

## تأثیر اثر فشردگی خاک روی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی آن

### به روش حل معکوس

مجید رئوف<sup>1\*</sup>

استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی؛

majidraof2000@yahoo.co.uk

### چکیده

در زمان انجام عملیات کاشت، داشت و برداشت در مزرعه، خاک زراعی تحت تاثیر نیروهای مختلف قرار گرفته و ویژگی‌های آن دچار تغییرات می‌گردد. هدف از این پژوهش بررسی اثر فشردگی خاک روی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی آن می‌باشد. بدین منظور پس از انتخاب چهار تیمار  $T_0$  (تیمار شاهد)،  $T_1$ ،  $T_2$  و  $T_3$  (تیمارهایی که تراکتور به ترتیب 1، 3 و 5 بار از روی آنها عبور کرده است) از خاک هر تیمار بعد از اعمال نیروی مورد نظر، نمونه برداری شد و ویژگی‌های آن‌ها در آزمایشگاه اندازه‌گیری گردید. میزان نفوذ آب در خاک در هر تیمار اندازه‌گیری و یک نقطه رطوبت - مکش نیز برداشت گردید. برای تعیین هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع و پارامترهای نگهداشت آب خاک از کد Hydrus 3D و از روش حل معکوس استفاده شد. چگالی ظاهری در تیمارهای  $T_1$ ،  $T_2$  و  $T_3$  نسبت به تیمار شاهد به ترتیب 17/41، 26/87 و 35/65 درصد افزایش، میزان تخلخل کل به ترتیب 16/55، 25/36 و 33/04 درصد و هدایت هیدرولیکی اشباع به ترتیب 38/09، 59/05 و 61/43 درصد کاهش نشان داد اما چگالی حقیقی تقریباً ثابت ماند. با فشردگی خاک در اثر اعمال نیرو از سطح آن پارامترهای  $\theta_r$ ،  $\theta_s$ ،  $K_s$  و  $n$  (به ترتیب رطوبت باقیمانده و اشباع، هدایت هیدرولیکی اشباع و پارامتر تجربی مدل ون گنوختن) کاهش و پارامترهای  $\alpha$  و  $l$  (به ترتیب پارامتر عکس مکش ورود هوا و پیوستگی منافذ) روند افزایشی داشتند. اثر اعمال نیرو روی پارامتر  $\alpha$  معنی‌دار نبوده ولی روی پارامترهای  $\theta_r$ ،  $\theta_s$ ،  $K_s$ ،  $n$  و  $l$  معنی‌دار بود.

واژه‌های کلیدی: هدایت آبی اشباع و غیر اشباع، مدل ون گنوختن، نفوذ آب به خاک

### مقدمه

شیمیایی، کاهش میزان ماده آلی خاک و آبیاری پی در پی (که باعث تحکیم ساختمان خاک می‌گردد) صورت پذیرد (8). فشردگی خاک روی بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی آن تاثیر گذاشته و در کل باعث کاهش درجه کیفیت خاک می‌گردد. رشد غیر عادی ریشه گیاهان (ریشه دهی بسیار عمیق یا بسیار کم عمق) می‌تواند

یکی از مهم‌ترین عوامل پایین آمدن کیفیت ویژگی‌های خاک در حدود 11 درصد از خاکهای زراعی جهان، فشردگی خاکهای زراعی می‌باشد. فشردگی ممکن است در اثر عبور ماشین آلات کشاورزی، عبور انسان‌ها یا حیوانات از روی خاکها، استفاده مکرر از کودهای

1. آدرس نویسنده مسؤول: اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، کدپستی: 5619911313

\* دریافت: تیر، 1391 و پذیرش: بهمن، 1391

نمودند. منحنی‌های هدایت هیدرولیکی غیراشباع و نگهداشت آب خاک از اعداد اندازه گیری شده ترسیم گردید. آنها نتیجه گیری نمودند که با افزایش فشردگی خاک میزان هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع و غیر اشباع کاهش و میزان رطوبت قابل نگهداری در مکشی معین افزایش یافت. مک رای و مهبوس (6) گزارش نمودند که با افزایش میزان فشردگی خاک مواد آلی آن کاهش یافته و تولید مواد آلی با سرعت کمتری صورت می‌پذیرد که خود باعث کاهش میزان آب نفوذ یافته در خاک می‌گردد زیرا فشردگی خاک و کاهش میزان مواد آلی آن باعث افزایش میزان چگالی ظاهری و کاهش تخلخل شده و آرایش ذرات و ساختمان خاک را به هم می‌ریزد.

اگر روی لایه های خاک فشردگی اعمال گردد خطر فرسایش خاک در اثر وقوع بارندگی افزایش می‌یابد. هر چند ایجاد فشردگی در یک خاک نیروهای دافعه بین ذرات را کاهش داده و باعث منظم تر قرار گرفتن ذرات خاک در یک سیستم شده و چگالی ظاهری را افزایش می‌دهد اما میزان آب وارد شده در خاک (آب نفوذ یافته) کاهش یافته و میزان رواناب تولید شده افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به ایجاد فرسایش بیشتری خواهد شد (11). رئوف و همکاران (9) و رئوف (2) اثر شیب زمین روی هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک، ضریب جذب معادله نفوذ فیلپ، منحنی نگهداشت آب خاک و پارامترهای هیدرولیکی غیراشباع خاک را بررسی نموده و نتیجه گیری نمودند که با افزایش شیب زمین هدایت هیدرولیکی اشباع و غیراشباع خاک و ضریب جذب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شیب زمین تغییراتی در منحنی نگهداشت آب خاک ایجاد می‌گردد. آنها این تغییرات را به فشردگی خاک در اثر نیروی وزن ذرات بالادست و وجود اختلاف در نحوه آرایش ذرات در اراضی افقی و شیب دار نسبت دادند. رئوف و همکاران (9) علاوه بر پارامترهای ذکر شده

به علت فشردگی شدن خاک زراعی باشد (13). در خاک- های زراعی یکی از اهداف شخم زدن بهبود ساختمان خاک‌هایی است که در فصل زراعی گذشته، دچار فشردگی و تحکیم شده‌اند. ساختمان خاک به علت این‌که ویژگی‌های هیدرولیکی آن را تعیین می‌کند، می‌تواند بیان آب خاک را تحت تاثیر قرار دهد. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل نگهداشت آب خاک و هدایت هیدرولیکی آن می‌باشد (1). فشردگی خاک روی ساختمان خاک اثر گذاشته که از یک طرف باعث تغییر در مقادیر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی شده و از طرف دیگر باعث تغییر در خواص بیولوژیکی خاک می‌گردد زیرا فشردگی شدن خاک باعث کاهش ورود هوا به داخل خاک شده و زندگی میکروارگانیسم‌ها را دچار اختلال خواهد نمود. نائم و همکاران (8) در پژوهشی اثر فشردگی خاک را روی ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل چگالی ظاهری و تخلخل کل بررسی نموده و با استفاده از یک غلتک دوار 7 تنی فشردگی‌های مورد نظر را به صورت مصنوعی در خاک ایجاد نموده و در نهایت به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان فشار وارده بر سطح خاک که باعث افزایش میزان فشردگی خاک می‌گردد، تخلخل کل خاک 14 تا 27 درصد کاهش و میزان چگالی ظاهری حدود 15 تا 26 درصد افزایش می‌یابد.

گای و همکاران (4) اثر فشردگی خاک را روی ویژگی‌های هیدرولیکی آن بررسی نمودند. آنها جهت اعمال فشردگی روی خاک مورد آزمایش از تراکتور استفاده و 4 تیمار که هر تیمار با بقیه تیمارها تنها در تعداد عبور تراکتور و زمان عبور تراکتور از روی آنها متفاوت بود در نظر گرفتند. این محققان مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع را به عنوان تابعی از رطوبت خاک و مقادیر رطوبت باقیمانده را به عنوان تابعی از میزان پتانسیل ماتریک خاک بررسی و منحنی‌های هدایت هیدرولیکی- رطوبت حجمی و رطوبت حجمی - پتانسیل ماتریک را برای خاک لومی و تحت فشردگی‌های مختلف استخراج

کرت و هر کرت به ابعاد 4×8 متر بود (در کل 12 کرت). نیاز آبی گندم از داده‌های هواشناسی دشت اردبیل به روش پنمن مونتیت و با استفاده از کد کراپوات<sup>1</sup> استخراج و کرت‌ها هر هفته به اندازه نیاز آبی متوسط گیاه گندم (گیاه رایج در منطقه دشت اردبیل) آبیاری گردیدند. جهت اعمال فشرده‌گی و اثر آن روی خصوصیات خاک بعد از رسیدن رطوبت خاک به حدی که بتوان عملیات زراعی را با ماشین آلات کشاورزی روی خاک انجام داد (رسیدن رطوبت به حد کمتر از ظرفیت زراعی) چهار تیمار شاهد یا بدون فشرده‌گی  $T_0$  (بدون عبور تراکتور)،  $T_1$  (عبور یک بار تراکتور از روی خاک)،  $T_2$  (عبور سه بار تراکتور از روی خاک) و  $T_3$  (عبور پنج بار تراکتور از روی خاک) در نظر گرفته شد. در انتهای دوره مورد نظر از خاک هر چهار تیمار نمونه برداری دست خورده و دست نخورده انجام گردید. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و خصوصیات فیزیکی آنها اندازه‌گیری شد. جهت تخمین خصوصیات هیدرولیکی خاک از روش حل معکوس و بهینه سازی معادله دیفرانسیلی حاکم بر انتقال رطوبت در خاک (معادله ریچاردز) استفاده شد. جهت مقایسه مقادیر پارامترهای مختلف خاک در تیمارهای مختلف از آزمون مقایسه میانگین دانکن با نرم افزار SPSS استفاده شد.

#### - انجام آزمایش ها

مقادیر چگالی ظاهری خاک به روش تهیه نمونه دست نخورده (روش وزن خشک بر حجم خاک)، چگالی حقیقی به روش آزمایش پیکنومتر، تخلخل کل خاک با توجه به مقادیر چگالی حقیقی و ظاهری (فلینت و فلینت 2002)، درصد ذرات تشکیل دهنده خاک (شامل رس، سیلت و شن) با استفاده از روش الک کردن و روش هیدرومتری، همگی در آزمایشگاه اندازه‌گیری گردیدند.

آزمایش‌های صحرایی شامل اندازه‌گیری مقادیر نفوذ آب در حالت اشباع و برداشت یک نقطه رطوبت - مکش در

مدل‌های مختلف منحنی مشخصه آب خاک را نیز مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که با افزایش شیب زمین دقت مدل‌های منحنی مشخصه آب خاک کاهش یافته و بیان نمودند که این مدل‌ها برای اراضی افقی ارائه گردیده‌اند.

هدف از این پژوهش ارزیابی اثر فشرده‌گی خاک روی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی آن بود.

#### مواد و روش ها

به منظور ارزیابی اثر فشرده‌گی خاک روی ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی آن، در خاکی تقریباً یکنواخت 4 تیمار انتخاب و آزمایش‌های نفوذ با استفاده از نفوذسنج استوانه‌های مضاعف انجام و ثبت گردیدند. با به دست آمدن داده‌های نفوذ و یک نقطه مکش - رطوبت پارامترهای توابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع و نگهداشت آب خاک با استفاده از کد Hydrus 3D و به روش معکوس استخراج و اثر فشرده‌گی خاک روی برخی ویژگی‌های فیزیکی و پارامترهای مذکور مورد بررسی قرار گرفت.

#### - منطقه محل اجرای پژوهش

پژوهش مورد نظر در مزرعه پژوهشی بابلان دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی صورت گرفت. این مزرعه تقریباً در فاصله 10 کیلومتری شمال شرق شهر اردبیل (کنار جاده اردبیل - آستارا) قرار دارد. منطقه مورد نظر دارای خاکهای شور بوده (جدول 1) که زراعت را در آن منطقه با محدودیت جزئی مواجه نموده است. آب مورد استفاده برای کشاورزی در منطقه بابلان (از جمله مزرعه پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی) از آب زیرزمینی منطقه تأمین می‌گردد که دارای شوری تقریباً زیادی (حدود  $850 \text{ ds/m}$ ) می‌باشد.

#### - تیمارهای آزمایش

برای تعیین اثر فشرده‌گی خاک روی ویژگی‌های هیدرولیکی آن طرحی در قالب بلوک کاملاً تصادفی با 4 تیمار و سه تکرار در نظر گرفته شد. تیمارها شامل 4

در این پژوهش، تابع نگهداشت آب خاک،  $\theta(h)$  مدل نگهداشت آب و خاک و گنوختن (12) و تابع هدایت هیدرولیکی،  $K(h)$  مدل کاپیلاری معلم (7) انتخاب شده است. معادله تابع نگهداشت آب و خاک و گنوختن عبارتست از (12):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (2)$$

همچنین معادله هدایت هیدرولیکی معلم بصورت زیر می باشد (12):

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \text{و} \quad K(h) = K_s S_e' \left\{ 1 - \left( 1 - S_e' \right)^m \right\}^2 \quad (3)$$

در این روابط:  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده  $[L^3 L^{-3}]$ ،  $\theta_s$  رطوبت اشباع  $[L^3 L^{-3}]$ ،  $S_e'$  اشباع نسبی [-]،  $\alpha$  پارامتر بیانگر عکس مکش ورود هوا در خاک  $[L^{-1}]$ ،  $l$  پارامتر پیوستگی منافذ [-] و  $n$  پارامتر تجربی [-] وابسته به نوع خاک می باشند. پارامترهای  $\alpha$  و  $n$  بستگی به شکل منحنی  $S_e(h)$  و  $K(h)$  دارند. تابع هدف،  $\phi$  که بایستی در فرایند حل معکوس برای تخمین پارامتر، حداقل گردد بصورت زیر می باشد (10):

$$\phi(b, q, p) = \sum_{j=1}^m V_j \sum_{i=1}^m W_{ij} [q_j^*(x, t_i) - q_j(x, t_i, b)]^2 + \sum_{j=1}^m \bar{V}_j \sum_{i=1}^m \bar{W}_{ij} [p_j^*(\theta_i) - p_j(\theta_i, b)]^2 + \sum_{j=1}^n \bar{V}_j [b_j^* - b_j]^2 \quad (4)$$

در این معادله  $m$  تعداد پارامترهای اندازه گیری شده و  $n$  تعداد اندازه گیری های هر پارامتر می باشد.  $q_j^*(x, t_i)$  بیانگر مقدار اندازه گیری شده پارامتر  $j$  ام در زمان  $t_i$  و

شرایط مزرعه بود. برای انجام آزمایش ها، در هر تیمار به فواصل زمانی یک ماه آزمایش نفوذ به روش استوانه های مضاعف انجام و سپس جدول استاندارد نفوذ طی هر آزمایش نفوذ تکمیل گردید. در آزمایش های استوانه های مضاعف پس از اینکه حلقه ها به صورت متحدالمرکز در محل مورد آزمایش کوبیده شدند آب به صورت همزمان بین دو حلقه و همچنین داخل حلقه کوچک ریخته شد و از همان لحظه اندازه گیری شروع گردید. آزمایش ها تا زمانی ادامه یافتند که طی چندین قرائت متوالی (حداقل 3 قرائت) شدت نفوذ تقریباً ثابت شده باشد یعنی تغییرات جریان نفوذ آب در خاک بسیار کم شده و تقریباً به حالت ماندگار رسیده باشد (3). مدت زمان آزمایش های نفوذ با استفاده از دستگاه استوانه های مضاعف بین 90 تا 140 دقیقه متغیر بود.

در هر آزمایش برای استخراج یک نقطه رطوبت-مکش (یک نقطه از منحنی رطوبتی خاک که در شبیه سازی محیط غیر اشباع با استفاده از کد Hydrus 3D نیاز می باشد) در یک رطوبت معین (رطوبتی که مکش معادل آن در محدوده اندازه گیری تانسومتر قرار داشته باشد) یک دستگاه تانسومتر در مزرعه گذاشته شد و مکش خاک در آن نقطه اندازه گیری و سپس در همان لحظه و از همان نقطه یک نمونه دست خورده (از عمق صفر تا 10 سانتیمتر) تهیه و رطوبت آن به روش توزین در آزمایشگاه تعیین گردید.

#### - روش حل معکوس

معادله جریان آب برای جریان دو بعدی متقارن، شعاعی، همدم، با درجه اشباع متغیر و محیط ثابت به صورت زیر می باشد:

$$(1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r K \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z}$$

که در آن  $\theta$  رطوبت حجمی  $[L^3 L^{-3}]$ ،  $h$  ارتفاع فشاری  $[L]$ ،  $K$  هدایت هیدرولیکی  $[L T^{-1}]$ ،  $r$  فاصله شعاعی  $[L]$ ،  $z$  فاصله عمودی  $[L]$  که در جهت رو به پایین مثبت در نظر گرفته می شود و  $t$  زمان  $[T]$  می باشند.

### نتایج و بحث

#### - اثر فشردگی روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

خاک منطقه با توجه به مثلث بافت خاک و بر اساس رده بندی USDA<sup>1</sup> از نوع لوم رسی بود. ویژگی‌های فیزیکی خاک محل انجام پژوهش در انتهای دوره (سه ماه بعد از شروع پژوهش) در جدول 1 آورده شده است. چنانچه از جدول 1 مشخص است در سطح اعتماد 95 درصد مقدار چگالی حقیقی ذرات خاک در اثر فشردگی در طول دوره مورد نظر تغییر معنی‌دار نداشته در حالی که مقدار چگالی ظاهری خاک به علت افزایش تعداد ذرات در واحد حجم در اثر فشردگی در طول دوره از 1/24 به 1/67 افزایش یافته است. افزایش چگالی ظاهری با افزایش فشردگی خاک در فشردگی دوم نسبت به اول، سوم نسبت به دوم و چهارم نسبت به سوم همگی معنی‌دار بوده‌اند. افزایش چگالی ظاهری و ثابت بودن چگالی حقیقی باعث شده است که تخلخل کل خاک از 51/9 درصد در تیمار بدون

در مکان  $x(r, z)$ ،  $q_j(x, t_i, b)$  تخمین مدل از مقدار پارامتر  $q_j^*(x, t_i)$  و  $V_j$  و ضرایب وزنی به برای یک پارامتر یا نقطه به خصوص می‌باشند.  $p_j^*(\theta_i)$  و  $p_j(\theta_i, b)$  برای پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشند. جزء آخر معادله (4) بیانگر تابع خطا برای اختلافات بین مقادیر قبلی پارامترهای هیدرولیکی خاک ( $b_j^*$ ) و تخمین نهایی آنها ( $b_j$ ) می‌باشد. با داشتن چهار پارامتر درصدهای رس، سیلت، شن و چگالی ظاهری به عنوان داده های ورودی، پارامترهای  $\theta_r$ ،  $\theta_s$ ،  $K_s$  و  $n$  و  $\alpha$  به عنوان پارامترهای خروجی از نرم افزار Rosetta استخراج و به عنوان تخمین‌های اولیه در حل عددی معادله ریچاردز در کد Hydrus 3D مورد استفاده قرار گرفت. از طرفی بر اساس گزارش معلم (7) برای اکثر خاکها مقدار عددی عامل پیوستگی منافذ  $l=0.5$  می‌باشد که در این پژوهش نیز به عنوان تخمین اولیه در حل معادله ریچاردز در کد Hydrus 3D مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق  $q_j^*(x, t_i)$  مقادیر نفوذ انباشته در زمان‌های مختلف می‌باشد.

جدول 1 برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام پژوهش در انتهای دوره مورد نظر

تیمار				پارامترهای فیزیکی
$T_3$	$T_2$	$T_1$	$T_0$	
(1/18) 1/67 <sup>d</sup>	(1/17) 1/57 <sup>c</sup>	(1/18) 1/46 <sup>b</sup>	*(1/18) 1/24 <sup>a**</sup>	چگالی ظاهری ( $gr/cm^3$ )
(2/57) 2/58 <sup>a</sup>	(2/58) 2/57 <sup>a</sup>	(2/58) 2/57 <sup>a</sup>	(2/58) 2/58 <sup>a</sup>	چگالی حقیقی ( $gr/cm^3$ )
(36) 36/1 <sup>a</sup>	(36/1) 35/9 <sup>a</sup>	(36) 36/2 <sup>a</sup>	(35/8) 36 <sup>a</sup>	شن (درصد)
(36/1) 35/8 <sup>a</sup>	(35/8) 35/7 <sup>a</sup>	(35/9) 35/6 <sup>a</sup>	(36/1) 36 <sup>a</sup>	سیلت (درصد)
(27/9) 28/1 <sup>a</sup>	(28/1) 28/4 <sup>a</sup>	(28/1) 28/2 <sup>a</sup>	(28/1) 28 <sup>a</sup>	رس (درصد)
(54/08) 34/75 <sup>c</sup>	(54/65) 38/74 <sup>c</sup>	(54/26) 43/31 <sup>b</sup>	(54/26) 51/9 <sup>a</sup>	تخلخل کل (درصد)
(8/12) 8/09 <sup>a</sup>	(8/05) 8/07 <sup>a</sup>	(7/98) 8/15 <sup>a</sup>	(8/01) 7/95 <sup>a</sup>	pH
(2/968) 3/051 <sup>a</sup>	(2/79) 2/462 <sup>a</sup>	(2/456) 2/379 <sup>a</sup>	(2/512) 2/897 <sup>a</sup>	درصد مواد آلی (%) <sup>2</sup>
(1136) 1182 <sup>a</sup>	(1153) 1154 <sup>a</sup>	(1142) 1126 <sup>a</sup>	(1154) 1171 <sup>a</sup>	شوری خاک <sup>3</sup> ( $dS/m$ )

\* اعداد داخل پرانتز مقادیر پارامترها در ابتدای فصل است

\*\* حروف مشابه در یک سطر بیانگر عدم معنی دار بودن اثر در سطح اعتماد 95 درصد در انتهای فصل است

<sup>1</sup>. United States Department of Agriculture

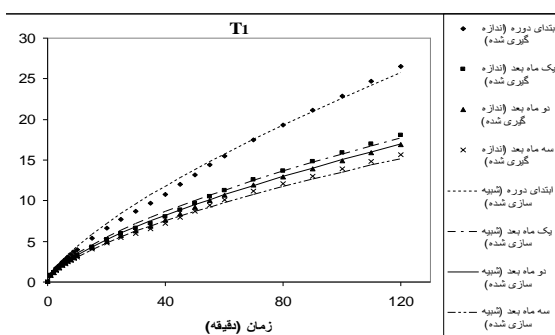
<sup>2</sup>. Organic Matter

<sup>3</sup>. Electrical Conductivity

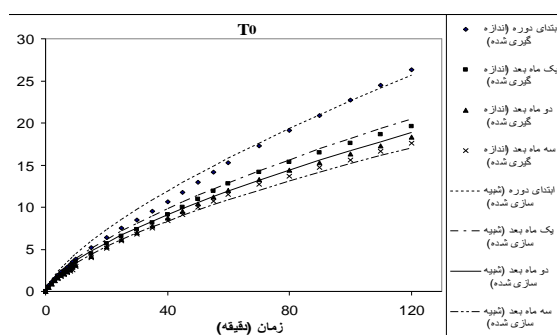
ساختمان خاک مقداری تحکیم یافته و نشست خاک باعث گردیده است که با فاصله گرفتن از ابتدای فصل میزان نفوذ آب در خاک کاهش یابد. در شکل 2 (مربوط به تیمار  $T_1$ ) نفوذ در ابتدای فصل زراعی مشابه نفوذ آب در تیمار شاهد در ابتدای فصل است اما با گذشت 1، 2 و 3 ماه از شروع دوره مورد نظر میزان نفوذ آب در خاک در تیمار  $T_1$  نسبت به ابتدای فصل کاهش یافته و شدت کاهش در این تیمار بیشتر از تیمار  $T_0$  (شاهد) می باشد. دلیل این امر علاوه بر تحکیم خاک در اثر آبیاری و بارش در طول فصل زراعی، فشردگی خاک در اثر عبور تراکتور به تعداد یک بار از روی خاک تیمار  $T_1$  است. در اشکال 3 و 4 (مربوط به تیمار  $T_2$  و  $T_3$ ) نیز نفوذ در ابتدای فصل زراعی مشابه نفوذ آب در تیمار شاهد در ابتدای فصل است اما با گذشت 1، 2 و 3 ماه از شروع دوره مورد نظر میزان نفوذ آب در این تیمارها نیز نسبت به ابتدای فصل کاهش یافته و شدت کاهش در تیمارهای ذکر شده بیشتر از تیمار  $T_0$  و  $T_1$  می باشد. در کل هر چه تعداد دفعات عبوری تراکتور از روی خاک مزرعه بیشتر می گردد کاهش مقدار آب نفوذی نیز بیشتر می شود بطوریکه کمترین میزان آب نفوذ یافته در تیمار  $T_3$  (تیماری 5 بار فشردگی) و بیشترین آن در تیمار  $T_0$  (تیمار بدون فشردگی) اتفاق افتاده و در تیمارهای بینابین ( $T_2$  و  $T_1$ ) میزان آب نفوذ یافته کمتر از تیمار شاهد و بیشتر از تیمار  $T_3$  می باشد.

فشردگی به 34/75 درصد در تیمار با پنج بار فشردگی در طول فصل زراعی کاهش یابد. کاهش تخلخل کل با افزایش فشردگی تنها در مورد فشردگی سوم معنی دار نبوده و در دو فشردگی دیگر معنی دار است. با کاهش 33/04 درصدی تخلخل کل در تیمار با پنج بار فشردگی نسبت به تیمار بدون فشردگی (تیمار شاهد) در اثر اعمال نیروی وزن در سطح خاک می توان انتظار داشت که بسیاری از پارامترهای خاک تحت تاثیر نیروی وارده از سطح خاک قرار گرفته و دچار تغییرات گردند. درصدهای ذرات تشکیل دهنده خاک شامل رس، سیلت و شن برای تیمارهای مختلف نیز طوری است که اختلاف معنی داری بین تیمارها مشاهده نمی شود و دلیل آن این است که تمام نمونه خاک های تهیه شده از یک مزرعه که سالیان متمادی تحت کشت و عملیات زراعی یکسان قرار داشت برداشت شده است. در مورد ویژگی های شیمیایی خاک نیز چنانچه انتظار می رود فشردگی خاک نتوانسته است روی ویژگی های شیمیایی خاک در کوتاه مدت موثر باشد. ممکن است پدیده فشردگی خاک در دراز مدت روی برخی از ویژگی های شیمیایی خاک موثر باشد.

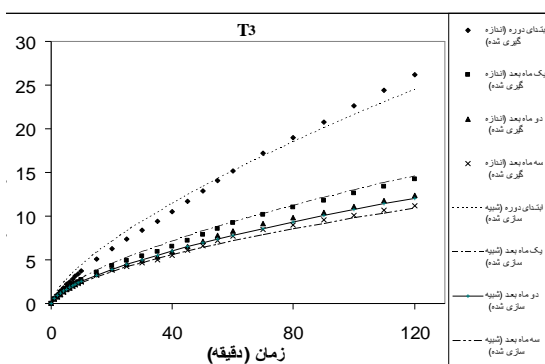
در اشکال 1 تا 4 منحنی های نفوذ انباشته ای اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با استفاده از کد Hydrus 3D برای تیمارهای  $T_0$  (شاهد)،  $T_1$ ،  $T_2$  و  $T_3$  در طول فصل زراعی مورد نظر و بعد از هر بار عبور تراکتور از روی تیمارهای هدف نشان داده شده است. در شکل 1 (مربوط به تیمار شاهد) در طول فصل زراعی هیچ گونه فشردگی روی خاک صورت نگرفته است با این وجود در طول فصل زراعی به علت آبیاری و بارش



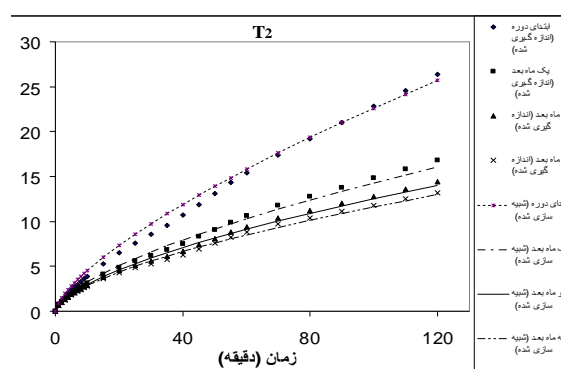
شکل 2- نمودارهای نفوذ تجمعی اندازه گیری شده و شبیه سازی برای تیمار  $T_1$



شکل 1- نمودارهای نفوذ تجمعی اندازه گیری شده و شبیه سازی برای تیمار  $T_0$  (شاهد)



شکل 4 نمودارهای نفوذ تجمعی اندازه گیری شده و شبیه سازی برای تیمار  $T_3$



شکل 3 نمودارهای نفوذ تجمعی اندازه گیری شده و شبیه سازی برای تیمار  $T_2$

تخمین اولیه از پارامترهای مذکور می باشد که بایستی در کد Hydrus 3D وارد گردند تا بتوان مقادیر بهینه شده آنها را استخراج نمود. چنانچه از جدول 2 مشخص است تمام پارامترهای تخمین زده شده از کد روزتا در اثر اعمال فشردگی دچار تغییر معنی دار در سطح اعتماد 95 درصد شده، اما تغییرات برای تمام پارامترها یکسان نمی باشد. بیشترین اثر فشردگی روی هدایت هیدرولیکی اشباع و کمترین آن روی دو پارامتر  $n$  و  $\alpha$  بوده است. علاوه بر مقادیر جدول 2، برای تمام تیمارها مقدار اولیه عامل پیوستگی منافذ،  $l=0.5$  در نظر گرفته شده است.

### اثر فشردگی روی ویژگی های هیدرولیکی خاک

مقادیر تخمین اولیه استخراج شده از کد روزتا برای پارامترهای  $\theta_r$ ،  $\theta_s$ ،  $K_s$ ،  $n$  و  $\alpha$  برای تیمارهای  $T_0$ ،  $T_1$ ،  $T_2$  و  $T_3$  در جدول 2 نشان داده شده است. با افزایش میزان فشردگی خاک در اثر نیروی وارده از سطح خاک مقدار چگالی ظاهری به شدت افزایش یافته و با ثابت بودن چگالی حقیقی خاک باعث شده که تخلخل کل کاهش یافته و بسیاری از پارامترهای هیدرولیکی خاک از قبیل  $\theta_r$ ،  $\theta_s$ ،  $K_s$ ،  $n$  و  $\alpha$  تغییر کنند که این تغییرات در جدول 2 آورده شده است. مقادیر جدول 2 تنها یک

جدول 2 - مقادیر تخمین اولیه استخراج شده از کد روزتا برای پارامترهای  $\alpha$  و  $n$ ,  $K_s$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ 

تیمار	LSD	$T_3$	$T_2$	$T_1$	$T_0$	پارامتر
	0/013	0/0641 <sup>c</sup>	0/0697 <sup>bc</sup>	0/074 <sup>ab</sup>	0/08 <sup>a*</sup>	$\theta_r (cm^3 / cm^3)$
	0/215	0/3591 <sup>c</sup>	0/3855 <sup>bc</sup>	0/4127 <sup>b</sup>	0/4671 <sup>a</sup>	$\theta_s (cm^3 / cm^3)$
	0/0023	0/0146 <sup>b</sup>	0/0126 <sup>ab</sup>	0/0114 <sup>ab</sup>	0/0102 <sup>a</sup>	$\alpha (1/cm)$
	0/245	1/3295 <sup>b</sup>	1/3968 <sup>ab</sup>	1/4523 <sup>ab</sup>	1/4993 <sup>a</sup>	$n (-)$
	10/452	2/9 <sup>c</sup>	4/47 <sup>bc</sup>	7/6 <sup>b</sup>	23/69 <sup>a</sup>	$K_s (cm/day)$

نوع خاک  
لوم رسی  
لوم رسی  
لوم رسی  
لوم رسی  
لوم رسی  
\* حروف مشابه در یک سطر بیانگر عدم معنی دار بودن اثر در سطح اعتماد 95 درصد است

الف) اثر فشردگی خاک روی مقدار رطوبت باقیمانده ( $\theta_r$ ) تنها بعد از اعمال فشردگی‌های زیاد به صورت معنی‌دار اثر می‌گذارد. از آنجا که در رطوبت‌های کم، رطوبت باقیمانده بیشتر در تخلخل ریز خاک وجود دارد بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که اثر فشردگی خاک روی تخلخل ریز خاک بعد از اعمال فشردگی‌های زیاد به طور معنی‌دار موثر بوده و در فشردگی‌های کم این اثر معنی‌دار نمی‌باشد. از طرفی چون حرکت آب در شرایط غیر اشباع (مخصوصاً در مکش‌های زیاد) از تخلخل ریز خاک صورت می‌گیرد (5)، می‌توان گفت که در شرایط غیر اشباع فشردگی خاک نمی‌تواند روی میزان جریان آب در خاک اثر معنی‌داری داشته باشد. ب) فشردگی اول خاک (تیمار  $T_1$ ) رطوبت اشباع خاک ( $\theta_s$ ) (تقریباً برابر تخلخل کل خاک) را به صورت معنی‌دار تحت تأثیر قرار داده و با توجه به نتیجه قسمت الف می‌توان نتیجه گرفت فشردگی خاک در بار اول روی تخلخل متوسط و درشت اثر معنی‌داری دارد.

جدول 3 پارامترهای بهینه شده هیدرولیکی غیر اشباع خاک، تخمین زده شده از حل معکوس با کد Hydrus 3D. خطای استاندارد و حد بالا و پایین این مقادیر را در سطح اعتماد 95 درصد نشان می‌دهد. مقادیر بهینه شده به روش حل معکوس (جدول 3) نشان می‌دهد که تخمین اولیه مقادیر تقریباً نزدیک به مقادیر بهینه آنها بوده اما با آنها دارای تفاوت می‌باشد. حد بالا و پایین مقادیر پارامترهای مورد نظر در سطح اعتماد 95 درصد نیز در دو ستون آخر جدول آورده شده است. گستردگی دامنه‌ی پارامتر تجربی  $n$  بیشترین و پارامتر بیانگر عکس مکش ورود هوا در خاک ( $\alpha$ ) کمترین می‌باشند. همچنین بیشترین و کمترین مقدار خطای استاندارد به ترتیب برای  $n$  و  $K_s$  می‌باشد. بنابراین می‌توان اظهار نمود که تخمین  $n$  دارای ضریب اطمینان کم و  $K_s$  دارای ضریب اطمینان بالایی می‌باشد. برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون دانکن استفاده شد. جدول 4 مقایسه میانگین پارامترهای مختلف را برای سه تکرار نشان می‌دهد. از جدول 4 می‌توان چنین استنباط نمود



جدول 3 - پارامترهای هیدرولیکی غیر اشباع خاک بدست آمده از حل معکوس با کد Hydrus 2D

تیمار	پارامتر	مقدار متوسط		خطای استاندارد	سطح اعتماد 95 درصد	
		پارامتر	پارامتر		حد پایین	حد بالا
$T_0$	$\theta_r (cm^3 / cm^3)$	0/091	2/183	-0/482	0/486	
	$\theta_s (cm^3 / cm^3)$	0/512	2/956	-0/685	0/715	
	$K_s (cm / min)$	0/021	0/184	-0/153	0/241	
	$n(-)$	1/823	5/153	-1/865	4/245	
	$\alpha (1 / cm)$	0/0126	0/712	-0/157	0/152	
	$l(-)$	-0/104	1/245	-0/576	1/425	
$T_1$	$\theta_r (cm^3 / cm^3)$	0/087	2/172	-0/473	0/489	
	$\theta_s (cm^3 / cm^3)$	0/401	3/542	-0/689	0/624	
	$K_s (cm / min)$	0/013	0/214	-0/245	0/235	
	$n(-)$	1/548	4/254	-0/983	2/835	
	$\alpha (1 / cm)$	0/0131	0/701	-0/153	0/172	
	$l(-)$	-0/091	1/325	-0/356	1/124	
$T_2$	$\theta_r (cm^3 / cm^3)$	0/082	2/071	-0/428	0/443	
	$\theta_s (cm^3 / cm^3)$	0/393	3/254	-0/635	0/715	
	$K_s (cm / min)$	0/0086	0/154	-0/284	0/304	
	$n(-)$	1/462	4/0143	-0/873	2/425	
	$\alpha (1 / cm)$	0/0134	0/663	-0/178	0/104	
	$l(-)$	-0/053	1/823	-0/112	0/912	
$T_3$	$\theta_r (cm^3 / cm^3)$	0/071	2/245	-0/412	0/532	
	$\theta_s (cm^3 / cm^3)$	0/371	3/042	-0/563	0/432	
	$K_s (cm / min)$	0/0081	0/179	-0/142	0/156	
	$n(-)$	1/326	4/142	-0/444	2/412	
	$\alpha (1 / cm)$	0/014	0/821	-0/187	0/219	
	$l(-)$	-0/009	1/577	-0/411	1/587	

از آنجا که حرکت آب در خاک در حالت اشباع از تخلخل متوسط و از جمله درشت خاک انجام می‌گیرد بنابراین می‌توان گفت میزان جریان آب در خاک در حالت اشباع می‌تواند تحت تاثیر فشردگی خاک و در همان بار اول فشردگی به طور معنی‌داری کاهش یابد.

ج) فشردگی خاک روی  $\alpha$  (عکس مکش نقطه ورود هوا) اثر معنی‌داری نداشته است.  
د) اعمال فشردگی اول روی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) اثر معنی‌داری داشت. همچنین سه بار فشردگی نیز روی این پارامتر

جدول 4- مقادیر بهینه پارامترهای  $\theta_r$ ،  $\theta_s$ ،  $K_s$ ،  $n$ ،  $\alpha$  و مقایسه آنها

تیمار				پارامتر
$T_3$	$T_2$	$T_1$	$T_0$	
0/071 <sup>b</sup>	0/082 <sup>a</sup>	0/087 <sup>a</sup>	0/091 <sup>a</sup> *	$\theta_r (cm^3 / cm^3)$
0/371 <sup>b</sup>	0/393 <sup>b</sup>	0/401 <sup>b</sup>	0/512 <sup>a</sup>	$\theta_s (cm^3 / cm^3)$
0/0140 <sup>a</sup>	0/0134 <sup>a</sup>	0/0131 <sup>a</sup>	0/0126 <sup>a</sup>	$\alpha (1/cm)$
1/326 <sup>b</sup>	1/462 <sup>b</sup>	1/548 <sup>b</sup>	1/823 <sup>a</sup>	$n (-)$
0/0081 <sup>c</sup>	0/0086 <sup>c</sup>	0/013 <sup>b</sup>	0/021 <sup>a</sup>	$K_s (cm/min)$
-0/009 <sup>c</sup>	-0/053 <sup>b</sup>	-0/091 <sup>a</sup>	-0/104 <sup>a</sup>	$l (-)$

\* حروف مشترک در یک سطر بیانگر عدم معنی دار بودن اثر در سطح اعتماد 95 درصد است

بین مقادیر این پارامتر مشاهده نمی‌شود. همچنین اختلاف مقادیر پارامتر پیوستگی منافذ خاک نیز پس از سه بار اعمال فشردگی معنی‌دار شده است.

### سیاسگزاری

از دانشگاه محقق اردبیلی به خاطر تقبل برخی هزینه‌های طرح و آزمایشگاه فیزیک خاک و کارشناس مربوطه به علت تقبل برخی زحمات بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

اثر معنی داری نسبت به یک بار فشردگی نشان داد. اختلاف 3 بار فشردگی و 5 بار فشردگی خاک از نظر هدایت هیدرولیکی معنی‌دار نبود. بنابراین می‌توان گفت مقدار جریان آب در خاک در حالت اشباع در اثر فشردگی کاهش می‌یابد اما کاهش تا حد معینی از فشردگی ادامه می‌یابد و پس از آن ممکن است مقدار جریان آب در خاک به حد ثابتی برسد. همانند رطوبت اشباع، پارامتر تجربی  $n$  نیز در بار اول فشردگی، به صورت معنی دار تحت تأثیر فشردگی خاک قرار گرفته و در فشردگی های بعدی اختلاف معنی داری

### فهرست منابع:

1. رئوف، مجید. 1389. کاربرد تابع نگهداشت آب خاک ون گنوختن در تخمین منحنی مشخصه آب خاک در اراضی شیبدار. سومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی. دانشگاه شهید چمران اهواز. 10 تا 12 اسفند.
2. Bodhinayake, W. L., B. C. Si and C. Xiao. 2004. New method for determining water-conducting macro- and mesoporosity from tension infiltrometer, Soil Science Society. Am. J., 68:760-769.
3. Flint, L.E. and A.L. Flint. 2002. The soil solution phase. Porosity. p. 241-254. In J. H. Dane and G. C. Topp (ed.) Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods, SSSA, Madison, WI.
4. Guy, R., S. J. Francois and M. Olivier. 2010. Effect of soil compaction on the hydraulic properties of the tilled layer. Integrated Cellular Pathology, death, danger and degeneration. First conference of the European institute. 22-23 April. Paris, France.
5. Hillel, D., 1982. Introduction to Soil Physics. San Diego, Academic Press, 364pp.
6. MacRae, R.J. and G.R. Mehuys, 1985. The effect of green manuring on the physical properties of temperate area soils. Advanced Soil Science, 3: 71-94.
7. Mualem, Y. 1976. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. Water Resour. Research, 12: 513-522.

- 8 Naeem, A., U. H. Fayyaz and Q. Ghulam. 2007. Effect of Subsurface Soil Compaction and Improvement Measures on Soil Properties. *International Journal of Agriculture & Biology*, 09–3–509–513.
- 9 Raof, M., A. H. Nazemi, A. A. Sadraddini, and S. Maroofi. 2011. Measuring and Estimating Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivity in Steady and Transient States on Sloping Lands. *World Applied Science Journal*. 12(11): 2023-2031.
- 10 Simunek, J., M. Sejna and M. Th. van Genuchten. 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably- Saturated Media, User Manual, Ver. 1., PC Progress, Prague, Czech.
- 11 Soane, B. D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil Tillage Research*, 16: 179–201
- 12 Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic properties of unsaturated soils, *Soil Science Society. Am. J.*, 44:892-898.
- 13 Van Lynden, G. W. J. 2000. The Assessment of the Status of Human-induced Degradation. *FAO Report*, No. 37