

## اثرات متقابل مواد آلی، کرم خاکی و فشردگی بر توزیع اندازه منافذ و ضرایب رطوبتی دو خاک ریزبافت و درشت‌بافت

شکراه اصغری<sup>۱\*</sup>، مهشید نجفیان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۰۷

<sup>۱</sup> دانشجوی گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

<sup>۲</sup> دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shasghari@uma.ac.ir

### چکیده

هدف این پژوهش مقایسه اثرات متقابل کرم خاکی *Eisenia fetida* و مواد آلی بر برخی خصوصیات هیدرولیکی دو خاک ریز و درشت‌بافت در دو سطح فشردگی بود. آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در ۲۴ تیمار و سه تکرار در شرایط اتاق رشد و به مدت شش ماه اجرا شد. فاکتورها عبارت از دو کلاس بافت خاک (لوم رسی و لوم شنی)، سه سطح ماده آلی (صفر، کاه و کلش گندم و کود گاوی هر دو به مقدار  $20 \text{ g kg}^{-1}$ )، دو سطح فشردگی ( $1/3$  و  $1/45 \text{ cm}^{-3}$ )، با و بدون حضور کرم خاکی بودند. نتایج نشان داد هر دو نوع ماده آلی مصرفی به‌طور متوسط باعث افزایش مقدار رطوبت‌های ظرفیت مزرعه‌ای ( $4/1\%$ )، نقطه پژمردگی دائم ( $2/4\%$ ) و قابل استفاده ( $8/78\%$ ) و نیز حجم منافذ متوسط+ریز ( $4/3\%$ ) و کاهش حجم منافذ درشت ( $11/75\%$ ) در هر دو بافت خاک گردید. بیشترین مقدار آب قابل استفاده در تیمار کاه و کلش و خاک لوم رسی مشاهده شد. فشردگی خاک به‌طور متوسط باعث کاهش حجم منافذ درشت ( $29/5\%$ ) و مقدار رطوبت اشباع ( $11/6\%$ ) و افزایش حجم منافذ متوسط+ریز ( $12\%$ ) گردید، در حالی که در حضور کرم خاکی، میانگین حجم منافذ درشت ( $17\%$ ) و مقدار رطوبت اشباع ( $8/1\%$ ) خاک افزایش و حجم منافذ متوسط + ریز ( $5\%$ ) آن کاهش یافت. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که تلقیح خاک با کرم خاکی می‌تواند موجب ارتقای کیفیت هیدرولیکی خاک‌های ریز و درشت‌بافت با کمینه افزودن مواد آلی در شرایط فشردگی گردد.

واژه‌های کلیدی: *Eisenia fetida*، توزیع اندازه منافذ، فشردگی خاک، مقدار آب قابل استفاده، مواد آلی

## Interaction Effects of Organic Matters, Earthworm and Compaction on Pore Size Distribution and Moisture Coefficients of Two Fine and Coarse-textured Soils

Sh Asghari<sup>1\*</sup>, M Najafian<sup>2</sup>

Received: 25 November 2015 Accepted: 28 August 2016

<sup>1</sup>- Assoc. Prof., Dept. of Soil Sci. and Eng, Faculty of Agriculture and Natural Res., Univ. of Mohaghegh Ardabili, Iran

<sup>2</sup>- Former M.Sc. Student, Dept. of Soil Sci. and Eng, Faculty of Agriculture and Natural Res., Univ. of Mohaghegh Ardabili, Iran

\* Corresponding Author, Email: shasghari@uma.ac.ir

### Abstract

The aim of this research was comparison of the interactions of *Eisenia fetida* earthworm and organic matters on some hydraulic properties of two fine and coarse-textured soils under two compaction levels. A factorial experiment was conducted as the completely randomized design with 24 treatments and three replications under growth room conditions during six months. The factors were two soil textural classes (sandy loam and clay loam), three organic matter levels (0, 20 g kg<sup>-1</sup> of both wheat straw and cow manure), and two compaction levels (1.3 and 1.45 g cm<sup>-3</sup>) with or without earthworm. The results showed that the both used organic matters averagely increased the soil field capacity (4.1%), permanent wilting point (2.4%) and available (8.78%) moistures values, meso+micro-pores volume (4.3%), while decreased the macropores volume (11.75%) in the both textural classes. Also, the highest available water content was observed in straw and clay loam soil treatments. Soil compaction decreased the soil saturated moisture value (11.6%) and macropores volume (29.5%) and increased meso+micro-pores volume (12%), while earthworm increased the mean of saturated moisture value (8.1%) and macropores volume (17%) and decreased meso+micro-pores volume (5%), averagely. The results of this study indicate that inoculating soil with earthworm can improve hydraulic quality of fine and coarse-textured soils under compaction condition even with using minimum organic matter.

**Keywords:** Available water content, *Eisenia fetida*, Organic matter, Pore size distribution, Soil compaction

### مقدمه

هیدرولیکی و نفوذپذیری هوا و در نتیجه افزایش پتانسیل تولید رواناب، فرسایش خاک و نهایتاً ایجاد شرایط نامناسب برای رشد گیاه می‌گردد (جوری و هورتون ۲۰۰۴). اگر جرم مخصوص ظاهری مؤثر<sup>۱</sup>

فشردگی خاک یک مشکل زیست محیطی جهانی است که تهدیدی برای تخریب اراضی زراعی، مرتعی و جنگلی می‌باشد. فشردگی خاک از طریق افزایش جرم مخصوص ظاهری و تغییر در توزیع اندازه، کج و موجی و درجه اتصال منافذ خاک موجب کاهش هدایت

<sup>1</sup>- Effective bulk density

نوع و میزان مصرفی بقایا نیز است. اگرچه اثرات مثبت کرم خاکی بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی (تجادا و همکاران ۲۰۰۹، موسوی و رئیسی ۱۳۸۹، صفادوست و همکاران ۱۳۹۱، المالکی و شولیون ۲۰۱۳) و بیولوژیکی خاک اثبات گردیده است ولی بررسی منابع حاکی از آن است که مطالعه در زمینه مقایسه اثرات متقابل فعالیت کرم خاکی، نوع مواد آلی افزوده شده و فشردگی خاک بر خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های ریز و درشت بافت مناطق خشک و نیمه‌خشک با توجه به کیفیت هیدرولیکی ضعیف این خاک‌ها به اندازه کافی انجام نشده است. هدف از این پژوهش، مقایسه اثرات متقابل مقدار و نوع مواد آلی و کرم خاکی *Eisenia fetida* بر توزیع اندازه منافذ و ضرایب رطوبتی در دو خاک ریز و درشت بافت منتخب از اراضی دشت مغان به‌عنوان قطب کشاورزی شمال غرب ایران، در شرایط متفاوت فشردگی خاک بود.

### مواد و روش‌ها

#### آماده‌سازی خاک، مواد آلی و کرم خاکی

دو خاک با کلاس بافت متفاوت به‌مقدار لازم از اراضی بایر دشت مغان برداشته شد. دشت مغان در شمال غرب ایران به مختصات جغرافیایی  $39^{\circ}20'$  تا  $42^{\circ}39'$  عرض شمالی و  $47^{\circ}30'$  تا  $48^{\circ}10'$  طول شرقی واقع گردیده است و ارتفاع آن از سطح دریاهای آزاد به‌طور متوسط ۴۵ متر می‌باشد. اقلیم منطقه مورد مطالعه نیمه‌خشک بوده و میانگین دما و بارندگی سالانه آن به‌ترتیب  $12/5^{\circ}C$  و ۴۶۲ mm است. نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن از غربال ۴/۷۵ mm عبور داده شد. برخی خصوصیات خاک شامل کلاس بافت به‌روش هیدرومتری ۴ قرائته، میانگین وزنی قطر (MWD) خاکدانه‌ها به‌روش الک تر، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع به‌وسیله هدایت سنج الکتریکی، pH در گل اشباع به‌وسیله pH متر، کربن آلی به‌روش والکلی و بلک، کلسیم به‌روش

خاک از مقدار آستانه ۱/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب (پیشنهاد شده توسط متخصصان فیزیک خاک) فراتر رود از دیدگاه بیولوژی خاک نیز می‌تواند تأثیر منفی بر بیوماس میکروبی و معدنی شدن کربن آلی خاک بگذارد (بیلیچ و همکاران ۲۰۱۰).

ماراشی و شولیون (۲۰۰۳) نشان دادند که فضولات کرم خاکی دارای جرم مخصوص ظاهری کمتری نسبت به خاک شاهد (بدون تأثیر کرم خاکی) بود در نتیجه باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک گردید. برادید و همکاران (۲۰۰۶) بیان نمودند که کاربرد ۲، ۴، ۸ و ۱۲ تن در هکتار بقایای گیاهی موجب کاهش جرم مخصوص ظاهری و انرژی متراکم‌کننده خاک به میزان ۳۰ درصد گردید. تجادا و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که کاربرد ورمی‌کمپوست تولید شده توسط کرم خاکی *Eisenia fetida* در منطقه سویل اسپانیا، از طریق افزایش تخلخل کل و کاهش ۱۲/۲ درصدی جرم مخصوص ظاهری منجر به کاهش فشردگی خاک گردید. موسوی و رئیسی (۱۳۸۹) در یک پژوهش گلخانه‌ای بیان نمودند که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها از ۰/۳۳۱ در تیمار شاهد به ۰/۶۵۱ میلی‌متر در تیمار بقایای یونجه + کرم خاکی به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. صفادوست و همکاران (۱۳۹۱) در یک پژوهش یک ساله نشان دادند اعمال توأمان تیمارهای فیزیکی (دوره-های تر و خشک و انجماد و ذوب) و بیولوژیکی (فعالیت کرم خاکی) سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری به-میزان ۹ و ۷ درصد و افزایش منافذ ریز (کوچکتر از ۳۰ میکرون) به‌میزان ۵۹ و ۵۲ درصد به‌ترتیب در خاک‌های لوم رسی و لوم شنی منتخب از استان همدان نسبت به خاک‌های دست‌خورده گردید. المالکی و شولیون (۲۰۱۳) گزارش نمودند که تیمار کرم خاکی + یونجه خشک باعث افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه‌ها گردید در حالی که اثر کرم خاکی + کاه گندم بر پایداری خاکدانه‌ها نتوانست معنی‌دار شود لذا آن‌ها نتیجه گرفتند که میزان تأثیر مثبت کرم خاکی بر ساختمان خاک تابع

کود گاوی پوسیده بر هر کیلوگرم خاک، فاکتور دوم کلاس بافت خاک در دو سطح لوم رسی و لوم شنی، فاکتور سوم دو سطح فشردگی خاک شامل  $1/3$  و  $g\ cm^{-3}$   $3$   $1/45$  و فاکتور چهارم حضور یا عدم حضور کرم خاکی بود. در مجموع ۷۲ ستون خاک آماده گردید. در پایان دوره خواباندن، اندازه‌گیری پارامترها در نمونه‌های خاک دست‌نخورده (با استفاده از استوانه‌های استیل به قطر و ارتفاع ۵ cm) و دست‌خورده (با کمینه دست‌خوردگی) برداشته شده از عمق ۱۰ تا ۱۵ cm لوله‌ها انجام شد.

#### اندازه‌گیری پارامترها

جرم مخصوص ظاهری ( $D_b$ ) به روش استوانه در نمونه‌های دست‌نخورده و جرم مخصوص حقیقی ( $D_p$ ) به روش پیکنومتر اندازه‌گیری شد. سپس تخلخل کل ( $n = 1 - \frac{D_b}{D_p}$ ) از طریق آنها محاسبه گردید (کلوت ۱۹۸۶). رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC) یا همان رطوبت معادل مکش ۱۰۰ cm برای تیمارهای خاک لوم شنی و ۳۰۰ cm برای تیمارهای خاک لوم رسی و نیز رطوبت اشباع در استوانه‌های دست‌نخورده و رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) یا همان رطوبت معادل مکش ۱۵۰۰۰ cm در کلیه تیمارها با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در نمونه‌های خاک گذرانده شده از غربال ۷۵ mm به روش وزنی تعیین گردیدند (گاردنر ۱۹۸۶). اختلاف بین رطوبت FC و PWP به عنوان مقدار آب قابل استفاده (AWC) محاسبه گردید ( $AWC = FC - PWP$ ) (باور و بلک ۱۹۹۲).

درصدهای منافذ درشت با قطر بزرگتر از  $75\ \mu m$  ( $P_{macro}$ ) و منافذ متوسط + ریز با قطر کوچکتر از  $75\ \mu m$  ( $P_{meso+micro}$ ) مطابق طبقه‌بندی انجمن علوم خاک آمریکا<sup>۲</sup> (بی‌نام ۱۹۹۷) با استفاده از رابطه موئینگی  $d\ h = \frac{0.3}{d}$  قطر منفذ و  $h$  مکش خاک هر دو برحسب سانتی‌متر) و

کمپلکسومتری با EDTA، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با اسید و تنفس پایه به روش دفع  $CO_2$  مطابق دستورالعمل‌های استاندارد و معمول (پیچ ۱۹۸۵، کلوت ۱۹۸۶) اندازه‌گیری شد. کود گاوی پوسیده و کاه و کلش گندم نیز به مقدار لازم از دشت مغان تهیه و نسبت کربن به نیتروژن در آنها اندازه‌گیری و محاسبه گردید. کود گاوی و کاه و کلش در دمای  $40\ ^\circ C$  و به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک گردید (المالکی و شولیون ۲۰۱۳) سپس به منظور یکنواختی از غربال ۲ mm عبور داده شد.

#### انکوباسیون تیمارها

برای اجرای آزمایش گلخانه‌ای از لوله‌های پی‌وی‌سی به قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. ته لوله‌های مذکور با استفاده از سیم فلزی و یک ورقه فلزی مشبک مسدود گردید سپس با خاک هواخشک در دو سطح بدون فشردگی ( $g\ cm^{-3}$ )  $1/3$  و فشرده شده ( $1/45\ g\ cm^{-3}$ ) برای هر دو کلاس بافتی پس از اعمال تیمارهای مواد آلی پرشد. مقادیر مصرفی مواد آلی شامل صفر (شاهد)، ۲۰ گرم جرم آون خشک کود گاوی و ۲۰ گرم جرم آون خشک کاه و کلش در هر کیلوگرم خاک بودند. مقادیر مصرفی مواد آلی بر مبنای پژوهش المالکی و شولیون (۲۰۱۳) انتخاب گردید. به هر ستون خاک، ۱۰ عدد کرم خاکی بالغ *Eisenia fetida* با اندازه متوسط (تهیه شده از یک کارگاه تولید ورمی کمپوست در شهرستان اردبیل) از طریق سوراخ‌های ایجاد شده در خاک اضافه گردید. نگهداری ستون‌های خاک در داخل یک اتاق رشد تاریک با دمای  $15\ ^\circ C$  تا  $20\ ^\circ C$  و به مدت شش ماه انجام گردید. در طول این مدت، رطوبت خاک لوله‌ها در محدوده ۵۰ تا ۷۵ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه از طریق توزین لوله‌ها و اضافه نمودن آب کاهش یافته در فواصل زمانی دو تا سه روز نگهداری شد. آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در ۲۴ تیمار و سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اول مقادیر مصرفی مواد آلی در سه سطح صفر (بدون مواد آلی)، ۲۰ گرم کاه و کلش گندم و ۲۰ گرم

<sup>2</sup>- Soil Science Society of America (SSSA)

### نتایج و بحث

جدول ۱ نشان می‌دهد که هر دو خاک مورد آزمایش دارای کربن آلی ناچیز، EC کم (غیر شور) و pH نسبتاً قلیایی بوده و از نظر میزان کربنات کلسیم، آهکی هستند. بر اساس سیستم طبقه‌بندی امریکایی، یکی از خاک‌ها دارای کلاس بافت لوم رسی و دیگری دارای کلاس بافت لوم شنی می‌باشد. خاک لوم رسی در مقایسه با خاک لوم شنی به علت داشتن رس، کربن آلی و کلسیم زیاد از ساختمان قوی‌تری (MWD بزرگتر) برخوردار است (جدول ۱). همچنین مقایسه شدت تنفس پایه در دو خاک بیانگر آن است که فعالیت بیولوژیکی خاک لوم رسی در مقایسه با لوم شنی بیشتر است. میانگین نسبت کربن به نیتروژن ( $\frac{C}{N}$ ) در گاه و کلش گندم و کودگاو به کار رفته در این پژوهش به ترتیب برابر ۴۸ و ۲۷ تعیین گردید که بیانگر بالا بودن میزان کربن آلی در گاه و کلش (۱۹/۲٪) در مقایسه با کود گاو (۱۵/۱٪) است.

داده‌های رطوبت حجمی اشباع ( $\theta_{vs}$ ) و رطوبت حجمی معادل مکش ۴۰ cm ( $\theta_{v40}$ ) براساس روابط ۱ و ۲ محاسبه شدند (دانلیسون و سوترلند ۱۹۸۶). لازم به توضیح است که مقادیر این رطوبت‌ها به روش وزنی در دستگاه ستون آب آویزان اندازه‌گیری شد سپس با استفاده از  $D_b$  به مقادیر رطوبت حجمی تبدیل گردید.

$$P_{macro} = \frac{\theta_{vs} - \theta_{v40}}{\theta_{vs}} \times 100 \quad [1]$$

$$P_{meso+micro} = 100 - P_{macro} \quad [2]$$

### تجزیه و تحلیل آماری

آزمون نرمال بودن داده‌ها و تعیین همبستگی پیرسون بین پارامترها با نرم‌افزار SPSS انجام شد. داده‌هایی که توزیع نرمال نداشتند تبدیل داده بر روی آن‌ها انجام شد سپس تجزیه واریانس انجام گردید. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین پارامترها با آزمون دانکن و با استفاده از نرم‌افزار MSTATC، و رسم اشکال با نرم‌افزار EXCEL انجام گرفت.

جدول ۱- برخی خصوصیات خاک‌های مورد مطالعه.

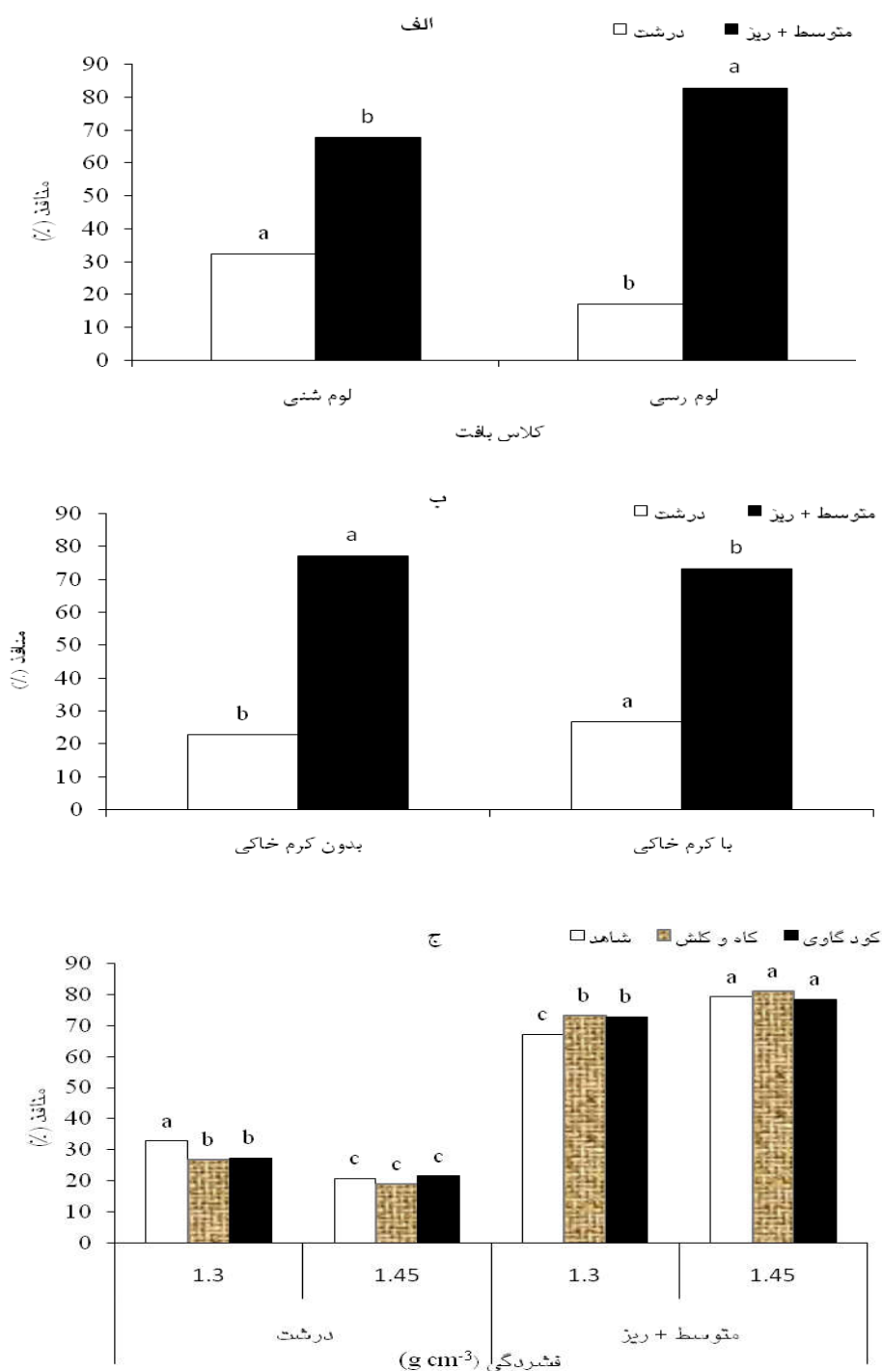
BR	CaCO <sub>3</sub> (%)	EC <sub>e</sub> (dS m <sup>-1</sup> )	pH	Ca (meq l <sup>-1</sup> )	OC (%)	MWD (mm)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	کلاس بافت
۰/۳۵	۱۱/۲۵	۰/۶۵۹	۷/۶۷	۴/۲	۰/۵۳	۰/۴۱	۳۴/۲	۴۴/۳	۲۱/۵	لوم رسی
۰/۱۲	۸	۰/۲۸۶	۷/۵۵	۳/۵	۰/۱۷	۰/۱۸	۸/۵	۲۲	۶۹/۵	لوم شنی

pH: واکنش گل اشباع، EC: هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع، Ca: کلسیم محلول، OC: کربن آلی، CaCO<sub>3</sub>: کربنات کلسیم معادل. BR: تنفس پایه، MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها. اعداد جدول از میانگین سه تکرار به دست آمده است.

به دلیل وجود شن زیاد از منافذ درشت بیشتری برخوردار هستند (هیلل ۲۰۰۴).  
تلقیح کرم خاکی صرف‌نظر از کلاس بافت خاک باعث افزایش معنی‌دار سهم منافذ درشت به میزان ۱۷ درصد و کاهش معنی‌دار سهم منافذ متوسط+ریز به میزان ۵ درصد نسبت به تیمار بدون کرم خاکی گردید (شکل ۱ ب).

### توزیع اندازه منافذ

شکل ۱ الف نشان می‌دهد که در خاک لوم رسی به‌طور معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) درصد منافذ درشت کمتر و درصد منافذ متوسط + ریز بیشتر از خاک لوم شنی است. به‌طور کلی خاک‌های ریزبافت به علت داشتن رس زیاد دارای منافذ ریز فراوان و خاک‌های درشت بافت



شکل ۱- اثرات اصلی بافت (الف) و کرم خاکی (ب) و اثرات متقابل ماده آلی و فشرده‌گی (ج) بر توزیع اندازه منافذ خاک. میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون دانکن).

همکاران (۱۳۹۱) مطابقت دارد که نشان دادند اعمال توأم تیمار فیزیکی (تر و خشک شدن و ذوب و انجماد) و بیولوژیکی (تلقیح کرم خاکی) باعث افزایش معنی‌دار منافذ درشت در هر دو خاک لوم شنی (۷۰٪) و لوم

به‌نظر می‌رسد کرم خاکی از طریق حفر کانال و مجاری در خاک باعث تغییر در توزیع اندازه منافذ خاک از طریق افزایش منافذ درشت و کاهش منافذ متوسط + ریز گردیده است. این نتایج با یافته‌های صفادوست و

میکوریزی) از طریق افزایش پایداری خاکدانه‌ها موجب تغییر معنی‌دار در توزیع اندازه منافذ (کاهش حجم منافذ درشت و افزایش حجم منافذ متوسط + ریز) در یک خاک لوم شنی زیر کشت جوبهاره گردید. افزایش فشردگی از  $1/3$  به  $1/45 \text{ g cm}^{-3}$  (شکل ۱ ج) از طریق تغییر در توزیع اندازه منافذ خاک به‌طور معنی‌دار باعث کاهش سهم منافذ درشت و افزایش سهم منافذ متوسط + ریز در هر سه سطح تیمار ماده آلی شد.

### تخلخل کل و رطوبت اشباع

بین رطوبت اشباع وزنی و تخلخل کل خاک رابطه همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $r=0.356^{**}$ ) یافت شد. مقایسه میانگین‌ها در جدول ۲ نیز گویای آن است که روند تغییرات رطوبت اشباع وزنی با تخلخل کل خاک در تیمارهای مختلف در یک راستا می‌باشد.

رسی (۱۱۴٪) نسبت به شاهد گردید. مقایسه میانگین‌ها در شکل ۱ ج بیان‌گر آن است که افزودن کاه و کلش و کود گاوی باعث کاهش معنی‌دار منافذ درشت و افزایش معنی‌دار منافذ متوسط + ریز در سطح فشردگی پایین گردیده است ولی در سطح فشردگی بالا به‌علت متراکم شدن خاک، تأثیر مواد آلی مورد استفاده در میزان مصرفی بر توزیع اندازه منافذ خاک نتوانست معنی‌دار گردد. به‌نظر می‌رسد اضافه کردن کاه و کلش و کود گاوی به خاک از طریق افزایش کربن آلی و نیز خاکدانه‌سازی باعث افزایش منافذ درون خاکدانه‌ای (متوسط + ریز) و کاهش منافذ بین خاکدانه‌ای (درشت) گردیده است. وجود همبستگی منفی و معنی‌دار ( $r=-0.565^{**}$ ) بین کربن آلی و منافذ درشت و مثبت و معنی‌دار ( $r=0.565^{**}$ ) بین منافذ متوسط + ریز با این نتایج در یک راستا می‌باشد. سمائی و همکاران (۱۳۹۴) نیز گزارش کردند اعمال تیمار بیولوژیکی (قارچ

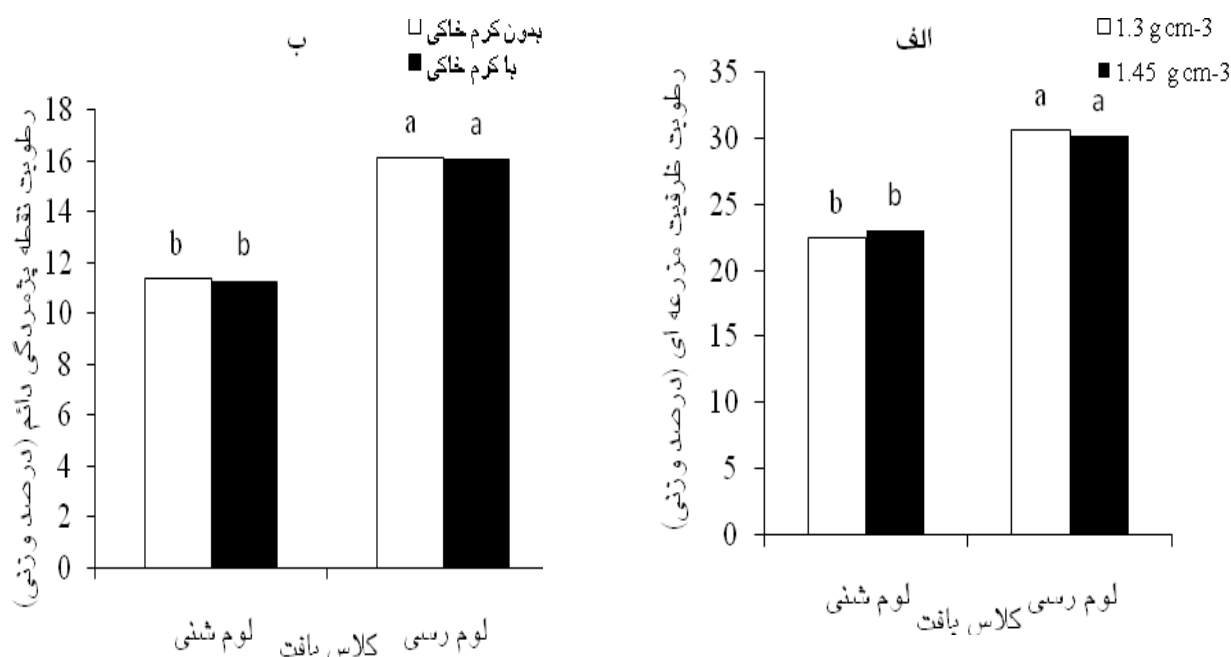
جدول ۲- اثرات متقابل بافت، فشردگی و کرم خاکی بر تخلخل کل و رطوبت اشباع وزنی.

بافت	فشردگی ( $\text{g cm}^{-3}$ )	کرم خاکی	تخلخل کل (%)	رطوبت اشباع وزنی (%)
	$1/3$	خیر	$46/19^c$	$39/98^d$
لوم شنی		بله	$50/95^a$	$45/76^b$
	$1/45$	خیر	$41/27^f$	$35/16^f$
		بله	$43/57^{de}$	$36/99^e$
	$1/3$	خیر	$48/42^b$	$46/74^{ab}$
لوم رسی		بله	$51/58^a$	$47/95^a$
	$1/45$	خیر	$42/58^{ef}$	$41/49^d$
		بله	$45/14^{cd}$	$43/59^c$

میانگین‌های با حروف غیرمشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون دانکن).

حاصل از تجزیه کست (مواد دفعی کرم خاکی) توسط باری و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد کرم‌های خاکی قادر هستند از طریق فشرده‌سازی خاک سست و نرم کردن خاک فشرده خصوصیات مکانیکی خاک را در وضعیت متعادل نگهداری کنند. البته فشردگی خاک ممکن است بر فراوانی جمعیت کرم خاکی بی‌تأثیر باشد ولی می‌تواند فعالیت حفاری آن‌ها را محدود نماید (بیلیچ و همکاران ۲۰۱۰). صفا دوست و همکاران (۱۳۹۱) نیز گزارش کردند اعمال تیمارهای فیزیکی (تر/خشک شدن و منجمد/ذوب شدن) و بیولوژیکی (تلقیح کرم خاکی) باعث افزایش بیشتر رطوبت اشباع در تیمارهای لوم رسی (۶۵/۸٪) در مقایسه با لوم شنی (۳۱/۲۵٪) نسبت به شاهد گردید.

تلقیح کرم خاکی به‌طور هم‌زمان باعث افزایش معنی‌دار رطوبت اشباع وزنی (به‌استثنای تیمار لوم رسی سطح فشردگی پایین) و تخلخل کل و اعمال فشردگی باعث کاهش معنی‌دار رطوبت اشباع و تخلخل کل در هر دو کلاس بافت لوم شنی و لوم رسی گردید (جدول ۲). همچنین بیشترین مقادیر رطوبت اشباع وزنی (۴۷/۹۵٪) و تخلخل کل (۵۱/۵۸٪) در تیمار لوم رسی با فشردگی سطح پایین و حضور کرم خاکی و کمترین مقادیر آن‌ها به‌ترتیب برابر ۳۵/۱۶٪ و ۴۱/۲۷٪ در تیمار لوم شنی با فشردگی سطح بالا و بدون کرم خاکی به‌دست آمد. به‌نظر می‌رسد مواد دفعی کرم خاکی به‌علت داشتن کربن آلی زیاد و جرم مخصوص ظاهری کم و نیز رس به‌دلیل تأثیر مثبت بر خاکدانه‌سازی و تشکیل منافذ ریز فراوان در مقایسه با شن، موجب افزایش تخلخل کل و رطوبت اشباع خاک گردیده است. نتایج



شکل ۲- اثرات متقابل بافت و فشردگی بر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (الف) و بافت و کرم خاکی بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم (ب). میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون دانکن).

شکل ۲ (الف) بیان‌گر آن است که رطوبت FC در تیمار خاک لوم رسی به‌طور معنی‌دار بیشتر از لوم شنی است و بین دو سطح فشردگی در هر دو کلاس بافت اختلاف

رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای، رطوبت نقطه پژمردگی دائم و آب قابل استفاده: مقایسه میانگین اثرات متقابل بافت و فشردگی بر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC) در



(منافذ درون خاکدانه‌ای) در مقایسه با منافذ درشت (منافذ بین خاکدانه‌ای) باعث کاهش آب ثقلی و افزایش رطوبت FC می‌گردد (صفادوست و همکاران ۱۳۹۱، سمائی و همکاران ۱۳۹۴). تلقیح کرم خاکی در تیمارهای شاهد (سطح فشردگی پایین) و کاه و کلش (سطح فشردگی بالا) باعث کاهش معنی‌دار رطوبت FC گردید؛ علت این موضوع را می‌توان به فعالیت حفاری کرم‌ها نسبت داد که از طریق ایجاد کانال‌ها و مجاری در خاک (کاپوویز و همکاران ۲۰۱۲) موجب افزایش سهم منافذ درشت و کاهش سهم منافذ متوسط + ریز (شکل ۱ ب) نسبت به تیمار بدون کرم خاکی گردیدند (جدول ۳).

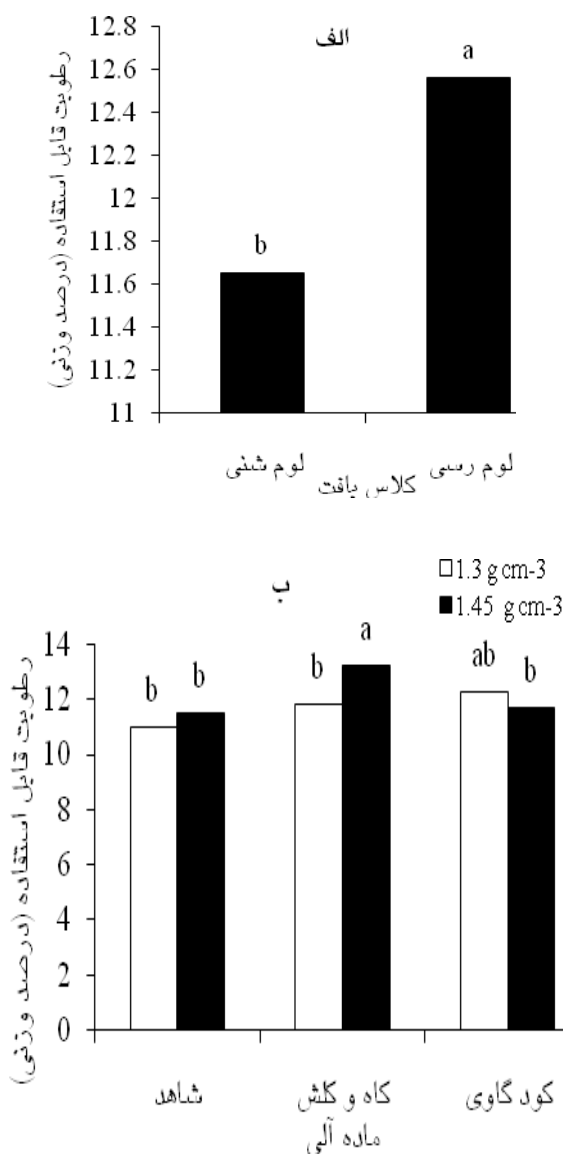
معنی‌دار وجود ندارد. علت این قضیه را می‌توان به فراوانی منافذ متوسط + ریز در خاک لوم رسی نسبت به لوم شنی نسبت داد (شکل ۱ الف). این منافذ به‌علت اعمال مکش قوی باعث حفظ آب در خاک و کاهش اتلاف آن از طریق نیروی ثقل می‌گردند (هیلل ۲۰۰۴). جدول ۳ نشان می‌دهد که به‌طور متوسط کاه و کلش (۶/۱٪) در مقایسه با کود گاوی (۴/۳٪) باعث افزایش بیشتر رطوبت FC نسبت به شاهد گردید. دلیل این امر را شاید بتوان به تأثیر بیشتر تیمار کاه و کلش بر MWD و خاکدانه‌سازی در مقایسه با کود گاوی نسبت داد؛ خاکدانه‌سازی از طریق افزایش منافذ متوسط + ریز

جدول ۳- اثرات متقابل ماده آلی، فشردگی و کرم خاکی بر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC).

ماده آلی	فشردگی ( $\text{g cm}^{-3}$ )	کرم خاکی	FC (درصد وزنی)
	۱/۳	خیر	۲۶/۶۲ <sup>bc</sup>
شاهد		بله	۲۵/۲۸ <sup>d</sup>
	۱/۴۵	خیر	۲۵/۴۷ <sup>cd</sup>
		بله	۲۶/۰۸ <sup>bcd</sup>
	۱/۳	خیر	۲۶/۵۳ <sup>bcd</sup>
کاه و کلش		بله	۲۷/۲۳ <sup>ab</sup>
	۱/۴۵	خیر	۲۸/۱۲ <sup>a</sup>
		بله	۲۶/۷ <sup>bc</sup>
	۱/۳	خیر	۲۷/۳۷ <sup>ab</sup>
کود گاوی		بله	۲۶/۱۵ <sup>bcd</sup>
	۱/۴۵	خیر	۲۶/۶۸ <sup>bc</sup>
		بله	۲۶/۶۲ <sup>bc</sup>

میانگین‌های با حروف غیرمشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون دانکن).

افزودن کرم خاکی به همراه اعمال تیمار فیزیکی (تر و خشک شدن و ذوب و انجماد) باعث افزایش معنی‌دار رطوبت PWP نسبت به شاهد گردید.



شکل ۳- اثر اصلی بافت (الف) و اثرات متقابل ماده آلی و فشردگی (ب) بر رطوبت قابل استفاده. میانگین‌های با حروف غیر مشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون دانکن).

شکل ۲ نشان می‌دهد که تلقیح کرم خاکی نتوانست تأثیر معنی‌دار بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) در هر دو خاک ریز و درشت بافت بگذارد. همچنین مقدار متوسط رطوبت PWP در خاک لوم رسی به‌طور معنی‌دار و به‌میزان  $42/3$  درصد بیشتر از خاک لوم شنی به‌دست آمد که دلیل آن را می‌توان به‌مقدار رس بالای خاک لوم رسی ( $34/2\%$ ) در مقایسه با لوم شنی ( $8/5\%$ ) نسبت داد. رطوبت نگهداری شده در مکش-های بالا (رطوبت PWP) اغلب آب جذب سطحی شده بوده و با افزایش مقدار رس به‌علت افزایش سطح ویژه کل ذرات خاک، آب جذب سطحی شده نیز افزایش می‌یابد (واریک ۲۰۰۲). اثرات متقابل ماده آلی، بافت و فشردگی بر رطوبت PWP (جدول ۴) بیان‌گر آن است که تنها افزودن کاه و گلش در خاک لوم رسی (هر دو سطح فشردگی) و لوم شنی (سطح فشردگی بالا) نتوانست از طریق افزایش کربن آلی و بالا بردن سطح ویژه کل خاک موجب افزایش معنی‌دار در رطوبت PWP در مقایسه با شاهد گردد. رابطه همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد ( $r=0/676^{**}$ ) بین کربن آلی و رطوبت PWP نیز این موضوع را تأیید می‌کند. به‌نظر می‌رسد افزایش ماده آلی خاک در اثر افزودن مقدار مصرفی کود گاوی در حدی نبوده است که منجر به افزایش معنی‌دار رطوبت PWP در هر دو خاک ریز و درشت بافت مورد آزمایش گردد. افزایش سطح فشردگی از  $1/3$  به  $1/45$  g/cm<sup>3</sup> تنها در تیمار کاه و گلش با کلاس بافت لوم رسی باعث کاهش معنی‌دار در رطوبت PWP گردید (جدول ۴). به‌نظر می‌رسد نیروی فشردگی از طریق بالا بردن سطح تماس بقایای اسفنجی کاه و گلش با ذرات خاک موجب ایجاد خاکدانه‌های درشت ( $MWD=1/22$  mm) در مقایسه با شاهد ( $mm$ )  $0/41$  (MWD) گردیده و در نهایت به‌دلیل کاهش احتمالی سطح ویژه کل خاک منجر به کاهش رطوبت PWP شده است. صفادوست و همکاران (۱۳۹۱) نشان دادند که

رطوبتی و در نتیجه افزایش AWC گردید. مقایسه میانگین‌ها در شکل ۳ ب نیز بیان‌گر آن است که فقط کاه و کلش (سطح فشردگی بالا) توانست به‌طور معنی‌دار نسبت به شاهد AWC را افزایش دهد و اختلاف آن با کود گاوی (سطح فشردگی بالا) نیز معنی‌دار شد.

شکل ۳ الف نشان می‌دهد که مقدار رطوبت قابل استفاده (AWC) در خاک لوم رسی به‌طور معنی‌دار بیشتر از لوم شنی است؛ با تغییر کلاس بافت خاک از لوم شنی به لوم رسی، افزایش در رطوبت FC (۸٪) شدیدتر از افزایش در رطوبت PWP (۵٪) بود (شکل ۲ الف و ب) لذا موجب بالا رفتن اختلاف آن دو ضریب

جدول ۴- اثرات متقابل ماده آلی، بافت و فشردگی بر رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP).

ماده آلی	بافت	فشردگی (g cm <sup>-3</sup> )	PWP (درصد وزنی)
	لوم شنی	۱/۳	۱۰/۶۳ <sup>c</sup>
شاهد		۱/۴۵	۱۰/۸۵ <sup>c</sup>
	لوم رسی	۱/۳	۱۶/۰۳ <sup>bc</sup>
		۱/۴۵	۱۶/۴ <sup>b</sup>
	لوم شنی	۱/۳	۱۱/۶ <sup>de</sup>
کاه و کلش		۱/۴۵	۱۲/۱۱ <sup>d</sup>
	لوم رسی	۱/۳	۱۷/۵۴ <sup>a</sup>
		۱/۴۵	۱۵/۲۴ <sup>c</sup>
	لوم شنی	۱/۳	۱۱/۱ <sup>de</sup>
کود گاوی		۱/۴۵	۱۱/۵۲ <sup>de</sup>
	لوم رسی	۱/۳	۱۵/۸۴ <sup>bc</sup>
		۱/۴۵	۱۵/۴ <sup>bc</sup>

میانگین‌های با حروف غیرمشابه دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد هستند (آزمون دانکن).

مقایسه با PWP و AWC ( $r=0.406^{**}$ ) نیز مؤید نتایج ذکر شده در بالا است. افزایش بیشتر مقادیر وزنی رطوبت FC نسبت به PWP در اثر استفاده از لجن فاضلاب شهری (فتح‌العلومی و اصغری ۱۳۹۳) و قارچ میکوریزی (سمائی و همکاران ۱۳۹۴) در دو خاک لوم

به‌نظر می‌رسد کاه و کلش در مقایسه با کود گاوی به‌علت برخورداری از کربن آلی زیاد، موجب افزایش بیشتر FC نسبت به PWP و در نتیجه افزایش AWC گردید. رابطه همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین FC و AWC ( $r=0.845^{**}$ ) در

شنی با ماده آلی ناچیز مشاهده شده است. تأثیر مثبت و معنی‌دار کاه و کلش بر رطوبت قابل استفاده در خاک لوم سیلتی توسط مولومبا و لال (۲۰۰۸) گزارش گردیده است. صفادوست و همکاران (۱۳۹۱) نیز بیان کردند اعمال هم‌زمان تیمار فیزیکی و بیولوژیکی (تلقیح کرم خاکی) باعث افزایش بیشتر مقدار رطوبت قابل استفاده در خاک لوم رسی (۶۵/۷۵٪) در مقایسه با لوم شنی (۹۸/۸۶٪) نسبت به شاهد گردید.

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم و نیز آب قابل استفاده در تیمار کاه و کلش به دلیل داشتن

### منابع مورد استفاده

- سمائی ف، اصغری ش، علی‌اصغرزاد ن و ساریخانی م، ۱۳۹۴. مقایسه اثر دو نوع قارچ میکوریز آربوسکولار بر برخی خصوصیات هیدرولیکی و جذب عناصر در یک خاک قلیایی زیر کشت جو بهاره در شرایط گلخانه‌ای. مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، جلد ۶، شماره ۲۱، صفحه‌های ۱۶۹ تا ۱۷۸.
- صفادوست آ، مصدقی م، محبوبی ع و یوسفی گ، ۱۳۹۱. اثر دوره‌های ترشدن/خشک شدن، انجماد/ذوب شدن و فعالیت کرم‌های خاکی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک. نشریه آب و خاک، جلد ۲۶، شماره ۲، صفحه‌های ۳۴۰ تا ۳۴۸.
- موسوی ف و رئیسی ف، ۱۳۸۹. پایداری خاکدانه‌ها در حضور کرم خاکی (*Lumbricus terrestris L.*) و مواد آلی مختلف در یک خاک آهکی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، جلد ۱۴، شماره ۵۴، صفحه‌های ۷۱ تا ۸۳.
- فتح‌العلوم س و اصغری ش، ۱۳۹۳. اثرات لجن فاضلاب شهری اردبیل بر برخی خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی یک خاک درشت بافت زیر کشت گندم. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، صفحه‌های ۱۶۹ تا ۱۸۳.
- Al-Maliki S and Scullion J, 2013. Interactions between earthworms and residues of differing quality affecting aggregate stability and microbial dynamics. *Applied Soil Ecology* 64: 56-62.
- Anonymous, 1997. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America (SSSA), Madison, WI.
- Barre P, McKenzie BM and Hallett PD, 2009. Earthworms bring compacted and loose soil to a similar mechanical state. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 656-658.
- Bauer A and Black AL, 1992. Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. *Soil Science Society of America Journal* 56: 248-254.
- Beylich A, Oberholzer HR, Schrader S, Hoper H and Wilke BM, 2010. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research* 109: 133-143.
- Bradid JA, Reichert JM, Da-Veiga M and Reinert DJ, 2006. Mulch and soil organic carbon content and their relationship with the maximum soil density obtained in the proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30:605-614.
- Capowiez Y, Samartino S, Cadoux S, Bouchant P, Richard G and Boizard H, 2012. Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry*
- Danielson RE and Sutherland PL, 1986. Porosity. Pp. 443-461. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2nd ed. Agronomy Monograph. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.

کربن آلی زیاد مشاهده گردید. تلقیح کرم خاکی صرف- نظر از کلاس بافت خاک، به‌طور معنی‌دار موجب افزایش حجم منافذ درشت (بزرگتر از ۷۵ میکرون) و کاهش حجم منافذ متوسط + ریز (کوچکتر از ۷۵ میکرون) گردید. همچنین افزودن کاه و کلش و کود گاوی فقط در سطح فشردگی پایین ( $D_b = 1/3 \text{ g cm}^{-3}$ ) باعث کاهش معنی‌دار حجم منافذ درشت و افزایش معنی‌دار حجم منافذ متوسط + ریز گردیده ولی در سطح فشردگی بالا ( $D_b = 1/45 \text{ g cm}^{-3}$ ) تأثیر آن بر منافذ معنی‌دار نشد. در مجموع، نتایج بیان‌گر آن است که امکان استفاده از کرم خاکی با کمینه مواد آلی مصرفی به‌منظور ارتقای کیفیت هیدرولیکی خاک‌های ریز و درشت بافت مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در شرایط فشردگی وجود دارد.

- Gardner WH, 1986. Water content. Pp. 493-544. In: Klute A (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed. Agronomy. Monograph. 9. ASA, Madison, WI.
- Hillel D. 2004. Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier Academic Press. 494p.
- Jury W and Horton R, 2004. Soil Physics. John Wiley & Sons Inc. 384p.
- Klute A (ed.), 1986. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. 2<sup>nd</sup> edition. Agron. Monog, ASA and SSSA, Madison, WI.
- Marashi ARA and Scullion J, 2003. Earthworm casts form stable aggregates in physically degraded soils. *Biology and Fertility of Soils* 37: 375–380.
- Mulumba LN and Lal R, 2008. Mulching effect on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 98: 106-111.
- Page AL (ed.), 1985. Methods of Soil Analysis. Chemical and Microbiological Methods. Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Tejada M, García-Martínez AM and Parrado J, 2009. Effects of a vermicompost composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *Catena* 77: 238–247.
- Warrick AW, 2002. Soil Physics Companion. CRC Press. New York, USA. 389 pp.