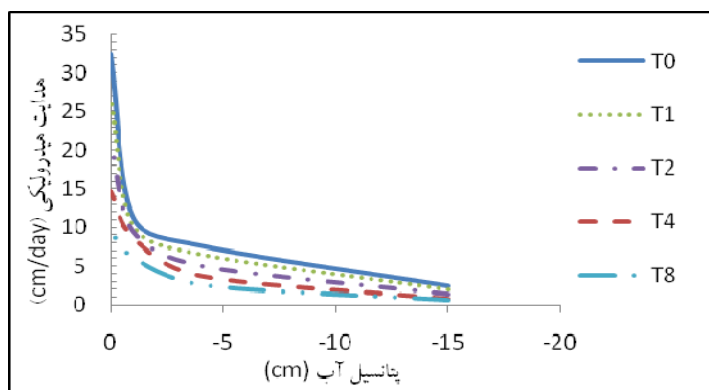
شکل ۳- توزیع جریان عبوری از هر دسته از منافذ خاک در تیمارهای مختلف

اندیس‌ها بیان کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند، حروف بزرگ نشان دهنده تأثیر تراکم بر درصد جریان عبوری از منافذ و حروف کوچک تفاوت بین دو کلاس منافذ. (معنی دار در سطح یک درصد بر اساس آزمون LSD).

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف بر هدایت هیدرولیکی

| F-value       | درجه آزادی | منابع تغییرات    |
|---------------|------------|------------------|
| ۱۷۵۷/۰۳۹۴ **  | ۴          | تراکم            |
| ۱۲۵۹۳/۲۷۴۹ ** | ۳          | پتانسیل آب       |
| ۵۴۹/۰۶۲۴ **   | ۱۲         | تراکم*پتانسیل آب |

\*\* معنی دار در سطح یک درصد.



شکل ۴- هدایت هیدرولیکی در پتانسیل‌ها و تیمارهای مختلف (اندیس‌ها بیان کننده تعداد عبور تراکتور می‌باشند).

نتیجه این منافذ درصد کمی از تخلخل کل خاک را تشکیل دادند (۸). وارکینتاین<sup>۱</sup> گزارش کرد که در اثر تراکم، اندازه و تعداد منافذ به صورت معنی‌دار کاهش می‌یابد که همین موضوع اثر عمیقی بر انتقال آب اشباع و غیر اشباع دارد (۲۶).

اثر تراکم بر درصد جریان عبوری از منافذ در سطح یک درصد معنی‌دار شد (شکل ۳). با افزایش تراکم درصد جریان عبوری از منافذ به طور معنی‌دار کاهش یافت. بیشترین درصد جریان عبوری از منافذ مربوط به تیمار شاهد و کمترین مقدار آن در تیمار هشت

تیمارها اختلاف درصد تخلخل مؤثر بین منافذ درشت و متوسط معنی دار 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 (شکل ۲). با افزایش تراکم، درصد تخلخل مؤثر در این دسته از منافذ به طور معنی‌دار کاهش یافت. کمترین مقدار تخلخل مؤثر در این دسته از منافذ در تیمار هشت بار عبور تراکتور دیده شد. با افزایش سطح فشردگی خاک، درصد تخلخل مؤثر در منافذ درشت نیز کاهش یافت ولی این تفاوت معنی دار نبود. با ایجاد تراکم و سست شدن خاکدانه‌ها، منافذ با شعاع بزرگ تخریب شده و در

همانطور که در شکل (۴) مشخص است در همه پتانسیل‌ها تیمار شاهد دارای بالاترین میزان هدایت هیدرولیکی غیراشباع و تیمار هشت بار عبور تراکتور دارای کمترین مقدار آن 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، نشان دادند که در هر مقدار از پتانسیل آب خاک (۱۷) فقط خلل و فرج کوچکتر از  $\frac{15}{\psi_m}$  (۱) دارای آب بوده و در حرکت آب دخالت دارند (۱۵). اگر با توجه به نتایج مارشال و همکاران<sup>۳</sup> بخواهیم قطر خلل و فرجی که در این مطالعه در حرکت آب در خاک شرکت دارند را اندازه‌گیری کنیم در محدوده (۰-۱۰۰) میکرون قرار می‌گیرد. این دامنه اندازه منافذ در دسته منافذ درشت (ماکروپورها) قرار می‌گیرد (۱۵). 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 (۱۴). پس منطقی به نظر می‌رسد که در پتانسیل‌های (۰ تا ۱۵- سانتی‌متر) هدایت هیدرولیکی غیراشباع با ایجاد تراکم کاهش یابد. والزاک و همکاران<sup>۴</sup> بیان کردند که افزایش تراکم باعث کاهش میزان هدایت هیدرولیکی غیراشباع در پتانسیل ماتریک بالا (۰ تا ۱۶- کیلو پاسکال) می‌شود (۲۵).

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 به‌گونه‌ای 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 خلل و فرج، خصوصیات هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک را به طور مشخصی تغییر داد. آسولین و تسیر<sup>۵</sup> 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 (۵).

### نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که با ایجاد تراکم، تعداد منافذ در دو دسته متوسط و درشت کاهش یافتند. در همه تیمارها تعداد منافذ متوسط چندین برابر منافذ درشت بود. عمده اثر تراکم بر منافذ

بار عبور تراکتور بود. اختلاف درصد جریان عبوری از منافذ بین این دو تیمار ۴۷ درصد گزارش شد. به عبارت دیگر با هشت بار عبور تراکتور درصد جریان عبوری از منافذ تقریباً به نصف کاهش یافت. در همه تیمارها بیشترین درصد جریان عبوری از منافذ درشت و کمترین درصد جریان عبوری از منافذ متوسط صورت گرفت. منافذ درشت با این که کمترین تعداد منافذ خاک بوده (جدول ۳) ولی اصلی‌ترین منافذ در حرکت آب در خاک بوده و بیشترین درصد جریان عبوری به خاک از این منافذ صورت گرفت. بیشترین درصد جریان عبوری از منافذ درشت مربوط به تیمار شاهد بود و با افزایش تراکم کاهش یافت به‌گونه‌ای که در تیمار هشت بار عبور تراکتور کمترین درصد جریان عبوری از منافذ درشت مشاهده گردید (شکل ۳). مارتینز و همکاران<sup>۱</sup> 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 (۱۶).

نتایج تجزیه آماری نشان داد که اثر تراکم و پتانسیل آب بر هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع در سطح یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). با افزایش تراکم میزان هدایت هیدرولیکی به طور معنی‌دار کاهش یافت. از آن جایی که در این مطالعه اثر تراکم بر تعداد منافذ مؤثر (منافذ فعال در هدایت آب در خاک) به طور معنی‌دار اثر گذاشت، بدیهی است که بر خواص هیدرولیکی خاک نیز تأثیر بگذارد.

تغییرات هدایت هیدرولیکی در پتانسیل‌های مختلف در شکل (۴) ارائه شده است. با افزایش تراکم میزان هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع کاهش یافت. بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی اشباع (پتانسیل صفر) مربوط به تیمار شاهد و کمترین میزان آن در تیمار هشت بار عبور تراکتور مشاهده شد (شکل ۴). 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 (۱). راب<sup>۲</sup>، بیان کرد که افزایش تراکم و کاهش تعداد منافذ درشت، بر هدایت هیدرولیکی اشباع و در نتیجه بر جریان آب در خاک اثر می‌گذارد (۱۹). 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 (۲۰).

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 ۴).

3- Marshall et al.

4- Walczak et al.

5- Assouline and Tessier

1- Martinez et al.

2- Rab

درشت خاک بود، زیرا با ایجاد تراکم منافذ درشت با وجود کمتر بودن تعداد این منافذ در خاک، بیشتر از منافذ متوسط تحت تأثیر قرار گرفتند. در همه تیمارها بیشترین درصد جریان عبوری از منافذ درشت و کمترین درصد جریان عبوری از منافذ متوسط صورت گرفت. منافذ درشت با این که کمترین تعداد منافذ خاک بوده و درصد بسیار کمی از تخلخل کل خاک را تشکیل داد ولی اصلی‌ترین منافذ در حرکت آب در خاک بوده و بیشترین درصد جریان عبوری به خاک از این منافذ صورت گرفت. همچنین در این مطالعه کاهش معنی‌دار هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع با افزایش تراکم ایجاد شده مشاهده گردید.

### منابع

۱- برزگر، ع. ا. ۱۳۸۰. مبانی فیزیک خاک. چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، .....

- 2- 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.
- 3- Andrian, A., Thomas, A. T., Richard, E. M., Harry, W. A., and L. F. Barry. 2005. Ground-based forest harvesting effects on soil physical properties and douglas-fir growth. *Soil Science Society of American Journal*, 69: 1822-1832.
- 4- Ankeny, M. D., Ahmed, M., Kasper, T. C. and R. Horton. 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, 55:470-476.
- 5- Assouline, S. and D. Tessier. 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: Experiment results and modeling. *Soil Science Society of American Journal*, 61: 390-398.
- 6- Bertolino Ana, V. F. A., Fernandes, N., Miranda, B. and P. Andréa. 2010. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. *Journal of Hydrology*, 393: 94–104.
- 7- Boivin, P., Schaffer, B., Temgoua, E., Gratier, M. and G. Steinman. 2006. Assessment of soil compaction using soil shrinkage modelling: Experimental data and perspectives. *Soil and Tillage Research*, 88: 65–79.
- 8- Cameria, M. R., Fernando, R. M. and L. S. Pereira. 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.
- 9- Froehlich, H. A. and D.H. McNabb. 1984. Minimizing soil compaction in Pacific Northwest forests. p. 159–192. In E.L. Stone (ed.) *Proc. Forest Soils and Treatment Impacts Conf.*, 1983. University of Tennessee, Knoxville, TN.
- 10- Gupta, S. C., and W. E. Larson. 1979. A model for predicting packing density of soils using particle size distribution. *Soil Science Society of American Journal*, 43: 758-764.
- 11- Hakansson, I. and G. W. Reeder. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 29: 277-304.
- 12- Horton, R., Ankeny, M. D. and R. R. Allmaras. 1994. Effects of soil compaction on soil hydraulic properties. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 32: 141– 165.
- 13- Lipiec, J. and I. Hakansson. 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 R. Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116: 107– 136.
- 15- Marshall, T. J., Holmes, J. W. and C. W. Rose. 1996. *Soil physics*. 2nd edition. Cambridge University.



- 16- Martinez, E., Fuentes, J. P., Silva, P., Valle, S. and E. Acevedo. 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.
- 17- Mc Nabb 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.
- 18- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N. and S. Pellegrini. 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil and Tillage Research*, 73: 119–129.
- 19- 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*, 191: 329–340.
- 20- Reicosky, D. C., Voorhees W. B. and J. K. Radke. 1981. Unsaturated water flow through a simulated wheel track. *Soil Science Society of American Journal*, 45:3–8.
- 21- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J. F. Brund, A. and J. Guearif. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52: 49-58.
- 22- Sharratt, B., Voorhees, W., McIntosh, G. and G. Lemme. 1998. Persistence of soil structural modifications along a historic wagon trail. *Soil Science Society of American Journal*, 62: 774–777.
- 23- Vervoort, R. W. and S. R. Cattle. 2003. Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to pore space geometry and pore size distribution. *Journal of Hydrology*, 272: 36-49.
- 24- Vos J. A., Hesterberg, D. and P. A. C. Raats. 2000. Nitrate leaching in a tile-drained silt loam soil. *Soil Science Society of American Journal*, 64:517–527.
- 25- Walczak, R.T., Witkowska-Walczak, B. and P. Baranowski. 1997. Soil structure parameters in models of crop growth and yield prediction. *Physical models. International Agrophysics*, 11: 111– 127.
- 26- Warkentin, B. P. 1971. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. *American Society of Agricultural Engineers*, 164: 126-154.
- 27- Watson, K. W. and R. J. Luxmoore. 1986. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Science Society of American Journal*, 50: 578–582.
- 28- Werner, D. and B. Werner. 2001. Compaction and recovery of soil structure in a silty clay soil (Chernozem): Physical, computer tomographic and scanning electron microscopic investigations. *Soil Science*, 164: 79–90.
- 29- Wiermann, C., Werner, D., Horn, R., Rostek, J. and B. Werner. 2000. Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53: 117–128.
- 30- Zhang, SH., Grip, H. and L. Lovdahl. 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil and Tillage Research*, 90 : 117–125.