بررسی تاثیر برخی مواد آلی، معدنی و باکتری‌های محرک رشد گیاه در اصلاح خصوصیات فیزیکی و شیمیایی یک خاک اِنتی‌سول شنی

چکیده

هدف این مطالعه دستیابی به یک ترکیب مناسب از مواد آلی، معدنی و ریزجانداران برگزیده برای اصلاح خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی لایه سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) یک خاک شنی غیرشور (انتی‌سول)، از رسوبات بادی نجم‌آباد کرج بود. طرح آزمایشی فاکتوریل کاملا تصادفی شامل سه سطح بنتونیت (B0، B20 و B40) به ترتیب ۰، ۲۰ و ۴۰ $Ton\ ha^{-1}$، سه سطح کربوکسی‌متیل سلولز (C3،C0 و C5) به ترتیب ۰، ۳ و ۵ $g\ kg^{-1}$ و مخلوط دو جدایه از باکتری اندوفیت (*Pseudomonas sp*) و رایزوشیت (*Pantoea agglomerans*) در سه سطح (M0، M20 و M40) به ترتیب ۰، ۲۰، و ۴۰ $mL\ kg^{-1}$ و مجموعا ۲۷ تیمار با ۳ تکرار (۸۱ واحد آزمایشی) تهیه و اجرا شد. جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها و شناسایی تیمارهای برتر از روش‌های آماری چند متغیره شامل تحلیل مولفه-های اصلی، خوشه‌بندی سلسله مراتبی و خوشه‌بندی دو مرحله‌ای استفاده شد. طبق خوشه‌بندی دو مرحله‌ای و بر اساس درجه اهمیت نسبی (RI) متغیرهای آهن قابل جذب (RI=1)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (RI=0.99) ، رطوبت ظرفیت زراعی(RI=0.97) ، نیتروژن کل (RI=0.87)، پتاسیم قابل جذب (RI=0.83) و آنزیم دهیدروژناز (RI=0.8) به ترتیب به عنوان مهم‌ترین متغیرها شناخته شدند. متغیرهای آهن قابل جذب با دامنه تغییر ۱/۷۵ تا ۷/۰۸ $mg\ kg^{-1}$، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با دامنه تغییر ۰/۳۱ تا ۱/۱۵ mm ، نیتروژن کل با دامنه تغییر ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۶ %، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای با دامنه تغییر ۸/۰۳ تا ۱۲/۸۲ %، پتاسیم قابل جذب با دامنه تغییر ۲۸۰/۸ تا ۴۱۶/۶۶ $mg\ kg^{-1}$ و آنزیم دهیدروژناز با دامنه تغییر ۰/۰۷ تا ۰/۱۴۸ $\mu gTPF\ g\ soil\ 24h^{-1}$ دارای بیشترین تاثیر در تفکیک تیمارها به خوشه‌های مختلف بودند. نتایج این مطالعه نشان داد تیمارهای B20 C5 M20، B40 C5 M10، B40 C5 M20، B40 C3 M20 و B40 C3 M10 از عملکرد بهتری جهت اصلاح برخی خصوصیات خاک نسبت به سایر تیمارها برخوردار هستند.

کلید واژه‌ها: *اندوفیت، بنتونیت، رایزوشیت، کربوکسی‌متیل سلولز*

Investigating the effects of some selected organic, inorganic materials and plant growth promoting bacteria in modifying the physical and chemical properties of a sandy Entisol

Abstract

The aim of the study is to combine organic, inorganic materials and selected microorganisme to modify the physical, chemical and biological characteristics of a non-saline sandy Entisol (0-20 cm), from NajmAbad Karaj aeolian sediments. This research was conducted in the frame of factorial Completely Randomized Design with three levels of bentonite 0, 20 and 40 $Ton\ ha^{-1}$ respectively, carboxymethyl cellulose 0, 3 and 5 $g\ kg^{-1}$ respectively and mixture of two isolates of endophytic bacteria (*Pseudomonas sp*) and rhizosheath (*Pantoea agglomerans*) at three levels respectively 0, 20, and 40 $mL\ kg^{-1}$ and a total of 27 treatments with 3 replications (81 samples). Multivariate statistical methods including Principal component Analysis (PCA), hierarchical clustering, and two-step clustering were used. Based on Two-step clustering, available Fe (RI=1), mean weighted diameter (RI=0.99), field capacity (RI=0.97), total N (RI=0.87), available K (RI=0.83), and dehydrogenase (RI=0.8) were identified as the most important (RI) variables. Variables including Fe available with a range of 1.75 to 7.08 $mg\ kg^{-1}$, mean weight diameter with a range of 0.31 to 1.15 mm, total nitrogen with a range of 0.014 to 0.06%, field capacity with a range of 8.03 to 12.82%, available K with a range of 280.8 to 416.66 $mg\ kg^{-1}$ and dehydrogenase enzyme with a range of 0.07 to 0.148 $\mu gTPF\ g\ soil\ 24\ h^{-1}$, had the highest effect in the clustering treatments. The results of this study showed that treatments B20C5M20, B40C5M10, B40C5M20, B40C3M20 and B40C3M10 have better performance to modify certain soil properties compared to other treatments.

Keywords: *endophyte, bentonite, rhizosheath, carboxymethyl cellulose*

مقدمه

انتی‌سول‌های شنی[1] (Psamment) در سرتاسر جهان از مناطق بسیار مرطوب تا معتدل، نیمه‌خشک و خشک پراکنده بوده و حدود ۹۰۰ Mha را پوشش می‌دهند (Yost & Hartemink, 2019) . این خاک‌ها علیرغم کشت و کار، اغلب باردهی کمی دارند که بستگی به میزان کربن آلی، درصد رس و شرایط رطوبتی آنها دارد. ویژگی‌های شناخته شده خاک‌های شنی، ظرفیت کم نگهداری آب، نفوذپذیری بالا و توانایی کم برای ذخیره و تبادل عناصر غذایی است. خاک‌های شنی به دلیل میزان کم رس، سیلت و مواد آلی، ساختمان ضعیفی دارند و مستعد فرآیندهای تخریب هستند. کمبود آب و عناصر غذایی منجر به پایین بودن فعالیت‌های زیستی این نوع خاک‌ها می‌شود و محدود شدن رشد گیاهان و میکروب‌ها می‌شود. اصلاح خاک‌های شنی با توجه به تغییرات آب و هوایی و دوره‌های خشکسالی شدید ممکن است چالش برانگیز باشد. به همین دلیل نیاز فوری به توسعه راهبردهای مناسب برای حفاظت و اصلاح آنها وجود دارد. مشکل اصلی برای بهره-برداری از این نوع خاک‌ها، توانایی کم آن‌ها در حفظ آب و حاصلخیزی پایین آن‌ها است که نیاز به افزودن کودهای معدنی دارند که هزینه‌ها و آلودگی محیطی را افزایش می‌دهد. افزایش بهره‌وری از این نوع خاک‌ها مستلزم استفاده از اصلاح کننده‌های خاک به منظور افزایش حاصلخیزی خاک است (Bednik et al., 2020).

اصلاح‌کننده‌های خاک موادی هستند که حاوی عناصر و ترکیبات ضروری برای بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و یا زیستی خاک هستند که در نهایت منجر به پایداری خاک، حفظ محیط زیست و بهبود شرایط برای رشد و نمو گیاه می‌شود (Semalulu et al., 2017) . استفاده از اصلاح‌کننده‌های خاک می‌تواند ظرفیت نگهداری آب موجود در خاک را بهبود بخشد، تبخیر و تعرق را کاهش دهد، راندمان مصرف آب و کود در محصولات کشاورزی را افزایش دهد و جوانه‌زنی، رشد و عملکرد محصول را افزایش دهد. اصلاح‌کننده‌های خاک از طریق کاهش تخریب خاک، بهبود روابط خاک–هوا–آب و اصلاح زهکشی خاک و غلبه بر آب‌گریزی، به افزایش تولید محصول کمک می‌کنند. اصلاح کننده‌های خاک نه تنها دسترسی به عناصر غذایی را برای محصولات کشاورزی بهبود می‌بخشند، بلکه باعث افزایش رقابت در برابر علف‌های هرز و دفاع در برابر آفات و بیماری‌ها می‌شوند (Babla et al., 2022).

افزودن بنتونیت[2]یک روش رایج در اصلاح و احیای خاک‌های شنی می‌باشد. بنتونیت یک رس ناخالص است که بیشتر از خانواده اسمکتایت تشکیل شده است. در کاربردهای کشاورزی، بنتونیت حفظ آب و عناصر غذایی را در اطراف ریشه گیاهان افزایش می‌دهد. عناصر غذایی محلول خاک را جذب می‌کند و آن‌ها را برای تبادل با گیاه حفظ می‌کند. از این رو، می‌توان آن را همراه با کودها برای به حداکثر رساندن فواید و افزایش بهره‌وری استفاده کرد (Mi et al., 2020).

در پژوهش (Zhang et al., 2024) افزودن بقایای ذرت به میزان ۶ تن در هکتار به همراه ۱۸ تن در هکتار رس بنتونیت، به خاک شنی، جرم مخصوص ظاهری خاک را به میزان ۲ تا ۵ درصد کاهش و تخلخل کل خاک را به میزان ۳ تا ۸ درصد افزایش داد و باعث بهبود وضعیت ساختمان خاک و حاصلخیزی خاک در مقایسه با خاک شاهد شد. همچنین در پژوهشی مشاهده شد که افزودن بنتونیت به خاک شنی باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، میزان کربن آلی، عناصر غذایی پر مصرف شامل کلسیم، منیزیم، پتاسیم و فسفر و عناصر کم مصرف روی و منگنز می‌شود (Semalulu et al., 2017) .

در تحقیقی اثر اصلاح کننده‌های رس مونتموریلونیت با نسبت (۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) در ترکیب با کاه گندم (۱ درصد وزنی) بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی یک خاک شن لومی در عربستان بررسی شد، نتایج نشان داد که اصلاح کننده متشکل از رس مونتموریلونیت به میزان ۱۰ درصد وزنی در ترکیب با کاه گندم بیشترین تاثیر را بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک داشت. به طوری که باعث افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی خاک، میزان ماده آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک، نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب

1.USDA, 2022, Entisols
2. Bentonite

خاک نسبت به تیمار شاهد شد. در مقابل میزان pH خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک، میزان نفوذ تجمعی آب در خاک و تبخیر و تعرق از سطح خاک نسبت به تیمار شاهد کاهش معنی‌داری داشت. همچنین تفاوت آماری معنی‌داری در میزان عناصر ریز مغذی قابل جذب خاک شامل آهن، روی، منگنز و مس نسبت به تیمار شاهد مشاهده نشد (Alghamdi et al., 2023) .

در یکی از مطالعات اخیر پیرامون اثر ترکیبی اصلاح کننده‌های رس بنتونیت و باکتری *Azospirillum brasilense* بر خصوصیات خاک و عملکرد گندم مشاهده شد که اثر تیمار ترکیبی رس بنتونیت به میزان ۱۰ $g\ kg^{-1}$ و باکتری *Azospirillum brasilense* به میزان ۱۰ mL/kg باعث افزایش قابل توجه مقادیر کربن آلی، تنفس میکروبی خاک، نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب نسبت به تیمار شاهد شد (Iqbal et al., 2024).

افزودن میکروارگانیسم‌ها[1] به خاک با تشکیل ساختمان و بهبود حاصلخیزی خاک، به اصلاح خاک‌ها کمک می‌کند. میکروارگانیسم‌های خاک جزء حیاتی اکوسیستم‌های زمین، به ویژه در مناطق خشک هستند. باکتری‌های محرک رشد گیاه[2] کارایی بالایی از نظر تولید عوامل محرک رشد و فراهم سازی عناصر غذایی قابل جذب دارند. باکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن و حل کننده فسفات از جمله ریزموجودات موثر در این فرایند شناخته شده‌اند. این ریزموجودات معمولاً در اطراف ریشه مستقر شده و گیاه را در جذب عناصر غذایی همیاری می‌کنند. این موجودات باعث تثبیت نیتروژن، آزادسازی یون‌های فسفات، پتاسیم، آهن و غیره از ترکیبات نامحلول، بهبود ساختمان خاک، افزایش محصول، کاهش آلودگی ناشی از مصرف کودهای شیمیایی و در نتیجه کاهش بیماری خواهند شد. امروزه تحقیقات زیادی پیرامون استفاده از میکروارگانیسم‌های خاک جهت اصلاح خاک صورت گرفته است. در پژوهشی تاثیر ترکیب تیمار میکروارگانیسم‌های خاک، بیوچار و کود معدنی در آزمایش گلدانی برای بهبود خصوصیات خاک‌های شنی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که اثر ترکیب ۳ تیمار باعث افزایش کربن آلی خاک، کربن زیست توده میکروبی و پروتئین گلومالین[3]در خاک شنی می‌شود (Herawati et al., 2024).

در پژوهشی (Martínez et al., 2019) در کشور اسپانیا با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی به اثرات باکتری *pseudomonas fluorescens* بر چرخه عناصر غذایی در خاک و عملکرد خربزه پرداختند. استفاده از این باکتری در خاک باعث افزایش حلالیت نمک‌های مختلف به ویژه کلریدها و همچنین باعث افزایش غلظت عناصر منگنز، مس، روی، فسفر، نیتروژن، پتاسیم و منیزیم قابل جذب و افزایش زیست توده میکروبی خاک شد. نتایج نشان داد فعالیت آنزیم بتاگلوکوزیداز[4]باعث آزادسازی عناصر آهن، روی، منگنز، مس، فسفر و نیتروژن در خاک شد. این عناصر غذایی می‌توانند پس از تجزیه ترکیبات آلی توسط این آنزیم به محلول خاک وارد شوند. در تحقیقی دیگر مشاهده شد که ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (*Planomicrobium chinense*، *Bacillus Cereus* و *Pseudomonas fluorescens*) اگزوپلی ساکاریدهایی تولید کردند که در شرایط تنش آبی باعث تجمع خاک در اطراف ریشه گیاهان گندم شد و به طور قابل توجهی ظرفیت نگهداری آب در خاک شنی را افزایش دادند. میزان عناصر غذایی خاک ریزوسفر گیاهان تیمار شده نیز (۳۵ درصدکلسیم، ۳۴ درصد پتاسیم، ۵۲ درصد منیزیم و ۴۲ درصد سدیم) نسبت به تیمار شاهد تحت تنش افزایش یافت (Khan et al., 2017).

یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین اصلاح‌کننده‌های آلی کربوکسی‌متیل سلولزها (CMC)[5] هستند. سلولز فراوان‌ترین بیوپلیمر تجدیدپذیر است که با هزینه کم برای تهیه پلیمرهای کاربردی مختلف در دسترس است. کربوکسی‌متیل سلولزها ترکیباتی (پلیمرهایی) هستند که به راحتی در آب حل و کاملا در آن پراکنده می‌شوند. خاصیت افزایش چسبندگی و امولسیون کنندگی CMC، باعث شده است

1. Microorganism
2. Plant growth promoting bacteria
3. Glomalin
4. Beta glucosidase
5. Carboxy methyl cellulose

که این مواد در طیف وسیعی از کاربردهای تجاری، آرایشی، دارویی، کشاورزی، صنایع کاغذ، نساجی و صنایع غذایی استفاده شوند (Qin et al., 2022).

(Omer et al., 2023) با افزودن هیدروژل متشکل از کربوکسی‌متیل سلولز و پلی آکریل آمید به میزان ۲ درصد به خاک شنی مشاهده کردند که ظرفیت نگهداری آب از ۷ درصد در نمونه خاک شاهد تا ۴۷ درصد در نمونه خاک تیمار شده افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که هیدروژل نوترکیب ساخته شده می‌تواند به عنوان حامل عناصر غذایی برای کاربردهای پیشرفته کشاورزی عمل کند.

در پژوهشی مشابه (Shao et al., 2023) به اثر ترکیبی سطوح مختلف بیوچار و کربوکسی‌متیل سلولز برخصوصیات فیزیکی خاک‌های شنی نواحی بیابانی پرداخته شد و نتایج نشان داد که ترکیب بیوچار و کربوکسی‌متیل سلولز چگالی ظاهری خاک را از۹/۴۱ تا ۱/۲۹ درصد و هدایت هیدرولیکی اشباع را از ۹۴/۹۸ تا ۲۹/۶۴ درصد کاهش می‌دهد و میزان رطوبت اشباع خاک را از ۸/۸۱ تا ۳۰/۷۴ درصد و ظرفیت نگهداری آب را از ۱۳/۹۱ تا ۳۶/۸۷ درصد افزایش می‌دهد. به طور مشابه، میزان پایداری خاکدانه‌ها از۲۹ تا ۲۵۶ درصد افزایش یافت.

استفاده از روش‌های آماری چند متغیره برای تجزیه و تحلیل داده‌ها در مطالعات مختلف کاربرد زیادی دارند، به ویژه در مطالعاتی که از حجم وسیعی از داده‌ها و متغیرهای مختلف برخوردار هستند. این روش‌ها با کاهش ابعاد داده‌ها و به حداقل رساندن مجموعه داده‌های موثر، قابلیت تفسیر داده‌ها را هموارتر می‌کنند. تحلیل آماری چند متغیره نظریه و روش استفاده از آمار ریاضی برای مطالعه مسائل چند متغیره است. تحلیل چند متغیره، بر اساس اصول آمار چند متغیره ساخته شده است که مشاهده و تجزیه و تحلیل بیش از یک متغیر پاسخ را به طور همزمان در حوزه آمار، شامل می‌شود. به طور کلی، تحلیل آماری چند متغیره برای پرداختن به مسئله‌هایی است که چندین اندازه‌گیری روی هر واحد آزمایشی صورت گرفته است و قرار است روابط بین این اندازه‌ها تعیین و استخراج شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به تجزیه و تحلیل خوشه‌ای، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل عاملی اشاره کرد (Reza et al., 2015).

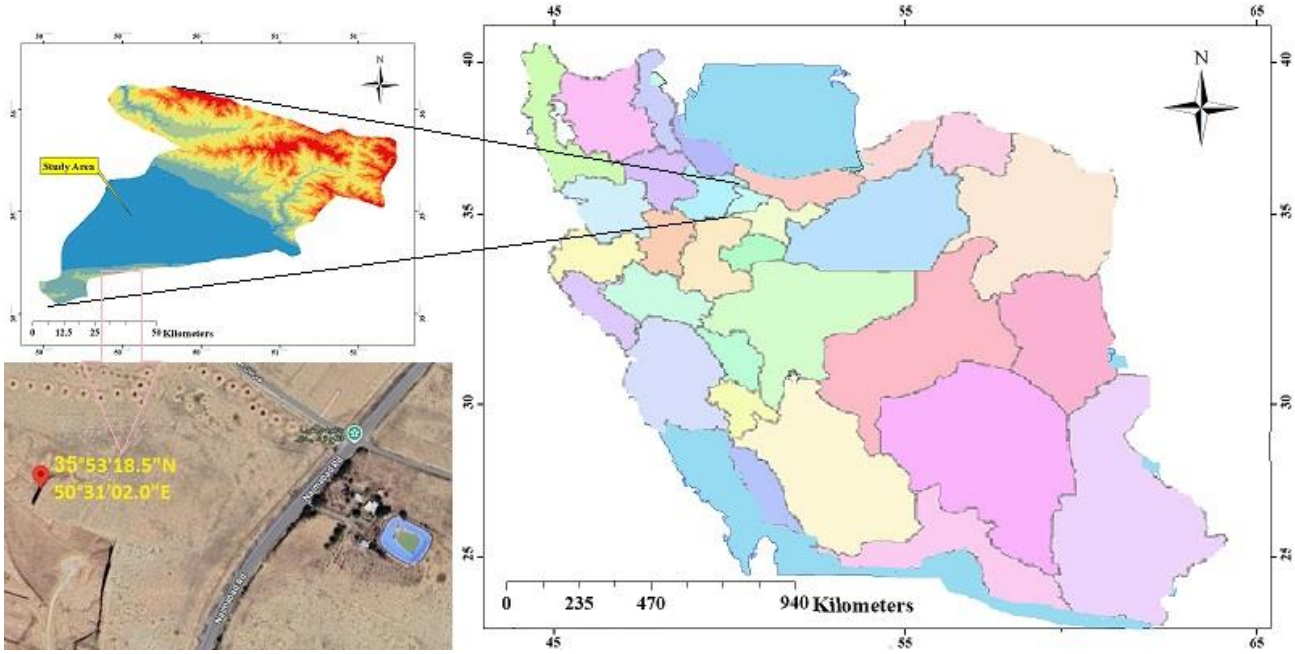
کشور ایران به دلیل پایین بودن ریزش‌های جوی و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی بارندگی، در زمره کشورهای خشک و نیمه خشک جهان بوده و همواره مشکل کمبود آب دارد. اعمال مدیریت صحیح و به کارگیری فناوری‌های پیشرفته به منظور حفظ ذخیره رطوبتی خاک از جمله اقدامات مؤثر برای افزایش راندمان آبیاری و در نتیجه بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب می‌باشد. روش‌های مختلفی برای کاهش محدودیت‌های منابع آب پیشنهاد شده است که استفاده از مواد اصلاح‌کننده طبیعی و مصنوعی از جمله آن‌ها می‌باشد. با توجه به لزوم بهره‌برداری از این خاک‌ها از یک طرف و توان تولیدی پایین آن‌ها ضرورت اصلاح این اراضی مسئله‌ای کاملا محرز می‌باشد. بررسی پیشینهٔ تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از اصلاح‌کننده‌های گوناگون خاک، از جمله مهم‌ترین روش‌های حفاظتی کارآمد است که بیشترین تأثیر را بر بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی خاک دارد. با وجود مطالعات متعدد موجود تاکنون مطالعات جامعی در استفاده همزمان از تیمارهای معدنی، آلی و زیستی مختلف اعم از تیمارهای بنتونیت، مواد آلی و میکروارگانیسم‌ها صورت نگرفته است. اجرای مطالعات در این زمینه ضمن بررسی تاثیر هر یک از اصلاح‌کننده‌های مورد استفاده بر خصوصیات خاک با روش‌های آماری چند متغیره، قابلیت اجرایی و سازگاری این روش‌ها را متناسب با شرایط محیطی تبیین می‌کند. توجه به این دستاوردها به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک درخاک‌های شدیدا شنی مناطق خشک کشور، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. بنا براین اهداف این مطالعه عبارتند از ۱- ارزیابی قابلیت اصلاحی بنتونیت، مواد آلی و باکتری‌های محرک رشد گیاه، در اصلاح توان تولیدی خاک شنی ۲- دستیابی به یک ترکیب مناسب از این اصلاح‌کننده‌ها، برای اصلاح خاک‌های شنی از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۳- معرفی بهترین تیمار جهت اصلاح خاک‌های کم بازده شنی

1 . Poly acryl amide

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و تهیه تیمارهای مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه در رسوبات شنی روستای خرم آباد از توابع شهرستان نظر آباد استان البرز واقع شده است. این منطقه در موقعیت جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۳ دقیقه و ۱۸ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۵۳ دقیقه و ۱۴ ثانیه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۱ دقیقه و ۵ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۳۱ دقیقه و ۱ ثانیه طول شرقی واقع شده است (شکل۱) و دارای رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی ترمیک می‌باشد. رده‌بندی خاک مورد مطالعه بر اساس سیستم رده‌بندی آمریکایی تا سطح فامیل به صورت Sandy, mixed, semiactive, thermic, Typic Torripsamments است. الگوی کشت زمین‌های اطراف این منطقه گندم و ذرت به صورت تناوبی است. در این مطالعه نمونه‌برداری از عمق سطحی (۲۰-۰ سانتیمتری) انجام و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلیمتری عبور داده شد. به منظور اصلاح و ارتقاء خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شنی از رس بنتونیت، کربوکسی‌متیل سلولز و مخلوط دو جدایه از باکتری اندوفیت *Pantoea agglomerans* (R11) و رایزوشیت *Pseudomonas sp* (E1)، در مقادیر و سطوح مختلف مذکور در جدول ۱ استفاده شد. آزمایش‌های لازم در قالب طرح فاکتوریل کاملا تصادفی طراحی و اجرا شدند. در مجموع ۲۷ تیمار با ۳ تکرار (۸۱ واحد آزمایشی) در گلدان‌های پلاستیکی با ظرفیت ۱ کیلوگرم و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر تهیه شدند. برای بررسی تاثیر تیمارهای آزمایشی بر خصوصیات خاک، از یک دوره ۳ ماهه خواباندن[1] نمونه‌ها در شرایط دمای آزمایشگاه و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای استفاده شد. گلدان‌ها به صورت هفتگی توزین و کاهش رطوبت تا رساندن به رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای برای هر گلدان، جبران شد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران سمت راست، استان البرز سمت چپ بالا و نقطه نمونه برداری سمت چپ پایین

[1] incubation

جدول ۱. مقدار و نماد سطوح مختلف تیمارهای آزمایشی

تیمار	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
کربوکسی‌متیل سلولز ($g\ kg^{-1}$)	C0=0	C3=3	C5=5
مخلوط دو جدایه باکتری اندوفیت و رایزوشیت ($mLkg^{-1}$)	M0=0	M10=10	M20=20
بنتونیت ($ton\ ha^{-1}$)	B0=0	B20=20	B40=40

آنالیزهای آزمایشگاهی

پس از اتمام دوره انکوباسیون، برخی از آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی نمونه های خاک، نظیر مقدار رطوبت اشباع (SP)، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC) ، رطوبت پژمردگی دائم (PWP) و رطوبت قابل استفاده (AW) با استفاده از دستگاه صفحه فشاری(Cassel & Nielsen, 1986) ، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک خشک (Kemper & Chepil, 1965)، جرم مخصوص ظاهری (BD) به روش استوانه (Blake, 1986)، pH و هدایت الکتریکی (EC) در نسبت ۱ به ۲/۵ عصاره خاک به آب (Bottomley et al., 2020)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم ۱ نرمال (Sumner & Miller, 1996)، درصد کربن آلی (OC) به روش اکسیداسیون تر (Walkly & Black, 1934)، نیتروژن کل خاک (TN) با استفاده از روش کجلدال (Nelson & Sommers, 1980) اندازه‌گیری شد. همچنین فسفر قابل جذب (P) توسط محلول بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار استخراج شده در pH برابر ۸/۵ توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (Olsen, 1954) و پتاسیم قابل جذب (K) توسط NH_4OAC ۱ نرمال استخراج شده در pH برابر ۷ توسط دستگاه فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد (Bottomley et al., 2020). مقادیر عناصر آهن (Fe)، روی (Zn)، منگنز (Mn) و مس قابل جذب (Cu) نمونه‌ها با محلول ۰/۰۰۵ مولار DTPA عصاره گیری و سپس توسط دستگاه جذب اتمی قرائت شد (Shuman, 1985). همچنین پارامترهای زیستی خاک نظیر آنزیم دهیدروژناز[1](DHA) (Bottomley et al., 2020) و تنفس میکروبی خاک (Rs) به روش تیتراسیون (Anderson, 1982) اندازه‌گیری شد.

آنالیزهای آماری

در ابتدا از روش‌های آماری تحلیل مولفه اصلی و خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای شناخت و گروه‌بندی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شده در این مطالعه استفاده و این روش‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. در مرحله بعد برای تعیین تیمارهای مشابه در هر خوشه از خوشه‌بندی تیمارها با روش سلسله مراتبی و در نهایت برای انتخاب بهترین تیمارها از خوشه‌بندی دو مرحله‌ای استفاده شد. کلیه آنالیزهای آماری و تفسیر نتایج در نرم افزارهای آماری Excel 2016، SPSS 27 و Minitab 21 انجام شد.

نتایج و بحث

در جدول ۲ برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه نشان داده شده است، بافت خاک مورد نظر شن لومی است. با توجه به مقادیر بالای درصد شن و مقادیر کم درصد رس و سیلت نفوذ پذیری این خاک زیاد و درنتیجه مقدار ذخیره رطوبتی پایین است. با توجه به میزان pH خاک، واکنش خاک در محدوده قلیایی و با توجه به میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع، خاک مورد نظر در محدوده خاک غیر شور قرار می‌گیرد. در جدول ۳ حد بحرانی عناصر غذایی در خاک‌های زراعی و باغی نشان داده شده است (Malakouti et al., 2005). با توجه به میزان کربن آلی پایین (۰/۱۶٪)، مقادیر کم عناصر پر مصرف نیتروژن (۰/۰۳٪)، فسفر (۲/۹۸ $mg\ kg^{1}$) و پتاسیم (۲۲۲ $mg\ kg^{1}$) و عناصر کم مصرف آهن (۱/۳ $mg\ kg^{1}$)، روی (۰/۳۴ $mg\ kg^{1}$)، منگنز (۱/۹۱ $mg\ kg^{1}$) و مس (۰/۶۲ $mg\ kg^{1}$)، در مقایسه با حد بحرانی عناصر غذایی، این خاک از وضعیت حاصلخیزی مساعدی برخوردار نیست و دارای کمبود عناصر تغذیه‌ای است.

1. Dehydrogenase

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Cu (mg.kg^{1})	Mn (mg.kg^{-1})	Zn (mg.kg^{1})	Fe (mg.kg^{1})	Kav (mg.kg^{1})	Pav (mg.kg^{1})	TN (%)	OC (%)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	EC (dS.m^{-1})	pH
۰/۶۲	۱/۹۱	۰/۳۴	۱/۳	۲۲۲	۲/۹۸	۰/۰۳	۰/۱۶	۱۱	۵	۸۴	۰/۲۴	۸/۱۳

جدول ۳. حد بحرانی غلظت عناصر غذایی در خاک‌های زراعی و باغی (Malakouti et al., 2005)

Cu (mg.kg^{1})	Mn (mg.kg^{-1})	Zn (mg.kg^{1})	Fe (mg.kg^{1})	Kav (mg.kg^{1})	Pav (mg.kg^{1})	OC (%)
۱	۸	۱	۱۰	۲۵۰–۳۰۰	۷–۱۰	>۲

برخی آماره‌های توصیفی متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شده برای ۸۱ واحد آزمایشی در جدول ۴ قابل مشاهده است. این خصوصیات شامل میانگین، حداقل، حداکثر، واریانس، ضریب تغییرات، انحراف معیار و خطای معیار است.

جدول ۴. آماره‌های توصیفی متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک پس از اعمال تیمارهای مطالعاتی

متغیر	تعداد	حداقل	حداکثر	میانگین	خطای معیار	انحراف معیار	واریانس	ضریب تغییرات
SP (%)	۸۱	۳۳/۴۴	۴۶/۶۹	۳۹/۹۲	۰/۷۱	۳/۶۸	۱۳/۶۱	۹/۲۴
FC (%)	۸۱	۷/۵۳	۱۳/۸۹	۱۰/۵۵	۰/۴۱	۲/۱۷	۴/۷۳	۲۰/۶۱
PWP (%)	۸۱	۳/۷۳	۵/۸۱	۴/۷۵	۰/۱۱	۰/۶۵	۰/۳۶	۱۲/۷۸
AW (%)	۸۱	۳/۱۹	۸/۳۴	۵/۷۹	۰/۳۱	۱/۶۱	۲/۶۱	۲۷/۹۳
DHA (µgTPF g soil 24 h^{-1})	۸۱	۰/۰۳۶	۰/۱۶۲	۰/۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۳۵/۲۳
Rs (mgCO_2 g soil 24 h^{-1})	۸۱	۰/۰۵	۰/۱۸۶	۰/۱۲	۰/۰۰۸	۰/۰۴۵	۰/۰۰۲	۳۳/۴۴
pH	۸۱	۷/۹	۸/۳۵	۸/۲	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۰۱۶	۱/۵۲
EC (dS m^{-1})	۸۱	۰/۲۴	۰/۴۶	۰/۳۵	۰/۰۱۲	۰/۰۷	۰/۰۰۵	۱۷/۸۹
BD (g cm^{-3})	۸۱	۱/۳	۱/۶۲	۱/۴۳	۰/۰۱۵	۰/۰۸	۰/۰۰۶	۵/۷۴
MWD (%)	۸۱	۰/۲۴	۱/۴	۰/۷۶	/۰۷۱	۰/۳۷	۰/۱۴	۴۸/۰۸
CEC (cmol^{+} kg^{-1})	۸۱	۳/۰۱	۷/۱۵	۵/۰۴	۰/۲	۱/۰۴	۱/۰۹	۲۰/۷۲
OC (%)	۸۱	۰/۱۶	۰/۷۱	۰/۴۴	۰/۰۳	۰/۱۷	۰/۰۳	۳۹/۱۲
P(mg kg^{-1})	۸۱	۲/۹۸	۷/۳۷	۴/۵۸	۰/۱۸	۰/۹۶	۰/۹۳	۲۱/۰۳
TN (%)	۸۱	۰/۰۰۶	۰/۰۶۳	۰/۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۲	۰	۵۳/۰۴
K (mg kg^{-1})	۸۱	۲۲۲	۴۲۰	۳۳۵	۱۳/۱	۶۸/۲	۴۶۴۴	۲۰/۳
Mn (mg kg^{-1})	۸۱	۱/۷۸	۵/۳۴	۲/۸۶	۰/۲	۱/۰۶	۱/۱۳	۳۷/۱۸
Fe (mg kg^{-1})	۸۱	۱/۲۶	۸/۲	۴	۰/۳۹	۲/۰۷	۴/۳	۵۱/۸۵
Cu (mg kg^{-1})	۸۱	۰/۶۲	۱/۵۱	۱	۰/۰۳۲	۰/۲	۰/۰۴	۲۰/۱۷
Zn (mg kg^{-1})	۸۱	۰/۳۴	۱/۰۱	۰/۵۶	۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۰۳	۳۴/۱۲

آزمون کایسر–مایر–الکین و بارتلت

آزمون Kaiser-Mayer-Olkin یا به اختصار (KMO) و آزمون Bartletts از سری آزمون‌هایی هستند که قبل از تحلیل عاملی اکتشافی برای اطمینان از کافی بودن تعداد نمونه و ارتباط معنی‌دار بین متغیرها استفاده می‌شوند. معمولا میزان شاخص KMO بالای ۰/۷ نشان-دهنده تعداد مناسب داده‌ها برای انجام تحلیل عاملی اکتشافی است. از شاخص بارتلت برای نشان دادن ارتباط بین متغیرها استفاده می‌شود (Leech et al., 2014) . در جدول ۵ مقادیر شاخص‌های ذکر شده نشان داده شده است، از آنجایی که مقدار شاخص KMO در این پژوهش عدد ۰/۸۵ به دست آمده است، داده‌های مورد نظر این پژوهش از تعداد کافی برای انجام تحلیل عاملی اکتشافی برخوردار هستند. مقدار

آماره ضریب خی–دو (۹۱۹/۲۵۷) بزرگتر از درجه آزادی (۱۷۱) است و مقدار آزمون معنی‌داری (در سطح مقایسه ۰/۰۵) کمتر از ۰/۰۵ است، داده‌های این پژوهش از ارتباط کافی و معنی‌دار جهت تحلیل عاملی اکتشافی برخوردار هستند.

جدول ۵. شاخص کایسر–مایر–الکین و بارتلت

KMO and Bartlett's Test		
Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		۰/۸۵۵
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	۹۱۹/۲۵۷
	df	۱۷۱
	Sig.	۰/۰۰۰

تحلیل مولفه‌های اصلی

مولفه‌های اصلی یک مجموعه داده عبارتند از ترکیبات خطی از متغیرها که بیشترین واریانس بین داده‌ها را تفسیر می‌کنند. به منظور شناسایی بهتر روابط بین متغیرها و مولفه‌ها از عمل دوران ماتریس استفاده شد که متداولترین نوع متعامد آن، دوران واریماکس[۲]است. معیار انتخاب مهم‌ترین مولفه‌ها در تحلیل مولفه‌های اصلی مقادیر ویژه (Eigenvalues) بزرگتر از ۱ است، از آنجایی که طبق قانون کایسر، مقادیر ویژه بزرگتر از ۱، در جدول ۶ مقادیر ۸/۶ و ۷/۹۲ هستند، بنا بر این دو مولفه اصلیPC1 و PC2 که قادر به بیان ۸۷ درصد پراکندگی واریانس داده‌ها می‌باشند انتخاب شدند. مولفه اول (PC1) به تنهایی ۴۵/۲۹ درصد و مولفه دوم (PC2) به تنهایی ۴۱/۷۱ درصد واریانس داده‌ها را بیان می‌کنند (Kaiser, 1960). بنابراین نتیجه می‌شود که ۱۹ کمیت به ۲ مولفه اصلی یا PC تبدیل شد.

در این پژوهش، از پارامترهایی که دارای بار عاملی بزرگ‌تر از ۰/۶ بودند برای بررسی روابط استفاده شد. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، کلیه متغیرها بار عاملی بالاتر از ۰/۶ هستند.

جدول ۶. نتایج تحلیل مولفه‌های اصلی برای ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک

Principal Component	PC1	PC2
Eigenvalue	۸/۶	۷/۹۲
Total variance (%)	۴۵/۲۹	۴۱/۷۱
Cumulative (%)	۸۷	
Parameter	Factor Loading	
P ($mg.kg^{-1}$)	۰/۹	
DHA ($\mu gTPF.gsoil.24h^{-1}$)	۰/۸۹	
Cu ($mg.kg^{-1}$)	۰/۸۵	
SP (%)	۰/۷۷	
Rs ($mgCo_2\ gsoil.24h^{-1}$)	۰/۷۶	
CEC ($cmol+.kg^{-1}$)	۰/۷۶	
Zn ($mg.kg^{-1}$)	۰/۷۴	
TN (%)	۰/۷۴	
Fe($mg.kg^{-1}$)	۰/۷۳	
OC (%)	۰/۶۴	
K ($mg.kg^{-1}$)	۰/۶۶	
pH		۰/۸۷
Mn ($mg.kg^{-1}$)		۰/۸۵
EC ($dS.m^{-1}$)		۰/۷۹
PWP (mm)		۰/۷۹
FC (%)		۰/۷۷
BD ($g.cm^{-3}$)		-۰/۷۶
AW (%)		۰/۷۵
MWD (mm)		۰/۷۴

1.Chi-square
1.varimax

بارهای عاملی متغیرها یا ضرایب همبستگی بین دو مولفه به صورت یکنواخت توزیع شده است، جدول ۷ همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. متغیرهای فسفر قابل جذب، روی قابل جذب، مس قابل جذب، آهن قابل جذب، نیتروژن کل قابل جذب، ظرفیت تبادلی کاتیونی، کربن آلی، آنزیم دهیدروژناز، تنفس میکروبی خاک، پتاسیم قابل جذب، و میزان رطوبت اشباع خاک در مولفه اول قرار گرفته‌اند، متغیرهای pH خاک، شوری خاک، منگنز قابل جذب، مقدار رطوبت ظرفیت زراعی، مقدار رطوبت پژمردگی دائم، میزان آب قابل استفاده، جرم مخصوص ظاهری و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در مولفه دوم قرار گرفته‌اند. می‌توان به طور نسبی مولفه اول را مربوطه به داده‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک دانست و مولفه دوم را مربوط به متغیرهای فیزیکی خاک نسبت داد. در پژوهش (Nabiollahi et al., 2017) نیز با به کارگیری تحلیل مولفه‌های اصلی متغیرهای درصد سدیم تبادلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، جرم مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی و pH به عنوان مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک انتخاب شدند.

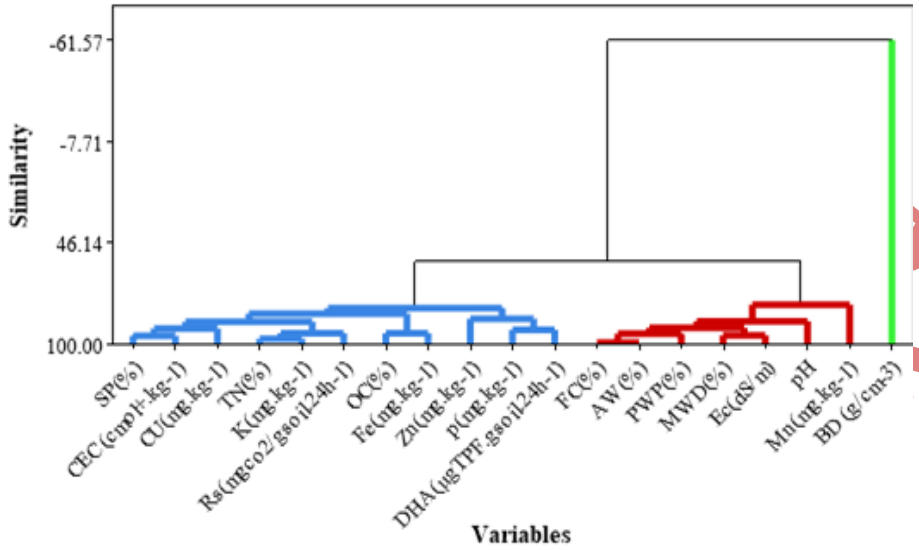
در پژوهش (Ngo-Mbogba et al., 2015) ماده آلی، فسفر، کلسیم و pH خاک شاخص‌های منتخب بودند، که ۸۸ درصد واریانس را تبیین نمودند. در پژوهش (Alidoust et al., 2019) متغیرهای کربن آلی، نیتروژن کل، تنفس میکروبی، pH و میانگین قطر خاکدانه‌ها در مولفه ۱ قرار گرفتند و این مولفه عامل ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی نام‌گذاری شد. بنابراین با استفاده از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی می‌توان مهم‌ترین شاخص‌های کیفیت خاک را که باعث ایجاد مهم‌ترین تغییرات در تیمارهای آزمایشی می‌شوند، در قالب مولفه‌های اصلی شناسایی کرده و از این مجموعه برای بهبود کیفیت خصوصیات خاک استفاده نمود.

جدول ۷. همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه

Variable	SP	FC	PWP	AW	MWD	BD	OC	CEC	CU	Zn	Fe	Mn	TN	P	K	pH	EC	DHA	Rs
SP	۱																		
FC	۰/۹	۱																	
PWP	۰/۸۹	۰/۹۴	۱																
AW	/۸۸	۰/۹۹	۰/۸۹	۱															
MWD	۰/۹	۰/۹	۰/۸۹	۰/۸۸	۱														
BD	−۰/۸۱	−۰/۹۱	−۰/۸۶	−۰/۹	−۰/۸۸	۱													
OC	۰/۸	۰/۸۴	۰/۷۵	۰/۸۴	۰/۷۸	-۰/۷۷	۱												
CEC	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۹	-۰/۸۳	۰/۸	۱											
CU	۰/۸۵	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۲	۰/۸	-۰/۷۵	۰/۶۷	۰/۸۷	۱										
Zn	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۷۵	۰/۸	۰/۷۷	-۰/۷۴	۰/۶۷	۰/۷۹	۰/۷۳	۱									
Fe	۰/۹۱	۰/۹	۰/۸۵	۰/۹	۰/۸۵	-۰/۷۹	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۷۴	۰/۸	۱								
Mn	۰/۵۸	۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۶۸	۰/۷۱	-۰/۷۴	۰/۴۵	۰/۵۷	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۵۳	۱							
TN	۰/۹	۰/۹۲	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۹	-۰/۸۴	۰/۸۲	۰/۹	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۶۵	۱						
P	۰/۸۱	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۶۷	-۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۳۴	۰/۷۶	۱					
K	۰/۸۷	۰/۹	۰/۸۵	۰/۹	۰/۸۸	-۰/۸۷	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۸۶	۰/۶۵	۰/۹۵	۰/۷۱	۱				
pH	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۸۵	-۰/۷۷	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۴۸	۰/۵۵	۰/۷۴	۰/۶۸	۰/۷۳	۰/۴۲	۰/۷۹	۱			
EC	۰/۸	۰/۹۱	۰/۸۴	۰/۹۲	۰/۹۲	-۰/۹۲	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۸۱	۰/۶۸	۰/۸۸	۰/۵۳	۰/۸۹	۰/۸۱	۱		
DHA	۰/۸۳	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۷۶	-۰/۷	۰/۷۲	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۸۴	۰/۴	۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۸۲	۰/۴۹	۰/۷	۱	
Rs	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۸۸	-۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۴۸	۰/۹۱	۰/۷۱	۰/۹	۰/۶۷	۰/۸۷	۰/۸۳	۱

خوشه‌بندی متغیرها به روش سلسله مراتبی

الگوریتم خوشه‌بندی سلسله مراتبی ساده‌ترین و اساسی‌ترین الگوریتم در فرآیند داده‌کاوی نمونه‌ها از جمله خاک می‌باشد که برای دستیابی به یک دید کلی از نحوه تغییر نمونه‌ها و روابط بین آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۲ نتایج خوشه‌بندی متغیرها به روش سلسله مراتبی مشابه با نتایج روش تجزیه به مولفه‌های اصلی در تفکیک پذیری متغیرها است.



شکل ۲. دندوگرام حاصل از خوشه‌بندی متغیرها به روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی

با ذکر این نکته که جرم مخصوص ظاهری چون دارای همبستگی منفی با سایر متغیرها است به صورت خوشه مجزا تفکیک شده است. در این پژوهش روش‌های تجزیه به مولفه اصلی و خوشه بندی به روش سلسله مراتبی در تفکیک‌پذیری متغیرها عملکرد مشابه داشتند. در پژوهشی دیگر تفکیک متغیرها با روش تجزیه به مولفه‌های اصلی و روش آنالیز شبکه انجام شد و نتایج یکسان مشاهده نشد (Martín-Sanz et al., 2022).

خوشه‌بندی تیمارها به روش سلسله مراتبی

این الگوریتم مشاهدات را طی مراحل مختلف با یکدیگر ترکیب کرده و کلاس‌های بزرگتری ایجاد می‌کند. این مدل سعی در یافتن خوشه-های همگن مشاهدات با حداکثر شباهت درون‌گروهی و حداکثر تفاوت با سایر گروه‌ها دارد. بدین صورت که یک مشاهده با سایر مشاهدات درون آن گروه که به آن تعلق گرفته است، کمترین فاصله و با مشاهدات بیرون از گروه، حداکثر تفاوت را از نظر ویژگی‌های مختلف داشته باشد، به منظور خوشه‌بندی تیمارهای مختلف با استفاده از این روش ابتدا ماتریس فاصله بین تیمارها با توجه به ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌ها با استفاده از فاصله مربع اقلیدسی[2] محاسبه گردید.

سپس روش اتصال وارد[3] جهت دسترسی به بهترین خوشه‌بندی با استفاده از نرم افزار Minitab مورد استفاده قرار گرفت. نتایج خوشه‌بندی به روش سلسله مراتبی بر اساس خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی ۲۷ تیمار اعمال شده نشان داد که ۴ خوشه مشخص قابل تفکیک و تمایز است، همانطور که در جدول ۸ نشان داده شده است، نحوه قرارگیری تیمارها در خوشه‌های مختلف بر اساس میزان فاصله از مرکز خوشه مد نظر است که بر این اساس فاصله هر تیمار یا مشاهده‌ای که کمترین فاصله را با مرکز خوشه دارد، به همان خوشه تعلق می‌گیرد. شکل ۳ دندوگرام حاصل از این خوشه‌بندی را بر اساس خوشه‌بندی سلسله مراتبی نشان می‌دهد.

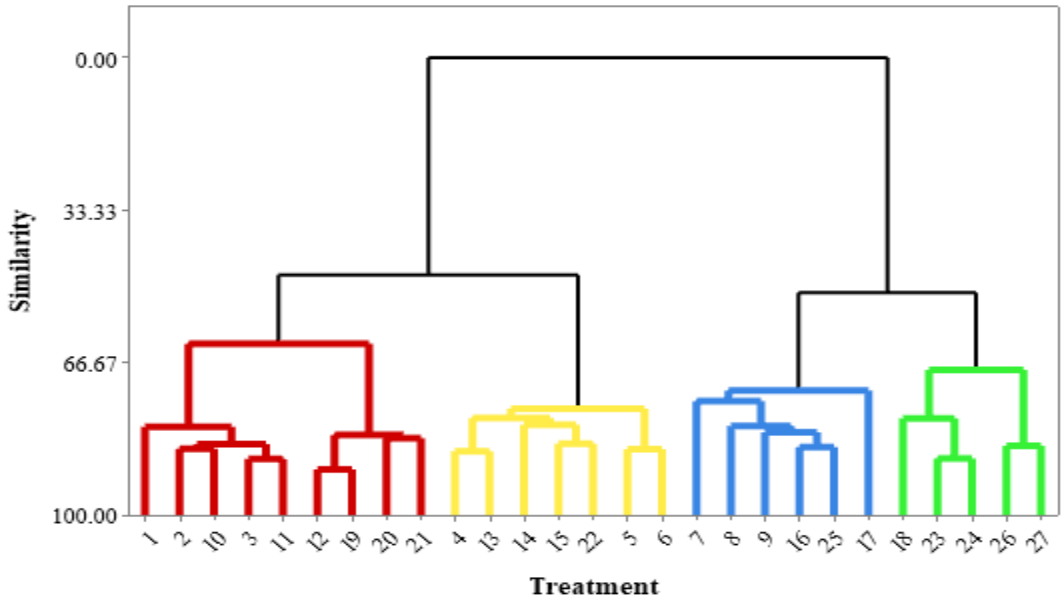
1. Distance Matrix
2. Euclidean square
1. Ward

جدول ۸. قرار گرفتن تیمارها در خوشه‌های مختلف بر اساس فاصله از مرکز خوشه‌ها

شماره خوشه	فاصله از مرکز خوشه چهارم	فاصله از مرکز خوشه سوم	فاصله از مرکز خوشه دوم	فاصله از مرکز خوشه اول	تیمارها	شماره
۱	۱۱/۵۶	۹/۷۲	۶/۳۶	۲/۶۹	B0 C0 M0	۱
۱	۱۰/۰۸	۸/۴۶	۵/۱۴	۱/۷۳	B0 C0 M10	۲
۱	۹/۶۳	۸/۰۲	۴/۷	۱/۱۵	B0 C0 M20	۳
۲	۷/۱۶	۵/۲	۱/۷۷	۳/۳۹	B0 C3 M0	۴
۲	۶/۰۸	۴/۴۴	۱/۹۷	۴/۹۶	B0 C3 M10	۵
۲	۵/۶۹	۴/۰۹	۱/۵۵	۵/۰۳	B0 C3 M20	۶
۳	۴/۹۳	۲/۲۱	۳/۶	۷/۰۵	B0 C5 M0	۷
۳	۳/۸۱	۱/۵۸	۴/۶۶	۸/۶۵	B0 C5 M10	۸
۳	۳/۷۵	۱/۷۴	۳/۵۷	۷/۶۹	B0 C5 M20	۹
۱	۱۰/۷۱	۹/۰۸	۵/۶۹	۱/۵۹	B20 C0 M0	۱۰
۱	۹/۷۸	۸/۰۷	۴/۶۲	۱/۲۲	B20 C0 M10	۱۱
۱	۸/۹۴	۷/۴۶	۴/۰۶	۱/۰۹	B20 C0 M20	۱۲
۲	۶/۳۷	۴/۶۶	۱/۵۹	۴/۱۸	B20 C3 M0	۱۳
۲	۵/۰۷	۳/۳۱	۱/۸۳	۵/۲۷	B20 C3 M10	۱۴
۲	۵/۰۱	۳/۵۸	۱/۶۸	۵/۴۱	B20 C3 M20	۱۵
۳	۴/۴۴	۱/۶۲	۳/۴۳	۷/۳۹	B20 C5 M0	۱۶
۳	۳/۴۴	۲/۴۴	۵/۶۴	۹/۶۱	B20 C5 M10	۱۷
۴	۱/۷۵	۳/۲	۵/۵۰	۹/۳۲	B20 C5 M20	۱۸
۱	۹/۲۴	۷/۸۹	۴/۵۲	۱/۳۶	B40 C0 M0	۱۹
۱	۸/۶۱	۷/۳۱	۴/۰۵	۱/۹۲	B40 C0 M10	۲۰
۱	۸/۰۸	۷/۰۷	۴/۱۳	۲/۷۵	B40 C0 M20	۲۱
۲	۴/۹۷	۳/۷۷	۱/۴۹	۵/۱۹	B40 C3 M0	۲۲
۴	۲/۱	۳/۱۶	۴/۰۴	۷/۹۳	B40 C3 M10	۲۳
۴	۱/۷۹	۳/۷۳	۴/۶۶	۸/۴۱	B40 C3 M20	۲۴
۳	۳/۱۵	۱/۵۹	۴/۳۳	۸/۴	B40 C5 M0	۲۵
۴	۱/۶۷	۴/۲۹	۶/۷۹	۱۰/۷۷	B40 C5 M10	۲۶
۴	۲/۶۱	۵/۳۴	۷/۷۸	۱۱/۶۴	B40 C5 M20	۲۷

طبق خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی وجه شباهت بین تیمارهایی که در خوشه اول قرار گرفته‌اند، عدم وجود کربوکسی‌متیل سلولز در ترکیب تیمارها است و به تیمار شاهد (B0C0M0) نزدیکتر هستند. وجه شباهت تیمارهایی که در خوشه دوم قرار گرفته‌اند وجود کربوکسی‌متیل سلولز در سطح ۳ $g\ kg^{-1}$ است، در تیمارهای خوشه سوم و چهارم وجود مقدار کربوکسی‌متیل سلولز در سطح ۵ $g\ kg^{-1}$ در اکثر تیمارها مشاهده می‌شود، به نوعی می‌توان گفت اثر بخشی سطوح مختلف کربوکسی‌متیل سلولز در تفکیک تیمارها در خوشه‌های مختلف، بیشتر از سطوح مختلف رس بنتونیت و سطوح باکتری است.

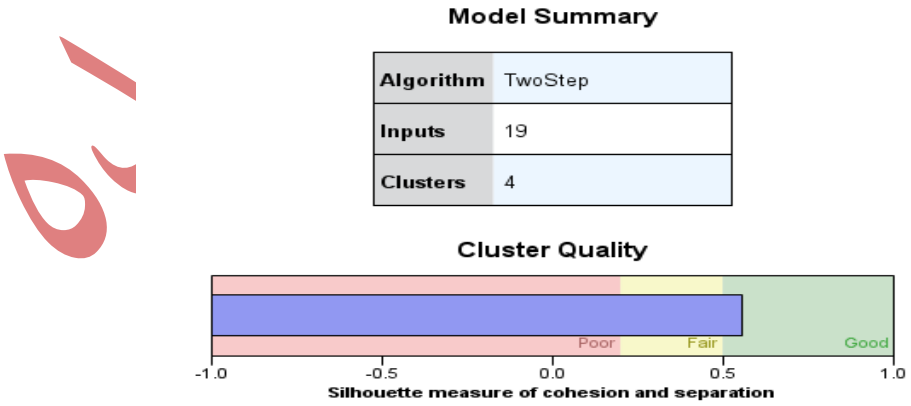
ویراستاری نشده



شکل ۳. دندوگرام حاصل از خوشه‌بندی تیمارهای مطالعاتی

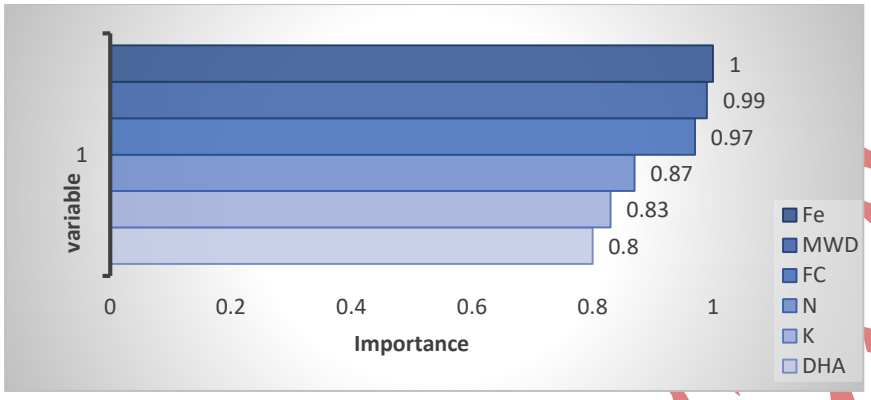
خوشه‌بندی دو مرحله‌ای

با اجرای خوشه‌بندی سلسله مراتبی صرفا می‌توان تیمارهای مشابه در خوشه‌های مختلف را شناسایی کرد، اما چگونگی تفکیک این تیمارها در خوشه‌های مختلف را نمی‌توان پیش‌بینی کرد، بدین منظور از سایر روش‌های خوشه‌بندی استفاده می‌شود، یکی از روش‌های پرکاربرد خوشه‌بندی در این زمینه روش خوشه‌بندی دو مرحله‌ای است. الگوریتم خوشه‌بندی دو مرحله‌ای در ابتدا با اجرای خوشه‌بندی مقدماتی و سپس با اجرای یکی از روش‌های رایج خوشه‌بندی، گروه بندی‌ها را شناسایی می‌کند. یکی از اقدامات خوشه‌بندی مقدماتی در این روش تعیین کیفیت خوشه‌بندی است، همانطور که در شکل ۴ مشخص شده است، ۱۹ متغیر در ۴ خوشه تفکیک شده است و کیفیت خوشه‌بندی تیمارها در محدوده نسبتا خوب قرار گرفته است.



شکل ۴. کیفیت خوشه‌بندی تیمارها در خوشه‌های مختلف

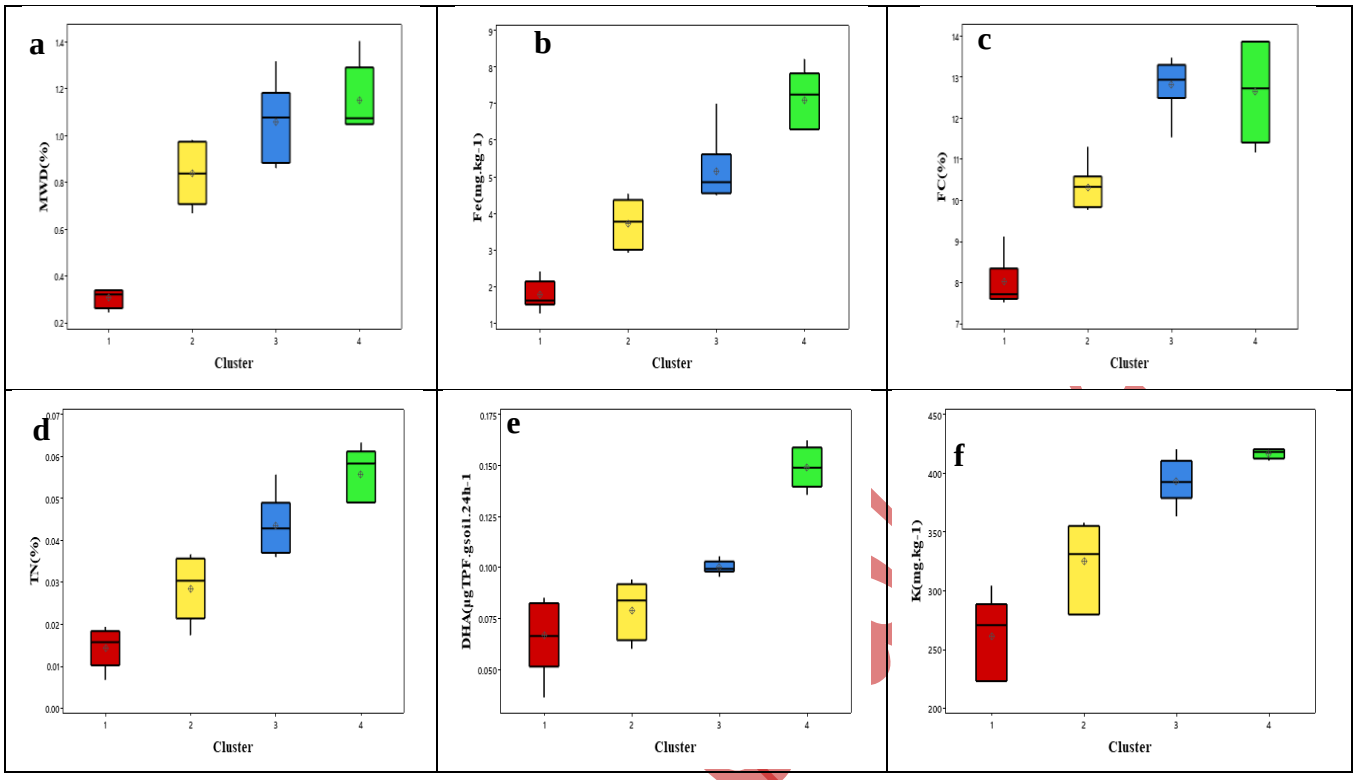
در این روش و بر اساس درجه اهمیت نسبی (Relative Importance) متغیرهای آهن قابل جذب (RI=1)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (RI=0.99)، رطوبت ظرفیت مزرعه (RI=0.97)، نیتروژن کل (RI=0.87) ، پتاسیم قابل جذب (RI=0.83) و آنزیم دهیدروژناز (RI=0.8) به ترتیب به عنوان مهم‌ترین متغیرها در تفکیک تیمارها به خوشه‌های مختلف شناسایی شدند. شکل ۵ نشان دهنده اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای ذکر شده است.



شکل ۵. اهمیت نسبی مهم‌ترین متغیرهای برآورد شده در روش خوشه‌بندی دو مرحله‌ای

در این روش مرکز ثقل میانگین این متغیرها برای کل تیمارهای خاک در چهار خوشه محاسبه شد و مقایسه میانگین این متغیرها در چهار خوشه مختلف بر اساس تجزیه واریانس و آزمون چند دامنه‌ای دانکن در نرم افزار SPSS انجام شد. در جدول ۹ میانگین هر متغیر در خوشه‌های مختلف و سطح معنی‌داری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد برای هر متغیر نشان داده شده است.

میانگین متغیرهای آهن قابل جذب، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، رطوبت ظرفیت مزرعه، نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب و آنزیم دهیدروژناز بین خوشه‌های ۱ تا ۴ دارای تفاوت معنی‌دار هستند. مقدار آهن قابل جذب در خوشه ۴ دارای بیشترین مقدار (۷/۰۸) $mg\ kg^{-1}$ و در خوشه شماره ۱ کمترین مقدار (۱/۷۵) $mg\ kg^{-1}$، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در خوشه ۴ دارای بیشترین مقدار (۱/۱۵) درصد و در خوشه ۱ کمترین مقدار (۰/۳۱) درصد، نیتروژن کل در خوشه ۴ دارای بیشترین مقدار (۰/۰۶) درصد و در خوشه ۱ کمترین مقدار (۰/۰۱۴) درصد، پتاسیم قابل جذب در خوشه ۴ دارای بیشترین مقدار (۴۱۶/۶۶) $mg\ kg^{-1}$ و در خوشه ۱ کمترین مقدار (۲۶۰/۸۱) $mg\ kg^{-1}$ و آنزیم دهیدروژناز در خوشه ۴ دارای بیشترین مقدار (۰/۱۴۸) $\mu gTPF\ g\ soil\ 24h^{-1}$ و در خوشه ۱ کمترین مقدار (۰/۰۷) $\mu gTPF\ g\ soil\ 24h^{-1}$ را دارا هستند. میزان رطوبت ظرفیت مزرعه در خوشه ۳ دارای بیشترین مقدار (۱۲/۸۲) درصد و در خوشه ۱ کمترین مقدار (۸/۰۳) درصد است. میزان رطوبت ظرفیت مزرعه در خوشه ۴، ۱۲/۶۶ درصد است که دارای اختلاف جزئی با مقدار رطوبت مزرعه‌ای خوشه ۳ است و تفاوت معنی‌داری ندارند. در شکل ۶ نمودار جعبه‌ای هر یک از متغیرها در خوشه‌های مختلف نشان داده شده است. با در نظر گرفتن این موارد می‌توان گفت بیشترین مقادیر متغیرهای ذکر شده در تیمارهای موجود در خوشه ۴ شامل تیمارهای B20 C5 M20، B40 C5 M10، B40 C5 M20، B40 C3 M20، و B40 C3 M10 هستند و به عنوان تیمارهای برتر و موثرتر در اصلاح خصوصیات خاک نسبت به سایر تیمارها شناخته می‌شوند. همچنین با توجه به جدول ۱۰ تیمارهای B40 C5 M10 و B40 C5 M20 در بین تیمارهای ذکر شده از اهمیت بیشتری برخوردار هستند.



شکل۶. نمودار جعبه‌ای متغیرهای آهن قابل جذب (a)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (b)، نیتروژن کل (c)، رطوبت ظرفیت مزرعه (d)، پتاسیم قابل جذب (e)، آنزیم دهیدروژناز (f)

جدول ۹. میانگین متغیرهای خاک در خوشه‌های مختلف و سطح معنی‌داری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد

متغیر	خوشه ۱	خوشه ۲	خوشه ۳	خوشه ۴	سطح معناداری
FC (%)	۸/۰۳^{c}	۱۰/۳۳^{b}	۱۲/۸۲^{a}	۱۲/۶۶^{a}	۰/۰۰۱*
MWD (mm)	۰/۳۱^{c}	۰/۸۳^{b}	۱/۰۵^{a}	۱/۱۵^{a}	۰/۰۰۱*
Fe(mg/kg)	۱/۷۵^{c}	۳/۷^{b}	۵/۱۴^{b}	۷/۰۸^{a}	۰/۰۰۱*
TN (%)	۰/۰۱۴^{d}	۰/۰۲۸^{c}	۰/۰۴۳^{b}	۰/۰۶^{a}	۰/۰۰۱*
K(mg/kg)	۲۶۰/۸۱^{c}	۳۲۴/۸۱^{b}	۳۹۳/۳^{a}	۴۱۶/۶۶^{a}	۰/۰۰۱*
DHA(µgTPF.gsoil.24h^{-1})	۰/۰۷^{c}	۰/۰۷۸^{c}	۰/۰۹۹^{b}	۰/۱۴۸^{a}	۰/۰۰۱*

جدول ۱۰. میانگین متغیرهای مهم خاک بین تیمارها و سطح معناداری بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد

Treatment	DHA (µgTPF.gsoil.24h^{-1})	FC (%)	TN (%)	K (mg. kg^{-1})	MWD (mm)	Fe (mg. kg^{-1})
B20 C5 M20	۰/۱۴۸^{bc}	۱۲/۷۳^{ab}	۰/۰۵۹^{a}	۴۱۴^{a}	۱/۰۴^{b}	۷/۲۳^{ab}
B40 C3 M10	۰/۱۳۵ c	۱۱/۱۷^{c}	۰/۰۴۷^{a}	۴۱۰^{a}	۱/۰۷^{b}	۶/۳^{b}
B40 C3 M20	۰/۱۵۵^{ab}	۱۱/۶۵^{bc}	۰/۰۴۹^{a}	۴۱۵^{a}	۱/۰۵^{b}	۶/۲۶^{b}
B40 C5 M10	۰/۱۴۳^{bc}	۱۳/۸۴^{a}	۰/۰۶۱^{a}	۴۲۰^{a}	۱/۱۷^{b}	۷/۴^{ab}
B40 C5 M20	۰/۱۶۲^{a}	۱۳/۸۹^{a}	۰/۰۵۸^{a}	۴۱۸^{a}	۱/۴^{a}	۸/۲^{a}
سطح معناداری	۰/۰۳*	۰/۰۱*	۰/۶	۰/۹	۰/۰۳*	۰/۰۴*

نتایج یافته‌های این

پژوهش با برخی مطالعات مرتبط در این زمینه مطابقت دارد. با افزایش سطوح مختلف رس بنتونیت، کربوکسی‌متیل سلولز و باکتری‌های محرک رشد گیاه، در بین تیمارها، مقادیر متغیرهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک افزایش معنی‌داری پیدا کرده است. استفاده از بنتونیت به عنوان یک راهکار پایدار و بلندمدت برای افزایش کارایی و پایداری سیستم‌های کشاورزی در خاک‌های شنی شناخته شده است (Bell & Seng, 2007). تأثیرات مثبت بنتونیت سبب شده است که در بسیاری از مناطق خشک جهان به عنوان یک اصلاح‌کننده خاک مورد استفاده قرار گیرد (McKissock et al., 2000; Suzuki et al., 2007) و به افزایش رشد و عملکرد محصولات کشاورزی کمک کند (Aleem et al., 2000). رس بنتونیت هنگامی که به عنوان اصلاح کننده خاک استفاده می‌شود، به دلیل خواص طبیعی خود می‌تواند باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، مواد آلی خاک و در دسترس بودن عناصر غذایی شود. همه این ویژگی‌ها می‌توانند وضعیت تخلخل خاک، ساختان خاک، فعالیت‌های میکروبی و در نهایت عملکرد محصول را بهبود بخشند. (Hussain et al., 2022) . افزایش مقدار بنتونیت در خاک می-تواند ظرفیت تبادل کاتیونی را به دلیل توسعه کمپلکس‌های آلی–معدنی در خاک افزایش دهد که باعث بهبود میزان کربن آلی خاک، فعالیت‌های میکروبی و عناصر غذایی در خاک شود، همچنین رس بنتونیت می‌تواند یون های دارای بار مثبت مانند منیزیم، پتاسیم و کلسیم را در خود نگه دارد و تولید آنزیم های آنتی اکسیدانی را افزایش دهد و باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، میزان نفوذ تجمعی آب در خاک و تبخیر و تعرق از سطح خاک شود (Alghamdi et al., 2023) . بنتونیت به‌دلیل توانایی‌اش در کاهش اثرات منفی خشکسالی بر سلامت خاک و فعالیت میکروبی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این ماده با افزایش نگهداری آب و بهبود فعالیت آنزیم‌ها، می‌تواند به بازیابی عملکردهای بیولوژیکی در خاک‌های آسیب‌دیده کمک کند. همچنین، بنتونیت به افزایش تنوع و فعالیت میکروبی در خاک‌های خشک منجر می‌شود که این امر به بهبود حاصلخیزی و سلامت خاک کمک می‌کند. علاوه بر این، خاصیت ژل‌مانند بنتونیت به‌عنوان یک نگه‌دارنده رطوبت، توانایی آن را در جذب و نگهداری آب افزایش می‌دهد. این خاصیت کمک می‌کند تا آب در لایه‌های خاک حفظ شود و شرایط بهتری برای رشد ریشه‌ها و فعالیت میکروبی فراهم گردد (Djajadi et al., 2012). علاوه بر این بنتونیت به عنوان حامل کودهای شیمیایی عمل کرده و آزاد شدن این کودها به گونه‌ای است که همزمان با نیازهای رشد گیاه در مراحل مختلف رشد صورت گیرد. این فرآیند باعث افزایش و جذب بهتر عناصر غذایی توسط ریشه گیاه می‌شود (El-Nagar & Sary, 2021).

کربوکسی‌متیل سلولزها، از دیگر عوامل موثر در اصلاح خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک هستند، که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم در این امر موثر هستند، کربوکسی‌متیل سلولز هنگامی که در آب حل می‌شود، خواص مفید زیادی از خود نشان می‌دهد. هنگامی که به خاک افزوده می‌شود، می‌تواند ویژگی‌های نفوذ پذیری خاک و پارامترهای مدل نفوذ را با تشکیل یک ساختار ژل مانند و بهبود عملکرد نفوذ آب در خاک و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک تغییر دهد. علاوه بر این، گروه کربوکسی‌متیل با بار منفی در زنجیره اصلی خود می‌تواند با کاتیون‌های محلول خاک از طریق جاذبه الکترواستاتیکی تعامل داشته باشد، به عنوان یک عامل اتصال قوی عمل کند که منجر به تجمع ذرات خاک و در نتیجه کاهش فشردگی خاک شود. از سوی دیگر باعث افزایش فضای منافذ خاک و افزایش تخلخل خاک می‌شود و نفوذ آب به خاک را بهبود می‌بخشد و با حفظ رطوبت خاک حلالیت عناصر غذایی در خاک را افزایش می‌دهد. کربوکسی‌متیل سلولز به عنوان یک پلیمر پلی‌کربوکسیلات، ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی دارد. در نتیجه جذب عناصر غذایی در خاک را افزایش می‌دهد و دسترسی به عناصر غذایی موثر را تقویت می‌کند. علاوه بر این، به عنوان منبع کربن، تکثیر و تولید میکروارگانیسم‌های خاک را تحریک می‌کند. این میکروارگانیسم‌ها نقش اساسی در تجزیه مواد آلی خاک و آزادسازی متعاقب عناصر غذایی ایفا می‌کنند . کربوکسی‌متیل سلولز علیرغم کمبود عناصر غذایی مانند نیتروژن و فسفر که در مواد آلی خاک مانند اسید هیومیک و اسیدهای آمینه وجود دارد، میزان عناصر غذایی موجود مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک را در لایه ۰–۴۰ سانتی متری خاک به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Wang et al., 2023). در مطالعات متعدد مشخص شده است که کاربرد ۰/۶ تا ۴ (g.kg) کربوکسی‌متیل سلولز

باعث کاهش نفوذپذیری آب و افزایش توان تولیدی خاک‌های شنی، افزایش ظرفیت نگهداشت آب و افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود و راندمان شستشوی املاح را در خاک‌های شور سرعت می‌بخشد (Ning et al., 2019) (Wu et al., 2015) .

برخی از باکتری‌های خاک برای افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود رشد گیاه مفید هستند (Muhammad et al., 2023). این باکتری ها نه تنها نیتروژن اتمسفر را برای تولید غذای خود تثبیت می‌کنند، بلکه می‌توانند ترکیبات پیچیده را نیز تجزیه کنند تا آن‌ها را در دسترس گیاه قرار دهند. این باکتری‌ها ، باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) نامیده می‌شوند (Mehmood et al., 2023). این باکتری ها گاهی به طور طبیعی به مقدار زیادی در خاک در منطقه ریشه گیاه حضور دارند و گاهی می‌توان آن‌ها را با بذر تلقیح کرد و مستقیماً باعث افزایش رشد و عملکرد محصول می شنود. این باکتری‌ها در تولید محصولات کشاورزی برای بهبود عملکرد و حاصلخیزی خاک بسیار مفید است (Ali et al., 2023).

یکی دیگر از اصلاح‌کننده‌های مورد استفاده در این پژوهش مخلوط دو جدایه از باکتری اندوفیت و رایزوشیت *Pantoea agglomerans* (R11) و *Pseudomonas sp* (E1) بود. این باکتری‌ها علاوه بر تولید اگزوپلی‌ساکاریدها که نقش مهمی در خاکدانه‌سازی و افزایش پایداری خاکدانه‌ها دارند، (Lorenzi et al., 2022) کارایی بالایی از نظر تولید عوامل محرک رشد و فراهم سازی عناصر غذایی به شکل قابل جذب را دارا می باشند (Khan et al., 2017). از جمله این موارد می‌توان به تولید هورمون‌های مختلف رشد شامل جیبرلین، سیتوکینین، اکسین، ترکیبات آلی مختلف مانند سیدروفور و آنزیم‌های دهیدروژناز ، آدنوزین دآمیناز و بتاگلوکوزیداز اشاره کرد که باعث انحلال و تسهیل جذب عناصر غذایی مختلف شامل، آهن، روی، منگنز، مس، فسفر، پتاسیم، منیزیم و نیتروژن قابل جذب در خاک و در نهایت افزایش زیست توده میکروبی می‌شوند (Sah et al., 2021). همچنین استفاده از این باکتری در خاک باعث افزایش حلالیت نمک‌های مختلف به ویژه کلریدها می‌شود (Martínez et al., 2019).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش‌های چند متغیره آماری به بررسی اثر سه نوع اصلاح کننده رس بنتونیت، کربوکسی‌متیل سلولز و مخلوط دو جدایه از باکتری‌های اندوفیت و رایزوشیت در سطوح مختلف، بر خصوصیات خاک پرداخته شد، استفاده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نتایج یکسانی در شناخت و تفکیک متغیرهای خاک داشت. طبق خوشه‌بندی دو مرحله‌ای و بر اساس درجه اهمیت نسبی (RI) متغیرهای آهن قابل جذب، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، رطوبت ظرفیت مزرعه، نیتروژن کل، پتاسیم قابل جذب و آنزیم دهیدروژناز به ترتیب به عنوان مهم‌ترین متغیرها شناخته شدند. نتایج نشان داد که تیمارهای B20 C5 M20، B40 C5 M10، B40 C5 M20، B40 C3 M20 و B40 C3 M10 از عملکرد بهتری در اصلاح خصوصیات خاک نسبت به سایر تیمارها برخوردار هستند. این اصلاح‌کننده‌ها به دلیل اثرات مثبت و مختلفی از قبیل، قابلیت جذب زیاد آب و بالا بردن راندمان مصرف آب در خاک، جذب عناصر غذایی ضروری مورد نیاز گیاه در سطح خود و در نتیجه افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، افزایش پایداری خاکدانه‌ها، افزایش تخلخل خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک، افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها ، افزایش تولید هرمون‌های گیاهی و آنزیم‌های مختلف و در نتیجه افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی مختلف، باعث افزایش کیفیت خاک به طور قابل توجهی می‌شوند. با توجه به عدم وجود منابع کافی آب و کیفیت پایین خاک‌های شنی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از این اصلاح‌کننده‌ها برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک بیش از گذشته، امری حیاتی و اجتناب ناپذیر است. مواد اصلاحی مورد استفاده در حال حاضر چندان شناخته شده نیستند و عمومیت پیدا نکرده‌اند ولی با توجه به اینکه از جهات زیست محیطی مشکل ساز نمی‌باشند و در عین حال اثرات مفید و سازنده‌ای بر خصوصیات خاک دارند در مقایسه با سایر مواد اصلاحی از نظر اقتصادی نیز مشابه با آنها یا حتی بهتر می‌باشند.

" هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Aleem, M., Hanna, N., & Sabry, S. (2000). Relationship between wheat root characteristics and grain yield in sandy and clay soils .

Alghamdi, A. G., Majrashi, M. A., & Ibrahim, H. M. (2023). Improving the Physical Properties and Water Retention of Sandy Soils by the Synergistic Utilization of Natural Clay Deposits and Wheat Straw. *Sustainability*, *16*(1), 46 .

Ali, B., Hafeez, A., Afridi, M. S., Javed, M. A., Sumaira, Suleman, F., Nadeem, M., Ali, S., Alwahibi, M. S., & Elshikh, M. S. (2023). Bacterial-mediated salinity stress tolerance in maize (Zea mays L.): A fortunate way toward sustainable agriculture. *ACS omega*, *8*(23), 20471-20487 .

Alidoust, E., Afyuni, M., Hajabbasi, M. A., & Mosaddeghi, M. R. (2019). Application of multivariate statistical methods for evaluating soil quality indices in Lordegan semiarid region. *Applied Soil Research*, *7*(3), 192-206 .

Anderson, J. P. (1982). Soil respiration. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, *9*, 831-871 .

Babla, M., Katwal, U ,.Yong, M.-T., Jahandari, S., Rahme, M., Chen, Z.-H., & Tao, Z. (2022). Value-added products as soil conditioners for sustainable agriculture. *Resources, conservation and recycling*, *178*, 106079 .

Bednik, M., Medyńska-Juraszek, A., Dudek, M., Kloc, S., Kręt ,A., Łabaz, B., & Waroszewski, J. (2020). Wheat straw biochar and NPK fertilization efficiency in sandy soil reclamation. *Agronomy*, *10*(4), 496 .

Bell, R., & Seng, V. (2007). The management of agroecosystems associated with sandy soils. Management of tropical sandy soils for sustainable development: proceedings of the International Conference on the Management of Tropical Sandy Soils, Khon Kaen, Thailand ,

Blake, G. (1986). Bulk density. *Methods of Soil Analysis. Part*, *1* .

Bottomley, P. J., Angle, J. S & ,.Weaver, R. (2020). *Methods of soil analysis, Part 2: Microbiological and biochemical properties* (Vol. 12). John Wiley & Sons .

Cassel, D., & Nielsen, D. (1986). Field capacity and available water capacity. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, *5*, 901-926 .

Djajadi, Abbott, L. K., & Hinz, C. (2012). Synergistic impacts of clay and organic matter on structural and biological properties of a sandy soil. *Geoderma*, *183-184*, 19-24.

El-Nagar, D. A., & Sary, D. H. (2021). Synthesis and characterization of nano bentonite and its effect on some properties of sandy soils. *Soil and tillage research*, *208*, 104872 .

Herawati, A., Mujiyo, M., Dewi, W. S., Syamsiyah, J., & Romadhon, M. R. (2024). Improving microbial properties in Psamments with mycorrhizal fungi, amendments, and fertilizer. *Eurasian Journal of Soil Science*, *13*(1), 59-69 .

Hussain, Z., Cheng, T., Irshad, M., Khattak, R. A., Yao, C., Song, D., & Mohiuddin, M. (2 .(٠٢٢Bentonite clay with different nitrogen sources can effectively reduce nitrate leaching from sandy soil. *Plos one*, *17*(12), e0278824 .

Iqbal, R., Valipour, M., Ali, B., Zulfiqar, U., Aziz, U., Zaheer, M. S., Sarfraz, A., Javed, M. A., Afridi, M. S & ,.Ercisli, S. (2024). Maximizing wheat yield through soil quality enhancement: A combined approach with Azospirillum brasilense and bentonite. *Plant Stress*, *11*, 100321 .

Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and psychological measurement*, *20*(1), 141-151 .

Kemper, W., & Chepil, W. (1965). Size distribution of aggregates. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*, *9*, 499-510 .

Khan, N., Bano, A., & Babar, M. A. (2017). The root growth of wheat plants, the water conservation and fertility status of sandy soils influenced by plant growth promoting rhizobacteria. *Symbiosis*, *72*, 195-205 .

Leech, N. L., Barrett, K. C., & Morgan, G .A. (2014). *IBM SPSS for intermediate statistics: Use and interpretation*. Routledge .

Lorenzi, A. S., Bonatelli, M. L., Chia, M. A., Peressim, L., & Quecine, M. C. (2022). Opposite sides of Pantoea agglomerans and its associated commercial outlook. *Microorganisms*, *10*(10), 2072 .

Malakouti, M., Moshiri, F., & Ghaibi, M. (2005). Optimum levels of nutrients in soil and some agronomic and horticultural crops. *Soil and Water Research Institue. Technical Bulletin* .(٤٠٥)

Martín-Sanz, J. P., de Santiago-Martín ,A., Valverde-Asenjo, I., Quintana-Nieto, J. R., González-Huecas, C., & López-Lafuente, A. L. (2022). Comparison of soil quality indexes calculated by network and principal component analysis for carbonated soils under different uses. *Ecological indicators* .١٠٩٣٧٤ ,١٤٣ ,

Martínez, J. I., Gómez-Garrido, M., Gómez-López, M. D., Faz, Á., Martínez-Martínez, S., & Acosta, J. A. (2019). Pseudomonas fluorescens affects nutrient dynamics in plant-soil system for melon production. *Chilean journal of agricultural research*, *79*(2), 223-233 .

McKissock, I., Walker, E., Gilkes, R., & Carter, D. (2000). The influence of clay type on reduction of water repellency by applied clays: a review of some West Australian work. *Journal of hydrology*, *231*, 323-332 .

Mehmood, N., Saeed, M., Zafarullah, S., Hyder, S., Rizvi, Z. F., Gondal, A. S., Jamil, N., Iqbal, R., Ali, B., & Ercisli, S. (2023). Multifaceted impacts of plant-beneficial pseudomonas spp. in managing various plant diseases and crop yield improvement. *ACS omega*, *8* .۲۲۳۱۵-۲۲۲۹۶ ,(۲۵)

Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., & Liu, J. (2020). Effect of bentonite as a soil amendment on field water-holding capacity, and millet photosynthesis and grain quality. *Scientific Reports*, *10*(1), 18282 .

Muhammad, H., Fahad, S., Saud, S., Hassan, S., Nasim, W., Ali, B., Hammad, H. M., Bakhat, H. F., Mubeen, M., & Khan, A. Z. (2023). A paradigm shift towards beneficial microbes enhancing the efficiency of organic and inorganic nitrogen sources for a sustainable environment. *Land*, *12*(3), 680 .

Nabiollahi, K., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Moradian, S. (2017). Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological indicators*, *83*, 482-494 .

Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1980). Total nitrogen analysis of soil and plant tissues. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, *63*(4), 770-778 .

Ngo-Mbogba, M., Yemefack, M., & Nyeck, B. (2015). Assessing soil quality under different land cover types within shifting agriculture in South Cameroon. *Soil and tillage research*, *150*, 124-131 .

Ning, S., Jumai, H., Wang, Q., Zhou, B., Su, L., Shan, Y., & Zhang, J. (2019). Comparison of the effects of polyacrylamide and sodium carboxymethylcellulose application on soil water infiltration in sandy loam soils. *Advances in Polymer Technology*, *2019*(1), 6869454 .

Olsen, S. R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. US Department of Agriculture .

Omer, A. M., Tamer ,T. M., Hassan, M. E., Khalifa, R. E., Abd El-Monaem, E. M., Eltaweil, A. S., & Mohy Eldin, M. S. (2023). Fabrication of grafted carboxymethyl cellulose superabsorbent hydrogel for water retention and sustained release of ethephon in sandy soil. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *48*(1), 561-572 .

Qin, C.-C., Abdalkarim, S. Y. H., Zhou, Y., Yu, H.-Y., & He, X. (2022). Ultrahigh water-retention cellulose hydrogels as soil amendments for early seed germination under harsh conditions. *Journal of Cleaner Production*, *370*, 133602 .

Reza, S., Baruah, U., & Singh, S. (2015). Multivariate approaches for soil fertility characterization of lower Brahmaputra valley, Assam, India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, *63*(4), 379-383 .

Sah, S., Krishnani, S., & Singh, R. (2021). Pseudomonas mediated nutritional and growth promotional activities for sustainable food security. *Current Research in Microbial Sciences*, *2*, 100084 .

Semalulu, O., Elobu, P., Namazzi, S., Kyebogola, S., & Mubiru, D. (2017). Higher cereal and legume yields using Ca-bentonite on sandy soils in the dry eastern Uganda: increased productivity versus profitability. *J. Agric. Res*, *5*(2), 140-147 .

Shao, F., Zeng, S., Wang, Q., Tao, W., Wu, J., Su, L., Yan, H., Zhang, Y., & Lin, S. (20 .(۲۳Synergistic effects of biochar and carboxymethyl cellulose sodium (CMC) applications on improving water retention and aggregate stability in desert soils. *Journal of Environmental Management*, *331*, 117305 .

Shuman, L. (1985). Fractionation method for soil microelements. *Soil science*, *140*(1), 11-22 .

Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, *5*, 1201-1229 .

Suzuki, S., Noble, A. D., Ruaysoongnern, S., & Chinabut, N. (2007). Improvement in water-holding capacity and structural stability of a sandy soil in Northeast Thailand. *Arid Land Research and Management*, *21*(1), 37-49 .

Walkly, A., & Black, I. (1934). An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil science society of America journal*, *37*, 29-38 .

Wang, Y., Gao, M., Chen, H., Chen, Y., Wang, L., & Wang, R. (2023). Fertigation and carboxymethyl cellulose applications enhance water-use efficiency, improving soil available nutrients and maize yield in salt-affected soil. *Sustainability*, *15*(12), 9602 .

Wu, J., Tao, W., Wang, H., & Wang, Q. (2015). Influence of sodium carboxyl methyl cellulose on soil aggregate structureand soil water movement. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *31*(2), 117-123 .

Yost, J. L., & Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in agronomy*, *158*, 217-310 .

Zhang, L., Mi, J., Zhao, B ,.Cui, X., Hu, K., McLaughlin, N. B., & Liu, J. (2024). Soil Amendment Combining Bentonite and Maize Straw Improves Soil Quality Cropped to Oat in a Semi-Arid Region. *Agronomy*, *14*(5), 1012 .

ınvestigating the effects of some selected organic, inorganic materials and and plant growth promoting bacteria in modifying the physical and chemical properties of a sandy Entisol

EXTEDED ABSTRACT

Background:

Sandy Entisols (Psamment) are distributed all over the world from very humid to temperate, semi-arid and dry regions. Sandy soils have low water holding capacity, high permeability and low ability to store and exchange nutrients. Due to the low amount of clay, silt and organic matter, sandy soils have a weak structure and are prone to degradation processes.The lack of water and nutrients leads to low biological activities of these types of soils and limits the growth of plants and microbes. Currently, the use of traditional methods of improving sandy soils is less significant due to the high cost and destructive effects on the environment. Applying correct management and applying advanced techniques is needed more than before. Soil Amendment are substances that contain essential elements and compounds to improve the physical, chemical or biological properties of the soil, which ultimately leads to soil stability, preserving the environment and improving the conditions for plant growth and development.

Objective

The aim of this study is to obtain a suitable combination of organic, inorganic materials and selected microoorganicm to improve the physical, chemical and biological characteristics of a non-saline sandy soil (Entisol) at a depth of 0-20 cm, from Najm Abad Karaj aeolian sediments

Methodology

This evaluation was carried out in the form of completely randomized design in factorial arrangement including three levels of bentonite (B0, B20 and B40) respectively 0, 20 and 40 Ton ha^{-1}, three levels of carboxymethyl cellulose (C0, C3 and C5) respectively 0, 3 and 5 g kg^{-1} and A mixture of two isolates of endophytic bacteria (*Pseudomonas sp*) and rhizosheath (*Pantoea agglomerans*) at three levels(M0, M20 and M40) respectively 0, 20, and 40 $mLkg^{-1}$ and a total of 27 treatments with 3 replications (81 experimental units). In order to analyze the data and identify the best treatments, multivariate statistical methods were used, including principal component analysis, hierarchical clustering, and Two-step clustering.

Finding

Based on two-step clustering, the variables Relative Importance (RI) including available Fe (RI=1), mean weighted diameter (RI=0.99), field capacity (RI=0.97), total nitrogen (RI=0.87), available K (RI=0.83) and dehydrogenase enzyme (RI=0.8) were identified as the most important variables respectively. Variables including Fe available with a range of 1.75 to 7.08 mg kg^{-1}, The mean weight diameter with a range of 0.31 to 1.15 mm, total nitrogen with a range of 0.014 to 0.06%, field capacity with a range of 8.03 to 12.82%, available K with a range of 280.8 to 416.66 mg kg^{-1} and dehydrogenase enzyme with a range of 0.07 to 0.148 µgTPF g soil 24 h^{-1}, had the highest effect in the clustering treatments into different clusters.

Conclusion

The results of this study showed that treatments B20 C5 M20, B40 C5 M10, B40 C5 M20, B40 C3 M20 and B40 C3 M10 have better performance to to modify certain soil properties compared to other treatments. These amendments have positive effects, such as high-water absorption and increase the efficiency of water use efficiency in the soil, plant essential nutrients absorption, increase the cation exchange capacity of the soil, soil aggregate stability, Soil porosity and reduction of soil bulk density, increasing the activity of microorganisms, increasing the production of plant hormones and various enzymes, and as a result, increase the soil quality. Considering the lack of sufficient water resources and the low quality of sandy soils, especially in arid and semi-arid regions, the use of these modifiers for the sustainable use of water and soil resources is more vital than in the past.

Keywords: *endophyte, bentonite, rhizosheath, carboxymethyl cellulose*

Author Contributions

Conceptualization; Ahmad Heidari and Alireza Raheb; methodology, Ahmad Heidari, Alireza Raheb and Hasan Etesami; validation, Ahmad Heidari and Mohammad Reza Bihamta; formal analysis, Mohammad Hoseini Badashiani; investigation, Mohammad Hoseini Badashiani; writing—original draft preparation, Mohammad Hoseini Badashiani; writing— Ahmad Heidari, X.X.; visualization, Mohammad Hoseini Badashiani; supervision Ahmad Heidari and Alireza Raheb; project administration, Ahmad Heidari; funding acquisition, Ahmad Heidari and Alireza Raheb. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript." All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank Soil Science Department of University of Tehran for providing equipments and Facilities, and Dr. Aida Bakhshi Khorramdareh for her participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest

ویراستاری نشده