*Journal of Soil Management and Sustainable Production*

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

**Print ISSN: 2322-1267**
**Online ISSN: 2322-1275**

# Effect of Application of Biochar and Wood Vinegar on Penetration Resistance and Structure Stability of Soil under Forage Corn Cultivation

**Nasrin Karimian Shamsabadi[1], Shoja Ghorbani Dashtaki[*2], Hamidreza Motaghian[3], Ramin Iranipour[4], Bijan Khalili Moghadam[5]**

1. Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, University of ShahreKord, Shahre Kord, Iran. E-mail: karimian.nasrin1368@gmail.com
2. Corresponding Author, Dept. of Soil Science, University of ShahreKord, ShahreKord, Iran. E-mail: shoja2002@yahoo.com
3. Dept. of Soil Science, University of ShahreKord, ShahreKord, Iran. E-mail: motaghian.h@yahoo.com
4. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Chaharmahal va Bakhtiari, ShahreKord, Iran. E-mail: ramin.iranipour@gmail.com
5. Dept. of Soil Science, University of Khuzestan, Khuzestan, Iran. E-mail: moghaddam623@yahoo.com

**Article Info**

**Article type:**
Full Length Research Paper

**Article history:**
Received: 04.19.2022
Revised: 08.31.2022
Accepted: 09.03.2022

**Keywords:**
Biochar,
Penetration resistance,
Structure Stability,
Wood Vinegar

**ABSTRACT**

**Background and Objectives:** The application of organic matter and soil conditioners is essential to maintain soil efficiency and achieve sustainable agriculture. The aim of this study was to investigate the effect of application of biochar and wood vinegar on penetration resistance and stability of soil aggregates under forage corn cultivation.

**Materials and Methods:** For this purpose, a study was conducted in greenhouse conditions at ShahreKord University. The experiment was performed as a factorial experiment in a completely randomized design with 30 treatments in 3 replications. The studied treatments included wood vinegar in 6 amounts of zero ($W_0$), 0.02 ($W_1$), 0.04 ($W_2$), 0.1 ($W_3$), 0.2 ($W_4$) and 0.4 ($W_5$) g/Kg (first factor) and conditioner including raw material (pomegranate and plum wood) in 2 levels 1 ($B_{01}$) and 2 ($B_{02}$) weight-weight percentage and biochar in 2 levels 1 ($B_1$) and 2 ($B_2$) weight-weight percentage (second factor) was applied. Soil penetration resistance of the undisturbed samples at 0, 10, 50, 100, 500, 1000 and 1500 KPa matric suctions by penetrometer and mean weight diameter of aggregates by dry sieving was measured.

**Results:** The results showed that the main effect of wood vinegar and conditioner (raw material (pomegranate and plum wood) and biochar) application and the interaction effect of wood vinegar and conditioner (raw material (pomegranate and plum wood) and biochar) application on bulk density and aggregate stability and soil penetration resistance at 0, 10, 50 and 500 KPa matric suctions were significant at the level of 1%. The application of wood vinegar and raw material increased bulk density and aggregate stability that the highest aggregate stability was related to $W_2B_2$ treatment, which increased the stability of aggregates by150%. Also, the application of wood vinegar and raw material increased the reduction of soil penetration resistance. So that at 0, 10, 50, 100 and 500 KPa matric suctions, the greatest decrease in penetration resistance was related to $W_5B_2$ treatment, which soil penetration resistance was observed in 81.7, 82.89, 86.89, 78.65 and 78.65% of the control.

**Conclusion:** Wood vinegar and biochar has high organic carbon, which is effective in increasing the aggregates stability and creating larger

aggregates and increasing mean weight diameter of aggregates and the cause can be attributed to the increase of the bonding force between the aggregates by the compounds in organic matter. Also, biochar and wood vinegar reduced soil penetration resistance by increasing soil organic carbon and reducing soil bulk density.

Cite this article: Karimian Shamsabadi, Nasrin, Ghorbani Dashtaki, Shoja, Motaghian, Hamidreza, Iranipour, Ramin, Khalili Moghadam, Bijan. 2023. Effect of Application of Biochar and Wood Vinegar on Penetration Resistance and Structure Stability of Soil under Forage Corn Cultivation. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 12 (4), 99-116.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20131.2057
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار

شاپا چاپی: ۱۲٦۷-۲۳۲۲

شاپا آنلاین: ۱۲۷۵-۲۳۲۲

# اثر کاربرد زغال زیستی و سرکه چوب بر مقاومت‌فروروی و پایداری خاکدانه‌های خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای

نسرین کریمیان شمس‌آبادی[۱]، شجاع قربانی دشتکی*[۲]، حمیدرضا متقیان[۳]، رامین ایرانی‌پور[٤]، بیژن خلیلی‌مقدم[٥]

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: karimian.nasrin1368@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: shioja2002@yahoo.com

۳. گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: motaghian.h@yahoo.com

٤. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، شهرکرد. ایران. رایانامه: ramin.iranipour@gmail.com

٥. گروه علوم خاک، دانشگاه خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: moghaddam623@yahoo.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله کامل علمی- پژوهشی

**تاریخ دریافت:** ۱٤۰۱/۰۱/۳۰

**تاریخ ویرایش:** ۱٤۰۱/۰٦/۰۹

**تاریخ پذیرش:** ۱٤۰۱/۰٦/۱۲

**واژه‌های کلیدی:**
پایداری خاکدانه‌ها،
زغال زیستی،
سرکه چوب،
مقاومت‌فروروی خاک

**چکیده**

**سابقه و هدف:** برای حفظ کارایی خاک و دستیابی به کشاورزی پایدار استفاده از مواد آلی و اصلاح‌کننده‌های خاک ضروری است. هدف از این پژوهش، مطالعه تأثیر کاربرد زغال زیستی و سرکه چوب بر مقاومت‌فروروی و پایداری خاکدانه‌های خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای بود. بدین‌منظور پژوهشی در شرایط گلخانه‌ای در دانشگاه شهرکرد اجرا گردید.

**مواد و روش‌ها:** آزمایش به‌صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل ۳۰ تیمار در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای مورد بررسی شامل سرکه چوب در شش مقدار صفر ($W_0$)، ۰/۰۲ ($W_1$)، ۰/۰٤ ($W_2$)، ۰/۱ ($W_3$)، ۰/۲ ($W_4$) و ۰/٤ ($W_5$) گرم در کیلوگرم (فاکتور اول) و ماده اصلاحی شامل ماده خام (چوب درختان انار و آلو) در دو سطح ۱ ($B_{01}$) و ۲ ($B_{02}$) درصد جرمی و زغال زیستی در دو سطح ۱ ($B_1$) و ۲ ($B_2$) درصد جرمی (فاکتور دوم) بود. مقاومت‌فروروی خاک بر روی نمونه‌های دست‌نخورده در مکش‌های ۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال به‌وسیله دستگاه فروسنج و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نیز به‌وسیله الک خشک اندازه‌گیری شد.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد اثر اصلی کاربرد سرکه چوب و ماده اصلاحی (شامل ماده خام (چوب درختان انار و آلو) و زغال زیستی) و اثر متقابل کاربرد سرکه چوب و ماده اصلاحی (ماده خام و سرکه چوب) بر جرم مخصوص ظاهری خاک، پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت‌فروروی خاک در مکش‌های ۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. به‌طوری که کاربرد سرکه چوب و ماده اصلاحی باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک و

افزایش پایداری خاکدانه‌ها گردید، بیش‌ترین پایداری خاکدانه مربوط به تیمار $W_2B_2$ بود که پایداری خاکدانه‌ها را ۱۵۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. هم‌چنین کاربرد هم‌زمان سرکه چوب و ماده اصلاحی باعث کاهش مقاومت‌فروروی خاک شد. به‌نحوی‌که در مکش‌های ۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال بیش‌ترین کاهش مقاومت‌فروروی مربوط به تیمار $W_5B_2$ (تیمار کاربرد هم‌زمان ۰/٤ گرم در کیلوگرم سرکه چوب و ۲ درصد جرمی زغال زیستی) بود که به ترتیب مقاومت‌فروروی خاک ۸۱/۷۰، ۸۲/۸۹، ۸٦/۸۹، ۷۸/٦۵ و ٦۵/۵۹ درصد در مقایسه با شاهد کاهش یافت.

**نتیجه‌گیری:** سرکه چوب و زغال زیستی دارای کربن‌آلی بالایی هستند. که به‌دلیل نقش مواد آلی در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و ایجاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر و افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در اثر افزایش نیروی چسبندگی بین خاکدانه‌ها توسط ترکیبات موجود است. بنابراین، زغال زیستی و سرکه چوب از طریق افزایش کربن‌آلی خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک باعث کاهش مقاومت‌فروروی خاک شدند.

**استناد**: کریمیان شمس‌آبادی، نسرین، قربانی دشتکی، شجاع، متقیان، حمیدرضا، ایرانی‌پور، رامین، خلیلی‌مقدم، بیژن (۱۴۰۱). اثر کاربرد زغال زیستی و سرکه چوب بر مقاومت‌فروروی و پایداری خاکدانه‌های خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای. *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۲ (۴)، ۱۱۶-۹۹.

DOI: 10.22069/EJSMS.2023.20131.2057

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

## مقدمه

وجود بقایای گیاهی بعد از برداشت محصولات زراعی مشکلات زیادی برای کشاورزان به‌وجود می‌آورد. از جمله راه‌کارها جهت استفاده از بقایای کشاورزی که مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است، گرماکافت[1]، یعنی تجزیه زیست‌توده در اثر حرارت آن‌ها است (۱). زمانی که این فرآیند در شرایط بدون اکسیژن یا با مقادیر جزئی اکسیژن رخ دهد، زغال زیستی تولید می‌شود (۲). محصولات گرماکافت مانند سرکه چوب[2] (۳) و زغال زیستی[3] (٤) می‌تواند جهت اصلاح خاک و کشاورزی ارگانیک کاربردی باشند.

سرکه چوب مایعی چسبناک و اسیدی بوده (۵) که طی فرایند سرد و مایع کردن گازهای حاصل از گرماکافت زغال چوب به‌دست می‌آید و شامل ۲۰۰ نوع ترکیب شیمیایی است (٦). سرکه چوب صد درصد آلی بوده و برای انسان، حیوانات، گیاهان و محیط زیست ماده‌ای سالم می‌باشد. این ماده مخلوطی از ترکیبات آلی است که برای کشاورزی ارگانیک بسیار مناسب است و باعث بهبود کیفیت خاک (۷)، کنترل علف هرز، تسهیل رشد گیاه و توسعه بیش‌تر ریشه می‌گردد (۸). سرکه چوب خاصیت ضدقارچی و خاصیت آنتی‌اکسیدانی داشته و به راحتی قابل تولید بوده و اثرات مخرب زیست‌محیطی و نامطلوب بر موجودات زنده و محیط ندارد (۹).

افزودن مواد آلی مانند سرکه چوب و زغال زیستی به خاک می‌تواند بر کیفیت فیزیکی خاک تأثیرگذار باشد و موجب تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک گردد، که از جمله این اثرات، تأثیر بر مقاومت فروروی خاک (٤، ۱۰) و پایداری خاکدانه‌ها (۱۱) است. مقاومت فروروی خاک از جمله ویژگی‌های ساختمانی حساس به مدیریت خاک بوده (٤) و در رشد ریشه تأثیرگذار می‌باشد. مقاومت فروروی خاک یکی از پویاترین ویژگی‌های مکانیکی خاک است که اطلاع از آن برای شخم، رشد گیاه و فعالیت‌های بیولوژیکی خاک مهم می‌باشد. مقاومت زیاد خاک در برابر فروروی، رشد ریشه را محدود می‌سازد، نفوذپذیری خاک را کاهش، رواناب و تلفات خاک را افزایش داده و اثر نامطلوبی بر کیفیت محیط زیست دارد (۱۲). عوامل متعددی بر آن تأثیرگذار هستند. از جمله این عوامل می‌توان به تراکم، تخلخل، بافت خاک، ساختمان خاک، عوامل سیمانی‌کننده، ماده آلی خاک، رطوبت خاک (۱۳) و عملیات خاکورزی (۱۰) اشاره کرد.

مواد آلی خاک از طریق افزایش پایداری ساختمان خاک و خاصیت الاستیسیته خاک مانند یک بالشت در مقابل نیروی وارده عمل کرده و باعث کاهش تراکم‌پذیری خاک می‌شود. هم‌چنین مواد آلی دامنه رطوبتی مناسب برای تردد ماشین‌آلات را افزایش می‌دهد و باعث کاهش مقاومت فروروی خاک می‌گردد (١٤). اوهیو و همکاران (١٩٩٤) گزارش کردند استفاده از مواد آلی، باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری، مقاومت‌فروروی و مقاومت برشی خاک می‌شود و به‌طورکلی تراکم‌پذیری خاک با کاربرد مواد آلی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (١٤). این تأثیر به‌ویژه در خاک‌های سنگین (رسی) که عملیات کشاورزی در آن‌ها در رطوبت‌های بالا و پایین دشوار است، باعث سهولت مدیریت خاک می‌شود. احمد و همکاران (۲۰۱۷) بیان نمودند افزودن زغال زیستی به خاک باعث کاهش مقاومت فروروی و تنش برشی خاک متراکم شده گردید (۱۵).

مامان و همکاران (۲۰۰۷) در مطالعه تأثیر درجه فشردگی و ماده آلی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک گزارش کردند، مقدار جرم مخصوص ظاهری و مقاومت‌فروروی خاک با افزایش ماده آلی خاک، کاهش یافت (١٦). شیرانی و همکاران (۲۰۱۱) طی

1- Pyrolysis
2- Wood Vinegar
3- Biochar

بررسی تأثیر سیستم خاکورزی و کود آلی بر مقاومت‌فروروی خاک گزارش کردند، اضافه نمودن کود دامی در لایه رویین سبب کاهش مقاومت‌فروروی خاک شد (۱۰). موجدی و همکاران (۲۰۱۱) نیز بیان نمودند، افزودن ماده آلی باعث کاهش مقاومت فروروی خاک می‌گردد (۱۷). هم‌چنین لیو و همکاران (۲۰۱۷) عنوان کردند افزودن زغال زیستی به خاک باعث کاهش مقاومت‌فروروی خاک شده و تنش ناشی از تراکم خاک در گندم را کاهش داد (۱۸). محمدی و خادم‌الرسول (۲۰۲۰) بیان نمودند افزودن زغال زیستی به خاکی با آلودگی نفتی، مقاومت فروروی خاک را نسبت به شاهد کاهش داد (۱۹).

پایداری خاکدانه‌ها یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی عملکرد خاک است که برای تعیین کیفیت فیزیکی خاک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۲۰). حضور خاکدانه‌های خاک که عمدتاً مسئول ساختار خاک هستند، برای عملکرد خاک و بهره‌وری کشاورزی مهم است. هم‌چنین خاکدانه‌های پایدار در آب می‌توانند از نظر فیزیکی، ماده آلی خاک را تثبیت کرده و آن را از تجزیه محافظت نماید (۲۱). انابی و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند مواد آلی در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و ایجاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر مؤثر است و افزایش مقدار وزنی قطر خاکدانه را مرتبط با افزایش نیروی چسبندگی بین خاکدانه‌ها توسط ترکیبات موجود در مواد آلی دانستند (۲۲). افزایش ماده آلی از ۲/۳ به ۳/۵ درصد منجر به افزایش اندازه خاکدانه‌های با قطر ۲ تا ٤ و ٤ تا ٦ میلی‌متری شده که در نتیجه آن کاهش فرسایش و هدررفت خاک و افزایش پایداری خاکدانه‌ها روی می‌دهد (۲۳).

زغال زیستی ماده‌ای متخلخل و حاوی مواد آلی زیاد است که افزودن آن به خاک باعث افزایش پایداری ساختمان خاک و افزایش تخلخل می‌گردد (۲٤). قربانی و همکاران (۲۰۱۹) بیان نمودند افزودن زغال زیستی تهیه شده از شلتوک برنج در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در مقادیر ۰، ۱ و ۳ درصد به دو خاک با بافت‌های لوم شنی و رسی اضافه شده باعث بهبود میانگین وزنی و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، پایداری و بعد فرکتال خاکدانه‌ها در خاک رسی شده، ولی تأثیری بر ویژگی‌های مذکور در خاک با بافت لوم شنی نداشت (۲۵). هم‌چنین ابریشم‌کش و همکاران (۲۰۲۰) در یک پژوهش گلخانه‌ای سوسپانسیون بیوچار تهیه شده از ضایعات هرس درخت زبان گنجشک و شلتوک برنج را در مقادیر ۰، ۰/۷ و ۱/٤ درصد به خاک‌های با بافت لوم و لوم شنی حساس به فرسایش اضافه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد تأثیر زغال زیستی مورد مطالعه باعث افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های تر در خاک لوم شد (۲٦).

نسیمی و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش کردند زغال زیستی با داشتن تخلخل ذاتی زیاد و کربن آلی بالا، باعث بهبود تخلخل و پایداری ساختمان خاک می‌گرددکه این نقش با مقدار مصرف زغال زیستی و مدت زمان‌های مختلف بعد از کاربرد زغال زیستی، اثرات متفاوتی دارد. بنابراین می‌توان از زغال زیستی جهت بهبود ساختمان خاک‌های تخریب یافته و ضعیف استفاده نمود (۲۱). هم‌چنین اصولی و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند افزودن زغال زیستی تهیه شده از کاه گندم، ورمی‌کمپوست و چوب زردآلو باعث افزایش تخلخل کل خاک، افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و کاهش مقاومت فروروی خاک گردید (۲۰).

امروزه نقش سرکه چوب در بهبود کیفیت خاک، افزایش عناصر غذایی خاک، و هم‌چنین تأثیر زغال زیستی بر بهبود وبژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و بهبود شرایط رشد گیاه به اثبات رسیده و به این علت مورد توجه پژوهش‌گران زیادی در سرتاسر جهان واقع شده است. با این وجود، اغلب مطالعات

انجام شده روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی زغال زیستی بود و مطالعاتی در رابطه با تأثیر استفاده از سرکه چوب و کاربرد زغال زیستی و سرکه چوب بر مقاومت‌فروروی و پایداری خاکدانه‌ها انجام نشده است. هم‌چنین از آنجائی که اغلب خاک‌های ایران با اقلیم خشک و نیمه خشک، دارای ماده آلی کم‌تر از یک درصد می‌باشند، این مسأله می‌تواند باعث تضعیف کیفیت فیزیکی خاک به‌ویژه از لحاظ پایداری ساختمان و مقاومت فروروی خاک گردد، که کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی مانند سرکه چوب و زغال زیستی می‌توانند باعث بهبود کیفیت فیزیکی خاک شود. از این‌رو هدف از این پژوهش مطالعه تأثیر کاربرد توأم زغال زیستی و سرکه چوب بر مقاومت‌فروروی و پایداری خاکدانه‌های خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای بود.

## مواد وروش‌ها

نمونه خاک مورد مطالعه از اراضی دانشگاه شهرکرد واقع در استان چهارمحال و بختیاری از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری برداشته شد. این منطقه دارای اقلیم نیمه خشک (به روش دومارتن) در طول تقریبی ۵۰ درجه و ٤۹ دقیقه و ۸ ثانیه و عرض ۳۲ درجه و ۲۱ دقیقه و ۲۸ ثانیه شمالی واقع در بخش مرکزی زاگرس است. رژیم رطوبتی و حرارتی در این منطقه به‌ترتیب زریک و مزیک است. نمونه خاک جمع‌آوری شده، پس از هوا خشک شدن از الک ٤ میلی‌متری برای پرکردن گلدان‌ها (گلدان‌های ۱۰ کیلوگرمی با اندازه ۲۲×۲۳ سانتی‌متر) عبور داده شد.

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد اجرا گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی شامل ۳۰ تیمار در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای مورد بررسی شامل سرکه چوب در شش سطح شامل مقادیر صفر ($W_0$)، ۰/۰۲ ($W_1$)، ۰/۰٤ ($W_2$)، ۰/۱ ($W_3$)، ۰/۲ ($W_4$) و ۰/٤ ($W_5$) گرم در کیلوگرم (فاکتور اول) و ماده اصلاحی شامل ماده خام (چوب درختان انار و آلو) در دو سطح ۱ ($B_{0\ 1}$) و ۲ ($B_{0\ 2}$) درصد جرمی و زغال زیستی (زغال زیستی حاصل از چوب درختان انار و آلو) در دو سطح ۱ ($B_1$) و ۲ ($B_2$) درصد جرمی (فاکتور دوم) بود. هم‌چنین تیمار شاهد (بدون کاربرد ماده اصلاحی) نیز در نظر گرفته شد.

سرکه چوب مورد استفاده طی فرآیند گرماکافت (حداکثر دمای ٤۵۰ درجه سانتی‌گراد با مدت نگهداری ۳ ساعت) در نتیجه جمع‌آوری و تقطیر گاز حاصل از سوختن چوب درختان انار و آلو تولید شده است. مهم‌ترین ترکیبات آلی در سرکه چوب اسید استیک می‌باشد که ۳ تا ۷ درصد آن و ۵۰ تا ۷۰ درصد مواد آلی آن را تشکیل می‌دهد. دیگر ترکیبات تشکیل‌دهنده سرکه چوب آب، متانول، کتون، اتیل والرلت (استر) و ... می‌باشد. زغال زیستی مورد استفاده نیز طی فرآیند گرماکافت به‌دست آمده است. شیوه عملکرد این فرآیند بدین شکل است که چوب و یا ضایعات کشاورزی (چوب آلو و انار) درون کوره‌ای با حرارت بالا (حداکثر ٤۵۰ درجه سانتی‌گراد با مدت نگهداری ۳ ساعت) در شرایط عدم حضور اکسیژن یا به مقدار فوق‌العاده کم حرارت داده شده است (۷).

در این مطالعه، براساس ۳۰ تیمار (٦ سطح سرکه چوب و ۵ سطح ماده اصلاحی) در سه تکرار مجموعاً از ۹۰ گلدان پلاستیکی برای کشت ذرت استفاده گردید. در کف گلدان‌ها سوراخ‌هایی به‌منظور زهکشی ایجاد و فیلتر شنی (دانه‌بندی ۲ تا ٤ میلی‌متر) به ضخامت ۲ سانتی‌متر در کف گلدان قرار داده شد. برای هر گلدان از ۱۰ کیلوگرم خاک عبور کرده از الک ٤ میلی‌متری (با توجه به جرم مخصوص ظاهری مزرعه) استفاده شد.

جهت اعمال تیمارها، ماده خام اولیه در سطوح ۱ ($B_{0\ 1}$) و ۲ ($B_{0\ 2}$) درصد جرمی و زغال زیستی تهیه‌شده آسیاب شده و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری در سطوح ۱ ($B_1$) و ۲ ($B_2$) درصد جرمی به صورت دستی با نمونه خاک کاملاً مخلوط و به گلدان‌ها منتقل گردید. هم‌چنین سرکه چوب در شش مقدار شامل صفر ($W_0$)، ۰/۰۱ ($W_1$)، ۰/۰۲ ($W_2$)، ۰/۰٤ ($W_3$)، ۰/۱ ($W_4$)، ۰/۲ ($W_5$) و ۰/٤ ($W_6$) گرم در کیلوگرم خاک، برای هر گلدان محاسبه و در آب مورد نیاز برای رسیدن به ظرفیت زراعی حل و یک هفته قبل از کشت به خاک گلدان‌ها افزوده شد. ویژگی آب آبیاری به شرح جدول ذیل (جدول ۱) می‌باشد.

**جدول ۱- برخی ویژگی‌های آب آبیاری مورد استفاده.**

**Table 1. Some properties of the irrigation water in the study.**

| | | |
|---|---|---|
| 1 | کلراید Chloride | آنیون‌ها Anions ($mmoll^{-1}$) |
| 91.51 | بی‌کربنات Bicarbonate | |
| 0.31 | نیترات Nitrite | |
| 1 | کلسیم Calcium | کاتیون‌ها Cations ($mmoll^{-1}$) |
| 0.5 | منیزیم Magnesium | |
| 0.04 | سدیم Sodium | |
| 0.01 | پتاسیم Potassium | |
| 7.6 | pH | |
| 0.25 | هدایت الکتریکی Electrical Conductivity ($dSm^{-1}$) | |

بعد از اعمال تیمارهای ماده اصلاحی (ماده خام و زغال زیستی) و سرکه چوب در گلدان‌ها، بذر ذرت رقم سینجنتا تهیه‌شده در ابتدا استریل (با استفاده از هیپوکلریت سدیم ۱ درصد) و در آب خیسانده شد و بعد از جوانه‌زنی به تعداد ۵ بذر در هر گلدان کشت و پس از مدت کوتاهی با توجه به تراکم کشت ذرت علوفه‌ای ۹۰۰۰۰ بوته در هکتار در منطقه، به ۳ عدد تنک شدند. طی مراحل رشد ذرت، آبیاری به‌طور منظم انجام شد. هم‌چنین عناصر ضروری در خاک قبل از کشت تعیین (جدول ۲) و به میزان ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود اوره، ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کود سوپرفسفات ساده، ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مس، ٤ میلی‌گرم بر کیلوگرم منگنز و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم آهن در ابتدای کاشت گیاه و یا طی دوره رشد گیاه به گلدان‌ها اضافه شد. دوره کشت ۱۰۰ روزه (تا مرحله رویش گل‌آذین نر) در نظر گرفته شد.

در این پژوهش مقاومت‌فروروی خاک بر روی نمونه‌های دست نخورده در مکش‌های ۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال که برمبنای مقدار رطوبت محاسبه شده با استفاده از دستگاه صفحه شنی و صفحات فشاری، بعد از ترسیم منحنی رطوبتی تعیین گردید، به‌وسیله دستگاه فروسنج[1] مدل MP11 با زاویه مخروط ۳۰ درجه و قطر میله ۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (۲۷). اندازه‌گیری نیرو در هر سیلندر در عمق‌های ۱ تا ٤ سانتی‌متر انجام شد. سپس میانگین هندسی نقاط اندازه‌گیری شده برای محاسبه مقاومت‌فروروی خاک استفاده گردید.

1- Penetrometer

$$PR = \frac{\text{Faverage}}{Acone} \quad (۱)$$

که در آن، $F_{average}$ میانگین نیرو بر حسب نیوتن، $A_{cone}$ سطح قاعده مخروط فروسنج ($m^2$) و PR مقاومت فروروی خاک بر حسب پاسکال می‌باشد.

هم‌چنین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها[1] با استفاده از روش الک خشک اندازه‌گیری شد. ابتدا ۲۰ گرم خاک دست نخورده روی سری الک‌ها به ترتیب شامل الک‌های ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر (از بالا به پایین) ریخته شد. سپس دستگاه اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها به‌مدت ۱۰ دقیقه روشن شد. پس از خاموش کردن دستگاه، خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک وزن شد. سپس وزن شن کم گردید. شاخص MWD براساس رابطه ۲ محاسبه گردید (۲۸).

$$\text{MDW} = \sum \text{Wi Xi} \quad (۲)$$

که در آن، $X_i$ متوسط قطر خاکدانه‌ها در هر کلاس اندازه‌ای (میانگین قطر سوراخ الک‌های بالا و پایین) و $W_i$ مقدار نسبی خاکدانه‌های با قطر متوسط $X_i$ می‌باشد.

هم‌چنین جرم مخصوص ظاهری خاک به روش سیلندر (۲۹) اندازه‌گیری گردید. قبل از تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی، فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس‌ها و نرمال بودن توزیع باقی‌مانده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف- اسمیرنوف بررسی شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش Fisher-LSD و در سطح احتمال یک درصد انجام گردید.

## نتایج و بحث

جدول ۲ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه، سرکه چوب، زغال زیستی و ماده خام اولیه را نشان می‌دهد. نمونه خاک مورد مطالعه دارای pH برابر ۷/۵، بافت لوم رسی سیلتی و براساس طبقه‌بندی سازمان خواروبار جهانی (FAO) در ردیف خاک‌های غیرشور و بدون محدودیت قرار داشت (۳۰). میزان کربن آلی خاک پایین و برابر ۰/۲۲ درصد بود. هم‌چنین زغال زیستی، ماده خام اولیه و سرکه چوب کاربردی دارای pH ۸/۲ ۷/۸ و ۳/۱۱ بودند.

**جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، سرکه چوب، زغال زیستی و ماده خام مورد مطالعه.**

**Table 2. Some physicochemical properties of the soil, wood vinegar, biochar and raw material in the study.**

| ماده خام Raw material | زغال زیستی Biochar | سرکه چوب Wood vinegar | خاک Soil | واحد Unit | ویژگی Property |
|---|---|---|---|---|---|
| - | - | - | لوم رسی سیلتی Silty clay loam | - | بافت خاک Soil texture |
| - | - | - | 1.13 | ($gcm^{-3}$) | جرم مخصوص ظاهری Bulk density |
| 7.8 | 8.2 | 3.11 | 7.5 | - | اسیدیته pH (1: 2) |
| 3.01 | 3.3 | 2.67 | 0.2 | ($dSm^{-1}$) | هدایت الکتریکی Electrical Conductivity |
| 54.9 | 55.3 | 32.5 | 0.22 | (%) | کربن آلی Organic Carbon |
| 0.65 | 0.79 | 0.1 | 0.2 | (%) | نیتروژن Nitrogen |
| - | - | - | 11.7 | ($mgkg^{-1}$) | فسفر Phosphorus |
| - | - | - | 160 | ($mgkg^{-1}$) | پتاسیم Potassium |

1- Mean Weighted Diameter, MWD

**کربن آلی خاک:** براساس نتایج حاصله (جدول ۳) اثر متقابل و اثرات اصلی کاربرد سرکه چوب و ماده اصلاحی بر میزان کربن آلی خاک کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

**جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد ماده اصلاحی و سرکه چوب بر پایداری خاکدانه‌ها و جرم مخصوص ظاهری خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای.**

**Table 3. Results of ANOVA (mean square values) the effect of application of biochar and wood vinegar on bulk density and organic carbon of soil under forage corn cultivation.**

| کربن آلی Organic Carbon | جرم مخصوص ظاهری Bulk density | پایداری خاکدانه‌ها Structure Stability | df | تیمارها Treatments |
|---|---|---|---|---|
| 0.38* | 0.07* | 0.04* | 5 | سرکه چوب Wood vinegar |
| 1.48* | 0.64* | 0.56* | 4 | ماده اصلاحی Amend |
| 0.024* | 0.008* | 0.03* | 20 | سرکه چوب*ماده اصلاحی W* A |
| 0.01 | 0.0003 | 0.01 | 60 | خطا Error |
| 8.70 | 1.44 | 9.50 | - | ضریب تغییرات (٪) Coefficient of variation |

* معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱٪ براساس آزمون LSD

* Indicate that variances are significant at the level of 1%

**جدول ٤- نتایج مقایسه میانگین اثر کاربرد ماده اصلاحی و سرکه چوب بر جرم مخصوص ظاهری و کربن آلی خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای.**

**Table 4. Effect of application of raw material and wood vinegar on bulk density and organic carbon of soil under forage corn cultivation.**

| $W_5$ | $W_4$ | $W_3$ | $W_2$ | $W_1$ | $W_0$ | تیمارها Treatments |
|---|---|---|---|---|---|---|
| کربن آلی Organic Carbon | | | | | | |
| $1.52^{b}$ | $1.44^{c}$ | $1.35^{bcde}$ | $1.21^{cdef}$ | $1.21^{hi}$ | $1.13^{j}$ | $B_{02}$ |
| $1.31^{ef}$ | $1.32^{e}$ | $1.31^{e}$ | $1.11^{j}$ | $1.18^{j}$ | $1.05^{k}$ | $B_{01}$ |
| $1.59^{a}$ | $1.51^{b}$ | $1.43^{c}$ | $1.29^{fg}$ | $1.28^{g}$ | $1.20^{hi}$ | $B_2$ |
| $1.39^{d}$ | $1.39^{d}$ | $1.29^{fg}$ | $1.19^{i}$ | $1.18^{i}$ | $1.12^{j}$ | $B_1$ |
| $0.94^{jl}$ | $0.81^{m}$ | $0.73^{n}$ | $0.64^{o}$ | $0.61^{o}$ | $0.22^{p}$ | $B_0$ |
| جرم مخصوص ظاهری Bulk density | | | | | | |
| $1.003^{l}$ | $1.01^{kl}$ | $1.04^{jk}$ | $1.08^{ghi}$ | $1.13^{f}$ | $1.19^{e}$ | $B_{02}$ |
| $1.08^{ghi}$ | $1.11^{fg}$ | $1.2^{e}$ | $1.26^{d}$ | $1.32^{c}$ | $1.39^{b}$ | $B_{01}$ |
| $1^{l}$ | $1.01^{kl}$ | $1.06^{ij}$ | $1.08^{ghi}$ | $1.1^{gh}$ | $1.18^{e}$ | $B_2$ |
| $1.04^{j}$ | $1.08^{hi}$ | $1.11^{fg}$ | $1.17^{e}$ | $1.27^{d}$ | $1.38^{b}$ | $B_1$ |
| $1.52^{a}$ | $1.53^{a}$ | $1.53^{a}$ | $1.54^{e}$ | $1.54^{a}$ | $1.54^{a}$ | $B_0$ |

در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ براساس آزمون LSD می‌باشند

Mean with different letters indicate a significant difference based on the 1% fisher-LSD test

با مصرف سرکه چوب و ماده اصلاحی میزان کربن آلی خاک افزایش یافت (جدول ٤). بیش‌ترین مقدار کربن آلی خاک در تیمار $W_5B_2$ بود که نسبت به شاهد ۷/۲ برابر گردید و کم‌ترین افزایش کربن آلی خاک مربوط به تیمار $W_1B_0$ بود که نسبت به شاهد ۲/۷۷ برابر گردید (جدول ۳). ژنگ و همکاران (۲۰۲۰) نیز بیان نمودند کاربرد توأم سرکه چوب و زغال زیستی به دلیل غنی بودن از کربن آلی، باعث فزایش کربن آلی خاک نسبت به شاهد گردید (۷). خادم و همکاران (۱۳۹٦) نیز گزارش کردند محتوای زیاد کربن و پایداری زغال زیستی سطح مواد آلی خاک را افزایش می‌دهد (۳۱).

**جرم مخصوص ظاهری خاک**: مطابق با نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) اثر اصلی کاربرد سرکه چوب در سطوح ۰/۰۲ ($W_1$)، ۰/۰٤ ($W_2$)، ۰/۱ ($W_3$)، ۰/۲ ($W_4$) و ۰/٤ ($W_5$) گرم بر کیلوگرم و ماده اصلاحی شامل ماده خام در ۲ سطح ۱ ($B_{0\ 1}$) و ۲ ($B_{0\ 2}$) درصد جرمی و زغال زیستی در ۲ سطح ۱ ($B_1$) و ۲ ($B_2$) درصد جرمی و اثر متقابل کاربرد سرکه چوب و ماده اصلاحی بر جرم مخصوص ظاهری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

با کاربرد توأم سرکه چوب و ماده اصلاحی جرم مخصوص ظاهری خاک کاهش یافت (جدول ٤). به‌طوری‌که بیش‌ترین کاهش جرم مخصوص ظاهری مربوط به تیمار $W_5B_2$ (کاربرد توأم سرکه چوب در سطح ۰/٤ گرم در کیلوگرم و زغال زیستی در سطح ۲ درصد جرمی) بود که باعث کاهش ۳۵ درصد جرم مخصوص ظاهری در مقایسه با شاهد گردید. کم‌ترین اثر کاهشی جرم مخصوص ظاهری مربوط به تیمارهای $W_1B_0$، $W_1B_0$، $W_3B_0$، $W_4B_0$ و $W_5B_0$ بود، که تنها سرکه چوب در سطوح متفاوت بدون ماده اصلاحی استفاده شده بود. نوروزی و همکاران (۲۰۱٦) به منظور بررسی زغال زیستی حاصل از برگ خرما با نسبت وزنی ۳ درصد بر جرم مخصوص ظاهری خاک گزارش کردند، جرم مخصوص ظاهری خاک بعد از دو ماه خواباندن با زغال زیستی به میزان ۲٤ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (۳۲). قربانی و امیراحمدی (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند استفاده از زغال زیستی به دلیل این‌که ماده‌ای سبک بوده و از چگالی کم‌تری نسبت به مواد معدنی خاک برخوردار است بعد از اختلاط در سطح ٤ درصد با ذرات خاک باعث کاهش تراکم در واحد حجم شده و در نتیجه باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری به‌میزان ۲۵ درصد گردید (۲۵). بورل و همکاران (۲۰۱٦) اثر زغال زیستی حاصل از خرده‌چوب بر جرم مخصوص ظاهری خاک در سه نوع خاک با بافت‌های لوم شنی، سیلتی لوم و لوم رسی بررسی کردند، نتایج نشان داد کاربرد ۳ درصد جرمی زغال زیستی به ترتیب باعث کاهش ۱۳/۳، ۱۰/۳ و ۹/۹ درصدی جرم مخصوص ظاهری خاک شد (۳۳).

زغال زیستی به دلیل داشتن جرم مخصوص ظاهری کم‌تر و تخلخل ذاتی بیش‌تر از ذرات معدنی و به‌طورکلی با افزایش تخلخل خاک (۳٤) و بهبود نسبی ساختمان خاک (۳۵) باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک می‌شود. از آنجائی که سرکه چوب صد درصد آلی بوده و شامل عناصر پرمصرف و کم‌مصرف از جمله پتاسیم، کلسیم، مس، آهن، منگنز، روی، مولیبدن، فسفر و ... می‌باشد (۳٦) و بیش‌تر این عناصر در فعالیت‌های حیاتی گیاه و افزایش فتوسنتز گیاه مؤثر هستند (۳٦) و باعث بهبود کیفیت خاک، تسهیل رشد گیاه و توسعه بیش‌تر ریشه می‌گردد (۸، ۳۷). هم‌چنین افزودن سرکه چوب به خاک جمعیت میکروب‌های سودمند خاک را افزایش می‌دهد (۳۷). در نتیجه سرکه چوب از طریق افزایش جمعیت میکروبی خاک و توسعه ریشه گیاه می‌تواند باعث ایجاد درز و ترک و افزایش تخلخل خاک گردد و سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شود.

**پایداری خاکدانه‌ها:** مطابق نتایج حاصله (جدول ۳) اثرات اصلی سرکه چوب و ماده اصلاحی و همچنین اثرات متقابل کاربرد توام ماده اصلاحی و سرکه چوب بر پایداری خاکدانه‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

**جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر کاربرد توأم ماده اصلاحی و سرکه چوب بر پایداری خاکدانه‌های خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای.**

**Table 5. Effect of application of raw material and wood vinegar on stability of soil aggregates under forage corn cultivation.**

| $W_5$ | $W_4$ | $W_3$ | $W_2$ | $W_1$ | $W_0$ | تیمارها Treatments |
|---|---|---|---|---|---|---|
| پایداری خاکدانه‌ها Structure Stability | | | | | | |
| $0.97^{efgh}$ | $1.08^{def}$ | $1.003^{defgh}$ | $1.06^{defg}$ | $1.07^{def}$ | $1.02^{defg}$ | $B_{02}$ |
| $1.07^{defg}$ | $1.13^{bcde}$ | $1.13^{bcde}$ | $1.07^{def}$ | $1.03^{defg}$ | $1.003^{defgh}$ | $B_{01}$ |
| $0.97^{efgh}$ | $1.3^{abc}$ | $1.32^{ab}$ | $1.45^{a}$ | $1.39^{a}$ | $1.32^{ab}$ | $B_2$ |
| $0.97^{efg}$ | $1.06^{defg}$ | $1.16^{bcd}$ | $1.03^{defg}$ | $1.13^{bcde}$ | $1.12^{cde}$ | $B_1$ |
| $0.89^{fgh}$ | $0.9^{fgh}$ | $0.71^{ji}$ | $0.83^{ih}$ | $0.88^{ihg}$ | $0.58^{j}$ | $B_0$ |

در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ براساس آزمون LSD می‌باشند

Mean with different letters indicate a significant difference based on the 1% fisher-LSD test

کاربرد توأم ماده اصلاحی و سرکه چوب پایداری خاکدانه‌ها را افزایش داد (جدول ۵). به‌طوری‌که بیش‌ترین پایداری خاکدانه مربوط به تیمار $W_2B_2$ (کاربرد توأم سرکه چوب در سطح ۰/۰۲ گرم در کیلوگرم و زغال زیستی در سطح ۲ درصد جرمی) بود که پایداری خاکدانه‌ها را ۱۵۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. هم‌چنین اثر ترکیبی زغال زیستی با سرکه چوب بر افزایش پایداری خاکدانه‌ها بیش‌تر از اثر ترکیبی ماده خام با سرکه چوب بود. اصولی و همکاران (۲۰۲۱) نیز بیان نمودند ۹۰ روز بعد از افزودن زغال زیستی به خاک لوم شنی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار شاهد ۰/۸۷ میلی‌متر بود و بیش‌ترین افزیش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت به شاهد در زغال زیستی حاصل از کاه و کلش گندم با مقدار ۰/۵ درصد به میزان ٤۰ درصد مشاهده گردید (۲۰).

با توجه به این‌که سرکه چوب (۸) و زغال زیستی (۲٤) دارای کربن آلی بالایی هستند. مواد آلی در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و ایجاد خاکدانه‌های بزرگتر و افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها مؤثر است که علت را می‌توان به افزایش نیروی چسبندگی بین خاکدانه‌ها توسط ترکیبات موجود در مواد آلی نسبت داد (۲۲). هم‌چنین، از آنجائی که علاوه بر کربن آلی فاکتورهای دیگر هم‌چون تخلخل و سطح ویژه می‌تواند بر پایداری خاکدانه ها مؤثر باشد. زغال زیستی علاوه بر این‌که کربن آلی بالائی دارد، ماده‌ای متخلخل بوده و باعث افزایش سطح ویژه می‌گردد و از این طریق نیز می‌تواند باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها گردد و نسبت به سرکه چوب اثر افزایشی بیش‌تری داشته باشد (۲۰). اسچونگ و همکاران (۲۰۰٤) نیز گزارش کردند زغال زیستی به علت کربن زیاد باعث تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها می‌گردد. هم‌چنین زغال زیستی به‌علت داشتن ساختار متخلخل، شبکه منافذ و ساختمان خاک را با گذشت مدت زمان پس از کاربردش تقویت کرده و بر جریان آب و هوا

مؤثر است (۳۸). نتایج مطالعات دی گریز و همکاران (۲۰۰۵) نیز نشان داد که اضافه نمودن مواد آلی تأثیر مثبتی بر تشکیل و پایداری خاکدانه‌ها داشته و دلیل آن را فعالیت تجزیه‌کنندگان میکروبی عنوان نمودند (۳۹).

محمودآبادی و احمد بیگی (۲۰۰۷) نشان دادند مقدار ماده آلی اضافه شده به خاک، تأثیر معنی‌داری بر خاکدانه‌سازی و توزیع اندازه خاکدانه‌ها دارد. به‌طوری که با افزایش مقدار ماده آلی خاک، درصد خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر نیز افزایش یافت (٤۰). نعمتی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند افزودن مواد آلی به خاک از طریق تأثیر مثبت بر جامعه میکروبی، می‌توانند باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها گردد (٤۱). نسیمی و همکاران (۲۰۲۰) علت افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با افزودن سطوح متفاوت زغال زیستی را مرتبط با افزایش کربن آلی زغال زیستی دانستند. کربن آلی به عنوان عامل پیونددهنده ذرات عمل کرده و سبب تشکیل خاکدانه‌هایی با میانگین وزنی قطر بیش‌تر می‌گردد (۱۱). نتایج سرکه چوب نیز به واسطه افزایش کربن آلی خاک (جدول ۳) و تأثیر بر جمعیت میکروبی خاک باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها شود. هم‌چنین زغال زیستی اضافه شده به خاک به‌عنوان هسته یک خاکدانه (همانند ذرات آلی یا میکروارگانیسم‌ها) عمل نموده و خاکدانه‌سازی در خاک را افزایش می‌دهد. افزایش ماده آلی اضافه شده به خاک از طریق ریشه و موسیلاژ میکروبی نیز موجب افزایش خاکدانه‌سازی در خاک می‌شود (٤۲).

**مقاومت‌فروروی خاک:** نتایج (جدول ٦) نشان داد اثرات اصلی سرکه چوب و ماده اصلاحی و هم‌چنین اثرات متقابل استفاده ماده اصلاحی و سرکه چوب بر مقاومت‌فروروی خاک در مکش‌های ۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. ولی در مکش‌های ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال تأثیر معنی‌داری نداشت.

**جدول ٦- نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد ماده اصلاحی و سرکه چوب بر مقاومت‌فروروی (کیلوپاسکال) خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای.**

**Table 6. Results of ANOVA (mean square values) the effect of application of raw material and wood vinegar on penetration resistance and stability of soil aggregates under forage corn cultivation.**

| 1500 | 1000 | 500 | 100 | 50 | 10 | 0 | df | تیمارها Treatments |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $1^{ns}$ | $2.63^{ns}$ | $141168^{*}$ | $40176^{*}$ | $42381^{*}$ | 20056 | $4267^{*}$ | 5 | سرکه چوب Wood vinegar |
| $2^{ns}$ | $5.81^{ns}$ | $2636606^{*}$ | $649046^{*}$ | $641772^{*}$ | $181808^{*}$ | $59834.4^{*}$ | 4 | ماده اصلاحی Amend |
| $2^{ns}$ | $4.64^{ns}$ | $86387^{*}$ | $32579^{*}$ | $318660^{*}$ | $17951^{*}$ | $3306.6^{*}$ | 20 | سرکه چوب * ماده اصلاحی W*A |
| 3 | 3.57 | 50 | 167 | 16 | 1002 | 269.1 | 6 | خطا Error |
| 0.06 | 0.05 | 10.8 | 13.7 | 17.7 | 18.4 | 17.6 | - | ضریب تغییرات Coefficient of variation (٪) |

$^{*}$ و $^{ns}$ به ترتیب معنی‌دار بودن و عدم معنی‌داری در سطح احتمال ۱٪ براساس آزمون LSD

* and $^{ns}$ indicate that variances are significant at the level of 1% and is non-significant, respectively

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین اثر کاربرد ماده اصلاحی و سرکه چوب بر مقاومت فروروی خاک (کیلوپاسکال) زیر کشت ذرت علوفه‌ای در مکش‌های ۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال.

**Table 7. Effect of application of raw material and wood vinegar on soil penetration resistance (kPa) under forage corn cultivation at 0, 10, 50 and 500 kPa matric suctions.**

| $W_5$ | $W_4$ | $W_3$ | $W_2$ | $W_1$ | $W_0$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 kPa matric suctions مکش ۰ کیلوپاسکال | | | | | | |
| $75.8^{defg}$ | $77.86^{de}$ | $79.66^{de}$ | $81.06^{de}$ | $80.03^{de}$ | $80.26^{de}$ | $B_{02}$ |
| $76.36^{def}$ | $78.46^{de}$ | $77.80^{de}$ | $80.06^{de}$ | $79.33^{de}$ | $79.93^{de}$ | $B_{01}$ |
| $47.90^{h}$ | $50.30^{fgh}$ | $49.16^{gh}$ | $57.26^{efgh}$ | $56.08^{efgh}$ | $61.28^{efgh}$ | $B_2$ |
| $57.33^{efgh}$ | $54.99^{efgh}$ | $62.27^{efgh}$ | $59.38^{efgh}$ | $61.53^{efgh}$ | $56.21^{efgh}$ | $B_1$ |
| $96.40^{d}$ | $157.10^{b}$ | $126.48^{c}$ | $260.53^{a}$ | $260.56^{a}$ | $261.96^{a}$ | $B_0$ |
| 10 kPa matric suctions مکش ۱۰ کیلوپاسکال | | | | | | |
| $149.6^{cdefghij}$ | $154.56^{cdef}$ | $152.7^{cdefg}$ | $151.9^{cdefgh}$ | $155.13^{cdef}$ | $150.86^{cdefghi}$ | $B_{02}$ |
| $148.4^{cdefghij}$ | $154.10^{cdef}$ | $155.2^{cdef}$ | $159.23^{cde}$ | $157.96^{cdef}$ | $160.06^{cd}$ | $B_{01}$ |
| $97.33^{j}$ | $98.63^{j}$ | $101.06^{ghij}$ | $98.80^{j}$ | $100.56^{gij}$ | $99.97^{hij}$ | $B_2$ |
| $101.16^{fghij}$ | $99.40^{ij}$ | $106.8^{efgij}$ | $109^{cdefghij}$ | $107.93^{cdefghij}$ | $110.33^{cdefghij}$ | $B_1$ |
| $179.93^{c}$ | $190.17^{c}$ | $198.83^{c}$ | $463.37^{b}$ | $586.86^{a}$ | $472.14^{b}$ | $B_0$ |
| 50 kPa matric suctions مکش ۵۰ کیلوپاسکال | | | | | | |
| $217.53^{k}$ | $221.26^{jk}$ | $222.56^{ijk}$ | $2.16^{h}$ | $229.96^{gh}$ | $229.93^{g}$ | B02 |
| $226.30^{hij}$ | $239.59^{ef}$ | $234.96^{fg}$ | $238.00^{ef}$ | $243.66^{e}$ | $244.06^{e}$ | B01 |
| $107.00^{s}$ | $108.40^{s}$ | $131.30^{r}$ | $137.66^{qr}$ | $136.30^{qr}$ | $138.26^{q}$ | B2 |
| $141.96^{pq}$ | $146.66^{op}$ | $149.36^{no}$ | $12854^{mn}$ | $156.43^{lm}$ | $162.33^{l}$ | B1 |
| $368.80^{d}$ | $375.13^{d}$ | $383.93^{c}$ | $806.30^{b}$ | $806.10^{b}$ | $816.38^{a}$ | B0 |
| 100 kPa matric suctions مکش ۱۰۰ کیلوپاسکال | | | | | | |
| $302.53^{g}$ | $304.56^{fg}$ | $307.13^{fg}$ | $313.03^{efg}$ | $314.60^{efg}$ | $313.76^{efg}$ | B02 |
| $310.96^{efg}$ | $325.23^{def}$ | $321.03^{defg}$ | $322.6^{defg}$ | $328.66^{de}$ | $338.7^{d}$ | B01 |
| $192.28^{l}$ | $193.10^{l}$ | $215.76^{ik}$ | $223.1^{hij}$ | $216.66^{ik}$ | $222.56^{hik}$ | B2 |
| $227.20^{hi}$ | $231.33^{hi}$ | $234.33^{hi}$ | $237.85^{h}$ | $241.16^{h}$ | $205.6^{kl}$ | B1 |
| $452.5^{c}$ | $459.86^{bc}$ | $473.66^{b}$ | $892.33^{a}$ | $892.23^{a}$ | $901.02^{a}$ | B0 |
| 500 kPa matric suctions مکش ۵۰۰ کیلوپاسکال | | | | | | |
| $943.9^{l}$ | $950.53^{kl}$ | $961.86^{jk}$ | $967.10^{j}$ | $992.90^{i}$ | $1005.6^{h}$ | B02 |
| $1002.93^{hi}$ | $1013.37^{h}$ | $1017.93^{g}$ | $1035.40^{f}$ | $1053.57^{e}$ | $1102.73^{d}$ | B01 |
| $704.10^{r}$ | $712.66^{r}$ | $729.77^{q}$ | $733.43^{q}$ | $733.50^{q}$ | $736.57^{q}$ | B2 |
| $740.07^{pq}$ | $748.53^{op}$ | $756.10^{o}$ | $782.70^{n}$ | $789.10^{n}$ | $802.63^{m}$ | B1 |
| $1302.33^{c}$ | $1307.46^{c}$ | $1327.67^{b}$ | $2043.82^{a}$ | $2047.05^{a}$ | $2046.32^{a}$ | B0 |

در هر ردیف میانگین‌های دارای حروف مشابه، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪ براساس آزمون LSD می‌باشند

Mean with different letters indicate a significant difference based on the 1% fisher-LSD test

براساس نتایج حاصله (جدول ۷) کاربرد توأم ماده اصلاحی و سرکه چوب باعث کاهش مقاومت‌فروروی خاک گردید. در مکش‌های ۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال بیش‌ترین کاهش مقاومت‌فروروی مربوط به تیمار $W_5B_2$ (کاربرد توام سرکه چوب در سطح ۰/٤ گرم بر کیلوگرم و زغال زیستی در سطح ۲ درصد جرمی) بود که به‌ترتیب مقاومت‌فروروی خاک ۸۱/۷۰، ۸۲/۸۹، ۸٦/۸۹، ۷۸/٦۵ و ٦۵/۵۹ درصد در مقایسه با شاهد کاهش یافت. کم‌ترین کاهش مقاومت‌فروروی نیز در مکش‌های ۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال مربوط به تیمار $W_1B_0$ بود (جدول ٦). هم‌چنین نتایج نشان داد (جدول ٦). بیش‌ترین تأثیر کاربرد سرکه چوب و ماده اصلاحی بر کاهش مقاومت فروروی خاک در رطوبت‌های بالا در مکش ۱۰ کیلوپاسکال بود، به‌نحوی‌که با افزایش مکش اثرگذاری کم‌تر شده و در مکش‌های ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال کاربرد سرکه چوب و ماده اصلاحی بر مقاومت‌فروروی خاک تأثیر معنی‌داری نداشت. زنگنه بیغش و همکاران (۲۰۱۸) طی بررسی تأثیر سطوح خاک‌ورزی و گیاه پوششی بر مقاومت‌فروروی خاک بیان کردند در مکش‌های ٦، ۱۰، ۳۰ و ٤۰۰ کیلوپاسکال اثر متقابل تیمارها، بر مقاومت‌فروروی معنی‌دار بود. ولی در مکش‌های ۸۰۰ و ۱۵۰۰ کیلو پاسکال اثر متقابل تیمارها معنی‌دار نبود. هم‌چنین عنوان نمودند نیروی چسبندگی زیاد بین ذرات خاک و آب در مکش‌های بالا، کاهش رطوبت خاک و خشک شدن آن مانع از اثر تیمارهای مختلف بر مقاومت فروروی خاک می‌گردد، که می‌تواند دلیل عدم معنی‌داری مقاومت‌فروروی در مکش‌های بالا باشد (٤). در این پژوهش نیز تأثیر تیمارها در مکش‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال بود و در مکش‌های ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال تأثیر معنی‌داری نداشت. چرا که در مکش‌های ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال، میزان رطوبت خاک بسیار کم بوده و خاک خشک می‌باشد. در این مکش‌ها مقدار مقاومت فروروی خاک تحت‌تأثیر تیمارهای اصلاحی قرار نگرفته است و بیش‌تر تحت‌تأثیر ویژگی‌های ذاتی خاک مانند چسبندگی و رطوبت بوده است.

مواد آلی خاک از طریق افزایش پایداری ساختمان خاک و افزایش خاصیت الاستیسیته خاک مانند یک بالشت در مقابل نیروی وارده عمل کرده و باعث کاهش تراکم‌پذیری خاک می‌شود. هم‌چنین مواد آلی دامنه رطوبتی مناسب برای تردد ماشین‌آلات را افزایش می‌دهد و باعث کاهش مقاومت خاک می‌گردد (١٤). اوهیو و همکاران (١٩٩٤) نیز بیان نمودند استفاده از مواد آلی سبب کاهش جرم مخصوص ظاهری، مقاومت‌فروروی و مقاومت برشی خاک می‌گردد (١٤).

نتایج مطالعات موجدی و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر افزودن ماده آلی بر مقاومت فرو روی خاک نشان داد کاربرد ماده آلی باعث کاهش مقاومت فروروی خاک می‌شود (۱۷). مامان و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر درجه فشردگی و ماده آلی بر خصوصیات فیزیکی خاک را مطالعه نمودند و عنوان کردند که مقدار جرم مخصوص ظاهری و مقاومت‌فروروی خاک با افزایش ماده آلی خاک کاهش یافت (١٦). زغال زیستی و سرکه چوب نیز از آنجائی که منبع غنی از کربن آلی می‌باشند (جدول ۳) به واسطه افزایش ماده آلی خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک باعث کاهش مقاومت‌فروروی خاک گردیدند.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر کاربرد زغال زیستی و سرکه چوب بر مقاومت‌فروروی و پایداری خاکدانه‌های خاک زیر کشت ذرت علوفه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با نتایج اثر اصلی کاربرد سرکه چوب و

ماده خام و اثر متقابل کاربرد توأم سرکه چوب و ماده خام بر پایداری خاکدانه‌ها و مقاومت‌فروروی خاکدر سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. کاربرد سرکه چوب و ماده خام باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها و کاهش مقاومت‌فروروی خاک شد. سرکه چوب و زغال زیستی دارای کربن‌آلی بالایی هستند که مواد آلی در افزایش پایداری خاکدانه‌ها و ایجاد خاکدانه‌های بزرگ‌تر و افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها مؤثر است که علت را می‌توان به افزایش نیروی چسبندگی بین خاکدانه‌ها توسط ترکیبات موجود در مواد آلی نسبت داد. هم‌چنین زغال زیستی ماده‌ای سبک بوده و از چگالی کم‌تری نسبت به مواد معدنی برخوردار است و مخلوط شدن با خاک باعث افزایش تخلخل خاک و در نتیجه کاهش جرم مخصوص می‌گردد. هم‌چنین زغال زیستی و سرکه چوب از طریق افزایش کربن آلی خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک باعث کاهش مقاومت‌فروروی خاک شدند. با توجه به اهمیت کیفیت خاک و تأثیر سرکه چوب و زغال زیستی بر بهبود و اصلاح ویژگی‌های خاک، مدیریت کیفیت خاک و تأثیر آن بر رشد و عملکرد گیاه و از آنجائی که این پژوهش در یک دوره کشت گیاه و در گلدان انجام شد، پیشنهاد می گردد، این بررسی در چند دوره رشد گیاه و برای گیاهان متفاوت و در مزرعه بررسی شود.

## سپاسگزاری

بدین‌وسیله از دانشگاه شهرکرد به‌علت حمایت مالی از این پژوهش در قالب پایان‌نامه دکتری، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

## منابع

1.Pattiya, A. 2011. Thermochemical characterization of agricultural wastes from Thai cassava plantations. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. 33: 691-701.
2.Lehmann, J., and Joseph, S. 2015. Biochar for environmental management. Science, technology and implementation. Published by Routledge. 976p.
3.Travero, J., and Mihara, M. 2015. Impacts of pyroligneous acid to biological and chemical properties of depleted soil in Bohol, Philippines. International Journal of Environmental and Rural Development. 6: 1. 132-137.
4.Zanganeh, Z., Bayat, H., Bayazidi, F., and Hamzei, J. 2018. Effect of Different Tillage systems and cover crop on aggregate stability, aggregate tensile strength and penetration resistance of a silt loam soil in hamedan. Journal Soil and Water Research. 48: 5. 1015-1029. (In Persian)
5.Sun, H., Feng, Y., Xue, L., Mandal, S., Wang, H., Shi, W., and Yang, L. 2020. Response of ammonia volatilization from rice paddy soil to application of wood vinegar alone or combined with biochar. Chemosphere. 242: 1-7.
6.Grewal, A., Abbey, L., and Gunupuru, L.R. 2018. Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture. Journal Analysis Applied. 135: 152-1529.
7.Zhang, Y., Wang, X., Liu, B., Liu, Q., Zheng, H., You, X. Sun, K. Luo, X., and Li, F. 2020. Comparative study of individual and co- application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality. Chemosphere. 246, 125699: 1-11.
8.Payamara, J. 2011. Usage of wood vinegar as new organic subxtance. International Journal of Chem. Tech. Research. 3: 3. 1658-1662.
9.Li, Z., Wu, L., Sun, S., Gao, J., Zhang, H., Zhang, Z., and Wang, Z. 2019. Disinfection and removal performance for Escherichia coli, toxic heavy matals and arsenic by wood vinegar-modified zeolite. Ecotoxicol. Environ. Saf. 174: 129-136.

10. Shirani, H., Hajabasi, M.H., Afyini, M. and Hemmat, A. 2011. Effect of tillage and manure application on soil penetration resistance of soil under maize cultivation. Journal Water and Soil Science. 51: 141-154. (In Persian)
11. Nasimi, P., Karimi, A., and Gerami, Z. 2020. Long-Term Effects of Palm Leaf Biochar on The Porosity aAnd Structure Stability of a Sandy Clay Loam Soil. Journal of Soil Research. 34: 2. 199-215. (In Persian)
12. Sheykhzadeh, G.R., Asghari, Sh., and Mesri Gundoshmian, T. 2019. Estimating Penetration Resistance in Agricultural Soils of Ardabil Plain Using Artificial Neural Network and Regression Methods. 30: 3. 941-954.
13. Grunwald, S., Rooney, D.J., McSweeney, K., and Lowery, B. 2001. Development of pedotransfer functions for a profile cone penetrometer. Geoderma. 100: 25-47.
14. Ohu, J.O., Ekwue, E.I., and Folorunso, O.A. 1994. The effect of addition oforganic matter on the compaction of a Vertisol from northern Nigeria. Soil Technology. 7: 155-162.
15. Ahmed, A., Gariepy, Y., and Raghavan, V. 2017. Influence of wood-derived biochar on the compactibility and strength of silt loam soil. International Agrophysics. 31: 2. 149-155.
16. Mamman, E., Ohu, J.O., and Crowther, T. 2007. Effect of soil compaction and organic matter on matter on the early growth of maize (*Zea mays*) in a vertisol. International Agrophysics. 21: 367-375.
17. Mujdeci, M. 2011. The effects of organic material application on soil penetration resistance. Journal Food Agriculture and Environment. 9: 1045-1047.
18. Liu, Q., Liu, B., Zhang, Y., Lin, Z., Zhu, T., Sun, R., Wang, X., Ma, J., Bei, Q., Liu, G., Lin, X., and Xie, Z. 2017. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil $N_2O$ emissions. Soil Biology and Biochemistry. 104: 8-17.
19. Mohammadi, N., Khademalrasoul, A. 2020. Investigation of biochar and zeoplant application on mechanical properties of soils contaminated with total petroleum hydrocarbons (Tphs) in oil fields of Ahvaz. Journal of Soil Research. 34: 3. 407-419. (In Persian)
20. Osooli, H., Karimi, A., Shirani, H., and Tabatabaei, S.H. 2021. Effect of Type, amount and biochar particles size on porosity, penetration resistance and stability of aggregates in a calcareous soil. Journal of Water and Soil Resources Conservation. 11: 1. 113-128. (In Persian)
21. Nasimi, P., Karimi, A., and Gerami, Z. 2020. Long-Term Effects of Palm Leaf Biochar on The Porosity aAnd Structure Stability of a Sandy Clay Loam Soil. Journal of Soil Research. 34: 2. 199-215. (In Persian)
22. Annabi, M., Houot, H., Francou, F., Poitrenaud, M., and Bissonnais, Y. 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different Maturities. Soil Science Society of America Journal. 71: 413-423.
23. Lado, M., Paz, A., and Ben-Hur, M. 2004. Organic matter and aggregate size interaction, seal formation, and soil loss. Soil Science Society of America Journal. 68: 935-942.
24. Nikravesh, S., Boroomandnasab, A., Naseri, A., and Soltani M. 2018. Investigating the Effect of Wheat Straw Biochar and Hydrochar on Physical Properties of a Sandy Loam Soil. Journal of Water and Soil Research. 32: 2. 387-397. (In Persian)
25. Ghorbani, M., and Amirahmadi, E. 2018. Effect of rice husk biochar on some physical characteristics of soil and corn growth in a loamy soil. Journal of Soil Research. 32: 3. 305-3019. (In Persian)
26. Abrishamkesh, S., Fazeli Sangani, M., Ramezanpour, H., Noroozi, M., and Shabany, A. 2020. Effect of biochar suspension application on physicochemical properties of two erosion-prone soils. Journal of Environmental Erosion Research. 73: 10: 1. 58-78. (In Persian)

27. Herrick, J.E., and Jones, T.L. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal. 66: 1320-1324.
28. Kemper, A., and Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. P 425-442. In: A. Klute. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1 2nd. Agron. Monog.9. ASA and SSSA.
29. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk Density. P 363-375. In: A. Klute (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. Agron. Monoger. 9. ASA. Madison, WI.
30. www.fao.org/about/et
31. Khadem, A., Raeisi, F., and Besharati, H. 2017. A Review of Biochar Effects on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. Land Management Journal. 5: 1. 13-30. (In Persian)
32. Nowroozi, M., Tabatabaei, S.H., Nouri, M., and Motaghian, H. 2016. Short-term effects of biochar produced from date palm's leaves on moisture retention in sandy loam soil. Journal of water and soil resources conservation. 6: 2. 137-150.
33. Burrell, L.D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., and Shoja, G. 2016. Long-term effects of biochar on soil physical properties. Geoderma. 282: 96-102.
34. Akhtar, S.S., Li, G.T., Andersen, M.N., and Liu, F.L. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. Agricultural Water Management. 138: 37-44.
35. Haefele, S.M., Konboon, Y., Wongboon, W., Amarante, S., Maarifat, A.A., Pfeiffer, E.M., and Knoblauch, V. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in rice-based systems. Field Crops Research. 121: 430-440.
36. Zulkarami, B., Ashrafuzzaman, M., Husni, M.O., and Ismail, M.R. 2011. Effect of pyroligneous acid on growth, yield and quality improvement of rockmelon in soilless culture. Australian Journal of Crop Science. 5: 12. 1508-1514.
37. Masum, S.M., Malek, M., Mandal, M.S.H., Haque, M.N., and Akther, Z. 2013. Influence of plant extracted pyroligneous acid on transplanted aman. World Journal of Experimental Bioscience. 4: 31-34.
38. Schjonning, P., Munkholm, L.J., and Elmholt, S. 2004. Soil quality in organic. Book of abstracts Eurosoil. Farming effects of crop rotations animal manure and soil compaction. The Danish Institute of Agricultural Sciences. 32p.
39. De Gryze, S., Six, J., Brits, C., and Merckx, R. 2005. A quantification of short-term macro aggregate dynamics: influences of wheat residue input and texture. Soil Biology and Biochemistry. 37: 55-66.
40. Mahmoodabadi, M., and Ahmadbeygi, B. 2011. Effect of soil physical and chemical properties on aggregate stability in some cultivation systems. Journal of Soil Management and Sustainable. 1: 2. 61-79.
41. Nemati, F., Raiesi, F., and Hoeeeinpour, A.R. 2012. Aggregate Stability under Different Treatments of Soil Salinity and Organic Materials in The Presence of the Anecic Earthworm *Lumbricus Terrestris* L. Under Greenhouse Conditions. Journal of Water and Soil Research. 19: 1. 41-60. (In Persian)
42. Gorovtsov, A.V., Minkina, T.M., Mandzhieva, S.S., Perelomov, L.V., Soja, G., Zamulina, I.V., Rajputa, D.V., Sushkova, N.S., Mohan, D., and Yao, J. 2019. The mechanisms of biochar interactions with microorganisms in soil. Environmental Geochemistry and Health. 42: 1. 1-24.