نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و هفتم، شماره اول، ۱۳۹۹
۷۱-۸۹
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2020.16986.3238

اثرات کوتاه‌مدت استفاده از کودهای زیستی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

لادن حیدری[۱]، *حسین بیات[۲] و جواد حمزه‌ئی[۳]

[۱]دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، [۲]دانشیار گروه علوم ومهندسی خاک، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، [۳]دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۸

چکیده

سابقه و هدف: کودهای زیستی با تأثیرگذاری بر تخلخل خاک و پایداری خاکدانه‌ها، می‌توانند بر ساختمان خاک تأثیر بگذارند. در واقع فعالیت ریزجانداران خاک علاوه بر تأثیر بر ریشه گیاهان، اثرات قابل‌توجهی بر ترکیبات آلی و در اغلب موارد ساختمان خاک دارند. بنابراین هدف این پژوهش بررسی تأثیر کودهای زیستی شامل قارچ مایکوریزا (*Glomus mosseae*) و باکتری ریزوبیوم (*Mesorhizobium caesar*) به‌صورت جداگانه و با هم بر برخی ویژگی‌های فیزیکی (جرم مخصوص ظاهری و تخلخل خاک) و شیمیایی خاک (واکنش خاک، هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل کاتیونی) در دو شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای بود که تاکنون کم‌تر موردبررسی قرار گرفته است. چراکه کاربرد کودهای زیستی در خاک می‌تواند یکی از شیوه‌های مناسب برای حفظ و بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک باشد.

مواد و روش‌ها: به‌منظور بررسی تأثیر همزیستی قارچ مایکوریزا و باکتری ریزوبیوم بر برخی خواص شیمیایی و فیزیکی خاک، آزمایشی در دو شرایط مزرعه و گلخانه، در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد. در شرایط مزرعه تیمارهای آزمایشی شامل قارچ مایکوریزا گونه *گلوموس موسه‌آ*، باکتری ریزوبیوم گونه *مزوریزوبیوم*، مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم و شاهد (بدون مایه‌زنی) بودند. در شرایط گلخانه تیمار ماده زمینه سترون شده قارچ مایکوریزا و تیمار بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) نیز تیمارهای آزمایشی بودند. گیاه مورد کشت در این آزمایش نخود بود. در پایان فصل رشد نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده از عمق‌های متفاوت برداشت و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مذکور در فوق اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: در شرایط مزرعه و گلخانه تیمارهای شامل مایکوریزا باعث کاهش واکنش خاک شدند. تیمارهای مختلف تأثیر معنی‌داری بر گنجایش تبادل کاتیونی در دو شرایط گلخانه و مزرعه نداشتند. احتمالاً به‌دلیل این‌که گنجایش تبادل کاتیونی در ارتباط با سطح ویژه خاک است. در شرایط گلخانه کم‌ترین جرم مخصوص ظاهری در عمق ۵-۰ سانتی‌متر (در سطح ۵ درصد) در گلدان‌های شامل تیمار مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم (۱/۳۰ $g\ cm^{-3}$) و

* مسئول مکاتبه: h.bayat@basu.ac.ir

مایکوریزا ($1/36\ g\ cm^{-3}$) و بیش‌ترین جرم مخصوص ظاهری در تیمار شاهد بدون گیاه و بدون مایه‌زنی ($1/49\ g\ cm^{-3}$) مشاهده شد. هم‌چنین تیمارهای شامل کود زیستی باعث افزایش معنی‌دار تخلخل خاک نسبت به شاهد بدون گیاه شدند. به‌گونه‌ای که در عمق اول (۵-۰ سانتی‌متر) تیمار مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم ($0/50\ cm^3cm^{-3}$) در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر تیمار مایکوریزا ($0/49\ cm^3cm^{-3}$) و در عمق سوم (۱۵-۱۰ سانتی‌متر) هر سه تیمار کود زیستی بیش‌ترین مقدار تخلخل را داشتند. شرایط مزرعه باعث کاهش اثر تیمارها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک گردید، که احتمالاً می‌تواند به‌علت تأثیر کم‌تر تیمارهای اعمال‌شده به علت وسعت زیاد منطقه و از طرفی شرایط محیطی کنترل نشده باشد.

نتیجه‌گیری: با توجه به این‌که تیمارهای مختلف کود زیستی تأثیر متفاوتی بر عمق ریشه‌زنی گیاهان و عملکرد گیاه دارند، تأثیر تیمارهای مختلف در این پژوهش در اعماق مختلف بر بهبود ساختمان خاک متفاوت بود. به‌طورکلی تیمارهای شامل کود زیستی با تأثیرگذاری بر عملکرد گیاه و ریشه گیاه باعث بهبود پارامترهای فیزیکی و ساختمان خاک شدند.

واژه‌های کلیدی: باکتری ریزوبیوم، تخلخل، جرم مخصوص ظاهری، مایکوریزا

مقدمه

زمینه‌های کاربردی علم بیوتکنولوژی خاک علاوه بر تولید کودهای زیستی، شامل استفاده از موجودات زنده مفید خاکزی به‌منظور حذف سموم و سایر آلاینده‌های خاک، تجزیه سریع بازمانده‌های گیاهی، بهبود ساختمان فیزیکی خاک، اصلاح خاک‌های فرسوده، کمک به حفظ سلامت گیاه و موارد دیگر می‌باشند (٤٤). کودهای زیستی یا کودهای میکروبی (جامد، مایع یا نیمه‌جامد) شامل یک و یا چند گونه از ریزجانداران خاص می‌باشند. این ریزموجودات موجب بهبود ساختمان خاک، مدیریت مواد آلی و تکمیل چرخه عناصر غذایی شده و می‌توانند وابستگی به کودها و سموم شیمیایی را کاهش دهند (۱۱). ازآن‌جایی‌که قارچ‌های مایکوریزا موجب افزایش توانایی گیاه میزبان در جذب فسفر و عناصر معدنی از خاک به‌خصوص منابع غیرقابل‌دسترس آن‌ها می‌شوند (۲۳)، بنابراین به این ریزجانداران مفید اصطلاحاً کودهای زیستی اطلاق می‌شود. فعالیت ریزجانداران خاک علاوه بر تأثیر بر ریشه گیاهان، اثرات قابل‌توجهی بر ترکیبات آلی و در اغلب موارد ساختمان خاک دارند (۳٤). تراکم خاک نیز به‌طور گسترده در طی یک قرن اخیر بررسی شده است، اما پژوهش‌ها و بررسی در این زمینه جهت ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش آن همچنان ادامه دارد. کودهای زیستی شامل ریزجاندارانی همانند سیانوباکترها، باکتری‌ها و قارچ‌ها هستند. قارچ‌های مایکوریزا آربوسکولار عمدتاً با هیف‌های خارج از سلولی و تولید گلومالین بر پایداری خاکدانه‌ها تأثیر می‌گذارند (۲٦ و ٤٠). درواقع هیف‌های قارچ مایکوریزا باعث اتصال ذرات خاک شده و گلومالین نیز اثر سیمان‌کننده بر خاک دارد و باعث پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (۳۹). در مطالعات متعددی گزارش‌شده است که پلیمر خارج سلولی که توسط کود زیستی (سیانوباکتر) استخراج می‌شود یک بستر مناسب برای رشد گیاه فراهم می‌کند و باعث افزایش فعالیت ریزجانداران هتروتروف شبیه ساپروفیت و

همزیست‌ها (ریزوبیوم) می‌شود که به‌نوبه خود باعث افزایش تولید پلی‌ساکارید و در نتیجه باعث پایداری ساختمان خاک می‌گردد (۳۵).

سمایی و همکاران (۲۰۱۵) اثر دو نوع قارچ میکوریزا (*گلوموس اینترادیسه و اتونیکاتوم*) بر برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک را بررسی نموده و نتیجه گرفتند که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ۱۱۳/٦ و ۲۰۱/۸ درصد و تخلخل کل خاک ۲/۲ و ۲/٦ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داشت (٤٤). این پژوهشگران علت افزایش میکروپورها را افزایش تخلخل کل و کاهش جرم مخصوص ظاهری بیان داشتند. در پژوهش دیگری که توسط مارتین و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد، تأثیر قارچ‌های *گلوموس موسه‌آ، گلوموس اینترارادیسز*[1] *و گلوموس جئوسپورم*[2] را بر تخلخل یک خاک لوم شنی بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که تخلخل خاک از ۹/۷۷ درصد در تیمار شاهد به ۱٤/۸۱ درصد در تیمار مایه‌زنی شده با قارچ *گلوموس موسه‌آ* افزایش یافت (۳۱). این پژوهشگران دلیل این افزایش را تشکیل خاکدانه‌های پایدار در اثر فعالیت‌های قارچی بیان داشتند. چراکه پایداری خاکدانه‌ها در اثر عوامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی اتفاق می‌افتد (٤۰). ارتاس (۲۰۱۵) گزارش کرد که در خاک‌هایی که تیمار کمپوست به همراه مایکوریزا اعمال شده بود نسبت به تیمار شامل کودهای شیمیایی کم‌ترین میزان جرم مخصوص ظاهری و بیش‌ترین مقدار تخلخل را دارا هستند (۳۷).

در پژوهش سولفاب (۲۰۱۳) استفاده از کودهای آلی و زیستی باعث افزایش معنی‌دار گنجایش تبادل کاتیونی در خاک شد (٤٦). در همین راستا اسیتکین و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که با کاربرد باکتری‌های محرک رشد مثل سودوموناس و باسیلوس، میزان عناصری چون آهن، روی، منگنز، منیزیم و پتاسیم ازدیاد پیدا می‌کند که یکی از دلایل این افزایش را زیاد شدن گنجایش تبادل کاتیونی در تیمارهای مایه‌زنی شده با باکتری نسبت به تیمارهای شاهد (بدون باکتری) بیان کرده‌اند (۱۲). در پژوهش سولفاب (۲۰۱۳) استفاده از کودهای آلی به همراه کود زیستی (شامل ریزوبیوم) تأثیر معنی‌داری بر واکنش خاک نداشت (٤٦). در پژوهش لیند و همکاران (۲۰۰۳) مشخص شد که کاربرد باکتری‌های محرک رشد باعث کاهش واکنش خاک از ۷/٦ به ٦ شد که می‌توان این کاهش را به کلونیزه شدن باکتری‌ها در خاک و تولید اسیدهای آلی نسبت داد (۲۷). هم‌چنین یکی از راهکارهای مقابله با شوری، مایه‌زنی بذر گیاهان زراعی با انواع مختلفی از باکتری‌ها و قارچ‌های مفید خاکزی است (٤۹). به‌طورکلی باکتری‌های ریزوبیومی همزیست با گیاهان لگوم، نسبت به گیاهان لگوم (بدون مایه‌زنی) تحمل بیش‌تری در برابر تنش شوری دارند. جیری و همکاران (۲۰۰۳) و باولدا و همکاران (۱۹۸۳) گزارش کردند که مایه‌زنی با قارچ مایکوریزا باعث کاهش هدایت الکتریکی خاک می‌شود (۱۰ و ۱٦). این در حالی است که ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که تیمار مایکوریزا باعث افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌گردد (۵۱). هم‌چنین برخی پژوهشگران گزارش کردند که گیاهان مایکوریزایی جذب سدیم را کاهش می‌دهند (۱). در حال حاضر از کودهای شیمیایی و اصلاح‌کننده‌ها به‌طور بی‌رویه‌ای استفاده می‌شود که باعث ایجاد آلودگی و برخی مشکلات گردیده است. به همین علت، بررسی نقش کودهای زیستی شامل باکتری‌ها و قارچ‌ها در بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی خاک با در نظر گرفتن ابعاد محیط زیستی آن‌ها ضروری به‌نظر می‌رسد؛ بنابراین، با توجه به اثرات منفی مصرف نهاده‌های

1- Glomus intraradices
2- Glomus geosporum

شیمیایی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها در اراضی کشاورزی، هدف از این مطالعه بررسی تأثیر قارچ مایکوریزا گونه *گلوموس موسه‌آ* و باکتری ریزوبیوم به‌صورت جداگانه و با هم بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در اعماق مختلف ۰-۵، ۵-۱۰ و ۱۰-۱۵ سانتی‌متر هم‌زمان در دو شرایط مزرعه‌ای و گلخانه‌ای بود که با توجه به گونه‌های قارچ و باکتری استفاده‌شده در این مطالعه، بررسی تأثیر هم‌زمان آن‌ها و هم‌زمانی مطالعه آزمایشگاهی و مزرعه‌ای تاکنون در هیچ پژوهشی گزارش نشده است.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ در مزرعه‌ی عباس‌آباد واقع در دانشگاه بوعلی‌سینا با موقعیت عرض جغرافیایی 34°47'26.21"N شمالی و طول جغرافیایی 48°28'40.14"E شرقی، به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل مایه‌زنی بذور با قارچ مایکوریزا (*Glmous mosseae*)، مایه‌زنی بذور با باکتری ریزوبیوم (*Mesorhizobium caesar*)، مایه‌زنی هم‌زمان با مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم و شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) بود. در آزمایش مزرعه‌ای ۱۲ واحد آزمایشی در نظر گرفته شد. در این پژوهش گیاه نخود به‌علت سازگاری با اقلیم همدان و هم‌چنین توانایی همزیستی با قارچ مایکوریزا و باکتری همزیست برای انجام آزمایش‌ها انتخاب گردید. گیاه نخود در اسفندماه ۹۲ کاشته شد و در اواخر خردادماه ۹۳ نیز برداشت شد.

آزمایش گلخانه‌ای در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی واقع در دانشگاه بوعلی‌سینا در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ به‌مدت چهار ماه اجرا شد. برای انجام آزمایش گلخانه‌ای یک نمونه خاک لومی از مزرعه تحقیقاتی عباس‌آباد (از محل آزمایش مزرعه‌ای) از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه گردید. سپس، در گلخانه هوا خشک گردیده و به‌منظور ایجاد یکنواختی از الک ٤/۷۵ میلی‌متری عبور داده شد. سپس در بهمن ۱۳۹۳ در گلدان‌های پلاستیکی ۷ کیلویی (قطر ۱۹/۵ و ارتفاع ۲۳/۵ سانتی‌متر)، بر اساس جرم مخصوص ظاهری خاک مزرعه ($1/5\ gcm^{-3}$) پر گردید.

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با شش تیمار شامل: مایه‌زنی بذور با مایکوریزا، مایه‌زنی با ریزوبیوم، مایه‌زنی هم‌زمان با مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم، ماده زمینه سترون‌شده قارچی، شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) و شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) در سه تکرار اجرا گردید.

کودزیستی ریزوچک سوپرپلاس[1] با جمعیت تقریبی 10^8 باکتری *مزوریزوبیوم* در هر سانتی‌مترمکعب از شرکت فن‌آوری زیستی مهر آسیا، تهران، تهیه شد. کود ریزوچک پی سوپر پلاس ویژه مایه‌زنی نخود و به ریخت پودر و جامد است و به‌میزان ۱ کیلوگرم باکتری برای ۷۰ کیلو بذر نخود در هکتار استفاده شد. از محلول صمغ عربی برای چسبندگی بهتر کود زیستی به بذرها استفاده شد. در روز کاشت، بذرهای نخود با وزن ویژه‌ای (۰/۰٦٤ گرم) از چسب که داخل جعبه کود قرار داشت با اندازه مشخصی از آب شهری (۸ میلی‌لیتر) آماده شد و بذرهای نخود (۲۰۰ گرم) با آن آغشته گردیدند و سپس میزان ۵/۷۱ گرم از کود بر روی بذرهای نخود آماده‌شده با چسب پاشیده شد و به‌این‌ترتیب بذرهای نخود به باکتری *مزو ریزوبیوم* مایه‌زنی شدند.

بعد از خشک شدن نسبی سطح بذور در سایه، بذرها سریعاً کشت شدند. قبل از کشت مایه‌زنی با مایه قارچ انجام شد که شامل خاک، بقایای ریشه‌ای و اندام‌های قارچی و در هر گرم خاک شامل ۵۰ تا ۱۰۰

1- Super Plus Fertilizer Rhizochick

عدد اسپور بود. استفاده از زاد مایه در شرایط مزرعه بدین‌صورت انجام شد که قبل از کاشت در کرت‌های مربوط به تیمار قارچی ۲-۳ گرم زاد مایه درون حفره‌هایی که برای کاشت بذر ایجادشده بودند ریخته شد، سپس روی زاد مایه ۲-۳ بذر قرار داده شد و در نهایت بذرها با خاک پوشانده شدند.

برای مایه‌زنی بذور با قارچ مایکوریزا در شرایط گلخانه به گلدان‌هایی که شامل تیمار قارچ مایکوریزا بودند مقدار ۱۰۰ گرم زادمایه قارچ اضافه گردید. مایه‌زنی بذور نخود با باکتری ریزوبیوم× مایکوریزا به این صورت بود که، برای مایه‌زنی، بذرهای نخود مشابه با روش مزرعه‌ای با باکتری ریزوبیوم آغشته شدند و سپس به هر گلدان ۱۰۰ گرم مایه قارچی اضافه شد و بذور مایه‌زنی شده با باکتری ریزوبیوم نیز به آن‌ها اضافه گردیدند. برای آماده کردن تیمار ماده زمینه سترون‌شده مایکوریزا (حذف قارچ مایکوریزا)، مقداری از کود زیستی شامل مایکوریزا برای سه مرتبه به‌مدت یک ربع در اتوکلاو (فشار ۱ اتمسفر و دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس) استریل گردید. به گلدان‌هایی که شامل تیمار ماده زمینه سترون شده مایکوریزا بودند مقدار ۱۰۰ گرم از تیمار موردنظر اضافه گردید.

در شرایط گلخانه در ابتدا در درون هر گلدان تعداد ۵ بذر جوانه‌زده شده نخود قرار داده شد و بعد از خارج شدن گیاهچه از خاک فقط ۲ گیاهچه در هر گلدان حفظ و بقیه حذف شدند.

در شرایط مزرعه در تیرماه ۱۳۹۳ از هر واحد آزمایشی، از هرکدام از عمق‌های (۵ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۱۵) سانتی‌متر و در شرایط گلخانه در خردادماه ۱۳۹٤ از هر گلدان از سه عمق (۰ تا ۵، ۵ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر) نمونه‌های دست‌نخورده (به‌وسیله سیلندرهای استیل به قطر ۵/۳ و ارتفاع ٤/۵ سانتی‌متر) و نمونه دست‌خورده با احتیاط کامل و حداقل دست‌خوردگی جمع‌آوری شد.

به‌منظور تعیین ویژگی‌های شیمیایی، نمونه‌های دست‌خورده خاک هوا خشک شده و سپس از الک ۲ و ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شدند. توزیع اندازه ذرات (PSD) با هیدرومتر (۱۵)، گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات آمونیوم ۱ نرمال (۹)، پ‌هاش (pH) در عصاره ۱:۵ خاک به آب با استفاده از دستگاه پ‌هاش سنج‌متر- اهم مدل ۸۲۸ (٤۷)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱:۵ خاک به آب به کمک هدایت‌سنج الکتریکی جن‌وی مدل ۷۱۲ (٤۲)، فسفر قابل‌جذب به روش اولسن (۳٦)، پتاسیم قابل‌جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (٤۸)، نیتروژن کل به روش کجلدال (٦)، مواد آلی به روش اکسیداسیون تر (٤۹) و مقدار کربنات کلسیم خاک به روش تیتراسیون برگشتی (٤۵) اندازه‌گیری شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ آورده شده است. برای تعیین جرم مخصوص ظاهری از روش بلاک و هرتگه (۸) و تخلخل از روش هیلل (۱۸) استفاده شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Physical and chemical properties of the studied soil.

بافت Texture	پژمردگی دائم PWP	ظرفیت زراعی FC	واکنش خاک pH	گنجایش تبادل کاتیونی CEC	جرم مخصوص ظاهری D_b	هدایت الکتریکی EC	کربن آلی OC	ازت N	پتاسیم K	فسفر P	کربنات کلسیم $CaCO_3$
–	درصد وزنی	درصد وزنی	–	$cmol_c\ kg^{-1}$	gcm^{-3}	dSm^{-1}	%	%	$mgkg^{-1}$	$mgkg^{-1}$	%
لوم	7	20	7.82	21.67	1.5	0.34	0.73	0.47	260	10.8	0.8

تجزیه واریانس متغیرها و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (۹/۲) (۱۹) انجام گرفت. رسم نمودارها توسط Excel 2010 و بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف[1] در نرم‌افزار SAS انجام شد.

نتایج و بحث

در شرایط گلخانه ویژگی‌های شیمیایی خاک تنها برای عمق ۱۰-۵ و در شرایط مزرعه برای دو عمق ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ سانتی‌متر موردبررسی قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس تیمارها نشان داد تیمارهای مختلف تأثیر معنی‌داری بر گنجایش تبادل کاتیونی در دو شرایط گلخانه و مزرعه نداشتند (جدول ۲). گنجایش تبادل کاتیونی در ارتباط با سطح ویژه خاک است (۲٤). هم‌چنین، ماده آلی مؤثرترین ویژگی در برآورد گنجایش تبادل کاتیونی است. میرخانی و همکاران (۲۰۰۵) دلیل این امر را سطح ویژه بالای ماده آلی و داشتن گروه‌های عامل و تأثیر آن‌ها بر افزایش گنجایش تبادل کاتیونی دانستند (۳۳). از طرفی نیز تغییرات مقدار ماده آلی خاک در این پژوهش در حدی نبود که بتواند بر گنجایش تبادل کاتیونی خاک تأثیر بگذارد (داده‌ها گزارش نشده است)؛ بنابراین تأثیر تیمارهای مختلف بر گنجایش تبادل کاتیونی معنی‌دار نشد. نیشا و همکاران (۲۰۰۷) نیز گزارش کردند که تأثیر کودهای زیستی بر گنجایش تبادل کاتیونی در ارتباط با زمان است و با گذشت زمان مشهود می‌شود؛ بنابراین یکی از دلایل احتمالی دیگر برای تحت‌تأثیر قرار نگرفتن گنجایش تبادل کاتیونی خاک می‌تواند به‌علت کوتاه‌مدت بودن این پژوهش باشد (۳۵).

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر ویژگی‌های شیمیایی خاک در شرایط گلخانه و مزرعه در عمق ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ سانتی‌متر.

Table 2. Analysis of variance of the effects of the treatments on the soil chemical properties in the greenhouse and field conditions at depths of 5-10 and 10-15 cm.

عمق Depths	منابع تغییر Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات (MS) گنجایش تبادل کاتیونی CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$ soil)	هدایت الکتریکی EC ($dS\ m^{-1}$)	واکنش خاک pH
گلخانه Greenhouse 5-10	تیمار Treatment	5	0.50^{ns}	0.018^{**}	0.040^{**}
	بلوک Block	2	0.28^{ns}	0.0010^{ns}	0.011^{ns}
	خطا Errors	10	0.92	0.0016	0.0086
مزرعه Field 5-10	تیمار Treatment	3	3.19^{ns}	1.016^{ns}	0.0103^{**}
	بلوک Block	2	0.29^{ns}	0.00056^{ns}	0.0028^{ns}
	خطا Errors	6	3.22	0.0046	0.00098
مزرعه Field 10-15	تیمار Treatment	3	0.94^{ns}	0.00026^{ns}	0.0055^{ns}
	بلوک Block	2	0.95^{ns}	0.00035^{ns}	0.0031^{ns}
	خطا Errors	6	0.54	0.00064	0.0016

^{ns} و ** به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم تأثیر معنی‌دار و تأثیر معنی‌دار در سطح ۱ درصد می‌باشند.

^{ns} and ** indicate not significant and significant at $P < 0.01$, respectively.

1- Kolmogorov- Smirnov

تأثیر تیمارهای مختلف در شرایط گلخانه بر واکنش خاک و هدایت الکتریکی خاک و در شرایط مزرعه در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر بر واکنش خاک در سطح احتمال یک درصد آماری معنی‌دار بود (جدول ۲). با توجه به جدول ۲ هیچ‌کدام از پارامترهای شیمیایی در عمق ۱۵-۱۰ سانتی‌متر در شرایط مزرعه تحت‌تأثیر کودهای زیستی قرار نگرفتند و تیمارهای مختلف تفاوت معنی‌داری را ایجاد نکردند. بنابراین با توجه به معنی‌دار شدن تأثیر تیمارها بر واکنش خاک در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر شرایط مزرعه، احتمالاً ناحیه مؤثر ریشه در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر باشد و با افزایش عمق در شرایط مزرعه تأثیر تیمارهای مختلف و ریشه کاهش پیدا کرده است. چراکه مشابه با این پژوهش روسان و همکاران (۲۰۰۵) عمق مؤثر برای تأثیرگذاری قارچ مایکوریزا بر واکنش خاک را ناحیه ریزوسفر ریشه گزارش کردند و بیان نمودند که همه توده خاک تحت‌تأثیر قارچ قرار نمی‌گیرد (٤١).

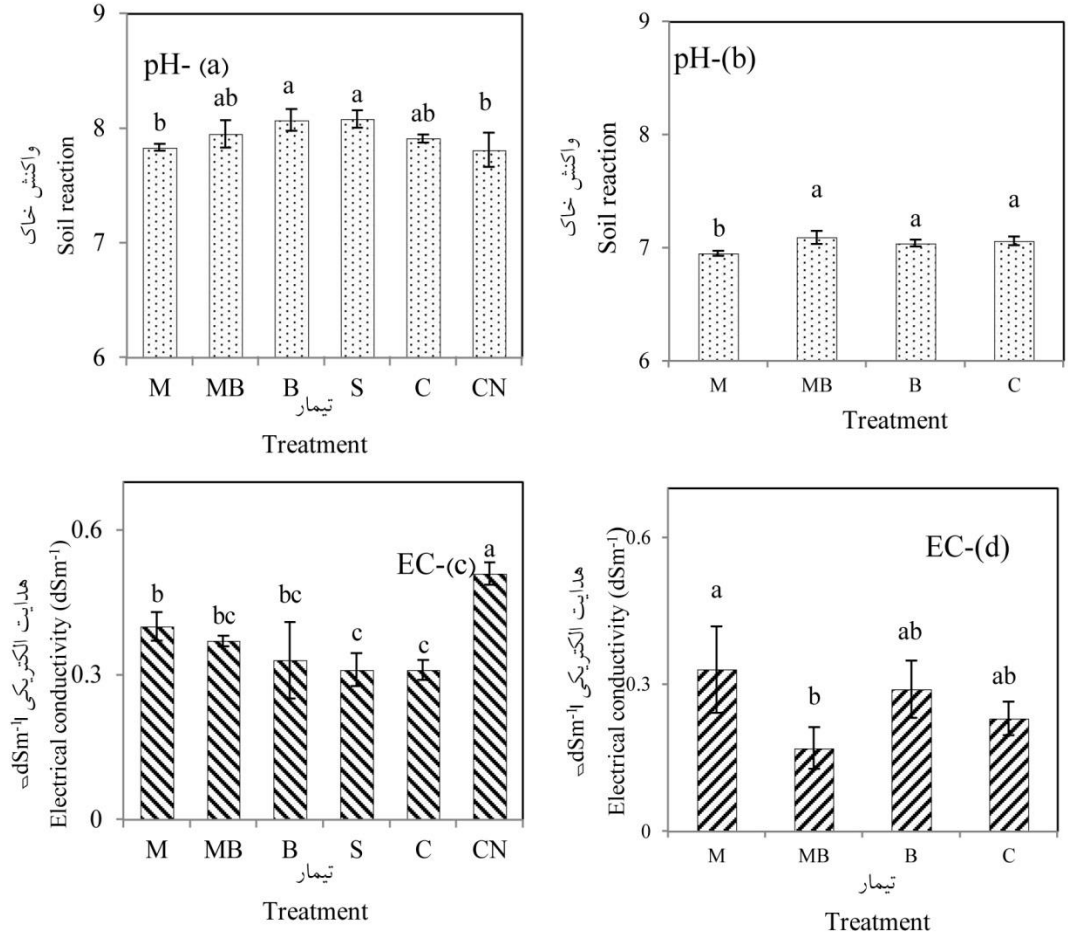
مقایسه میانگین تأثیر تیمارهای مختلف بر واکنش خاک در شرایط گلخانه نشان داد که استفاده از تیمار مایکوریزا باعث کاهش ۳ درصدی واکنش خاک نسبت به تیمار ماده زمینه سترون‌شده مایکوریزا و تیمار باکتری ریزوبیوم شد، که این کاهش از نظر آماری در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (شکل ۱-a). در شرایط مزرعه در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متری تیمار مایکوریزا به‌طور معنی‌داری باعث کاهش واکنش خاک نسبت به تیمار باکتری ریزوبیوم (۱/۹۷ درصد)، مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم (۱/۲٦درصد) و شاهد با گیاه (۱/۵۵ درصد) شد (شکل ۱-b). همچنین تفاوت معنی‌داری بین سه تیمار باکتری ریزوبیوم، مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم و شاهد وجود نداشت. روسان و همکاران (۲۰۰۵) نیز گزارش کردند که مایه‌زنی با مایکوریزا آربسکولار باعث کاهش واکنش خاک در ناحیه ریزوسفر ریشه شد (٤١). از طرفی نیز گیاهان میکوریزایی با تولید مقدار زیادی دی‌اکسیدکربن در ناحیه ریزوسفر ریشه (۲۱) باعث افزایش جمعیت میکروبی و افزایش میزان نیتریفیکاسیون (۲۵) می‌شوند؛ که منجر به افزایش اسیدیته و کاهش واکنش خاک می‌شوند. در این پژوهش در شرایط گلخانه مقدار کربن آلی در تیمارهای شامل مایکوریزا (۱/۰۲)، مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم (۰/۹٤) و شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) (۰/۸۵) گواهی بر این دلایل بود. از طرفی تیمار شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) نسبت به تیمار مایکوریزا تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. محیط و شرایط آب و هوایی، کیفیت آب، کیفیت خاک و ترکیبات آن و کودهای شیمیایی بر pH خاک مؤثرند.

در شرایط گلخانه تمامی تیمارها باعث کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک نسبت به شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) در دامنه ۲۲ تا ۳۹ درصد شدند (شکل ۱- c)؛ که این نتیجه احتمالاً نشان‌دهنده جذب سدیم و سایر املاح توسط گیاه است. شاهد بدون گیاه به‌علت عدم وجود گیاه بیش‌ترین هدایت الکتریکی (dSm^{-1}۰/۵۱) را داشت. از طرفی نیز تیمار مایکوریزا باعث افزایش ۲۹ درصدی ($P<$۰/۰۵) هدایت الکتریکی خاک نسبت به تیمار ماده زمینه سترون‌شده مایکوریزا و شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) شد و تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای شامل کود زیستی نبود. شاید علت عدم تفاوت معنی‌دار بین هدایت الکتریکی تیمارهای شامل کود زیستی، تأثیر مشابه این تیمارها بر برخی ویژگی‌های خاک از جمله هدایت الکتریکی و ساختمان خاک باشد. چراکه تأثیر این تیمارها بر جرم مخصوص ظاهری مشابه بود و تفاوت معنی‌داری را ایجاد نکرده بودند (شکل ۳).

گلومالین آزادشده از میکوریزا عملکرد بالقوه‌ای را در اکوسیستم‌های خاک نشان داده است، که شامل ارتقاء ذخیره کربن آلی خاک، بهبود ساختار خاکدانه‌های خاک و افزایش مقاومت گیاهان در برابر

تنش‌های محیطی است (۱٤). مشابه با این پژوهش بی و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که تیمار مایکوریزا باعث افزایش هدایت الکتریکی خاک شد (۷). در شرایط مزرعه نیز تیمار مایکوریزا باعث افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک نسبت به تیمار مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر شد (شکل ۱-d). هر چند که تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای شامل مایکوریزا، باکتری ریزوبیوم و شاهد وجود نداشت. اما با توجه به شکل ۱-d تیمار مایکوریزا باعث افزایش هدایت الکتریکی خاک گردید. در مقابل اخزری و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که ممکن است هدایت الکتریکی تحت‌تأثیر قارچ مایکوریزا قرار نگیرد (۲). نتایج نشان داد که در شرایط گلخانه‌ای احتمالاً گیاهان مایکوریزایی جذب سدیم را کاهش می‌دهند (۱). آل- کاراکی (۲۰۰٦) علت کاهش جذب سدیم در خاک‌های تحت تنش شوری در گیاهان مایکوریزایی نسبت به گیاهان غیرمایکوریزایی را ذخیره سدیم در ریشه یا در هیف‌های قارچ مایکوریزا و یا اینکه تجزیه آن در واکوئل سلول‌های ریشه گزارش کرد (۱). هر چند که تفاوت معنی‌داری بین تیمار باکتری ریزوبیوم و مایکوریزا× باکتری ریزوبیوم با شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) و ماده زمینه سترون‌شده نبود؛ اما با توجه به شکل ۱-c بیش‌ترین میانگین هدایت الکتریکی خاک از میان تیمارهای شامل گیاه در تیمارهای کود زیستی مشاهده شد. امین دلدار و همکاران (۲۰۱۲) نیز گزارش کردند که تیمار مایه‌زنی بذر با باکتری محرک رشد بیش‌ترین هدایت الکتریکی خاک را داشت و کم‌ترین هدایت الکتریکی در تیمار شاهد (بدون مایه‌زنی) دیده شد (۳)؛ بنابراین احتمالاً استفاده از تیمارهای کود زیستی باعث شده است که گیاه میزان جذب کلر و سدیم را کاهش دهد. در نتیجه باعث افزایش هدایت الکتریکی نسبت به تیمار شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) و ماده زمینه سترون‌شده مایکوریزا شوند که تیمار کود زیستی را دریافت نکرده‌اند، اما یکی از دلایل احتمالی بالا بودن هدایت الکتریکی در تیمار شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) (۰/۵۱ dSm^{-1}) در واقع عدم وجود گیاه و عدم جذب سدیم و کلر توسط گیاه، است. بنابراین تیمار مایکوریزا باعث کاهش هدایت الکتریکی به‌میزان ۲۷/۵ درصد نسبت به تیمار شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) شد ولی به‌علت کاهش مقدار جذب سدیم نسبت به گیاهان غیرمایکوریزایی باعث افزایش هدایت الکتریکی به‌میزان ۲۹ درصد نسبت به تیمارهای شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) و ماده زمینه سترون شده مایکوریزا گردید.

در شرایط مزرعه به‌علت تحت‌تأثیر قرار نگرفتن پارامتر تخلخل، داده‌ها گزارش نشده است. در شرایط گلخانه تأثیر تیمارهای کود زیستی در پایه ۵ درصد آماری بر تخلخل کل در عمق ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ سانتی‌متر معنی‌دار بود، ولی تیمارهای مختلف در عمق ۵-۰ سانتی‌متر تأثیر معنی‌داری بر تخلخل نداشتند (جدول ۳). مقایسه میانگین تیمارهای مختلف در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر نشان داد که تیمار شامل مایکوریزا باعث افزایش معنی‌دار تخلخل نسبت به تیمارهای ماده زمینه سترون‌شده مایکوریزا، شاهد بدون گیاه و شاهد با گیاه به‌ترتیب به‌میزان ۱۱، ۹/۷ و ۱۰/۷ درصد شد. هم‌چنین تفاوت معنی‌داری بین سه تیمار شامل کود زیستی وجود نداشت (شکل ۲-b). از طرفی در عمق ۱۵-۱۰ سانتی‌متر تیمارهای شامل کود زیستی و ماده زمینه سترون‌شده باعث افزایش معنی‌دار تخلخل نسبت به شاهد بدون گیاه به مقدار ۸/۲ تا ۹/۸ درصد شدند (شکل ۲-c).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر واکنش خاک در شرایط گلخانه (a) و شرایط مزرعه (b) و هدایت الکتریکی در شرایط گلخانه (c) و در شرایط مزرعه (d) در عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متری. M، MB، B، S، C و CN به‌ترتیب نشان‌دهنده تیمار مایکوریزا، مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم، باکتری ریزوبیوم، تیمار سترون‌شده مایکوریزا، شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) و شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) می‌باشند. در هر شکل وجود حروف مشابه بر روی هریک از ستون‌ها نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. خطوط عمودی بر روی هر ستون نشان‌دهنده انحراف استاندارد داده‌هاست.

Figure 1. The mean comparison of the effect of different treatments on the soil reaction in the greenhouse condition (a) and in the field condition (b) and electrical conductivity in the greenhouse condition (c) and in the field condition (d) at the depth of 5-10 cm. M, MB, B, S, C and CN, show mycorrhiza, mycorrhiza - rhizobium bacterium, rhizobium bacterium, sterilized mycorrhiza background material, control with plant (non-inoculated) and control without plant (non-inoculated), respectively. Similar lower case letters on the columns indicate no significant difference at P<0.05 based on Duncan's multiple mean comparison, between the treatments. The vertical line on bars shows the data's standard deviation.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر تخلخل کل (cm^3cm^{-3}) در عمق اول (۵-۰ سانتی‌متر)، دوم (۱۰-۵ سانتی‌متر) و سوم (۱۵-۱۰ سانتی‌متر).

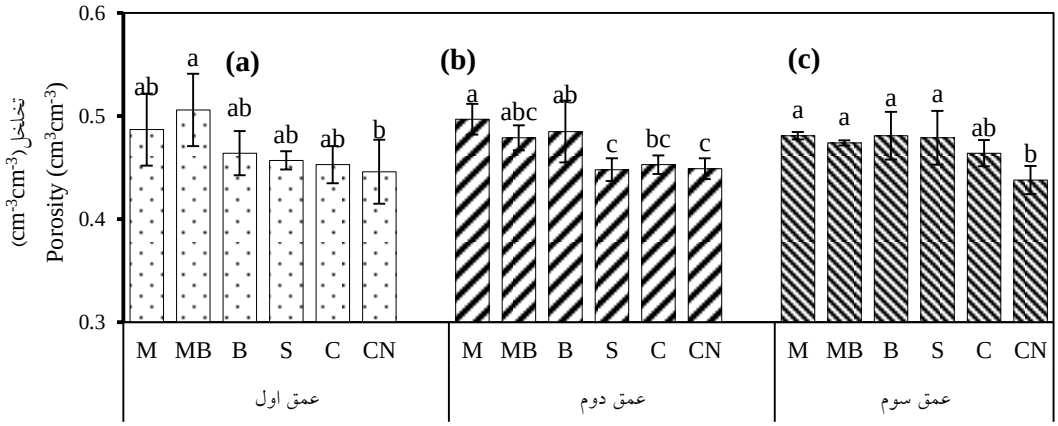
Table 3. Analysis of variance of the effects of treatments on the total porosity (cm^3 cm^{-3}) at the first (0-5 cm), second (5-10 cm), and third (15-10 cm) depths.

منابع تغییر Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares		
		عمق اول First depth (0-5 cm)	عمق دوم Second depth (5-10 cm)	عمق سوم Third depth (10-15 cm)
تیمار Treatment	5	0.0016 ^{ns}	0.0011*	0.0008*
بلوک Block	2	0.00045^{ns}	0.00040^{ns}	0.00002^{ns}
خطا Errors	10	0.0009	0.00025	0.00031

^{ns} و * به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم تأثیر معنی‌دار و تأثیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشند.

^{ns} and * indicate not significant and significant at P<0.05, respectively.

مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر تخلخل کل در عمق ۵-۰ سانتی‌متر نشان داد که همزیستی با قارچ مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم باعث افزایش معنی‌دار تخلخل کل به مقدار ۱۲ درصد نسبت به شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) شد، ولی تفاوت آن با سایر تیمارها معنی‌دار نشد (شکل ۲- a). افزایش تخلخل کل از طریق ایجاد منافذ ریز و متوسط فراوان در تیمارهای قارچی در مقایسه با شاهد (بدون قارچ) به‌دلیل کاهش چشمگیر در جرم مخصوص ظاهری بود (٤٤). از طرفی تغییر در ویژگی‌های منافذ بستگی به ارتباط بین حجم ریشه و حجم منافذ (۵) و وسعت و اندازه الگوی رشدی استفاده‌شده به‌وسیله ریشه برای نفوذ ریشه به داخل خاک بستگی دارد (٤). درنتیجه احتمالاً کودهای زیستی با تأثیرگذاری بر ریشه، بر تخلخل خاک تأثیر می‌گذارند. از طرفی نیز کم‌ترین میزان تخلخل در تیمار شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) مشاهده شد. چراکه ریشه تأثیر زیادی بر ساختمان خاک و هیدرولوژی خاک دارد (۲۹). بنابراین عدم وجود ریشه، ترشحات ریشه و مقدار کربن آلی کم‌تر باعث افزایش جرم مخصوص ظاهری در نتیجه کاهش تخلخل خاک در تیمار شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) گردیده است. تیمارهای باکتریایی و قارچی با افزایش تجمع خاک، پایداری و تخلخل خاک، پتانسیل بهبود ساختار خاک را دارند (۳۸). کاییتوو و همکاران (۲۰۱٦) گزارش دادند که مایه‌زنی گیاهان (نخود) با گونه‌های ریزوبیوم باعث افزایش معنی‌دار ماده خشک شاخه و ریشه و تعداد گره‌ها به‌ترتیب ۱۷، ۱۲ و ۲۰ درصد بالاتر از گیاهان مایه‌زنی شد (۲۰).



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر تخلخل کل در (a) عمق اول (۵-۰ سانتی‌متر)، (b) عمق دوم (۱۰-۵ سانتی‌متر) و (c) عمق سوم (۱۵-۱۰ سانتی‌متر). M، MB، B، S، C و CN به‌ترتیب نشان‌دهنده تیمار مایکوریزا، مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم، باکتری ریزوبیوم، تیمار سترون‌شده مایکوریزا، شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) و شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) می‌باشند. در هر بخش شکل وجود حروف مشابه بر روی هریک از ستون‌ها نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. خطوط عمودی بر روی هر ستون نشان‌دهنده انحراف استاندارد داده‌ها است.

Figure 2. The mean comparison of the effect of different treatments on the total porosity at (a) the first depth (0-5 cm), (b) the second depth (5-10 cm) and (c) the third depth (10-15 cm). M, MB, B, S, C and CN, show mycorrhiza, mycorrhiza - rhizobium bacterium, rhizobium bacterium, sterilized mycorrhiza background material, control with plant (non-inoculated) and control without plant (non-inoculated), respectively. At each section similar letters on the columns indicate no significant difference at P<0.05 based on Duncan's multiple mean comparison, between the treatments at that section. The vertical line on bars shows the data's standard deviation.

وانگ و همکاران (۲۰۱۸) افزایش ارتفاع ساقه، وزن خشک ساقه و ریشه و وزن خشک کل در گیاهان میکورزایی نسبت به غیرمیکوریزایی را گزارش کردند (۵۰). بنابراین استفاده هم‌زمان از مایکوریزا× باکتری ریزوبیوم با تأثیرگذاری بر ریشه و در نتیجه ترشحات ریشه باعث بهبود ساختمان خاک در نتیجه افزایش تخلخل کل گردید (شکل ۲).

در شرایط مزرعه به‌علت تحت‌تأثیر قرار نگرفتن جرم مخصوص ظاهری، داده‌ها گزارش نشده است. در شرایط گلخانه تیمارهای مختلف تأثیر معنی‌داری (در پایه احتمال ۵ درصد) بر جرم مخصوص ظاهری در عمق‌های ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ سانتی‌متر داشتند، ولی تأثیر تیمارها در عمق ۵-۰ سانتی‌متر بر جرم مخصوص ظاهری معنی‌دار نشد (جدول ٤). احتمالاً عمق مؤثر ریشه در پژوهش گلخانه‌ای عمق ۱۰-۵ و ۱۵-۱۰ سانتی‌متر بوده است. در عمق ۵-۰ سانتی‌متر تیمار مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم باعث کاهش ۱۲ درصدی جرم مخصوص ظاهری (P<۰/۰۵) نسبت به شاهد بدون گیاه (بدون تلقیح) شد، ولی بین سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۳- a). علت تأثیر بیش‌تر و معنی‌دار قارچ مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم نسبت دیگر تیمارها بر جرم مخصوص ظاهری در عمق ۵-۰ سانتی‌متر را می‌توان به افزایش درصد کلنیزاسیون ریشه و یا احتمالاً حجم بیش‌تر ریشه و ترشحات بیش‌تر در تیمار قارچ مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم نسبت داد. در این پژوهش نیز به‌علت برداشت نمونه دست‌نخورده امکان برداشت ریشه و اندازه‌گیری عملکرد وجود نداشت. بنابراین پایداری ساختمان خاک باعث افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و کاهش جرم مخصوص ظاهری و تغییر توزیع خلل و فرج خاک می‌شود (۲۸).

جدول ٤- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای مختلف بر جرم مخصوص ظاهری خاک (gcm^{-3}) در عمق اول (۵-۰ سانتی‌متر)، دوم (۱۰-۵ سانتی‌متر) و سوم (۱۵-۱۰ سانتی‌متر).

Table 4. Analysis of variance of the effects of treatments on the bulk density (g cm^{-3}) at the first (0-5 cm), second (5-10 cm) and third (15-10 cm) depths.

منابع تغییر Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean squares		
		عمق اول First depth (0-5 cm)	عمق دوم Second depth (5-10 cm)	عمق سوم Third depth (10-15 cm)
تیمار Treatment	5	0.011 ns	0.0079 *	0.0059 *
بلوک Block	2	0.0031 ns	0.0030 ns	0.00012 ns
خطا Errors	10	0.0055	0.0018	0.0022

ns و * به‌ترتیب نشان‌دهنده عدم تأثیر معنی‌دار و تأثیر معنی‌دار در سطح ۵ درصد می‌باشند.

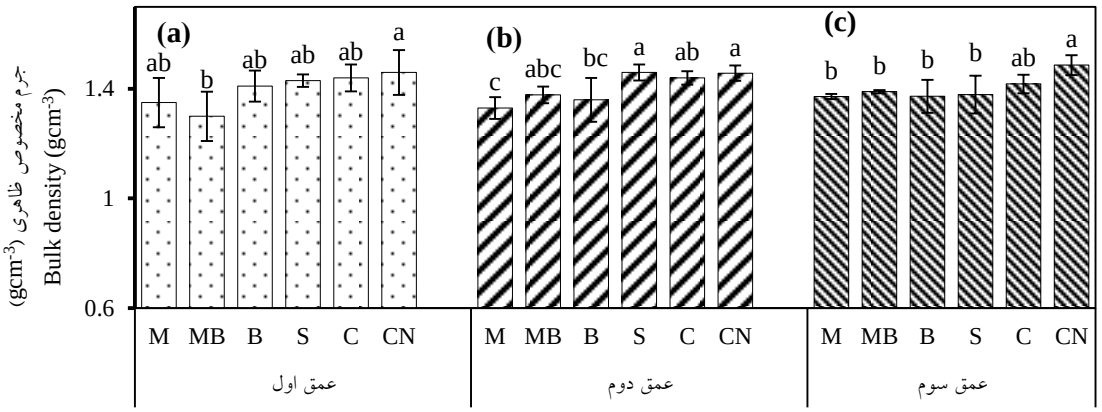
ns and * indicate not significant and significant at P<0.05, respectively.

در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر تیمار مایکوریزا باعث کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری نسبت به ماده زمینه سترون‌شده مایکوریزا (به مقدار ۹/۷ درصد) و دو شاهد (به مقدار ۹/۵ درصد) شد، ولی تفاوت معنی‌داری بین جرم مخصوص ظاهری تیمارهای باکتری ریزوبیوم، مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم و ماده زمینه سترون‌شده مایکوریزا با هر دو شاهد مشاهده نشد (شکل ۳- b). هم‌چنین کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری در تیمار قارچی نسبت به شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) در عمق ۱۰-۵ سانتی‌متر احتمالاً به افزایش بخش آلی فاز جامد خاک در اثر ترشحات قارچ و ریشه برمی‌گردد. چراکه مایکوریزا از طریق اتصال ذرات به یکدیگر باعث تبدیل خاکدانه‌های ریز به خاکدانه‌های درشت شده و باعث پایداری خاکدانه‌ها، درنتیجه بهبود ساختمان خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل خاک (۳۲) می‌گردد. اخضری (۲۰۱۵) نیز کاهش جرم مخصوص ظاهری را در تیمارهای قارچ مایکوریزا گزارش کرد (۲). فرهادی و همکاران (۲۰۱۷) گزارش کردند که قارچ میکوریز آربسکولار با بهبود شرایط رشد گیاه و افزایش کلنیزاسیون ریشه (و افزایش ترشح گلومالین) و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک می‌تواند به کاهش فرسایش خاک کمک کند (۱۳).

در عمق ۱۵-۱۰ سانتی‌متر تیمارهای شامل کود زیستی و ماده زمینه سترون‌شده باعث کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری نسبت به شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) به مقدار ٦/۵ تا ۷/۷ درصد شدند و بین دو شاهد تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۳- c). در هر سه عمق نیز تیمار شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) بیش‌ترین میانگین جرم مخصوص ظاهری را داشت. با توجه به شکل ۳ کم‌ترین میانگین جرم مخصوص ظاهری، در هر سه تیمار شامل کود زیستی مشاهده شد. کاهش معنی‌دار جرم مخصوص ظاهری می‌تواند در تیمارهای شامل کود زیستی ناشی از افزایش تخلخل کل (شکل ۲)، به‌علت تغییر در

توزیع اندازه منافذ خاک در مقایسه با شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) باشد. به‌عبارت دیگر خاکدانه‌سازی از طریق افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (داده‌ها گزارش نشده است) در تیمارهای قارچی منجر به کاهش جرم مخصوص ظاهری در مقایسه با شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) گردیده است. فرهادی و همکاران (۲۰۱۷) کاهش جرم مخصوص ظاهری را در تیمار قارچ مایکوریزا آربسکولار گزارش کردند (۱۳).

هیدایت و همکاران (۲۰۱۷) اثرات نوع کودهای قارچی و قارچ‌های میکوریزی را بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک موردبررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که در تیمارهای مایه‌زنی شده با قارچ‌های میکوریزی، جرم مخصوص ظاهری کاهش و میزان تخلخل خاک افزایش یافته است (۱۷). جرم مخصوص ظاهری تحت‌تأثیر ساختمان خاک قرار دارد و شاخصی برای تراکم خاک، تهویه و توسعه آسان ریشه به‌ویژه در خاک با مقدار زیاد رس است.



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف بر جرم مخصوص ظاهری در (a) عمق اول (۵-۰ سانتی‌متر)، (b) عمق دوم (۱۰-۵ سانتی‌متر) و (c) عمق سوم (۱۵-۱۰ سانتی‌متر). M، MB، B، S، C و CN به‌ترتیب نشان‌دهنده تیمار مایکوریزا، مایکوریزا و باکتری ریزوبیوم، باکتری ریزوبیوم، تیمار سترون‌شده مایکوریزا، شاهد با گیاه (بدون مایه‌زنی) و شاهد بدون گیاه (بدون مایه‌زنی) می‌باشند. وجود حروف مشابه بر روی هر یک از ستون‌ها نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. خطوط عمودی بر روی هر ستون نشان‌دهنده انحراف استاندارد داده‌ها است.

Figure 3. The mean comparison of the effect of different treatments on the bulk density of (a) the first depth (0-5 cm), (b) the second depth (5-10 cm) and (c) the third depth (10-15 cm). M, MB, B, S, C and CN, show mycorrhiza, mycorrhiza - rhizobium bacterium, rhizobium bacterium, sterilized mycorrhiza background material, control with plant (non-inoculated) and control without plant (non-inoculated), respectively. At each section similar lower case letters on the columns indicate no significant difference at P<0.05 based on Duncan's multiple mean comparison, between the treatments at that section. The vertical line on bars shows the data's standard deviation.

نتیجه‌گیری کلی

در شرایط مزرعه غالب تیمارها تأثیر معنی‌داری بر ویژگی‌های موردمطالعه نداشتند. شرایط مزرعه باعث کاهش اثر تیمارها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک گردید که احتمالاً می‌تواند به‌علت تأثیر کم‌تر تیمارهای اعمال‌شده به‌علت وسعت زیاد منطقه و از طرفی شرایط محیطی کنترل نشده باشد. چراکه تأثیر زیاد تیمارها بر ساختمان خاک در شرایط گلخانه (شرایط

کنترل‌شده و استفاده از گلدان) نشان‌دهنده این موضوع است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش در شرایط گلخانه، مشخص شد که کاربرد کود زیستی، بر ساختمان خاک اثر داشته و با بهبود توزیع اندازه منافذ خاک باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل شده است. در شرایط گلخانه تیمار مایکوریزا احتمالاً با کاهش جذب کلر و سدیم باعث افزایش هدایت الکتریکی شد؛ بنابراین، استفاده از کودهای زیستی یکی از راهکارهای مناسب برای بهبود ویژگی‌های شیمیایی است. استفاده هم‌زمان از تیمار مایکوریزا × باکتری ریزوبیوم می‌تواند باعث افزایش درصد کلنیزاسیون ریشه و یا احتمالاً حجم بیش‌تر ریشه و ترشحات بیش‌تر در این تیمار شود و درنتیجه باعث بهبود بیش‌تر ساختمان خاک گردد. از طرفی با توجه به این‌که تیمارهای مختلف تأثیر متفاوتی بر عمق ریشه‌زنی گیاهان و عملکرد گیاه دارند، تأثیر تیمارهای مختلف در این پژوهش در اعماق مختلف بر بهبود ساختمان خاک متفاوت بود. به‌طورکلی تیمارهای شامل کود زیستی با تأثیرگذاری بر عملکرد گیاه و ریشه گیاه باعث بهبود پارامترهای فیزیکی و ساختمان خاک شدند. توصیه می‌شود در پژوهش‌های بعدی کارایی سایر گونه‌ها همراه با گیاهان دیگر و در مدت زمان طولانی به‌خصوص در شرایط مزرعه موردبررسی قرار بگیرد.

منابع

1. Al-Karaki, G. 2006. Nursery inoculation of tomato with arbuscular mycorrhizal fungi and subsequent performance under irrigation with saline water. J. Sci. Hort. 109: 1-7.
2. Akhzari, D., Attaeian, B., Arami, S.A., Mahmoodi, F., and Aslani, F. 2015. Effects of Vermicompost and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Soil Properties and Growth of *Medicago polymorpha* L. Compost Science and Utilization. 23: 3. 142-153.
3. Aminadldar, Z., Ehteshami, M., Shahidi Komaleh, A., and Khawazi, K. 2012. Effect of Pseudomonas Bacteria on Chemical-Biological Properties of Soil, Yield and Yield Components of Two Rice Cultivars. J. Crop Prod. Proc. 11: 149-159. (In Persian)
4. Bodner, G., Leitner, D., and Kaul, H.P. 2014. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. Plant and Soil. 380: 1-2. 133-151.
5. Bengough, A. 2012. Water dynamics of the root zone: rhizosphere biophysics and its control on soil hydrology. Vadose Zone J. 11: 2.
6. Bremner, J.M. 1970. Nitrogen total, regular Kjeldahl method. P 610-616, In: Methods of Soil Analysis, Part II: Chemical and Microbiological Properties. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsim.
7. Bi, Y., Zhang, Y., and Zou, H. 2018. Plant growth and their root development after inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi in coal mine subsided areas. Inter. J. Coal Sci. Technol. 5: 1. 1-7.
8. Blake, G.R., and Hartge, K.H. 1986. Bulk density. P 363-375, In: Klute, A. (eds), Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America, Madison, USA.
9. Bower, C.A., Reitemeier, R., and Fireman, M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Science. 73: 4. 251-262.
10. Buwalda, J., Stribley, D., and Tinker, P., 1983. Increased uptake of anions by plants with vesicular-arbuscular mycorrhizas. Plant and Soil. 71: 1-3. 463-467.
11. Egamberdiyeva, D. 2007. The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils. Applied Soil Ecology. 36: 2-3. 184-189.

12.Esitken, A., Yildiz, H.E., Ercisli, S., Donmez, M.F., Turan, M., and Gunes, A. 2010. Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) on yield, growth and nutrient contents of organically grown strawberry. Scientia Horticulturae. 124: 62-66.
13.Farhadi, A., Enayatizamir, N., Farrokhian Firouzi, A., and Howeizeh, H. 2017. The Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Drought Stress on Glomalin Content and Some Physical and Mechanical properties of Soil under Blue Panic Grass Cultivation (Panicum antidotal). Water and Soil Conservation. 23: 5. 267-280. (In Persian)
14.Gao, W.Q., Wang, P., and Wu, Q.S. 2019. Functions and application of glomalin-related soil proteins: A Review. Sains Malaysiana. 48: 1. 111-119.
15.Gee, G.W., and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis, P 383-411, In: Klute, A., (ed), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison.
16.Giri, B., Kapoor, R., Mukerji, K.J.B., and Soils, F.O. 2003. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi and salinity on growth, biomass and mineral nutrition of Acacia auriculiformis. Biology and Fertility of Soils. 38: 3. 170-175.
17.Hidayat, C., Rosdiana, R., Frasetya, B., and Hasani, S. 2017. Improvement of physical properties of inceptisols and yield of sweet corn affected by arbuscular mycorrhizal fungi and manure applications. KnE Life Sci. 2: 158-163.
18.Hillel, D. 1971. Soil and Water, Physical Principles and Processes. Academic Press, New York.
19.Institute, S. 1985. SAS user's guide: statistics, Sas Inst.
20.Khaitov, B., Kurbonov, A., Abdiev, A., and Adilov, M. 2016. Effect of chickpea in association with Rhizobium to crop productivity and soil fertility. Eurasian J. Soil Sci. 5: 2. 105-112.
21.Knight, W., Allen, M., Jurinak, J., and Dudley, L. 1989. Elevated carbon dioxide and solution phosphorus in soil with vesicular-arbuscular mycorrhizal western wheatgrass. Soil Sci. Soc. Amer. J. (USA). 53: 4. 1075-1082.
22.Kohler-Milleret, R., Le Bayon, R.C., Chenu, C., Gobat, J.M., and Boivin, P. 2013. Impact of two root systems, earthworms and mycorrhizae on the physical properties of an unstable silt loam Luvisol and plant production. Plant and soil. 370: 251-265.
23.Kristek, S., Kristek, A., and Pavlovic, H. 2005. The influence of mycorrhizal fungi (*Glomus* sp.) on field pea plant survival and growth in drought caused stress conditions. Plant Soil and Environment. 51: 9. 385.
24.Lal, R., and Shukla, M.R. 2004. Principles of Soil Physics. Marcel Dekker, New York.
25.Li, X.L., George, E., and Marschner, H. 1991a. Phosphorus depletion and pH decrease at the root–soil and hyphae–soil interfaces of VA mycorrhizal white clover fertilized with ammonium. New phytologist. 119: 3. 397-404.
26.Lehmann, A., Zhend, W., and Rillige, M.C. 2017. Soil biota contributions to soil aggregation. Nature Ecology and Evolution. 1: 1828-1835.
27.Lind, K., Lafer, G., Schloffer, K., Innerhoffer, G., and Meister, H. 2003. Organic Ruit Growing. CABI Pub., Wallingford, UK.
28.Lindsay, B.J., and Logan, T.J. 1998. Field response of soil physical properties to sewage sludge. Environmental Quality. 27: 3. 534-542.
29.Logsdon, S.D. 2013. Root effects on soil properties and processes: synthesis and future research needs. In: T., Timlin and Ahuja, LR (eds) Enhancing understanding and quantification of soil–root growth interactions. Adv. Agric. Syst. Model 4.
30.Marschner, H., and Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. Plant and Soil. 159: 1. 89-102.

31.Martin, S., Mooney, S., Dickinson, M., and West, H. 2012. The effects of simultaneous root colonisation by three Glomus species on soil pore characteristics. Soil Biology and Biochemistry. 49: 167-173.
32.Milleret, R., Le Bayon, R.C., and Gobat, J.M. 2009. Root, mycorrhiza and earthworm interactions: their effects on soil structuring processes, plant and soil nutrient concentration and plant biomass. Plant and soil. 316: 1-2. 1-12.
33.Mirkhani. R., Shabanpour, M., and Saadat, S. 2005. Using Relative Particle Frequency and Organic Carbon Percentage to Estimate Cation Exchange Capacity of Soils of Lorestan Province. J. Soil Water Sci. 2: 19. 242-235. (In Persian)
34.Moalem, A.H., and Eshghizadeh, H. 2007. The Application of Biological Fertilizers: Benefits and Limitations. Proceedings of the Second Iranian National Conference on Ecological Agriculture. (In Persian)
35.Nisha, R., Kaushik, A., and Kaushik, C. 2007. Effect of indigenous cyanobacterial application on structural stability and productivity of an organically poor semi-arid soil. Geoderma. 138: 1-2. 49-56.
36.Olsen, S.R. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Department of Agriculture, Washington, DC.
37.Ortas, I.J. 2015. Comparative analyses of Turkey agricultural soils: Potential communities of indigenous and exotic mycorrhiza species' effect on maize (*Zea mays* L.) growth and nutrient uptakes. Europ. J. Soil Biol. 69: 79-87.
38.Rashid, M.I., Mujawar, L.H., Shahzad, T., Almeelbi, T., Ismail, I.M.I., and Oves, M.J.M.R. 2016. Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. Microbiol Res. 183: 26-41.
39.Rubin, J., and sturmer, S.L. 2015. Mycorrhizal inoculum potential and the importance of the mycelium length for aggregation of riparian soils. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 39: 1. 59-68.
40.Rillig, M.C., Muller, L.A., and Anika, L. 2017. Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators. Isme J. 11: 9. 1943-1948.
41.Rusan, M., Pan, W., and Kennedy, A. 2005. Chemical alteration of the rhizosphere of the mycorrhizal-colonized wheat root. Mycorrhiza. 15: 4. 259-266.
42.Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Shouse, P.J., and Alves, W.J. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. Soil Sci. Soc. Amer. J. 53: 2. 433-439.
43.Saleh Rastin, N. 1998. Biological Fertilizers . Soil and Water. 3: 12. 1-36. (In Persian)
44.Samaei, F., Asghari, S., and Aliasgharzad, N. 2015. The effects of two arbuscular mycorrhizal fungi on some physical properties of a sandy loam soil and nutrients uptake by spring barley. Soil Environ. 1: 1. 1-9.
45.Sims, J.T. 1996. Lime requirement. P 491-515, In: D.L. Sparks et al., (eds). Methods of Soils Analysis,. Part 3-Chemical Methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
46.Sulfab, H.A. 2013. Effect of bioorganic fertilizers on soil fertility and yield of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) in Malakal Area, Republic of South Sudan. Journal of Natural Resources and Enviromental Studies. 12: 12. 14-19.
47.Thomas, G.W. 1996. Soil pH and Soil Acidity. P 475-490, In: D.L., Sparks (ed). Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods, SSSA Book Series 5, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
48.Varley, J.A. 1966. Automatic methods for the determination of nitrogen, phosphorus and potassium in plant material. Analyst. 91: 1079. 119-126.
49.Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science. 37: 29-38.

50.Wang, J., Li, T., Yang, H., Hu, T., Nie, L.,Wang, F., Alcala, M., and Zang, H. 2018. Geographical origin discrimination and polysaccharides quantitative analysis of radix codonopsis with micro near-infrared spectrometer engine. J. Innov. Optic. Health Sci. Pp: 1-11.

51.Zhang, H., Wu, X., Li, G., Qin, P.J.B., and Soils, F.O. 2011. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing fungus (*Mortierella* sp.) and their effects on Kostelelzkya virginica growth and enzyme activities of rhizosphere and bulk soils at different salinities. Biology and Fertility of Soils. 47: 5. 436.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 27(1), 2020
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2020.16986.3238

Short-term effects of bio-fertilizers application on some soil physical and chemical properties

L. Heydari[1], *H. Bayat[2] and J. Hamzei[3]

[1]Ph.D. Student, Dept. of Soil Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran,
[2]Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran,
[3]Associate Prof., Dept. of Agronomy and Plant Breeding, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
Received: 08.03.2019; Accepted: 01.28.2020

Abstract

Background and Objectives: Bio-fertilizers can affect soil structure by affecting soil porosity and aggregate stability. In fact, the activity of soil microorganisms, in addition to their effects on plant roots, has significant effects on organic compounds and, in most cases, soil structure. Therefore, the aim of this study was to investigate the effect of bio-fertilizers namely mycorrhiza fungi (*Glomus mosseae*) and rhizobium (*Mesorhizobium caesar*) separately and together on some physical (bulk density and soil porosity) and chemical (Soil reaction, electrical conductivity and cation exchange capacity) properties of soil under greenhouse and field conditions, which has been less studied, so far. Because the application of bio-fertilizers in the soil can be one of the best ways to maintain and improve the physical and chemical quality of the soil.

Materials and Methods: In order to investigate the effect of Mycorrhiza fungi and Rhizobium on some chemical and physical properties of soil, an experiment was conducted in both field and greenhouse conditions in a completely randomized-block design with three replications. Mycorrhizal fungi specie *Glomus mosseae*, rhizobium (*Mesorhizobium*), mycorrhiza - rhizobium and control (no bio-fertilizer) were the treatments at the field condition. Sterilized mycorrhiza background material and non-plant (non-bio-fertilizer) were the two additional treatments in the greenhouse condition. The plant cultivated in this experiment was chickpea. At the end of the growing season, disturbed and undisturbed soil samples were taken from different depths and physical and chemical soil properties, mentioned above, were measured.

Results: In the field and greenhouse conditions, mycorrhiza treatment reduced soil pH. Different treatments had no significant effect on cation exchange capacity under greenhouse and field conditions. Probably because, the cation exchange capacity associated with the soil specific surface area. In the greenhouse condition, the lowest bulk density at the first depth 0-5 cm ($P<0.05$) was observed in pots containing mycorrhiza-rhizobium treatments (1.30 g cm^{-3}) and mycorrhiza (1.36 g cm^{-3}) and the highest bulk density was observed in the control treatment without plant and without inoculation (1.49 g cm^{-3}). Also, treatments containing bio-fertilizer significantly increased soil porosity compared to the control without plant. So that, in the first depth (0-5 cm), the mycorrhiza × rhizobium bacteria treatment (0.50 cm^3cm^{-3}), in the second depth (5-10 cm), the mycorrhiza treatment (0.49 cm^3cm^{-3}) and in the third depth (10-15 cm), all three bio-fertilizer treatments, had the highest porosity. The field conditions reduced the effects of the treatments on the soil physical properties, which may be due to the less impact of the treatments applied due to the large extent of the area and the uncontrolled environmental conditions.

* Corresponding Author; Email: h.bayat@basu.ac.ir

Conclusion: Since different bio-fertilizer treatments had different effects on rooting depth and plant yield, the effect of the different treatments on soil structure improvement was different at different depths. In general, treatments containing bio-fertilizers improved the soil physical parameters and structure by affecting plant and root yield.

Keywords: Bulk density, Mycorrhiza, Porosity, Rhizobium bacteria