

Effect of Organic Residues, *Bacillus* and *Trichoderma* on Soil Structural Stability in two Soils with Different Textural Class

Ramin Nasiri Tuli¹, Mahmoud Shabanpour², Mohammad Bagher Farhangi^{3,*}

(Received: October, 2023 Accepted: July, 2024)

Abstract

Aggregate stability as a basis of sustainable soil management is greatly influenced by the interaction of various organic materials and microorganisms. The aim of this research was to investigate the effect of simultaneous application of organic residues and its decomposing microorganisms on the stability of soil aggregates in two soils with different textures. An experiment was conducted using a factorial arrangement in a completely randomized design with 18 treatments and 3 replications (54 pots). Factors included soil texture: sandy loam (SL) and clay loam (CL), organic residues: no application (control), cow manure 2% (w/w), wheat straw 2% (w/w), and inoculation with microorganisms: no inoculation (control), inoculation of *Trichoderma* sp., and *Bacillus* sp. After applying the treatments, the pots were placed in the incubation conditions (laboratory temperature and 50 to 75% of the field capacity) for 6 months. Measurements were taken for mean weight diameter, geometric mean diameter (GMD), and tensile strength of soil aggregates, fractal dimension, water stable soil aggregates, organic carbon (OC) content, pH, soil electrical conductivity and microbial basal respiration (MBR). Mean comparisons for the effect of soil texture × organic residues × microorganisms on OC and GMD showed that the highest values (6.32% and 1.95 mm, respectively) was obtained in clay loam soil treated with cow manure inoculated with *Bacillus* sp. Comparing soil textures separately, the highest amount MBR values (0.44 and 0.26 $\mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$ for CL and SL soils, respectively) were obtained in the *Bacillus* inoculated-cow manure treatment. Overall, cow manure had a greater effect on improving soil properties compared to wheat straw, and *Bacillus* bacterium had a greater effect compared to *Trichoderma* fungus inoculation, particularly in improving soil structure stability. This effect was most noticeable in sandy soil.

Keywords: Aggregate stability index, Organic carbon, Soil microbial respiration, Tensile strength

Nasiri Tuli R., Shabanpour M., and Farhangi M.B. 2025. Effect of organic residues, *Bacillus* and *Trichoderma* on soil structural stability in two soils with different textural class. *Applied Soil Research*, 12(4): 92-109.

1-Former MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan

2-Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan

3- Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan

* Corresponding Author Email: m.farhangi@guilan.ac.ir

تأثیر بقایای آلی، باسیلوس و تریکودرما بر پایداری ساختمان خاک در دو کلاس بافتی متفاوت

رامین نصیری طولی^۱، محمود شعبانپور^۲، محمدباقر فرهنگي^{۳*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۸)

چکیده

پایداری خاکدانه‌ها مبنای مدیریت پایدار خاک است و برهم‌کنش مواد آلی و میکروارگانیسم‌های گوناگون، تأثیر زیادی بر آن دارند. این پژوهش با هدف بررسی اثر کاربرد هم‌زمان بقایای آلی و میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده آن روی پایداری خاکدانه‌ها در دو خاک با بافت متفاوت انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۸ تیمار و ۳ تکرار (۵۴ گلدان) اجرا شد. فاکتور اول بافت خاک: لوم شنی و لوم رسی؛ فاکتور دوم بقایای آلی: صفر (شاهد)، ۲ درصد جرمی کود گاوی پوسیده، ۲ درصد جرمی کاه و کلش گندم، و مایه‌زنی با ریزجاندارن: بدون مایه‌زنی (شاهد)، قارچ تریکودرما و باکتری باسیلوس بود. پس از اعمال تیمارها، گلدان‌ها به مدت ۶ ماه در شرایط انکوباسیون (دمای آزمایشگاه و رطوبت ۵۰ تا ۷۵ درصد ظرفیت زراعی) قرار گرفتند. سپس میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD)، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب، مقاومت کششی خاکدانه، بُعد فراکتال، کربن آلی (OC)، pH، قابلیت هدایت الکتریکی و تنفس پایه میکروبی (MBR) اندازه‌گیری شدند. مقایسه میانگین تأثیر بافت خاک در بقایای آلی در میکروارگانیسم‌ها بر OC و GMD خاکدانه‌ها نشان داد که بیش‌ترین مقدار هر دو ویژگی (به ترتیب ۶/۳۲ درصد و ۱/۹۵ میلی‌متر) در تیمار خاک لوم رسی دارای کود گاوی مایه‌زنی شده با باسیلوس به‌دست آمد. در بررسی جداگانه خاک‌ها دیده شد که بیش‌ترین مقدار MBR (۰/۴۴ و $0.26 \mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$) به ترتیب برای لوم رسی و لوم شنی) در تیمار کود گاوی در باسیلوس به دست آمد. در کل کود گاوی در مقایسه با کاه و کلش گندم و باکتری باسیلوس در مقایسه با قارچ تریکودرما تأثیر بیشتری بر بهبود ویژگی‌های خاک به‌ویژه پایداری ساختمان خاک داشتند و این تأثیر در خاک شنی برجسته بود.

واژه‌های کلیدی: تنفس میکروبی خاک، شاخص پایداری خاکدانه، کربن آلی، مقاومت کششی

نصیری طولی ر.، شعبانپور م.، فرهنگي م.ب. ۱۴۰۳. تأثیر بقایای آلی، باسیلوس و تریکودرما بر پایداری ساختمان خاک در دو کلاس بافتی متفاوت. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۴. صفحه: ۹۲-۱۰۹.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۲- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۳- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان (مکاتبه کننده)

* پست الکترونیک: m.farhangi@guilan.ac.ir

مقدمه

خاک یکی از منابع طبیعی است که برای تأمین نیازهای آینده انسان، باید به صورت پایدار مدیریت شود. برنامه ریزی برای حفاظت از خاک در درازمدت از ضرورت‌های اولیه بوده و در این راستا، ساختمان خاک نقش اساسی دارد (Mason, 2003). ساختمان خاک، حاصل آرایش ذرات خاک در کنار یکدیگر و اتصال این ذرات به وسیله نیروهای چسبنده است. نتیجه‌ی اتصال ذرات معدنی و آلی خاک، شکل‌گیری خاکدانه‌ها است (Borie et al., 2008). در حقیقت پایداری ساختمان خاک مترادف با پایداری خاکدانه‌های خاک است که به عنوان شاخص کلیدی سلامت خاک نیز در نظر گرفته می‌شود (Zhang et al., 2008). ساختمان خاک به طور مستقیم بر بسیاری از ویژگی‌های خاک از جمله اندازه منافذ خاک، مقدار و چگونگی حرکت آب در خاک، گرما و تهویه، انتشار عناصر غذایی، جوانه‌زنی و رشد ریشه و تجزیه ماده آلی و پویایی آن مؤثر است (Denef et al., 2004; Rabot et al., 2018). خاکدانه‌ها، آمیزه‌ای از دانه‌های اولیه شن، سیلت و رس هستند که پیوستگی‌شان به یکدیگر بیش از خاک پیرامون این مجموعه است. به عبارت دیگر پیدایش خاکدانه‌ها پیامدی از هم‌آوری، هم‌آرایی و سیمانی شدن ذرات اولیه است (Bast et al., 2015). افزایش هم‌آوری ذرات خاک و تشکیل خاکدانه‌های مقاوم، سبب بهبود ویژگی‌های خاک، هم از دیدگاه کشاورزی و هم از دیدگاه زیست‌محیطی می‌گردد (Obalum et al., 2019). توانایی خاکدانه‌ها به پایداری در برابر فروپاشی را پایداری خاکدانه می‌گویند و از آن به عنوان شاخص ارزیابی کیفیت ساختمان خاک استفاده می‌کنند (Bronick & Lal, 2005). پایداری خاکدانه‌ها اثر مهمی در گسترش سیستم ریشه‌ای، تبادل گاز، تنظیم آب و مواد غذایی و چرخه‌ی کربن دارد و اساس بسیاری از خدمات اکوسیستمی ارائه شده توسط خاک مانند، تولید اولیه، کنترل فرسایش یا نفوذ آب (Bronick & Lal, 2005; Barthes et al., 2008; Li et al., 2011; Baer & Birgé, 2018; Abrishamkesh et al., 2024) می‌باشد. در هر حال، پایداری خاکدانه‌ها دربردارنده اطلاعات کلیدی در مورد عملکرد و کیفیت خاک است (Chrenkova et al., 2014). بنابراین اقدام جهت بهبود ساختمان خاک ضروری است.

ویژگی‌های ذاتی خاک مانند ذرات معدنی (رس‌ها)، مواد آلی، کربنات و سولفات کلسیم و اکسیدها و سزکویی اکسیدهای آهن و آلومینیوم، ویژگی‌های زیستی شامل ریشه گیاهان، میکروارگانیسم‌ها و جانوران خاک و عوامل بیرونی مانند فاکتورهای اقلیمی و مدیریتی از عوامل مؤثر بر تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها هستند (Bronick & Lal, 2005; Khazai et al., 2008). از بین موارد یاد شده نقش بقایای آلی و رس‌ها برجسته است. چراکه بقایا علاوه بر تأثیر مستقیم در خاکدانه‌سازی سبب راه‌اندازی سلسله‌ای از عوامل مانند تحریک رشد میکروارگانیسم‌ها و گیاهان می‌شوند که در ادامه، آنها موجب افزایش خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها خواهند شد (Saljnikov et al., 2013). ترشحات میکروبی و ریشه‌ها، رس‌ها را به هم چسبانده و در بین آنها ماده آلی به دام افتاده و بیشتر حفاظت می‌شود (Six et al., 2004).

از دیدگاه شیمیایی، تجزیه مواد آلی و بقایای گیاهی موجب آزاد شدن پلی‌ساکاریدها، ترکیبات هیومیک و موسیلاژها می‌شود که در پیوستگی ذرات خاک به یکدیگر نقش مثبتی دارد. از دیدگاه بیولوژیک، حضور مواد آلی، فعالیت میکروب‌ها (مثل قارچ‌ها و باکتری‌ها) و درشت‌جانداران (مثل کرم‌های خاکی) را تحریک می‌کند که نتیجه آن افزایش پایداری خاکدانه است (Blanco-Canqui, & Lal, 2009). در این میان به نقش ترکیبات پلی‌ساکاریدی مواد آلی نسبت به سایر ترکیبات آن در پایداری خاکدانه‌ها تأکید بیشتری شده است (Bouajila & Gallali, 2010). پلی‌ساکاریدهای با بار منفی و اسید پلی‌یورونیک‌ها، همراه با رشد باکتری‌ها، برای اتصال رس‌ها و سیمانی شدن مواد آلی در خاک مفید بوده و در تشکیل خاکدانه‌های درشت نقش دارند. افزایش خاکدانه‌های درشت کربن آلی ناپایدار را از معدنی‌شدن میکروبی محافظت می‌کند، که به نوبه خود باعث پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (Six et al., 2002).

بقایای گیاهی تازه قادرند همانند یک ماده سیمان‌کننده، باعث نگهداری ذرات در کنار هم و در نتیجه تشکیل خاکدانه گردیده و با اتصال خاکدانه‌های کوچک به یکدیگر، باعث تشکیل خاکدانه‌های بزرگتر شوند. در پژوهش‌ها به نقش فعالیت‌های بیولوژیک ناشی از اضافه شدن بقایای تازه آلی به خاک در فرآیند خاکدانه‌سازی (Bidisha et al., 2010)، افزایش خاکدانه‌های پایدار در آب در اثر

گندم) به خاک و مایه‌زنی دو نوع میکروارگانسیم (باکتری و قارچ) برای معدنی کردن آنها برای بررسی ویژگی‌های مربوط به خاکدانه‌سازی بود. آزمایش در دو خاک با بافت متفاوت انجام شد تا تأثیر شرایط ذاتی خاک خاک (یعنی مقدار رس) نیز بررسی شود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آماده‌سازی خاک

خاک‌های مورد استفاده در این پژوهش از بخش مرکزی شهرستان تالش در استان گیلان و از دامنه با عرض جغرافیایی ۵۸° ۸۰' ۳۷" شمالی و طول جغرافیایی ۱۶' ۸۸° ۴۸" شرقی و کنار رودخانه عرض جغرافیایی ۸۱° ۸۰' ۳۷" شمالی و طول جغرافیایی ۸۷' ۸۷° ۴۸" شرقی برداشته شد. کاربری هر دو خاک مرتع (زیر پوشش علفزار) بود. مطالعه در آزمایشگاه فیزیک خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه گیلان تکمیل شد.

نمونه‌برداری خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر به دو صورت دست‌خورده و دست‌نخورده انجام شد. خاک دست‌نخورده برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری خاک و خاک دست‌خورده برای اندازه‌گیری سایر ویژگی‌های خاک و نیز بررسی تأثیر تیمارها، استفاده شد. خاک‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک گردیده و بخشی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی از الک ۲ میلی‌متر و بخش دیگر برای آزمایش آنکوباسیون از الک ۴/۷۵ میلی‌متر عبور داده شد (Nimmo & Perkins, 2002).

آماده‌سازی تیمارها

کود گاوی پوسیده و کاه و کلش گندم تازه تهیه شده از دامداری در آون به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۴۰ درجه سلسیوس خشک گردید. سپس به دستگاه خردکن منتقل و از الک ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شد.

باکتری *Bacillus* sp.) تهیه شده در محیط کشت نوترینت برات در شیکر آنکوباتور (دمای ۲۸ درجه سلسیوس و ۱۲۰ rpm) بازکشت شد. سپس در انتهای فاز رشد نمایی به روش سانتریفیوژ (۵۰۰۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه) از محیط کشت جدا و در آب مقطر استریل به عنوان سوسپانسیون استوک^۲ جمع‌آوری گردید. پس از

افزودن مواد آلی به خاک (Tajik *et al.*, 2003) و افزایش پایداری ساختمان خاک در اثر افزودن بقایای گیاهی (Dorostkar & Vali, 2018) اشاره شده است.

تأثیر میکروارگانسیم‌های مختلف مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها و اکتینومایست‌ها که در خاک به فراوانی یافت می‌شوند در تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها متفاوت است. گزارش شده که قارچ‌ها بیشترین، باکتری‌ها کم‌ترین و اکتینومایست‌ها نقش میانه در پایداری خاکدانه‌ها دارند (Fokom *et al.*, 2013). قارچ‌های رشته‌ای با تولید هیف و ترشح مواد آلی ذرات خاک را مانند دانه‌های تسبیح به هم متصل نموده و نقش مهمی در خاکدانه‌سازی دارد (Lehmann & Rillig, 2015). پلی‌ساکاریدهای برون‌یاخته‌ای در باکتری‌ها در تشکیل خاکدانه‌ها، نگه‌داری آب و مواد مغذی موجود در خاک و افزایش فعالیت آنزیم‌های مختلف خاک بسیار مهم‌اند (Alami *et al.*, 2000). گونه‌های خاصی از جنس *باسیلوس*^۱ به تولید مقادیر زیادی پلی‌ساکاریدهای برون‌یاخته‌ای معروف هستند (Singha, 2012). عمر و رجب (Umer & Rajab, 2012) ارتباط بین مؤلفه‌های پایداری خاکدانه‌ها، مقدار مواد آلی، بافت و چگالی ظاهری خاک را با برخی مؤلفه‌های پایایی میکروارگانسیم‌های خاک‌زی مانند تنفس پایه، تنفس ناشی از سوبسترا، زیست توده میکروبی و ضریب سوخت و ساز میکروبی بررسی کردند. نتایج حاکی از وجود همبستگی مثبت بین پایداری خاکدانه‌ها و مؤلفه‌های مذکور بود.

در حالی که تغییر محتوای رس یا سزکویی اکسیدهای خاک تقریباً از نظر مدیریتی غیرممکن است، افزایش محتوای مواد آلی خاک در مزرعه در کمتر از چهار سال ممکن می‌باشد (Aulakh *et al.*, 2001). در این زمینه راه‌کارهایی مانند استفاده از کود سبز، افزودن کود دامی (به عنوان مثال، Gerzabek *et al.*, 2001 و 2001) و بقایای گیاهان کشاورزی به خاک سطحی و اتکا به میکروارگانسیم‌ها برای تجزیه آن‌ها (Mola ali abasiyan *et al.*, 2024; Bird *et al.*, 2001) که سبب افزایش ماده آلی خاک می‌شود، محبوبیت فزاینده‌ای به دست آورده‌اند. با این حال، در کمتر پژوهشی این موارد در کنار هم بررسی شده‌اند. بنابراین، هدف این پژوهش افزودن کود گاوی و بقایای گیاهی (کاه و کلش

¹ *Bacillus* sp.

² Stock suspension

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

ویژگی‌های خاک در دو حالت؛ یکی پیش از اجرای آزمایش آنکوباسیون و برای تعیین مشخصات اولیه خاک و دیگری پس از آن برای بررسی تأثیر تیمارها، مورد بررسی قرار گرفتند. ویژگی‌هایی مانند چگالی ظاهری به روش سیندر (Grossman & Reinsch, 2002)، بافت به روش هیدرومتری (Carter & Gregorich, 2007) و رطوبت ظرفیت زراعی (θ_{FC}) تنها پیش از اجرای آزمایش گرماگذاری اندازه‌گیری شدند. برای تعیین رطوبت ظرفیت زراعی، به خاک خشک گلدان آب اضافه شد تا به حد اشباع برسد. سپس روی آن با پلاستیک پوشانده شد. پس از دو روز و بیرون آمدن آب اضافه از گلدان، رطوبت وزنی از روش تفاضلی به دست آمد (Alizadeh, 2008). با توجه به وزن خاک درون گلدان (۲/۵ کیلوگرم) و رطوبت ظرفیت زراعی میزان اولیه‌ی آب مصرفی برای هر گلدان محاسبه گردید. اندازه‌گیری کربن آلی به روش اکسیداسیون تر، قابلیت هدایت الکتریکی^۵ (EC) عصاره اشباع خاک به وسیله دستگاه هدایت سنج مدل LF 325 و pH به روش پتانسیومتری نیز در هر دو حالت پیش و پس از گرماگذاری انجام شد (Carter & Gregorich, 2007).

ویژگی‌هایی مانند پایداری خاکدانه‌ها به روش الک مرطوب (Nimmo & Perkins, 2002)، مقاومت کششی با روش دکستر و کروسبرگن (روش برزیلی) (Dexter & Kroesbergen, 1985)، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA^6) به روش کمپر و روزنائو (Kemper & Rosenau, 1986) و تنفس پایه میکروبی در نمونه‌های دست‌نخورده و پس از پایان دوره گرماگذاری اندازه‌گیری شدند. برای تعیین تنفس پایه میکروبی خاک روش سنسجس میزان دی‌اکسیدکربن تصعید شده و به‌دام افتاده در سود، به روش تیتراسیون با اسید کلریدریک ۰/۱ مولار مورد استفاده قرار گرفت (Carter & Gregorich, 2007).

در اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها ابتدا ۱۰۰ گرم خاک آون خشک (< ۴ mm) روی یک کاغذ صافی قرار گرفت و به آرامی در طول ۲۴ ساعت خیس شد. سپس خاک به سری الک (با قطر ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۲۵ میلی‌متر) در دستگاه الک‌تر (با دامنه نوسان ۳/۱۸ cm سانتی‌متر و rpm

تعیین تعداد باکتری‌ها در این سوسپانسیون با لام هموسایتومتر^۱، حجم مناسبی از سوسپانسیون استوک در ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر استریل به خاک اضافه گردید به طوری که هر ۱۰۰ گرم خاک درون گلدان 10^8 باکتری باسیلوس دریافت کرد (Hashempour et al., 2020).

قارچ *Trichoderma* sp. تهیه شده در محیط کشت PDA^۲ به مدت یک هفته در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بازکشت و پس از پنج روز اسپورزایی در محیط کشت سبوس گندم استریل بر اساس روش کاوال کانت و همکاران (Cavalcante et al., 2008) تکثیر شد. سپس تعداد اسپورهای قارچ تریکودرما با لام هموسایتومتر شمارش شد و حجم مناسبی از سوسپانسیون استوک در ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر استریل تهیه شد و به گلدان‌ها اضافه گردید به طوری که هر ۱۰۰ گرم خاک درون گلدان 10^8 پروپاگول^۳ قارچ تریکودرما دریافت کرد (Yilmaz & Sönmez, 2017).

آنکوباسیون تیمارها

برای انجام آزمایش ۵۴ گلدان پلاستیکی (ارتفاع ۱۵ و قطر دهانه ۲۰ سانتی‌متر) مورد استفاده قرار گرفت. مواد افزوده شده به خاک طبق طرح آزمایشی شامل بقایای آلی؛ ۵۰ گرم کود گاوی و ۵۰ گرم کاه و کلش گندم، و میکروارگانیسیم‌ها؛ ۲۵ میلی‌لیتر سوسپانسیون دارای باکتری باسیلوس و اسپورهای قارچ تریکودرما بود که به صورت آرایش فاکتوریل به ۲/۵ کیلوگرم خاک اضافه و پس از اختلاط کامل در گلدان‌ها ریخته شد. پس از آماده سازی تیمارها، گلدان‌ها به مدت ۶ ماه در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند. در تمام این مدت، رطوبت خاک گلدان‌ها به روش وزنی (Alizadeh, 2008) با آب مقطر در محدوده ۵۰ تا ۷۵ درصد ظرفیت زراعی^۴ (FC) حفظ گردید.

پس از پایان دوره ۶ ماهه آنکوباسیون، بخشی از خاک به صورت دست‌نخورده نگهداری و مقداری از خاک هر گلدان نیز برای انجام آزمایش‌های زیستی برداشته و تا زمان آزمایش در یخچال (دمای ۴ درجه سلسیوس) نگهداری گردید. بخش دیگری از خاک‌ها نیز برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، هوا خشک، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد.

5 Electrical Conductivity

6 Water stable aggregates

1 Hemocytometer

2 Potato dextrose agar

3 Propagules

4 Field capacity

تجزیه آماری

تجزیه آماری داده‌ها به صورت آزمایش فاکتوریل (۳ × ۳ × ۳) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. فاکتورها شامل بافت خاک اولیه در دو سطح (بافت لوم رسی و لوم شنی)، بقایا در سه سطح (شاهد، کود گاوی، کاه و کلش گندم) و میکروارگانیزم‌ها در سه سطح (شاهد، باسیلوس، تریکودرما) بودند. پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها، برای تجزیه داده‌ها و مقایسه میانگین پارامترها آزمون توکی (در سطح احتمال ۵ درصد) مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی بیشتر ارتباط بین تیمارها و پارامترهای اندازه‌گیری شده، آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نیز انجام شد. برای انجام همه آنالیزها از نرم‌افزار SPSS 21 و برای رسم نمودارها از Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های اولیه خاک‌ها

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. خاک کنار رودخانه دارای بافت لوم شنی با کربن آلی کم (۰/۸۸ درصد) و چگالی ظاهری بالا (۱/۵۲ g cm⁻³) بود، درحالی‌که خاک دامنه کوه بافت لوم رسی داشته، کربن آلی آن (۳/۱۵٪) بیشتر از خاک کنار رودخانه و چگالی ظاهری آن (۱/۱۷ g cm⁻³) کمتر از خاک کنار رودخانه بود (جدول ۱). هر دو خاک اسیدی بودند اما خاک کنار رودخانه (pH = ۶/۰۸) اسیدی ضعیف (دامنه بین ۶/۱ تا ۶/۶) و خاک دامنه کوه (pH = ۵/۷۰) اسیدی میانه (دامنه بین ۵/۶ تا ۶/۱) بود (Brady & Weil, 2008).

اثر تیمارها بر ویژگی‌های خاک

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) اثر اصلی بافت خاک بر روی همه ویژگی‌های بررسی شده به جز pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) معنی‌دار بود (p < ۰/۰۱). اثرات اصلی بقایای آلی و میکروارگانیزم‌ها بر کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه، تنفس میکروبی، پایداری خاک‌دانه‌ها در آب و میانگین هندسی قطر خاک‌دانه معنی‌دار بود (p < ۰/۰۱). علاوه بر این اثر بقایای آلی بر EC نیز معنی‌دار بود (p < ۰/۰۱). اثرات متقابل دوجانبه بافت خاک و بقایای آلی بر ویژگی‌های پایداری خاک‌دانه‌ها در آب

(۳۰) قرار گرفت. پس از ۱۰ دقیقه، خاک روی هر الک در آون (۱۰۵ درجه سلسیوس و به مدت ۲۴ ساعت) خشک و وزن آن اندازه‌گیری شد. سپس شاخص‌های مانند میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها^۱ (MWD)، میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها^۲ (GMD) و بعد فرکتال (D) با استفاده از رابطه ۸-۲ تا ۱۰-۲ محاسبه شد.

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

$$GMD = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \log X_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad 2$$

$$N(r > R) = KR^{-D} \quad 3$$

که در این روابط، MWD میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها (mm)، X_i میانگین قطر خاک‌دانه‌هایی روی هر الک (mm)، W_i نسبت وزن خاک‌دانه‌ها در هر الک به وزن کل خاک، n تعداد الک‌ها در سری، GMD میانگین هندسی قطر خاک‌دانه‌ها (mm)، w_i جرم خاک‌دانه‌ها بر روی الک i ام (g) و $\sum_{i=1}^n W_i$ وزن کل خاک‌دانه‌ها (g)، r اندازه قطر نرمال شده‌ی خاک‌دانه‌ها در هر بخش اندازه‌ای، $N(r > R)$ تعداد تجمعی خاک‌دانه‌های با اندازه r که از مقیاس اندازه‌گیری R بزرگتر است و به وسیله قطر الک تعیین می‌شود، K مقدار ثابت و D بعد فرکتالی است.

برای اندازه‌گیری WSA، ۴ گرم از خاک‌دانه‌های هوا خشک (۱-۲ mm) همانند بالا خیس شد. سپس خاک‌دانه‌های خیس به آرامی روی الک ۰/۲۶ میلی‌متر در دستگاه الک‌تر (با دامنه نوسان ۱/۳ cm سانتی‌متر و ۳۵ rpm) قرار گرفت. پس از ۳ دقیقه خاک‌دانه‌های روی الک در آون (دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس) خشک شده و وزن گردید. برای محاسبه WSA باید تصحیحی برای ذرات شن و ماسه انجام گیرد. بنابراین، خاک‌دانه‌های آون خشک پس از توزین در یک محلول دیسپرس کننده قرار گرفته و دوباره از الک ۰/۲۶ میلی‌متر عبور داده شدند. بخش روی الک ذرات شن با قطر بزرگتر از ۰/۲۶ را تشکیل می‌دهد که پس از خشک شدن در آون وزن آنها تعیین گردید. با کسر کردن وزن ذرات شن از وزن اولیه خاک‌دانه‌ها و تقسیم کردن حاصل به وزن اولیه، وزن خاک‌دانه‌های پایدار در آب به دست آمد.

1 Mean Weight Diameter

2 Geometric mean diameter

آن در خاک‌های تیمار شده با کود گاوی ($2/4 \text{ dS m}^{-1}$) به طور معنی‌داری ($p < 0/05$) بیشتر از خاک‌های تیمار شده با کاه گندم ($1/5 \text{ dS m}^{-1}$) و شاهد ($1/2 \text{ dS m}^{-1}$) بود. افزودن بقایا سبب افزایش EC در هر دو خاک نسبت به مقدار اولیه (جدول ۱) شد. بقایای آلی و کودهای دامی دارای نمک‌های معدنی هستند که در فرایند تجزیه وارد محلول خاک می‌شوند. بخش زیادی از ارزش تغذیه‌ای آنها برای گیاهان به دلیل حضور همین عناصر غذایی است به طوری که کود گاوی معادل یک کود NPK ۱-۲-۳ بیان شده است (Dhiman *et al.*, 2021). تحقیقات پیشین نیز نشان داده‌اند که افزودن کودهای دامی به خاک سبب افزایش شوری و کاهش مختصر در pH می‌شود (Li-Xian *et al.*, 2007).

و میانگین هندسی قطر خاکدانه، اثرات متقابل دوجانبه بافت خاک و میکروارگانیسم‌ها و اثرات متقابل دوجانبه بقایای آلی و میکروارگانیسم‌ها بر ویژگی‌های تنفس میکروبی و میانگین هندسی قطر خاکدانه معنی‌دار شدند ($p < 0/01$). همچنین اثرات متقابل سه‌جانبه بافت خاک، بقایای آلی و میکروارگانیسم‌ها بر ویژگی‌های کربن آلی، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها معنی‌دار بود ($p < 0/05$).

pH خاک و قابلیت هدایت الکتریکی

تغییرات pH اندازه‌گیری شده در خاک‌ها تحت تأثیر تیمارهای مختلف بقایای آلی و میکروارگانیسم‌ها قرار نگرفت. اما قابلیت هدایت الکتریکی (EC) تحت تأثیر بقایای افزوده شده به خاک قرار گرفت. به طوری که مقدار

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1. Some physico-chemical properties of the studied soils

Sampling point	Textural Class	pH	EC dS m^{-1}	BD g cm^{-3}	OC	θ_{FC} ----- $\text{g } 100\text{g}^{-1}$ -----	Sand	Silt	Clay
Riverside	Sandy Loam	6.08	0.96	1.52	0.88	16.2	62	26.6	11.4
Hillsilde	Clay Loam	5.70	1.23	1.17	3.15	17.6	30	30.4	39.6

pH: Acidity, EC: Electrical conductivity, BD; Bulk density, OC: Organic carbon, and θ_{FC} : Gravimetric water content at field capacity

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر بافت خاک، بقایای آلی، میکروارگانیسم‌ها و اثر متقابل آنها بر ویژگی‌های بررسی شده خاک

Table 2. Analysis of variance of the effect of soil texture, organic residues, microorganisms and their interactions on the investigated soil characteristics

Source of variation	df	Mean squares								
		pH	EC	OC	MWD	GMD	WSA	TS	F	MBR
Soil texture (T)	1	0.89	0.34	195**	8.8**	4.03**	5290**	10184**	3.4**	0.152**
Organic residues (R)	2	1.14	6.8**	31.7**	3.8**	1.90**	1226**	7.9236	0.21	0.042**
Microorganisms (M)	2	2.34	0.53	23.9**	3.5**	1.13**	656.0**	6.9414	0.33	0.025**
T × R	2	0.04	0.21	0.275	0.11	0.07**	136.6**	1.7181	0.19	0.002
T × M	2	1.19	0.03	0.053	0.04	0.039**	14.35	0.83104	0.38	0.009**
R × M	4	0.61	0.13	1.86	0.11	0.073*	6.188	0.97767	0.09	0.005**
T × R × M	4	0.87	0.06	2.27**	0.25	0.031*	1.375	0.98482	0.09	0.001
Error	36	0.90	0.93	0.73	0.11	0.01	10.7	7.8775	0.09	0.001

* and ** indicate significance at the 5% and 1% probability level.

pH; Acidity, EC; Electrical conductivity, OC; Organic carbon, MWD; Mean weight diameter of soil aggregates, GMD; Geometric mean diameter of soil aggregates, WSA; Water stable soil aggregates, TS; Tensile strength, F; Fractal dimension, MBR; Microbial basal respiration.

تریکودرما) شده است. کم‌ترین مقدار کربن آلی در هر دو خاک نیز در تیمار شاهد به دست آمد که در هر دو خاک با دیگر تیمارها تفاوت آماری معنی‌دار داشت ($p < 0/05$). با افزودن هر دو نوع بقایای کود گاوی و کاه و کلش گندم، مقادیر کربن آلی خاک نسبت به نمونه شاهد به طور معنی‌داری ($p < 0/05$) در هر دو بافت خاک افزایش یافت اما این افزایش در خاک لوم شنی بیشتر بود. به طور

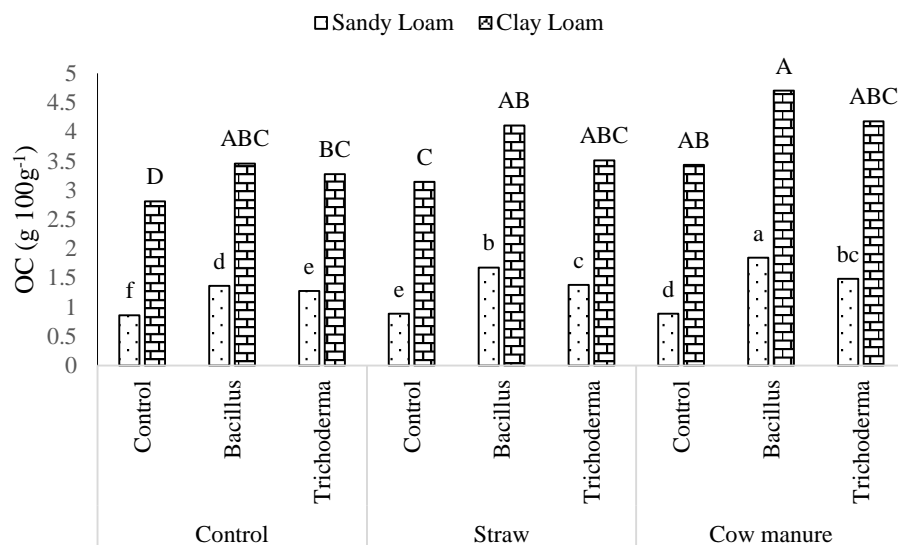
کربن آلی

بیش‌ترین مقدار کربن آلی در هر دو خاک در تیمار کود گاوی - باسیلوس به دست آمد که در خاک با بافت لوم شنی با دیگر تیمارها تفاوت آماری معنی‌دار داشت ($p < 0/05$). در واقع این تیمار در هر دو خاک سبب افزایش بیشتر کربن آلی خاک در مقایسه با دیگر تیمارها (کاه و کلش - باسیلوس و تریکودرما، کود گاوی -

(2019) که این تفاوت نسبت به نمونه شاهد و همچنین تیمار کاه و کلش گندم مشاهده شد. ماهیت بقایا، نوع کربن موجود در بقایای آلی و همچنین سایر ترکیب‌های آلی و معدنی همراه بر روند تجزیه آن در محیط خاک بسیار مؤثر است به طوری که نسبت کربن به نیتروژن (C/N) بقایا برای بررسی شدت تجزیه آن تعریف شده است (Fu *et al.*, 2021). از آنجا که کود گاوی نسبت C/N کمتری (۱۶ تا ۲۵) در مقایسه با کاه و کلش گندم (۱۰۰ تا ۱۲۵) دارد، تجزیه آن سریع‌تر انجام شده و کربن آلی بیشتری در کوتاه مدت به خاک اضافه می‌کند (Macias-Corral *et al.*, 2019). در سوی دیگر، بقایای با C/N بالا معمولاً برای رشد قارچ‌ها مفیدتر هستند (Wang *et al.*, 2020).

میانگین، این ویژگی برای تیمار کود گاوی (۴/۱۱ و ۱/۴۰ درصد به ترتیب برای خاک لوم رسی و لوم شنی) مقدار بالاتری را نسبت به مقدار آن در تیمار کاه و کلش گندم (۳/۵۹ و ۱/۳۱ درصد به ترتیب برای خاک لوم رسی و لوم شنی) نشان داد ($p < 0.05$). میانگین کربن آلی در تیمار شاهد دو خاک لوم رسی و لوم شنی نیز به ترتیب ۲/۹۷ و ۰/۸۰ درصد بود (شکل ۱). بنابراین، افزودن بقایا به روشنی سبب افزایش کربن آلی خاک شده است که هم‌سو با پژوهش‌های دیگر است (Mekki *et al.*, 2013; Hashempour *et al.*, 2020).

ورود کود دامی به خاک علاوه بر ایجاد محیط مطلوب برای فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک، موجب می‌شود که میزان کربن آلی خاک نیز افزایش یابد (Shao *et al.*,



شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر بقایا و میکروارگانیسم‌ها بر محتوای کربن آلی اندازه‌گیری شده در خاک با بافت لوم شنی و لوم رسی. در هر سری، میانگین‌های دارای حروف همسان، به روش آزمون توکی اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 1. Mean comparison of the effect of residues and microorganisms on the organic carbon content measured in the sandy loam and clay loam soils.

In each series, means followed by the same superscript letters are not significantly different according to Tukey's test at $P < 0.05$

(۱)، که می‌تواند مربوط به فعالیت این باکتری و نقش اساسی آن در خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌های خاک باشد (رجوع به شکل ۲).

در مطالعه‌ای که روی اثر ترکیبی میکروارگانیسم‌ها و کود دامی بر میزان کربن آلی خاک انجام شد، مشخص گردید که مصرف کود دامی، کمپوست و تلفیق آنها با باکتری و قارچ به ویژه در دراز مدت، میزان کربن آلی خاک را در مقایسه با انواع تیمارهای دیگر، به میزان بیشتری افزایش داده است (Behera & Panda, 2009). ملاعلی عباسیان و

نتایج نشان داد که با افزودن هر دو میکروارگانیسم باکتری باسیلوس و قارچ تریکودرما، مقادیر کربن آلی نسبت به نمونه شاهد به طور معنی‌داری ($p < 0.05$) در هر دو بافت خاک افزایش یافت. به‌طور میانگین، این ویژگی برای تیمار باسیلوس مقدار (۴/۰۹ و ۱/۶۳ درصد به ترتیب در خاک لوم رسی و لوم شنی) بالاتری را نسبت به مقدار آن در تیمار تریکودرما (۳/۶۶ و ۱/۳۸ درصد به ترتیب در خاک لوم رسی و لوم شنی) نشان داد و تفاوت بین این مقادیر تنها در خاک لوم رسی معنی‌دار بود ($p < 0.05$) (شکل

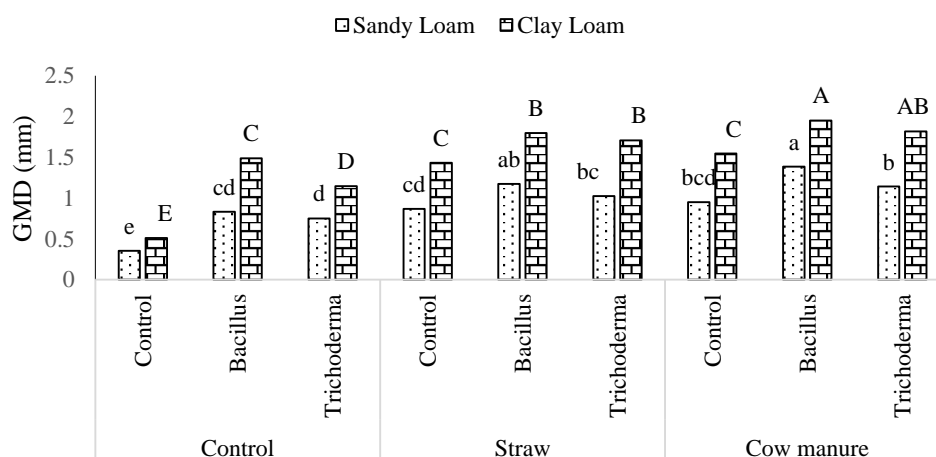
همراه با تیمار قارچ *تریکودرما* و در خاک لوم شنی با تیمار کاه گندم همراه با تیمار باکتری *باسیلیوس* تفاوت آماری معنی دار نداشت. کمترین مقدار GMD نیز در هر دو خاک در تیمار شاهد به دست آمد که با دیگر تیمارها تفاوت آماری معنی داری داشت ($p < 0/05$). نتایج نشان داد که در هر دو نوع خاک افزودن کود گاوی و کاه و کلش گندم سبب افزایش معنی دار GMD نسبت به نمونه شاهد شد. به طور میانگین، این ویژگی در خاک لوم رسی و لوم شنی برای تیمار کود گاوی به ترتیب مقدار ۱/۷۷ و ۱/۱۶ میلی متر و برای تیمار کاه و کلش گندم به ترتیب ۱/۶۴ و ۱/۰۲ میلی متر بود که هر دو به طور معنی داری ($p < 0/05$) بالاتر از شاهد (به ترتیب ۱/۰۵ و ۰/۶۵ میلی متر در خاک لوم رسی و لوم شنی) بودند و البته تفاوت بین هر دو نیز در خاک لوم رسی معنی دار بود ($p < 0/05$).

باتوجه به نتایج می توان گفت که تأثیر کود گاوی در مقایسه با کاه و کلش گندم بر میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در خاک لوم شنی بیشتر از خاک لوم رسی بود، به طوری که GMD تحت تأثیر کود گاوی در خاک لوم شنی و لوم رسی در برابر شاهد به ترتیب ۱/۶۹ و ۱/۷۸ برابر افزایش یافت در حالی که این افزایش تحت تأثیر کاه و کلش گندم در هر دو خاک یکسان (۱/۵۶ برابر) بود (شکل ۲). روستا و عنایتی (Rousta & Enayati, 2013) گزارش کردند که کاربرد بقایای آلی مانند کاه و کلش گندم و کود دامی باعث افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد شده است.

همکاران (Mola ali abasiyan *et al.*, 2024) نیز در بررسی تاثیر پنج نوع ماده آلی بر خاک مشاهده کردند که تیمارهای لئوناردیت، ورمی کمپوست و لیگنوسولفانات کلسیم به ترتیب بیشترین تاثیر مثبت در افزایش درصد ماده آلی داشتند. استفاده از کود زیستی *تریکودرما* با نرخ ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی در یک خاک رسی به ترتیب سبب افزایش ۱۰/۸ تا ۱۲ و ۱۷/۸ تا ۱۸/۶ درصدی کربن آلی در خاکدانه‌های با اندازه مختلف در مقایسه با تیمار کنترل شد و افزایش دوز استفاده کود تا ۵۰ درصد وزنی تفاوت معنی دار در محتوای کربن آلی خاکدانه‌ای ایجاد نکرد (Zhu *et al.*, 2022). نوع میکروارگانیسم‌های غالب در خاک یکی دیگر از عوامل بسیار مؤثر بر تجزیه بقایای آلی و تلیفیک کربن آن با خاک هستند (Sharma *et al.*, 2010; Fu *et al.*, 2021). گزارش شده که در سیستم‌های کشاورزی که خاک پیوسته کود دامی دریافت می‌کند فراوانی و تنوع میکروبی (باکتری‌ها) افزایش می‌یابد (Hartmann *et al.*, 2015). نوع بقایا بر تنوع میکروبی نیز تأثیر مهمی دارد. به طوری که در یک خاک آهکی بقایای گندم در مقایسه با کود گاوی سبب افزایش قارچ‌ها نسبت به باکتری‌ها شد (Bei *et al.*, 2018).

میانگین هندسی قطر خاکدانه

با توجه به شکل ۲، در هر دو خاک بالاترین مقدار GMD در تیمار کود گاوی همراه با تیمار باکتری *باسیلیوس* به دست آمد که در خاک لوم رسی با تیمار کود گاوی



شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر بقایا و میکروارگانیسم‌ها بر میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در خاک با بافت لوم شنی و لوم رسی.

در هر سری، میانگین‌های دارای حروف همسان، به روش آزمون توکی اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 2. Mean comparison of the effect of residues and microorganisms on the geometric mean diameter of aggregates measured in the sandy loam and clay loam soils.

In each series, means followed by the same superscript letters are not significantly different according to Tukey's test at $P < 0.05$

ریز (mm) ۰/۲۵ - ۰/۰۵۳) شد (Zhu et al., 2022). روی هم رفته، میانگین مقدار GMD در خاک لوم رسی ۱/۴۹ میلی‌متر و ۱/۵۸ برابر مقدار آن در خاک لوم شنی بود.

درصد خاکدانه‌های پایدار در آب

اثر بقایای آلی بر درصد خاکدانه‌های پایدار در آب (WSA) در دو بافت خاک لوم رسی و لوم شنی در شکل ۳ آمده است. با افزودن بقایا در هر دو خاک درصد WSA نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری ($p < 0/05$) افزایش یافت. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار WSA به ترتیب در خاک لوم رسی تیمار شده با کود گاوی و تیمار شاهد خاک لوم شنی به‌دست آمد و تفاوت آن‌ها با دیگر تیمارها معنی‌دار بود ($p < 0/05$). کاربرد بقایا سبب شد که در مجموع خاک لوم رسی حدود ۲۰ درصد خاکدانه‌های پایدار در آب بیشتری از خاک لوم شنی داشته باشد. این یافته هم‌سو با دیگر پژوهش‌هاست (برای مثال: Kristiansen et al., 2002; 2006; Khazai et al., 2008) که مقدار بالای رس را مهمترین عامل در پایداری مناسب خاکدانه‌ها می‌دانند. خزائی و همکاران (Khazai et al., 2008) به ترتیب ماده آلی، رس و کربنات کلسیم را از عوامل مؤثر بر پایداری خاکدانه‌های برخی از خاک‌های کشاورزی استان همدان معرفی کردند. اگر چه اشاره شده که نقش ذرات رس، بیشتر در خاک‌های سطحی و هنگامی که به خوبی با مواد آلی مخلوط شده باشد، پدیدار می‌شود (Six et al., 2002).

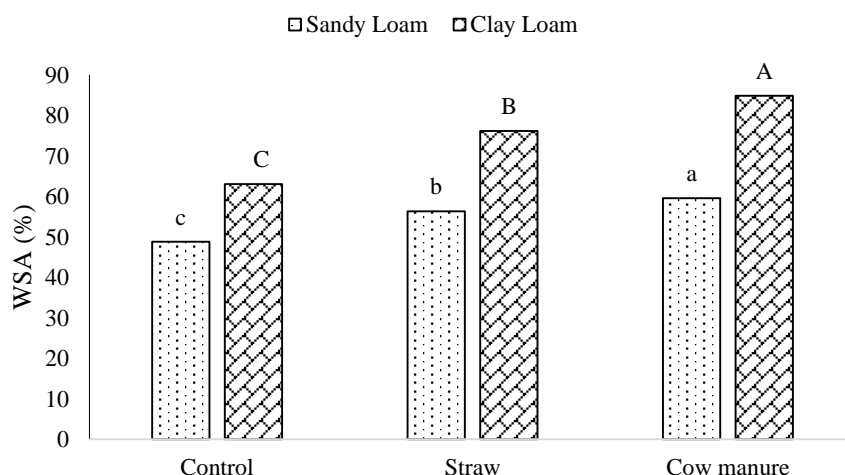
در بین بقایا، کود گاوی در هر دو خاک بهترین تأثیر را بر WAS داشت، به‌طوری‌که میانگین WSA خاک‌های تیمار شده با این بقایا حدود ۶ درصد بیشتر از خاک‌های تیمار شده با کاه و کلش گندم و حدود ۱۶ درصد بیشتر از تیمارهای شاهد بود (شکل ۳). این نتایج با مطالعه والن و همکاران (Whalen et al., 2003) مطابقت دارد. ایشان گزارش کردند که با افزایش کاربرد بقایای آلی، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب به‌طور معنی‌داری در مقایسه با تیمارهای بدون کود آلی افزایش یافت. اگرچه تأثیر میکروارگانسیم‌ها همراه با بقایا بر WSA معنی‌دار نبود اما در مجموع مقدار WSA در تیمارهای مایه‌زنی شده با باسیلوس حدود ۱۲ درصد و در تیمارهای مایه‌زنی شده با تریکودرما حدود ۷ درصد بیشتر از شاهد (۵۸/۳ درصد) بود. در مطالعه‌ای مشخص شد که درصد خاکدانه‌های پایدار

مقایسه اثر میکروارگانسیم‌ها بر GMD نیز نشان داد که تحت تأثیر هر دو تیمار باکتری باسیلوس و قارچ تریکودرما، مقادیر GMD در هر دو خاک لوم رسی و لوم شنی نسبت به نمونه شاهد به‌طور معنی‌داری ($p < 0/05$) افزایش یافت. در خاک لوم رسی، مقدار GMD تحت تأثیر تیمار باسیلوس (۱/۷۴ میلی‌متر) به‌طور معنی‌داری ($p < 0/05$) بالاتر از مقدار آن در تیمار تریکودرما (۱/۵۶ میلی‌متر) بود. میانگین GMD در خاک لوم شنی نیز برای تیمار باسیلوس به‌طور معنی‌داری ($p < 0/05$) بالاتر از تیمار تریکودرما (۱/۱۳ میلی‌متر در مقابل ۰/۹۷ میلی‌متر) بود ($p < 0/05$). به‌طور کلی می‌توان گفت که تأثیر باکتری در مقایسه با قارچ بر GMD در خاک لوم شنی بیشتر از خاک لوم رسی بود. به‌گونه‌ای که GMD تحت تأثیر باسیلوس در خاک لوم شنی و لوم رسی در برابر شاهد به ترتیب ۱/۵۷ و ۱/۵۰ برابر افزایش یافت درحالی‌که این افزایش تحت تأثیر تریکودرما در هر دو خاک تقریباً یکسان (۱/۳۵ برابر) بود (شکل ۲).

در مطالعه‌ای که روی تأثیر باکتری باسیلوس بر پایداری خاکدانه‌ها انجام شد، مشخص گردید که فعالیت این باکتری در خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها نقش اساسی ایفا می‌کند. اما فعالیت این باکتری به مواد آلی خاک وابسته است، بدین معنی که بخش عمده‌ای از تأثیر ماده آلی بر پایداری خاکدانه‌ها ممکن است مربوط به فعالیت باکتری‌های باسیلوس برای تجزیه مواد آلی خاک باشد (Hashim et al., 2020). بنابراین، نتایج به‌دست آمده در این پژوهش یعنی بالا بودن GMD و OC (شکل ۱ و ۲) در تیمارهای کود گاوی - باسیلوس توجیه می‌شود. همچنین در مطالعه دیگری به وضوح نشان داده شد که افزایش پایداری خاکدانه‌ها به دلیل پلی‌ساکاریدهای تولید شده توسط باکتری‌های باسیلوس است (Amézketa et al., 1995). علاوه بر اثر باکتری، باراهاس آسوس (Barajas, 2005) گزارش داد که توانایی هیف‌های قارچ در ایجاد خاکدانه و افزایش پایداری خاک ارتباط مستقیمی با زیست‌توده قارچ به ویژه قارچ تریکودرما و ترشحات تولید شده توسط آن‌ها دارد. در پژوهش دیگری دیده شد که استفاده از کود زیستی تریکودرما سبب افزایش پایداری خاکدانه‌ها شد و دوز کاربرد ۲۰ درصد وزنی بیشترین تأثیر را داشت. همچنین کود زیستی سبب افزایش تشکیل خاکدانه‌های درشت ($> 0/25$ mm) و کاهش خاکدانه‌های

مهم برای بازیابی و افزایش درصد خاکدانه‌های پایدار در آب باشند (Duchicela *et al.*, 2013).

در آب به شدت همبستگی مثبتی با ترکیب میکروارگانیسم‌ها به ویژه جمعیت باکتریایی و قارچی خاک دارد و این میکروارگانیسم‌های خاک می‌توانند یک واسطه



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر بقایا بر خاکدانه‌های پایدار در آب در خاک با بافت لوم شنی و لوم رسی.

در هر سری، میانگین‌های دارای حروف همسان، به روش آزمون توکی اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 3. Mean comparison of the effect of residues on the water stable aggregates in the sandy loam and clay loam soils.

In each series, means followed by the same superscript letters are not significantly different according to Tukey's test at $P < 0.05$

دیگر (۴۰ برابر رس و ۷۰ برابر کربنات کلسیم) بود. اما در خاکدانه‌های مرطوب تأثیر ماده آلی کم شد.

بعد فراکتال

در هر دو بافت خاک تیمارهای مختلف بقایای آلی و میکروارگانیسم‌ها بر تغییرات بعد فراکتال تأثیر معنی‌دار نداشتند اما تأثیر بافت خاک بر این ویژگی معنی‌دار بود ($p < 0.01$; جدول ۱). به طور میانگین، این سنججه در خاک لوم رسی ۱/۹۱ و در خاک لوم شنی ۱/۴۰ به دست آمد. در این راستا می‌توان گفت که خاکدانه‌های پایدار که بعد فراکتالی کوچک‌تری ایجاد می‌کنند، بیشتر در خاک‌ها و کاربری‌هایی مشاهده می‌شود که در آنها مدیریت‌های مناسب دیگری مانند عملیات خاک‌ورزی کمتر و تناوب زراعی حاکم باشد نه افزودن بقایای آلی مانند کود گاوی و کاه و کلش گندم که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است. در سوی دیگر، خردشوندگی بیشتر که حاصل خاکدانه‌های ناپایدار است و بعد فراکتالی بزرگتر ایجاد می‌کنند می‌تواند تحت شرایط نابسامان مدیریتی مانند مدیریت نادرست بقایای گیاهی ایجاد شود (Ataee *et al.*, 2014).

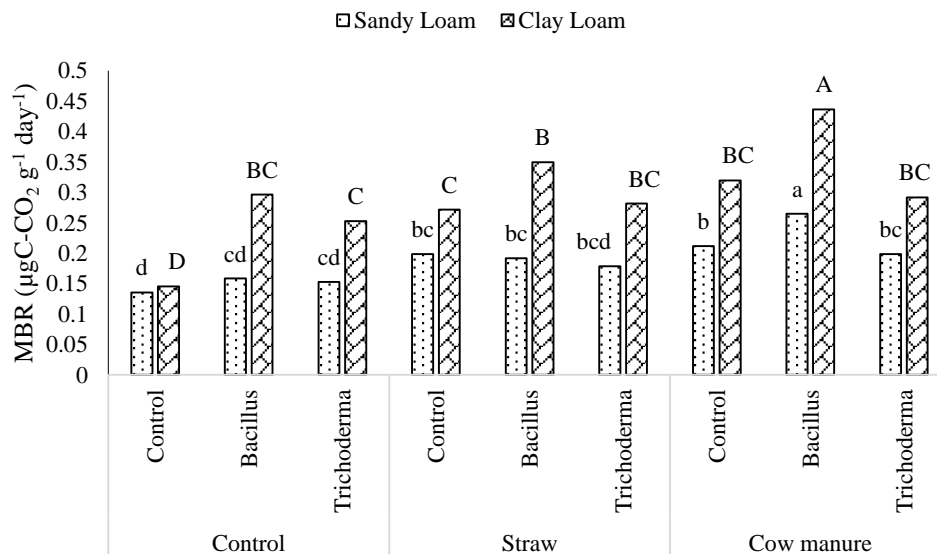
تنفس میکروبی

مقاومت کششی

تغییرات مقادیر مقاومت کششی اندازه‌گیری شده تحت تأثیر تیمارهای مختلف بقایای آلی و میکروارگانیسم‌ها قرار نگرفت و تفاوت معنی‌دار بین این تیمارها در هیچ کدام از دو بافت خاک دیده نشد. اما تأثیر بافت خاک بر این ویژگی معنی‌دار بود ($p < 0.01$; جدول ۱). به طور میانگین، این ویژگی در خاک لوم رسی ۴۶/۱۲ کیلوپاسکال و در خاک لوم شنی ۱۸/۶۶ کیلوپاسکال به دست آمد. این نتایج بر خلاف یافته‌های تیزدال و همکاران (Tisdall *et al.*, 2010) بود که گزارش دادند که در خاک‌های مایه‌زنی شده با قارچ به ویژه قارچ تریکودرما، همبستگی مثبتی بین میزان توسعه قارچ و مقاومت کششی خاک وجود دارد. لی و همکاران (Li *et al.*, 2011) نیز گزارش دادند که با وجود اثر مثبت بقایای آلی بر مقاومت کششی خاک، ممکن است حتی اثر کودها و منابع دیگر مانند منابع شیمیایی بر این ویژگی خاک از منابع آلی بیشتر باشد. خزائی و همکاران (Khazai *et al.*, 2008) گزارش کردند که از سه ویژگی ذاتی ماده آلی، رس و کربنات کلسیم که اثر آنها بر مقاومت کششی خاکدانه‌ها بررسی شد، تأثیر ماده آلی بر مقاومت کشش خاکدانه‌های هواخشک به مراتب بیشتر از دو ویژگی

و البته تفاوت بین این دو تیمار در این بافت لوم رسی نیز معنی دار بود ($p < 0.05$). به طور کلی تأثیر کاه و کلش گندم در مقایسه با کود گاوی بر میانگین شدت MBR در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی بود. به طوری که شدت MBR تحت تأثیر کاه و کلش گندم در خاک لوم شنی و لوم رسی در برابر شاهد به ترتیب $1/27$ و $1/30$ برابر افزایش یافت در حالی که این افزایش تحت تأثیر کود گاوی در هر دو خاک تقریباً یکسان ($1/51$ برابر) بود (شکل ۴). نتایج به دست آمده درباره این صفت خاکی هم سو با یافته‌های ایوینو و همکاران (Iovieno *et al.*, 2009) بود که در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که اصلاح کننده‌های آلی و کود دامی کاملاً اثر افزایشی بر شدت تنفس میکروبی خاک دارد.

در هر دو خاک بالاترین شدت MBR در تیمار کود گاوی همراه با تیمار باسیلوس به دست آمد که تفاوت آن با سایر تیمارها معنی دار بود ($p < 0.05$). کمترین شدت MBR نیز در هر دو خاک در تیمار شاهد به دست آمد که تفاوت آن در خاک لوم رسی با دیگر تیمارها معنی دار بود ($p < 0.05$). نتایج نشان داد که هر دو بافت خاک افزودن کود گاوی و کاه و کلش گندم سبب افزایش معنی دار شدت تنفس پایه میکروبی نسبت به نمونه شاهد شد. به طور میانگین، این ویژگی به ترتیب در خاک لوم شنی و لوم رسی برای تیمار کود گاوی مقدار $0/19$ و $0/23$ $\mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$ و برای تیمار کاه و کلش گندم $0/30$ و $0/30$ $\mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$ بود که در هر دو خاک به طور معنی داری ($p < 0.05$) بالاتر از مقدار آن در تیمار شاهد‌های نظیر ($0/15$ و $0/23$ $\mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$) بودند.



شکل ۴- مقایسه میانگین تأثیر بقایا و میکروارگانیسم‌ها بر شدت تنفس پایه میکروبی در خاک با بافت لوم شنی و لوم رسی.

در هر سری، میانگین‌های دارای حروف همسان، به روش آزمون توکی اختلاف معنی دار در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Figure 4. Mean comparison of the effect of residues and microorganisms on the microbial basal respiration rate in the sandy loam and clay loam soils.

In each series, means followed by the same superscript letters are not significantly different according to Tukey's test at $P < 0.05$

شدت MBR تحت تأثیر تیمار باکتری باسیلوس ($0/21$ و $0/36$ $\mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$) به طور معنی داری ($p < 0.05$) بیشتر از مقدار آن در تیمار قارچ تریکودرما ($0/21$ و $0/28$ $\text{CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$) بود. به طور کلی می‌توان گفت که تأثیر باکتری در مقایسه با قارچ بر شدت MBR در خاک لوم رسی بیشتر از خاک لوم شنی بود. شدت MBR تحت تأثیر باکتری باسیلوس در خاک لوم شنی و لوم رسی در مقایسه با شاهد به ترتیب $1/47$ و $1/13$ برابر افزایش یافت

مقایسه اثر تیمار میکروارگانیسم‌ها بر مقایسه اثر تیمار میکروارگانیسم‌ها بر MBR نیز نشان داد که تحت تأثیر هر دو تیمار باکتری باسیلوس شدت MBR در هر دو بافت خاک لوم رسی و لوم شنی نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت اما تنها در بافت لوم رسی تفاوت آنها معنی دار بود. شدت MBR در تیمار تریکودرما اگرچه در خاک لوم رسی بیشتر از شاهد بود اما تفاوت معنی دار با آن نداشت. به طور میانگین در خاک لوم شنی و لوم رسی،

در نتیجه نرخ تنفس خاک تأثیر بگذارد (Saljnikov *et al.*, 2013).

علاوه بر این، قارچ‌ها می‌توانند مواد آلی بیرون از خاکدانه‌ها را نیز از طریق حرکت هیف‌ها تجزیه کنند و راندمان جذب بالایی از منابع کربن را نشان می‌دهند. درحالی‌که باکتری‌ها این مزیت را ندارند. با این حال، باکتری‌ها به ویژه گرم-مثبت‌ها معمولاً در تجزیه مواد آلی کهنه شرکت می‌کنند (Naylor *et al.*, 2017). اگرچه در پژوهش حاضر شدت تنفس با تیمار کود گاوی و باسیلوس و ویژگی‌های خاکدانه‌های پایدار و کربن آلی خاک رابطه مثبت داشت، اما شدت تنفس در خاکدانه‌های با اندازه‌های مختلف و همچنین فراوانی میکروارگانیسم‌ها که نقش حیاتی در گردش کربن آلی دارند ارزیابی نشد. بنابراین، مطالعات بیشتری با تمرکز بر اثرات این تیمارها بر ترکیب جامعه میکروبی خاک و معدنی شدن کربن در خاکدانه‌های مختلف مورد نیاز است، که می‌تواند به مدیریت پایداری ساختمان خاک کمک کند.

آنالیز تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

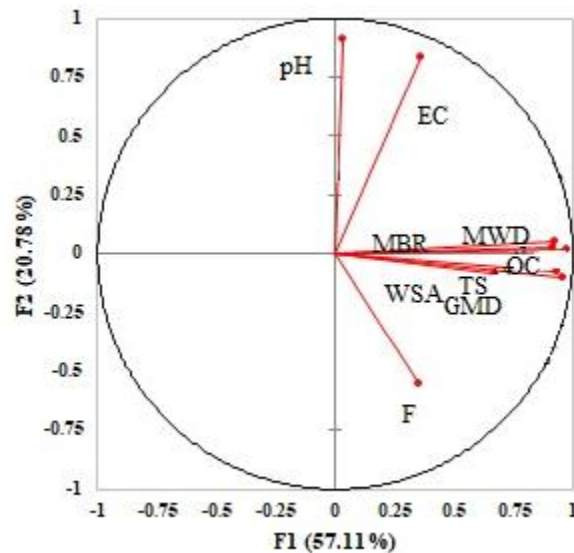
تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای بررسی بیشتر ارتباط احتمالی بین عوامل مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها انجام شد. در شکل ۵ ارتباط ویژگی‌های اندازه‌گیری شده باهم در هر دو خاک و در جدول ۳ آنالیز تجزیه به مؤلفه اصلی آمده است. محور افقی ۵۷/۱۱ درصد تغییرپذیری واریانس را توصیف می‌کند و نشان می‌دهد که پارامترهایی که بیشترین تأثیر را در این پژوهش از تیمارها گرفته‌اند شامل کربن آلی، تنفس پایه میکروبی، میانگین وزنی و هندسی قطر خاکدانه‌ها، خاکدانه‌های پایدار در آب و مقاومت کششی هستند (شکل ۵). این پارامترها در مؤلفه اول خود را نشان داده‌اند (جدول ۳). همچنین محور عمودی ۲۰/۷۸ درصد تغییرپذیری را توصیف نمود (شکل ۵) که شامل پارامترهای اسیدیته خاک و قابلیت هدایت الکتریکی (مؤلفه دوم) و بعد فراکتال (مؤلفه سوم) است (جدول ۳). محور دوم نشان می‌دهد این پارامترها در توصیف تأثیر تیمارها بر پایداری خاکدانه‌ها کارایی کمتری داشته‌اند. به دیگر سخن، نزدیک بودن نقاط مربوط به پارامترهای مؤلفه اول تأیید می‌کند که تأثیر تیمارها (میکروارگانیسم‌ها و بقایا) بر شاخص‌های پایداری خاکدانه، از طریق محتوای

در حالی‌که شدت MBR تحت تأثیر قارچ تریکودرما در خاک لوم رسی ۱/۱۲ برابر افزایش یافت و در خاک شنی حتی کمتر (۰/۹۷ برابر) شد. اگرچه شدت تنفس پایه میکروبی هر دو خاک در تیمار شاهد نزدیک به هم (حدود $0.14 \mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$) بود اما تحت تأثیر تیمارها میانگین شدت MBR در خاک لوم رسی به $1.29 \mu\text{gC-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ day}^{-1}$ رسید که ۱/۵۶ برابر مقدار آن در خاک لوم شنی بود (شکل ۴). از آنجا که شدت تنفس تنها در پایان دوره گرماگذاری اندازه‌گیری شده و در طول دوره نیز تهویه انجام نشده است، به نظر می‌رسد که در خاک رسی به دلیل تهویه کمتر تنفس همچنان در سطح بالایی ادامه دارد. کربن آلی بالاتر (شکل ۱) و درصد بالای خاکدانه‌های پایدار (شکل ۳) در این خاک در مقایسه با خاک شنی تا اندازه‌ای این موضوع را تأیید می‌کند. از آنجا که بقایای آلی از مهم‌ترین عوامل تشکیل خاکدانه‌ها هستند، شدت تجزیه آنها در طول زمان باعث تخریب خاکدانه‌ها می‌شود.

در پژوهشی ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2022) مشاهده کردند که پس از افزودن قارچ تریکودرما به یک خاک رسی در دو هفته نخست شدت معدنی شدن چشم‌گیر بود و پس از آن کاهش یافته و نسبتاً پایدار ماند. اگرچه در پژوهش آنها خاک دیگری مورد مقایسه قرار نگرفته اما بررسی شدت تنفس در خاکدانه‌های با اندازه‌های مختلف نشان داد که بیشترین و کمترین شدت تنفس به ترتیب در خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ mm و کوچک‌تر از mm ۰/۵۳ ثبت شد. گزارش شده که سه عامل کیفیت بقایا، محیط فیزیکیوشیمیایی که در آن تجزیه رخ می‌دهد و نوع میکروارگانیسم‌ها تجزیه بقایا را تنظیم می‌کنند. خاکدانه‌هایی که تحت تأثیر پلی‌ساکاریدها تشکیل شده‌اند حداکثر شش ماه پایدار می‌مانند. از سویی، تنها ۲ تا ۳۰ درصد مواد آلی خاک بخش فعال را تشکیل می‌دهند که عمدتاً متشکل از زیست‌توده میکروبی و متابولیت‌های آنها است. این بخش زمان بازچرخ ۰/۸ تا ۵ سال را دارد و ۱۰ تا ۳۰ درصد مسئول حمایت از میکروارگانیسم‌های خاک است. این بخش اگرچه بخش کوچکی از کل ماده آلی خاک را تشکیل می‌دهد، اما منبع اصلی مواد مغذی و انرژی برای میکروارگانیسم‌ها و گیاهان و منبع اصلی برای شار دی اکسید کربن از خاک است. با این حال، تغییر تولید ماده آلی و کیفیت بقایا می‌تواند بر تجزیه میکروبی و

روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مشاهده کردند که فاکتور اول در محور افقی ۵۴/۲ درصد تغییرپذیری را توجیه کرد. آنها نتیجه گرفتند که پارامترهای مربوط به فعالیت بیولوژیک که شامل ترشح پلی‌ساکاریدها، طول هیف قارچ‌ها و زیست‌توده میکروبی بود، در پایداری خاکدانه‌ها تعیین کننده هستند.

کربن آلی و تنفس میکروبی خاک بوده است. در سوی دیگر، مؤلفه‌های دوم و سوم با توجه به زاویه نزدیک ۹۰ درجه با ویژگی‌های دیگر، تحت تأثیر تیمارها در این پژوهش قرار نگرفتند. در پژوهشی آبیوس و همکاران (Abives *et al.*, 2007) در بررسی نقش عوامل متصل کننده بیولوژیک در طی تجزیه مواد آلی بر پایداری خاکدانه‌ها به



شکل ۵- روابط ویژگی‌های خاک مورد مطالعه.

EC، قابلیت هدایت الکتریکی، MWD؛ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، MBR؛ تنفس پایه میکروبی، OC؛ کربن آلی، TS؛ مقاومت کششی، GMD، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، WSA؛ خاکدانه‌های پایدار در آب و F؛ بعد فراکتال است

Figure 5. Relationships of the studied soil characteristics.

EC; Electrical conductivity, MWD; Mean weight diameter, MBR; Microbial basal respiration, OC; Organic carbon, TS; Tensile strength, GMD; Geometric mean diameter, WSA; Water stable aggregates, and F; Fractal dimension

جدول ۳- اثرات ویژگی‌های مورد مطالعه روی مؤلفه‌های اصلی

Table 3. Effects of the studied characteristics on the main components

Studied characteristics	First component	Second component	Third component
Organic carbon	0.950	0.000	0.002
pH	0.001	0.839	0.044
Electrical conductivity	0.130	0.700	0.051
Mean weight diameter	0.836	0.001	0.080
Microbial basal respiration	0.858	0.003	0.045
Water stable soil aggregates	0.913	0.010	0.000
Tensile strength	0.449	0.007	0.239
Geometric mean diameter	0.875	0.006	0.048
Fractal dimension	0.127	0.305	0.377

The bold values show the greatest effect of the studied characteristics on the desired component.

شاهد در تیمارهای مختلف بقایای آلی و میکروارگانیزم‌ها معنی‌دار بود. از میان دو عامل تیمار بقایای آلی، کود دامی اثر بیشتری را بر افزایش خصوصیات خاک و بهبود وضعیت پایداری ساختمان خاک در مقایسه با کاه و کلش گندم داشت. از میان دو تیمار میکروارگانیزم‌ها، باکتری باسیلوس

نتیجه‌گیری کلی

به‌طور کلی نتایج نشان داد که محتوای کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، تنفس پایه میکروبی، پایداری خاکدانه‌ها در آب و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها جزو پارامترهایی بودند که تفاوت مقادیر آنها نسبت به نمونه

افزایش معنی‌دار داشته و این مورد می‌تواند نشان دهنده کاربرد مطلوب این تیمارها برای افزایش پایداری ساختمان یک خاک باشد. ضمن اینکه، کاربرد کود گاوی همراه با باکتری *باسیلوس* با کاهش شدت تنفس پس از شش ماه سبب ارتقای محتوای کربن آلی و پایداری ساختمان خاک در بافت لوم شنی شد. بنابراین، توصیه می‌شود برای حفاظت از این خاک‌ها این روش مدیریتی در شرایط میدانی با در نظر گرفتن وضعیت محیطی همانند دما و بارش بررسی شود.

اثر بیشتری را بر افزایش خصوصیات خاک و بهبود وضعیت پایداری ساختمان خاک در مقایسه با قارچ *تریکودرما* داشت. نتایج نشان داد که ارتباط مثبتی بین فاکتورهای بقایای آلی، میکروارگانیسیم‌ها و پارامترهای کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، تنفس پایه میکروبی، پایداری خاکدانه‌ها در آب، مقاومت کششی و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها وجود دارد. شاخص‌های منعکس‌کننده وضعیت پایداری ساختمان خاک مانند میانگین وزنی قطر خاکدانه، پایداری خاکدانه‌ها در آب و میانگین هندسی قطر خاکدانه، همگی با اعمال تیمارهای بقایای آلی و میکروارگانیسیم‌ها

References

- Abiven S., Menasseri S., Angers D.A., and Leterme P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science*. 58(1): 239-247.
- Abrishamkesh S., zahmatkesh M., Yaghmaeian N., and Asadi H. 2024. Estimation and zoning of soil erodibility factor in Aliabad watershed, Roodbar, Guilan Province. *Applied Soil Research*. 11(4): 126-141. (In Persian)
- Alami Y., Achouak W., Marol C. and Heulin T. 2000. Rhizosphere soil aggregation and plant growth promotion of sunflowers by an exopolysaccharide-producing *Rhizobium* sp. strain isolated from sunflower roots. *Applied and Environmental Microbiology*. 66(8): 3393-3398.
- Alizadeh A. 2008. Water, Soil, Plant. Astane ghodse razavi, 8th edition. 353p. (In Persian)
- Amézketa E., Singer M.J., and Scow K. 1995. Stabilization of Artificial Aggregates through the Growth of Bacteria and their Production of Polysaccharides. In *Agronomy Abstracts ASA*, Madison, WI, pp. 289-290.
- Ataee A., Gorji M., and Parvizi Y. 2014. Evaluation of the suitability of fractal dimension of soil aggregates in assessing different soil management practices. *Iranian Journal of Soil Research*. 28:4. 701-712. (In Persian)
- Aulakh M.S., Khera T.S., Doran J.W., and Bronson K.F. 2001. Managing crop residue with green manure, urea, and tillage in a rice-wheat rotation. *Soil Science Society of America Journal*. 65(3): 820-827.
- Baer S.G., and Birgé H.E. 2018. Soil ecosystem services: An overview. *Managing Soil Health for Sustainable Agriculture*. 1: 17-38.
- Balabane M., and Plante A.F. 2004. Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. *European Journal of Soil Science*. 55: 415-427.
- Barajas Aceves M. 2005. Comparison of different microbial biomass and activity measurement methods in metal- contaminated soil. *Journal of Bioresource Technology*. 96: 1405-1414.
- Barthes B.G., Kouakoua E., Larre-Larrouy M.C., Razafimbelo T.M., de Luca E.F., Azontonde A., Neves C.S., de Freitas P.L., and Feller C.L. 2008. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*. 143:1. 14-25.
- Bast A., Wilcke W., Graf F., Lüscher P., and Gärtner H. 2015. A simplified and rapid technique to determine an aggregate stability coefficient in coarse grained soils. *Catena*. 127: 170-176.
- Behera S.K., and Panda R.K. 2009. Effect of fertilization and irrigation schedule on water and fertilizer solute transport for wheat crop in a sub-humid sub-tropical region. *Agriculture Ecology Environmental*. 130: 141-155.
- Bei S., Zhang Y., Li T., Christie P., Li X. and Zhang J. 2018. Response of the soil microbial community to different fertilizer inputs in a wheat-maize rotation on a calcareous soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 260: 58-69.
- Bidisha M., Joerg R. and Yakov K. 2010. Effects of aggregation processes on distribution of aggregate size fractions and organic C content of a long-term fertilized soil. *European Journal of Soil Biology*. 46(6): 365-370.

- Bird J.A., Horwath W.R., Eagle A.J. and van Kessel C. 2001. Immobilization of fertilizer nitrogen in rice: effects of straw management practices. *Soil Science Society of America Journal*. 65(4): 1143-1152.
- Blanco-Canqui H., and Lal R. 2009. Extent of soil water repellency under long-term no-till soils. *Geoderma*. 149: 171–180.
- Borie F., Rubio R., and Morales A. 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 8: 9-18.
- Bouajila A., and Gallali T. 2010. Land use effect on soil and particulate organic carbon, and aggregate stability in some soils in Tunisia. *African Journal of Agricultural Research*. 5(8): 764-774.
- Brady N.C., and Weil R.R. 2008. *The Nature and Properties of Soils*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1082p.
- Bronick C. J., and Lal R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3-22.
- Carter M.R., and Gregorich E.G. 2007. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. CRC press. 1264p.
- Cavalcante R.S., Lima H.L.S., Pinto G.A.S., Gava C.A.T., and Rodriguez S. 2008. Effect of moisture on *Trichoderma* conidia production on corn and wheat bran by solid state fermentation. *Microbiol Biotechnology*. 24: 319-325.
- Chrenkova K., Mataix-Solera J., Dlapa P., and Arcenegui V. 2014. Long-term changes in soil aggregation comparing forest and agricultural land use in different Mediterranean soil types. *Geoderma*, 235: 290-299.
- Denef K., Six J., Merckx R., and Paustian K. 2004. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*. 68:6. 1935-1944.
- Dexter A.R., and Kroesbergen B. 1985. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agriculture Engineering Research*. 31: 139-147.
- Dhiman S., Kumar S., Baliyan N., Dheeman S., and Maheshwari D.K. 2021. Cattle dung manure microbiota as a substitute for mineral nutrients and growth management practices in plants. *Endophytes: Mineral Nutrient Management*. 3: 77-103.
- Dorostkar V., and Vali R. 2018. Effect of grape leaves and pomegranate peel on soil structural stability and water repellency in different salinity levels. *Journal of Agricultural Engineering*. 40: 29–46. (In Persian)
- Duchicela J., Sullivan T.S., Bontti E., and Bever J.D. 2013. Soil aggregate stability increase is strongly related to fungal community succession along an abandoned agricultural field chronosequence in the Bolivian Altiplano. *Journal of Applied Ecology*. 50: 1266–1273.
- Fokom R., Teugwa mofor C., Nana Wakam L., Ngonkeu Megapche E.L., Tchameni S., Nwaga D., Rillig C.M., and Amvam Zollo P.H. 2013. Glomalin, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use changes in the humid forest zone in south Cameroon. *Applied Ecology and Environmental Research*. 11:4 581-592.
- Fu B., Chen L., Huang H., Qu P., and Wei Z. 2021. Impacts of crop residues on soil health: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*. 33:1.164-173.
- Gerzabek M.H., Haberhauer G. and Kirchmann H. 2001. Soil organic matter pools and carbon- 13 natural abundances in particle- size fractions of a long- term agricultural field experiment receiving organic amendments. *Soil Science Society of America Journal*. 65(2): 352-358.
- Grossman R.B., and Reinsch T.G. 2002. Bulk density and linear extensibility. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 4, 2nd Ed.* American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, Madison, WI: pp.201-228.
- Hartmann M., Frey B., Mayer J., Mader P., and Widmer F. 2015. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *ISME Journal*. 9: 1177–1194.
- Hashempour E., Farhangi M., Ghorbanzadeh N., Fazeli Sangani M. 2020. The effect of *Bacillus* bacteria on phosphorus release from oil refinery plant-solid waste in a calcareous soil. *Water and Soil*. 34:1. 129-143. (In Persian)
- Hashim Z.E., Alzubaidi L.A., and Al-Madhhachi A.T. 2020. The Influence of Microbiology on Soil Aggregation Stability. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 870: 012110.
- Iovieno P., Morra L., Leone A., and Pagano L. 2009. Effect of organic and mineral fertilizers on soil respiration and enzyme activities of two Mediterranean horticultural soils. *Biology and Fertility of Soils*. 45: 555-561.

- Kemper W.D., and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1*, 2nd Ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, Madison, WI: pp.425 – 442.
- Khazai A., Mosaddeghi M.R., and Mahboubi A.A. 2008. Impacts of test conditions, soil organic matter, clay and calcium carbonate contents on mean weight diameter and tensile strength of aggregates of some Hamedan soils. *Journal of Crop Production and Processing*. 12: 123-134. (In Persian)
- Kristiansen S.M., Schjønning P., Thomsen I.K., Olesen J.E., Kristensen K., and Christensen B.T. 2006. Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture. *Geoderma*. 137: 147-154.
- Lehmann A., and Rillig M.C. 2015. Understanding mechanisms of soil biota involvement in soil aggregation: A way forward with saprobic fungi?. *Soil Biology and Biochemistry*. 88: 298-302.
- Li J.T., Zhong X.L., Wang F., and Zhao Q.G. 2011. Effect of poultry litter and livestock manure on soil physical and biological indicators in a rice-wheat rotation system. *Plant, soil and Environment*. 57: 351–356.
- Li-Xian Y., Guo-Liang L., Shi-Hua T., Gavin S., and Zhao-Huan H. 2007. Salinity of animal manure and potential risk of secondary soil salinization through successive manure application. *Science of the Total Environment*. 383(1-3): 106-114.
- Macias-Corral M.A., Cueto-Wong J.A., Morán-Martínez J., and Reynoso-Cuevas L. 2019. Effect of different initial C/N ratio of cow manure and straw on microbial quality of compost. *International Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture*. 8: 357–365
- Mason J. 2003. *Sustainable Agriculture*. Landlinks Press. 205p.
- Mekki A., Arous F., Aloui F., and Sayadi S. 2013. Disposal of agro-industrials wastes as soil amendments. *American Journal of Environmental Science*. 9:6. 458-469.
- Mola ali abasiyan S., Hemati A., and Eskandarnasl A. 2024. Effect of some addictive organic compounds on soil microbial population and nutrients concentration in maize (*Zea mays* L.). *Applied Soil Research*. 12(1): 1-14. (In Persian)
- Naylor D., DeGraaf S., Purdom E., and Coleman-Derr D. 2017. Drought and host selection influence bacterial community dynamics in the grass root microbiome. *The ISME Journal*. 11(12): 2691-2704.
- Nimmo J.R., and Perkins K.S. 2002. Aggregate stability and size distribution. In: Warren, A.D. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. *Soil Science Society of America Journal*. 317-328.
- Obalum S.E., Uteau-Puschmann D., and Peth S. 2019. Reduced tillage and compost effects on soil aggregate stability of a silt-loam Luvisol using different aggregate stability tests. *Soil and Tillage Research*. 189: 217-228.
- Rabot E., Wiesmeier M., Schlüter S., and Vogel H.J. 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*. 314: 122-137.
- Rousta M.J., and Enayati K. 2013. Effects of organic and mineral amendments on mean weight diameter of soil aggregates. *Watershed Management Researches (Pajouhesh-Va-Sazandegi)*. 26:1. 24-30. (In Persian)
- Saljnikov E., Cakmak D., and Rahimgalieva S. 2013. Soil organic matter stability as affected by land management in steppe ecosystems. *Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment*. 10: 269-310.
- Shao H.Y., Li Z.Y., Liu D., Li Y.F., Lu L., Wang X.D., Zhang A.F., and Wang Y.L. 2019. Effects of manure application rates on the soil carbon fractions and aggregate stability. *Environmental Science*. 40: 4691–4699.
- Sharma S.K., Ramesh A., Sharma M.P., Joshi O.P., Govaerts B., Steenwerth K.L., and Karlen D.L. 2010. Microbial community structure and diversity as indicators for evaluating soil quality. In: Lichtfouse, E. (Ed.), *Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture*. Springer, Netherlands. pp. 317–358.
- Singha T.K. 2012. Microbial extracellular polymeric substances: production, isolation and applications. *IOSR Journal of Pharmacy*. 2(2): 271-281.
- Six J., Bossuyt H., Degryze S., and Denef K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*. 79(1): 7-31.
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., and Paustian K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 241: 155-176.

- Tajik F., Rahimi H., and Pazira E. 2003. Effect of electrical conductivity and sodium adsorption ratio of water on aggregate stability in soils with different organic matter content. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 5: 67–75. (In Persian)
- Tisdall M., Nelson S., Wilkinson K., Smith S., and McKenzie B. 2010. Stabilization of soil against wind erosion by six saprotrophic fungi. *Soil Biology and Biochemistry*. 50: 134-141.
- Umer M.I., and Rajab S.M. 2012. Correlation between aggregate stability and microbiological activity in two Russian soil types. *Eurasian Rasian Journal of Soil Science*. 1: 45-50.
- Wang Q.Q., Liu L.L., Yu L.I., Song Q.I.N., Wang C.J., Cai A.D., Lei W.U., Minggang X.U., and Zhang W.J. 2020. Long-term fertilization leads to specific PLFA finger-prints in Chinese Hapludults soil. *Journal of Integrative Agriculture*. 19(5):1354-1362.
- Whalen J.K., Hu Q., and Liu A. 2003. Compost applications increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*. 67: 1842–1847.
- Yazdanpanah A., and Bakhtiyari M. 2023. Study of manure mixing effects by different tillage methods on soil bulk density, chemical properties of soil and sugarbeet yield. *Applied Soil Research*. 11(3): 88-97. (In Persian)
- Yilmaz E., and Sönmez M. 2017. The role of organic/bio-fertilizer amendment on aggregate stability and organic carbon content in different aggregate scales. *Soil and Tillage Research*. 168: 118-124.
- Zhang Z., Wei C., Xie D., Gao M., and Zeng X. 2008. Effects of land use patterns on soil aggregate stability in Sichuan Basin, China. *Particuology*. 6:3.157-166.
- Zhu L., Cao M., Sang C., Li T., Zhang Y., Chang Y. and Li L., 2022. Trichoderma bio-fertilizer decreased C mineralization in aggregates on the southern North China Plain. *Agriculture*. 12(7): 1001.