

Interaction Effects of Biochar Type and Pyrolysis Temperature on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties and Soil Quality Indices

Zahra Javanmrd¹, Afsaneh Alinejadian-Bidabadi^{1*}, Amir Lakzian²,
Omidali Akbarpour³ and Keanoush Hamidian^{4*}

1- Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran

2- Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

3- Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran

4- Agricultural Jihad Organization of Lorestan, Khorramabad, Iran

* Corresponding author, Email: alinezhadian.a@lu.ac.ir

Abstract

Background and Objectives: Soil quality degradation is a major challenge to sustainable land management. This study aimed to investigate the effects of biochar type, walnut shell (Wa) and pomegranate peel (Po), and pyrolysis temperature (400, 500, and 600°C) on soil quality. The hypothesis was that biochar type and pyrolysis temperature would independently and interactively affect soil quality.

Methods: The experiment was conducted in a randomized complete block design with seven treatments and three replications at the research farm of the Faculty of Agriculture, Lorestan University. The Nemrow Quality Index (NQI) and Integrated Quality Index (IQI) were calculated based on the Total Data Set (TDS) and Minimum Data Set (MDS).

Results: Increasing pyrolysis temperature significantly affected most soil properties ($p < 0.01$). With increasing temperature, bulk density (BD) and percentage of aggregate destruction (PAD) decreased, whereas porosity, mean weight diameter (MWD), whole soil stability index (WSSI), and normalized stability index (NSI) increased. The highest MWD and WSSI were observed in Wa600, while the highest porosity and field capacity occurred in Po600. The highest organic carbon (OC) was recorded in Po600, whereas the highest phosphorus and potassium contents were obtained in Wa600. Microbial biomass carbon (MBC), particulate organic carbon (POC), urease, and alkaline phosphatase activities increased, while metabolic quotient (QCO_2) and acid phosphatase activity decreased ($p < 0.01$). The highest IQI-TDS (0.722) was observed in Wa600, whereas the highest IQI-MDS (0.695) occurred in Po400.

Conclusion: Biochar, particularly at 600°C, improved soil quality. The superior performance of Wa600 in IQI-TDS and Po400 in IQI-MDS highlights the importance of selecting appropriate feedstock and pyrolysis temperature for improving soil quality.

Keywords: Aggregate stability, Pomegranate peel, Walnut shell, Minimum data set, Nemrow quality index, Microbial biomass carbon.

اثر متقابل نوع بیوچار و دمای پیرولیز بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی و شاخص‌های کیفیت خاک

زهرا جوانمرد^۱، افسانه عالی نژادیان بیدآبادی^{۱*}، امیر لکزیان^۲، امیدعلی اکبرپور^۳ و کیانوش حمیدیان^۴

^۱- گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

^۲- گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

^۳- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

^۴- سازمان جهاد کشاورزی استان لرستان، خرم‌آباد، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: alinezhadian.a@lu.ac.ir

چکیده

پیشینه و هدف: کاهش کیفیت خاک چالشی مهم در مدیریت پایدار اراضی است. این پژوهش با هدف بررسی اثر نوع بیوچار، پوست گردو (Wa) و پوست انار (Po)، و دمای پیرولیز (۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) بر کیفیت خاک انجام شد. فرضیه پژوهش این بود که نوع بیوچار و دمای پیرولیز، به صورت مستقل و متقابل، بر کیفیت خاک اثر دارند.

روش‌ها: آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با هفت تیمار و سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان انجام شد و شاخص کیفیت نمره (NQI) و کیفیت تجمعی (IQI) بر پایه مجموعه داده کامل (TDS) و حداقل مجموعه داده (MDS) محاسبه شدند.

نتایج: افزایش دمای پیرولیز بر بیشتر ویژگی‌های خاک اثر معنی‌داری داشت ($p < 0.01$). با افزایش دما، جرم مخصوص ظاهری (BD) و درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD) کاهش و تخلخل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، شاخص پایداری کل خاک (WSSI) و شاخص پایداری نرمال (NSI) افزایش یافتند. بیشترین MWD و WSSI در Wa600 و بیشترین تخلخل و ظرفیت زراعی در Po600 مشاهده شد. بیشترین کربن آلی (OC) در Po600 و بیشترین فسفر و پتاسیم در Wa600 به دست آمد. همچنین کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) و کربن آلی ذره‌ای (POC)، فعالیت اوره‌آز و آلکالین فسفاتاز افزایش و ضریب متابولیسمی (QCO_2) و فعالیت اسید فسفاتاز کاهش یافتند ($p < 0.01$). بیشترین IQI-TDS (۰/۷۲۲) در Wa600 و بیشترین IQI-MDS (۰/۶۹۵) در Po400 مشاهده شد.

نتیجه‌گیری کلی: بیوچار، به ویژه در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، کیفیت خاک را بهبود داد. برتری Wa600 در IQI-TDS و Po400 در IQI-MDS، اهمیت انتخاب ماده اولیه و دمای پیرولیز را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاکدانه‌ها، پوست انار، پوست گردو، حداقل مجموعه داده، شاخص نمره، کربن زیست‌توده میکروبی.

مقدمه

تأمین امنیت غذایی و توسعه کشاورزی پایدار مستلزم حفظ و ارتقای کیفیت خاک است. کاهش ماده آلی، تخریب ساختمان خاک و افت عملکردهای اکولوژیکی از عوامل مهم محدودکننده تولید کشاورزی هستند. اگرچه کودهای شیمیایی و آلی می‌توانند حاصلخیزی خاک را در کوتاه‌مدت افزایش دهند، پیامدهای مصرف نامتوازن آن‌ها ضرورت استفاده از اصلاح‌کننده‌های پایدار را افزایش داده است (Taleb Shams et al., 2022; Mohammadi and Khademalrasoul, 2021).

بیوپچار به دلیل برخورداری از کربن پایدار، ساختار متخلخل و سطح ویژه بالا، می‌تواند به عنوان اصلاح‌کننده‌ای پایدار، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را بهبود بخشد (Azimzadeh and Najafi, 2017). این ماده از پیرولیز زیست‌توده در شرایط محدودیت اکسیژن تولید می‌شود و می‌تواند از بقایای کشاورزی و پسماندهای باغی تهیه شود (Hansen et al., 2016). ویژگی‌های بیوپچار به ماده اولیه و شرایط تولید، به ویژه دمای پیرولیز، وابسته است. افزایش دمای پیرولیز معمولاً با تغییر ساختار منافذ، افزایش سهم کربن پایدار و سطح ویژه و تغییر گروه‌های عاملی همراه است و می‌تواند بر pH، مقدار خاکستر، نگهداری آب، فراهمی عناصر غذایی و فعالیت‌های زیستی خاک تأثیر بگذارد (Selmy et al., 2021; Zhang et al., 2017). از این رو، با توجه به تفاوت بیوپچارها از نظر ترکیب کربن، ساختار منافذ، سطح ویژه، خاکستر و عناصر معدنی، اثر آن‌ها بر کیفیت خاک الزاماً یکنواخت نیست و به نوع ماده اولیه، دمای پیرولیز و ویژگی‌های اولیه خاک بستگی دارد (Saffari et al., 2020).

مطالعات پیشین نیز وابستگی پاسخ خاک به نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز بیوپچار را نشان داده‌اند. (Sial et al., 2023) گزارش کردند که کاربرد بیوپچار پوست گردوی تولیدشده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس موجب افزایش کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل‌دسترس و فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز و آلکالین فسفاتاز در

خاک‌های با بافت سبک شد. (Li et al., 2023) نیز نشان دادند که نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز بر مقدار کربن، pH، سطح ویژه و حجم منافذ بیوپچار اثرگذار است. همچنین، افزایش دمای پیرولیز بیوپچار پوست انار با کاهش بازده تولید و تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن همراه است.

کیفیت خاک مفهومی چندبعدی است که ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی را در برمی‌گیرد و ارزیابی آن با یک ویژگی منفرد امکان‌پذیر نیست (Divband Hafshejani et al., 2017). شاخص‌های کیفیت خاک (SQI^۱) با تلفیق ویژگی‌های کلیدی، امکان ارزیابی جامع عملکرد خاک و مقایسه اثر مدیریت‌های مختلف را فراهم می‌کنند (Witzgall et al., 2021). همچنین، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA^۲) برای شناسایی مهم‌ترین ویژگی‌ها و تشکیل حداقل مجموعه داده (MDS^۳) کاربرد دارد (Bünemann et al., 2018).

با وجود مطالعات متعدد، مقایسه مستقیم بیوپچار پوست گردو و پوست انار در دامنه‌ای از دماهای پیرولیز و ارزیابی هم‌زمان پاسخ‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک همچنان محدود است. همچنین، بررسی هم‌زمان شاخص‌های پایداری خاکدانه، کربن آلی ذره‌ای، کربن زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌های اسید فسفاتاز، آلکالین فسفاتاز و اوره‌آز، همراه با ارزیابی کیفیت خاک بر پایه TDS و MDS، می‌تواند شناخت جامع‌تری از اثر بیوپچار بر عملکرد خاک فراهم کند. مقایسه شاخص‌های کیفیت تجمعی (IQI^۴) و کیفیت نمره (NQI^۵) بر پایه مجموعه داده کامل (TDS^۶) و MDS نیز می‌تواند حساسیت و همگرایی این رویکردها را در ارزیابی کیفیت خاک مشخص کند. بنابراین، نوآوری پژوهش حاضر، بررسی هم‌زمان اثر نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز بر مجموعه‌ای گسترده از ویژگی‌های خاک و مقایسه دو رویکرد TDS و MDS در محاسبه IQI و NQI است.

بنابراین، هدف این پژوهش بررسی اثر متقابل بیوپچار پوست انار و پوست گردو و دماهای پیرولیز ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه

4- Integrated Quality Index
5- Nemoro Quality Index
6- Total Data Set

1- Soil Quality Indices
2- Principal Component Analysis
3- Minimum Data Set



الف ب

شکل ۱. (الف) بیوچار پوست انار؛ (ب) بیوچار پوست گردو

Figure 1. (a) Pomegranate peel biochar; (b) Walnut shell biochar.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده انواع بیوچار تهیه شده در دماهای مختلف پیرولیز

Table 1. Some measured properties of biochar types prepared at different pyrolysis temperatures.

بیوچار پوست انار در دماهای مختلف پیرولیز Po: Pomegranate peel biochar			بیوچار پوست گردو در دماهای مختلف پیرولیز Wa: Walnut shell biochar			ویژگی‌ها Properties
600°C	500°C	400°C	600°C	500°C	400°C	
9.71	9.68	9.65	10.97	10.77	8	pH
6.29	6.04	4.68	12.04	11.36	10.93	EC (dS m ⁻¹)
0.32	0.41	0.40	0.32	0.33	0.35	BD (g cm ⁻³)
2.06	1.12	1.08	1.19	1.17	1.07	PD (g cm ⁻³)
42	43	44	40	41	42	Y (%)
22.6	20.6	19.2	43.4	41.8	40.8	Ash (%)
21.8	20	20	22.2	17.8	16.4	OC (%)
6.5	6.2	5.9	4.4	3.8	3.6	CaCO ₃ (%)
24.3	18.8	11.7	55.1	52.5	47.3	K (mg kg ⁻¹)
1.58	1.42	1.35	2.05	1.99	1.63	N (mg kg ⁻¹)
80.1	67.9	63.5	105.4	99.6	81.4	P (mg kg ⁻¹)
196.47	195.43	102.60	425.30	402.19	355.01	Na (mg kg ⁻¹)
12.65	14.80	15.35	8	8.94	13.61	C/N

pH: اسیدیته؛ EC: هدایت الکتریکی، BD: جرم مخصوص ظاهری، PD: جرم مخصوص حقیقی، Y: بازده تولید، Ash: خاکستر، OC: کربن آلی، CaCO₃: کربنات

کلسیم، K: پتاسیم، N: نیتروژن، P: فسفر، Na: سدیم، C/N: نسبت کربن به نیتروژن.

pH: soil acidity, EC: electrical conductivity, BD: bulk density, PD: particle density, Y: yield, Ash: ash content, OC: organic carbon, CaCO₃: calcium carbonate, K: potassium, N: nitrogen, P: phosphorus, Na: sodium, C/N: carbon-to-nitrogen ratio.

آماده‌سازی بیوچار

پوست سبز گردو و پوست میوه انار به دلیل فراوانی و دسترس‌پذیری در استان لرستان، پس از آماده‌سازی، به صورت جداگانه در محفظه‌های مقاوم به حرارت و تحت شرایط محدودیت اکسیژن پیرولیز شدند. فرآیند پیرولیز در کوره با نرخ افزایش $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ۲، در دماهای ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس و به مدت ۳ ساعت انجام شد. پس از سرد شدن، بیوچارها آسیاب و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند (شکل ۱)، ویژگی‌های اولیه بیوچارها در جدول (۱) ارائه شده است.

سلسیوس بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از شاخص IQI و شاخص کیفیت NQI مبتنی بر PCA بود. فرضیه پژوهش بر این بود که نوع بیوچار و دمای پیرولیز، به صورت مستقل و متقابل، بر ویژگی‌های خاک و شاخص‌های کیفیت خاک اثر معنی‌داری دارند و پاسخ خاک به افزایش دمای پیرولیز به نوع ماده اولیه وابسته است.

مواد و روش‌ها

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اولیه مورد مطالعه پیش از اعمال تیمارها

Table 2. Physical and chemical properties of the initial soil under study prior to the application of treatments

Na	P	N	K	CaCO ₃	OC	PWP	FC	PD	BD	EC	pH	Soil
mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	%	%	%	%	(g cm ⁻³)	(g cm ⁻³)	(dS m ⁻¹)		
15.23	11.31	0.04	252.3	28.33	0.61	14.72	21.75	2.32	1.44	0.73	8.02	A

pH: اسیدیته، EC: هدایت الکتریکی، BD: جرم مخصوص ظاهری، PD: جرم مخصوص حقیقی، FC: ظرفیت زراعی، PWP: نقطه پژمردگی دائم، OC: کربن آلی، CaCO₃: کربنات کلسیم، K: پتاسیم، N: نیتروژن، P: فسفر، Na: سدیم.

pH: soil acidity, EC: electrical conductivity, BD: bulk density, PD: particle density, FC: field capacity, PWP: permanent wilting point, OC: organic carbon, CaCO₃: calcium carbonate, K: potassium, N: nitrogen, P: phosphorus, Na: sodium.

طرح آزمایشی

از ۹۰ روز، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مجدد ویژگی‌های خاک انجام شد.

توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتر تعیین شد و خاک دارای بافت لومی شنی بود (Selmy et al., 2021). ویژگی‌های فیزیکی شامل میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD⁷)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD⁸)، پایداری خاکدانه‌ها (AS⁹)، شاخص پایداری کل خاک (WSSI¹⁰)، شاخص پایداری نرمال (NSI¹¹) و درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD¹²) با روش الکتر

اندازه‌گیری شدند (Acharya et al., 2024; Salinas et al., 2020; Alogaidi et al., 2025; Zhang et al., 2017). جرم مخصوص ظاهری (BD¹³) و حقیقی (PD¹⁴) به ترتیب با روش استوانه و پیکنومتر و رطوبت وزنی در نقطه ظرفیت زراعی (FC) و پژمردگی دائم (PWP) با دستگاه صفحه فشاری تعیین شدند (Baiaomonte et al., 2015; Selmy et al., 2021). نیتروژن کل به روش کج‌لدال تعیین شد. فسفر قابل جذب پس از استخراج با محلول بی‌کربنات سدیم نیم مولار (pH=۸/۵) با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. پتاسیم قابل جذب و سدیم قابل استخراج پس از استخراج با محلول استات آمونیوم یک مولار (pH=۷)، با فلیم‌فتمتری اندازه‌گیری شدند. کربن آلی (OC¹⁵) نیز به روش والکی-بلک تعیین شد (Shohab Arzkhazloo et al., 2011; Kemper and Rosenau, 1986).

آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۷ تیمار و سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان انجام شد. تیمارها شامل بیوچار پوست گردو و انار تولیدشده در دماهای ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس (Wa500, Wa400, Wa600, Po400, Po500, Po600) و شاهد بدون بیوچار (Control) بودند. در مجموع، ۲۱ کرت آزمایشی در منطقه مورد مطالعه اجرا شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک

پیش از افزودن بیوچار، ویژگی‌های اولیه خاک مزرعه اندازه‌گیری و نتایج در جدول ۲ ارائه شد. سپس بیوچارها به مقدار ۱۰ تن در هکتار براساس وزن خشک (Zhang, 2017) با خاک سطحی مزرعه در عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر مخلوط شدند. خاک تیمارشده در کرت‌های ۱/۵ × ۱/۵ متر به مدت ۹۰ روز در شرایط مزرعه‌ای و بدون جابه‌جایی خوابانده و نگهداری شد. در این دوره، رطوبت خاک به صورت دوره‌ای و با روش وزنی پایش و در حد ظرفیت زراعی حفظ شد و آب مورد نیاز هر کرت بر اساس کاهش رطوبت و با استفاده از کنتور حجمی تأمین شد (Yan et al., 2022; Forouhar et al., 2018). میانگین دمای محیط در طول فصل کشت بهاره در محدوده ۱۳ تا ۱۶ درجه سلسیوس بود. پس

12- Percentage of aggregate destruction

13- Bulk Density

14- Particle Density

15- Organic Carbon

7- Mean weight diameter

8- Geometric weight diameter

9- Aggregate stability

10- Whole soil stability index

11- Normalized stability index

الکتریکی (EC^{16}) نیز به ترتیب در خمیر و عصاره اشباع، با دستگاه pH متر Bante PHS-3BW و هدایت سنج Hanna HI2300 اندازه گیری شدند (Thomas, 1996).

ویژگی های زیستی شامل کربن زیست توده میکروبی (MBC^{17}) و تنفس پایه میکروبی (BR^{18}) به ترتیب با روش تدخین با کلروفرم و تیتراسیون با اسید کلریدریک اندازه گیری شدند (Nichols and Toro, 2011; Govindasamy et al., 2023). ضریب متابولیکی (QCO_2) نیز از نسبت BR به MBC با واحد $mg\ CO_2-C\ mg^{-1}\ MBC\ h^{-1}$ محاسبه شد. کربن آلی ذره ای (POC^{19})، نیز با محلول ۵ درصد سدیم هگزا متافسفات و جداسازی بخش باقی مانده روی الک ۵۳ میکرومتر تعیین شد (Witcombe et al., 2023). فعالیت اوره آز و اسید فسفاتاز و آلکالین فسفاتاز نیز به ترتیب بر اساس روش های (1994) Tabatabai اندازه گیری شدند.

شاخص کیفیت خاک

کیفیت خاک با استفاده از شاخص های IQI و NQI براساس TDS و MDS ارزیابی شد. IQI با در نظر گرفتن وزن نسبی و امتیاز نرمال شده هر ویژگی، و NQI براساس میانگین و حداقل امتیاز نرمال شده ویژگی ها محاسبه شد؛ بنابراین، NQI علاوه بر وضعیت کلی ویژگی ها، اثر محدود کننده ترین ویژگی را نیز منعکس می کند (Rezaee et al., 2020).

برای استخراج MDS ، از تحلیل PCA در قالب تحلیل عاملی (FA^{20}) استفاده شد. عواملی با مقدار ویژه بیش از ۱ و بیشترین سهم در واریانس کل برای انتخاب ویژگی های MDS در نظر گرفته شدند (Qian et al., 2023). در این مطالعه، ۸ مؤلفه با مقدار ویژه بیشتر از ۱ استخراج شد که در مجموع ۷۸/۴۸ درصد واریانس کل را تبیین کردند.

به منظور حذف اثر تفاوت واحدهای اندازه گیری، ویژگی ها با استفاده از توابع عضویت فازی به مقادیر بدون بعد تبدیل و بر

اساس وضعیت مطلوب آن ها در سه گروه «بالا تر از حد بهینه»، «پایین تر از حد بهینه» و «سطح بهینه» طبقه بندی شدند (Santos et al., 2021).

وزن نسبی ویژگی ها نیز با استفاده از شاخص اشتراک پذیری (COM) حاصل از PCA تعیین شد. وزن هر ویژگی از نسبت COM آن به مجموع COM ویژگی های مجموعه داده مربوطه به دست آمد (رابطه ۱) (Guo et al., 2017).

$$W_i = \frac{COM_i}{\sum COM_i} \quad (1)$$

که در آن، W_i وزن نسبی و COM_i شاخص اشتراک پذیری ویژگی i است و مجموع وزن ها برابر با یک در نظر گرفته شد. در نهایت، IQI و NQI بر اساس روابط ۲ و ۳ محاسبه و چهار شاخص $IQI-TDS$ ، $IQI-MDS$ ، $NQI-TDS$ و $NQI-MDS$ برای ارزیابی اثر تیمارهای بیوچار به دست آمدند:

$$IQI = \sum_{i=1}^n (W_i \times N_i) \quad (2)$$

$$NQI = \frac{P_{ave}^2 + P_{min}^2}{2} \times \frac{n-1}{n} \quad (3)$$

در رابطه W_i ، IQI وزن هر ویژگی، N_i امتیاز عضویت آن ویژگی و n تعداد ویژگی ها است. در رابطه NQI نیز P_{ave} میانگین امتیاز ویژگی ها، P_{min} حداقل امتیاز ویژگی ها و n تعداد ویژگی ها را نشان می دهد.

تحلیل آماری

تجزیه آماری داده ها با استفاده از نرم افزار SAS نسخه (۹/۳) انجام شد. پس از بررسی نرمال بودن داده ها و همگنی واریانس خطاها، اثر نوع بیوچار، دمای پیرولیز و اثر متقابل آن ها بر ویژگی های خاک با تجزیه واریانس بررسی شد. شاخص های IQI و NQI نیز برای هر تکرار به صورت مستقل محاسبه و در تحلیل واریانس به عنوان متغیر پاسخ استفاده شدند. در صورت معنی داری اثر تیمار، مقایسه میانگین ها با آزمون LSD در سطوح احتمال ۱ و ۵

19- Particulate organic carbon

20- Factor analysis

16- Electrical Conductivity

17- Microbial biomass carbon

18- Basal respiration

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر نوع بیوپچار (پوست گردو (Wa) و پوست انار (Po))، دمای پیرولیز (۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) و اثر متقابل آنها بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

Table 3. Analysis of variance of the effects of biochar feedstock type (walnut shell (Wa) and pomegranate peel (Po)), pyrolysis temperature (400, 500, and 600 °C), and their interaction on soil physical properties

PAD	NSI	WSSI	GMD	MWD	Porosity	PWP	FC	PD	BD	df	منابع تغییر Sources of variation
0.64 ^{n.s}	0.01 ^{n.s}	12.14 ^{**}	48.63 ^{**}	0.11 ^{n.s}	16.98 ^{**}	4.68 [*]	9.25 ^{**}	49.10 ^{**}	1.25 ^{n.s}	1	نوع بیوپچار Biochar type
15.77 ^{**}	14.12 ^{**}	176.52 ^{**}	12.45 ^{**}	13.93 ^{**}	20.66 ^{**}	12.22 ^{**}	61.81 ^{**}	2.0 ^{n.s}	26.16 ^{**}	2	دمای پیرولیز Pyrolysis temperature
1.17 ^{n.s}	0.93 ^{n.s}	18.28 ^{**}	0.17 ^{n.s}	0.99 ^{n.s}	1.37 ^{n.s}	1.64 ^{n.s}	12.88 ^{**}	5.90 [*]	1.29 ^{n.s}	2	نوع بیوپچار × دمای پیرولیز Biochar type × temperature

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، n.s. غیر معنی‌دار

**: significant at $p < 0.01$, *: significant at $p < 0.05$, n.s: non-significant

BD: جرم مخصوص ظاهری، PD: جرم مخصوص حقیقی، FC: ظرفیت زراعی، PWP: نقطه پژمردگی دائم، Porosity: تخلخل، MWD: میانگین قطر

وزنی، GMD: میانگین قطر هندسی، WSSI: شاخص پایداری کل خاک، NSI: شاخص نرمال‌شده پایداری، PAD: درصد تخریب خاکدانه‌ها.

BD: bulk density, PD: particle density, FC: field capacity, PWP: permanent wilting point, Porosity: total porosity, MWD: mean weight diameter, GMD: geometric mean diameter, WSSI: whole soil stability index, NSI: normalized stability index, PAD: percentage of aggregate destruction.

درصد انجام شد. جداول با استفاده از Microsoft Excel تهیه شد. از آنجا که پایداری خاکدانه‌ها می‌تواند با ویژگی‌های هیدروفیزیکی خاک مرتبط باشد، بررسی منحنی مشخصه رطوبتی می‌تواند به تبیین این تفاوت‌ها کمک کند؛ با این حال، به دلیل اندازه‌گیری نشدن این منحنی در پژوهش حاضر، این ارتباط به‌طور مستقیم قابل ارزیابی نبود و بررسی آن در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

بیشترین تخلخل (۵۷/۹۸٪) و رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی (۲۳/۷۸٪) در Po600 به‌دست آمد. افزایش این ویژگی‌ها می‌تواند ناشی با ساختار متخلخل‌تر بیوپچار در دماهای بالاتر مرتبط باشد (Ali et al., 2025; Andrews et al., 2002). همچنین، افزایش PWP در ۶۰۰ درجه سلسیوس، به‌ویژه در Po600، احتمالاً با افزایش سهم منافذ ریز و در نتیجه نگهداشت بیشتر آب در مکش‌های بالا مرتبط است (Ali et al., 2025). در مقابل، WSSI در Wa600 بیشتر بود که می‌تواند ناشی از تخلخل بیشتر و برهم‌کنش مؤثرتر بیوپچار با ذرات خاک باشد (Khadem et al., 2017). تفاوت در آبگریزی بیوپچارها نیز می‌تواند در پاسخ متفاوت پایداری خاکدانه‌ها نقش داشته باشد (Miri and Zamani Babgohari, 2020).

نتایج و بحث

اثر نوع بیوپچار و دمای پیرولیز بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که دمای پیرولیز بر تمامی ویژگی‌های فیزیکی خاک، به‌جز جرم مخصوص حقیقی (PD)، اثر معنی‌دار داشت. اثر نوع بیوپچار نیز بر PD، FC، PWP، تخلخل، GMD و WSSI معنی‌دار بود. همچنین، اثر متقابل نوع بیوپچار و دمای پیرولیز برای ویژگی‌های PD، FC و WSSI معنی‌دار شد (جدول ۳).

با افزایش دمای پیرولیز، BD و PAD کاهش و تخلخل، WSSI، MWD و NSI افزایش یافتند، درحالی‌که GMD در دو نوع بیوپچار روند یکسانی نداشت (جدول ۴). کاهش BD و PAD و افزایش پایداری خاکدانه‌ها احتمالاً به چگالی کمتر، تخلخل بیشتر و بهبود ساختار بیوپچار در دماهای بالاتر مربوط است (Azimzadeh and Najafi, 2017). بیشترین MWD (mm) و WSSI (۳/۶۸٪) در Wa600 و بیشترین GMD (mm)

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع بیوچار (پوست گردو (Wa) و پوست انار (Po)) و دما (۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

Table 4. Mean comparison of the interaction effects between biochar feedstock type (walnut shell (Wa) and pomegranate peel (Po)) and pyrolysis temperature (400, 500, and 600 °C) on soil physical properties

pomegranate peel biocharP بیوچار پوست انار			Walnut shell biochar بیوچار پوست گردو			شاهد	ویژگی‌ها
600°C	500°C	400°C	600°C	500°C	400°C	Control	Properties
1.12 ^c	1.32 ^b	1.37 ^{ab}	1.21 ^c	1.34 ^b	1.35 ^{ab}	1.44 ^a	BD (g cm ⁻³)
2.61 ^a	2.54 ^{ab}	2.62 ^a	2.40 ^{cd}	2.47 ^{bc}	2.34 ^{de}	2.31 ^e	PD (g cm ⁻³)
23.78 ^a	23.06 ^{cd}	22.98 ^d	23.61 ^b	23.46 ^b	23.18 ^c	21.75 ^e	FC (%)
15.85 ^a	15.13 ^b	15.06 ^b	16.09 ^a	15.81 ^a	15.11 ^b	14.72 ^b	PWP (%)
57.10 ^a	48.10 ^{bc}	47.80 ^{bc}	49.6 ^b	45.8 ^{cd}	42.3 ^{de}	37.40 ^e	Porosity (%)
3.29 ^{ab}	2.95 ^{bc}	2.12 ^{de}	3.68 ^a	2.63 ^{cd}	1.83 ^{de}	1.41 ^e	MWD (mm)
1.65 ^{de}	1.72 ^{cd}	1.55 ^e	1.84 ^b	1.96 ^a	1.76 ^{bc}	1.62 ^{de}	GMD (mm)
32.53 ^{ab}	29.56 ^c	28.13 ^d	33.33 ^a	32.06 ^b	27.23 ^e	26.92 ^e	WSSI (%)
33.33 ^a	28.26 ^{bc}	24.26 ^{cd}	31.31 ^{ab}	28.35 ^{bc}	25.94 ^c	20.32 ^d	NSI (%)
65.72 ^e	71.05 ^{cd}	75.11 ^b	68.68 ^{de}	61.72 ^{cd}	74.05 ^{bc}	79.69 ^a	PAD (%)

در هر ردیف، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each row, means sharing a letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

BD: جرم مخصوص ظاهری، PD: جرم مخصوص حقیقی، FC: ظرفیت زراعی، PWP: نقطه پژمردگی دائم، Porosity: تخلخل، MWD: میانگین قطر وزنی،

GMD: میانگین قطر هندسی، WSSI: شاخص پایداری کل خاک، NSI: شاخص نرمال‌شده پایداری، PAD: درصد تخریب خاکدانه‌ها.

BD: bulk density, PD: particle density, FC: field capacity, PWP: permanent wilting point, Porosity: total porosity, MWD: mean weight diameter, GMD: geometric mean diameter, WSSI: whole soil stability index, NSI: normalized stability index, PAD: percentage of aggregate destruction.

در برخی تیمارهای دمای بالاتر نیز می‌تواند به افزایش نسبی سهم مواد معدنی و خاکستر بیوچار مربوط باشد.

کاربرد بیوچار موجب افزایش EC شد و مقدار آن با افزایش دمای پیرولیز افزایش یافت؛ بیشترین مقدار EC در Wa600 مشاهده شد (جدول ۶). این افزایش احتمالاً به تغلیظ عناصر معدنی مانند K، Na، Ca و Mg در خاکستر بیوچار مربوط است (Divband Hafshejani et al., 2017; Azimzadeh and Najafi, 2017). اگرچه EC در بیشتر تیمارها کمتر از 2 dS m^{-1} بود؛ افزایش EC و Na در Wa600، ضرورت پایش شور و مدیریت محتاطانه کاربرد آن را، به‌ویژه در خاک‌های آهکی و مناطق نیمه‌خشک، نشان می‌دهد. بااین‌حال، به‌دلیل محدود بودن آزمایش به ۹۰ روز، پایداری بلندمدت EC و Na و روند شست‌وشو یا جذب آن‌ها قابل قضاوت قطعی نیست؛ بنابراین، بررسی این موارد در آزمایش‌های بلندمدت و مزرعه‌ای ضروری است.

مقدار OC نیز با نوع بیوچار و دمای پیرولیز تغییر کرد و بیشترین مقدار در Po600 مشاهده شد (جدول ۶). افزایش OC

در مجموع، پاسخ ویژگی‌های فیزیکی خاک به نوع بیوچار و دمای پیرولیز وابسته بود؛ به‌طوری که Wa600 در بهبود پایداری خاکدانه‌ها و Po600 در افزایش تخلخل و ظرفیت زراعی عملکرد بهتری داشتند.

اثر نوع بیوچار و دمای پیرولیز بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نوع بیوچار و دمای پیرولیز بر بیشتر ویژگی‌های شیمیایی خاک اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۵). دمای پیرولیز بر pH، EC، OC، CaCO_3 ، N، P، K و Na، نوع بیوچار بر همه ویژگی‌ها به‌جز CaCO_3 و اثر متقابل نوع بیوچار × دما بر pH، EC، OC، K و Na معنی‌دار بود.

با افزایش دمای پیرولیز، pH خاک، به‌ویژه در بیوچار پوست انار، افزایش یافت (جدول ۶) که احتمالاً با افزایش کاتیون‌های بازی، تشکیل ترکیبات قلیایی و کاهش گروه‌های عاملی اسیدی مانند کربوکسیل و هیدروکسیل مرتبط است (El Hamdouni et al., 2022; Divband Hafshejani et al., 2017). افزایش CaCO_3

جدول ۵. تجزیه واریانس اثر نوع بیوچار (پوست گردو (Wa) و پوست انار (Po))، دمای پیرولیز (۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) و اثر متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 5. Analysis of variance of the effects of biochar feedstock type (walnut shell (Wa) and pomegranate peel (Po)), pyrolysis temperature (400, 500, and 600 °C), and their interaction on soil chemical properties

Na	K	P	N	CaCO ₃	OC	EC	pH	df	منابع تغییر Sources of variation
832.63**	57358.32**	1232.29**	86.29**	0.25n.s	13.04**	326.44**	69.59**	1	نوع بیوچار Biochar type
3585.17**	1615.91**	347.33**	7.22**	10.56**	45.36**	1083.26**	63.87**	2	دمای پیرولیز Pyrolysis temperature
485.07**	78.27**	1.82n.s	0.08n.s	0.25n.s	29.91**	167.91**	6.59**	2	نوع بیوچار × دمای پیرولیز Biochar type × temperature

**معنی‌دار در سطح ۱ درصد، *معنی‌دار در سطح ۵ درصد، n.s غیر معنی‌دار هستند.

**: significant at $p < 0.01$, *: significant at $p < 0.05$, ns: non-significant

pH: اسیدیته خاک، EC: هدایت الکتریکی، OC: کربن آلی، CaCO₃: کربنات کلسیم، N: نیتروژن، P: فسفر، K: پتاسیم، Na: سدیم.

pH: soil acidity, EC: electrical conductivity, OC: organic carbon, CaCO₃: calcium carbonate, N: nitrogen, P: phosphorus, K: potassium, Na: sodium.

جدول ۶. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع بیوچار (پوست گردو (Wa) و پوست انار (Po)) و دمای پیرولیز (۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 6. Mean effects of the interaction between biochar feedstock type (walnut shell (Wa) and pomegranate peel (Po)) and pyrolysis temperature (400, 500, and 600 °C) on soil chemical properties

بیوچار پوست انار Pomegranate peel biochar			بیوچار پوست گردو Walnut shell biochar			شاهد Control	ویژگی‌ها Properties
600°C	500°C	400°C	600°C	500°C	400°C		
8.02 ^{ab}	7.98 ^c	7.95 ^c	8.03 ^a	7.98 ^{bc}	7.97 ^c	8.02 ^{ab}	pH
1.69 ^b	0.86 ^d	0.76 ^e	2.27 ^a	1.05 ^c	0.75 ^e	0.73 ^e	EC (dS m ⁻¹)
0.91 ^a	0.89 ^{ab}	0.83 ^{cd}	0.81 ^d	0.83 ^{cd}	0.86 ^{bc}	0.60 ^e	OC (%)
30.66 ^a	29.83 ^{ab}	29.16 ^{bc}	30.66 ^a	30 ^{ab}	29.16 ^{bc}	28.33 ^c	CaCO ₃ (%)
0.07 ^{cd}	0.07 ^{bc}	0.06 ^d	0.075 ^a	0.07 ^b	0.076 ^a	0.05 ^e	N (mg kg ⁻¹)
16.66 ^c	15.55 ^d	12.43 ^e	22.43 ^a	18.66 ^b	16.90 ^c	11.32 ^f	P (mg kg ⁻¹)
541.66 ^d	490.66 ^e	385.66 ^f	974 ^a	855.66 ^b	805.33 ^c	252.33 ^g	K (mg kg ⁻¹)
51.53 ^b	22.53 ^d	15.90 ^e	85.31 ^a	33.32 ^c	15.23 ^c	15.23 ^e	Na (mg kg ⁻¹)

در هر ردیف، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each row, means sharing a letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

pH: اسیدیته خاک، EC: هدایت الکتریکی، OC: کربن آلی، CaCO₃: کربنات کلسیم، N: نیتروژن، P: فسفر، K: پتاسیم، Na: سدیم.

pH: soil acidity, EC: electrical conductivity, OC: organic carbon, CaCO₃: calcium carbonate, N: nitrogen, P: phosphorus, K: potassium, Na: sodium.

در دماهای بالاتر احتمالاً ناشی از افزایش کربنی‌شدن، حذف ترکیبات فرار و تشکیل ساختارهای کربنی پایدارتر است (Moradi et al., 2024).
بخشی از N به‌صورت گاز در دماهای بالا، مقدار بالاتر آن در Wa600 می‌تواند نشان‌دهنده ماندگاری نسبی N در این بیوچار باشد (Hossain et al., 2011). با افزایش دمای پیرولیز، P و K افزایش یافتند و این افزایش در بیوچار پوست گردو بارزتر بود (جدول ۶). این روند احتمالاً از تفاوت ترکیب معدنی مواد اولیه شد که از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند. با وجود خروج بیشترین مقدار N در تیمارهای Wa400 و Wa600 مشاهده شد که از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند. با وجود خروج

جدول ۷. تجزیه واریانس اثر نوع بیوچار، دمای پیرولیز و اثر متقابل آن‌ها بر ویژگی‌های تنفسی و کربنی خاک

Table 7. Analysis of variance of the effects of biochar type, pyrolysis temperature, and their interaction on soil respiratory and carbon properties

منابع تغییر Sources of variation	df	تنفس پایه BR	کربن زیست‌توده میکروبی MBC	کربن آلی ذره‌ای POC	ضریب متابولیکی QCO ₂
نوع بیوچار Biochar type	1	0.00 ^{ns}	15.72 ^{**}	0.72 ^{ns}	10.68 ^{**}
دمای پیرولیز Pyrolysis temperature	2	1.67 ^{ns}	43.56 ^{**}	16.04 ^{**}	29.77 ^{**}
نوع بیوچار × دمای پیرولیز Biochar type × temperature	2	0.31 ^{ns}	3.62 [*]	0.48 ^{ns}	2.05 ^{ns}

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns غیر معنی‌دار هستند.

** : significant at $p < 0.01$, * : significant at $p < 0.05$, ns: non-significant

BR: تنفس پایه، MBC: کربن زیست‌توده میکروبی، POC: کربن آلی ذره‌ای، QCO₂: ضریب متابولیکی.

BR: basal respiration, MBC: microbial biomass carbon, POC: particulate organic carbon, QCO₂: metabolic quotient.

جدول ۸. تجزیه واریانس اثر نوع بیوچار، دمای پیرولیز و اثر متقابل آن‌ها بر فعالیت آنزیم‌های خاک

Table 8. Analysis of variance of the effects of biochar type, pyrolysis temperature, and their interaction on soil enzyme activities

منابع تغییر Sources of variation	df	اوره‌آز Urease	اسید فسفاتاز Acid phosphatase	آلکالین فسفاتاز Alkaline phosphatase
نوع بیوچار Biochar type	1	1.27 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.15 ^{ns}
دمای پیرولیز Pyrolysis temperature	2	111.94 ^{**}	266.40 ^{**}	763.08 ^{**}
نوع بیوچار × دمای پیرولیز Biochar type × temperature	2	6.91 ^{**}	3 ^{ns}	2.57 ^{ns}

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ns غیر معنی‌دار هستند.

** : significant at $p < 0.01$, * : significant at $p < 0.05$, ns: non-significant

Urease: فعالیت آنزیم اوره‌آز، Acid: phosphatase: فعالیت آنزیم اسید فسفاتاز، Alkaline phosphatase: فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز.

Urease: urease activity, Acid phosphatase: acid phosphatase activity, Alkaline phosphatase: alkaline phosphatase activity.

شورشدگی یا سدیمی شدن خاک فضاوت قطعی کرد.

در مجموع، پاسخ شیمیایی خاک تابع نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز بود؛ به‌طوری‌که Wa، به‌ویژه در دماهای بالاتر، در افزایش P و K و Po در افزایش OC عملکرد بهتری داشت.

اثر نوع بیوچار و دمای پیرولیز بر ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که دمای پیرولیز بر MBC، QCO₂، POC و فعالیت اوره‌آز، اسید فسفاتاز و آلکالین فسفاتاز اثر معنی‌داری داشت (جدول ۷ و ۸). همچنین، اثر نوع بیوچار

و کاهش سهم ترکیبات فرار در طی پیرولیز ناشی می‌شود (Azimzadeh and Najafi, 2017). همچنین مقدار Na خاک افزایش یافت و بیشترین مقدار آن در Wa600 مشاهده شد؛ این تغییر احتمالاً به انتقال و آزادسازی ترکیبات سدیمی موجود در بیوچار مربوط است. همراهی افزایش Na با تغییرات pH نیز می‌تواند با حضور ترکیبات قلبایی و مواد معدنی بیوچار ارتباط داشته باشد (Cantrell et al., 2012). با این حال، از آنجاکه نسبت جذب سدیم (SAR) و درصد سدیم تبادلی (ESP) اندازه‌گیری نشدند، نمی‌توان صرفاً بر اساس تغییرات Na و pH درباره خطر

جدول ۹. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع بیوچار (پوست گردو (Wa) و پوست انار (Po)) و دمای پیرولیز (۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) بر ویژگی‌های زیستی خاک

Table 9. Mean comparison of the interaction effects of biochar feedstock type (walnut shell (Wa) and pomegranate peel (Po)) and pyrolysis temperature (400, 500, and 600 °C) on soil biological properties

بیوچار پوست انار Pomegranate peel biochar			بیوچار پوست گردو Walnut shell biochar			شاهد Control	ویژگی‌ها Properties
600°C	500°C	400°C	600°C	500°C	400°C		
0.31 ^a	0.28 ^a	0.27 ^a	0.29 ^a	0.29 ^a	0.28 ^a	0.27 ^a	تنفس پایه Basal respiration; BR (mg CO ₂ kg ⁻¹ soil d ⁻¹)
1.69 ^a	1.38 ^b	0.86 ^{cd}	1.39 ^b	0.98 ^c	0.84 ^{cd}	0.72 ^d	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon; MBC (mg kg ⁻¹ soil)
3.18 ^{ab}	2.95 ^{bc}	2.68 ^c	3.35 ^a	2.92 ^{bc}	2.74 ^c	2.24 ^d	کربن آلی ذره‌ای Particulate organic carbon; POC (%)
0.18 ^c	0.21 ^c	0.32 ^b	0.21 ^c	0.29 ^b	0.33 ^{ab}	0.38 ^a	ضریب متابولیکی (mg CO ₂ -C mg ⁻¹ MBC h ⁻¹) Metabolic quotient; QCO ₂
12.37 ^b	11.18 ^c	9.97 ^d	13.07 ^a	10.58 ^{cd}	9.31 ^e	7.64 ^f	اوره آز (μg NH ₄ ⁺ -N g ⁻¹ soil 2 h ⁻¹) Urease
21.32 ^d	23.45 ^c	26.44 ^b	20.58 ^d	23.33 ^c	26.92 ^b	30.18 ^a	اسید فسفاتاز (μg pNP g ⁻¹ soil h ⁻¹) Acid phosphatase
98.77 ^a	93.69 ^b	89.46 ^c	99.17 ^a	93.76 ^b	88.75 ^c	82.83 ^d	آلکالین فسفاتاز (μg pNP g ⁻¹ soil h ⁻¹) Alkaline phosphatase

در هر ردیف، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

In each row, means sharing a letter are not significantly different (LSD, $p < 0.05$).

BR: تنفس پایه، QCO₂: ضریب متابولیکی، Urease: فعالیت آنزیم اوره‌آز، Alkaline phosphatase: فعالیت آنزیم آلکالین فسفاتاز.

BR: basal respiration, qCO₂: metabolic quotient, Urease: urease activity, Alkaline phosphatase: alkaline phosphatase activity.

(Mwendwa, 2022)

در مقابل، QCO₂ با کاربرد بیوچار و افزایش دمای پیرولیز کاهش یافت (جدول ۷ و ۹). افزایش MBC همراه با کاهش QCO₂ می‌تواند نشان‌دهنده کاهش تنش متابولیکی و افزایش کارایی مصرف کربن توسط جامعه میکروبی باشد. فعالیت اوره‌آز نیز افزایش یافت و بیشترین مقدار در Wa600 مشاهده شد (جدول ۸ و ۹) که احتمالاً با بهبود شرایط زیستی خاک و افزایش نگهداشت یا فعالیت آنزیم‌ها در سطح متخلخل بیوچار مرتبط است (Pandey et al., 2020; Wojewódzki et al., 2022).

فعالیت اسید فسفاتاز با افزایش دمای پیرولیز کاهش، در حالی که آلکالین فسفاتاز افزایش یافت (جدول ۸). کاهش فعالیت اسید فسفاتاز را نمی‌توان به افزایش pH نسبت داد، زیرا pH خاک در

بر MBC و QCO₂ و اثر متقابل نوع بیوچار و دمای پیرولیز بر MBC و فعالیت اوره‌آز معنی‌دار بود. در مقابل، BR تحت تأثیر تیمارها قرار نگرفت (جدول ۷). این نتیجه نشان داد که تیمارهای مورد بررسی در شرایط این آزمایش تغییر معنی‌داری در تنفس پایه میکروبی ایجاد نکردند؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های Mohammadi and Khademalrasoul, 2021 قابل مقایسه است. با افزایش دمای پیرولیز، MBC افزایش یافت و بیشترین مقدار در Po600 مشاهده شد (جدول ۷). این افزایش می‌تواند با ایجاد زیستگاه مناسب‌تر برای میکروارگانیسم‌ها در ساختار متخلخل بیوچار مرتبط باشد. کاربرد بیوچار همچنین POC را نسبت به شاهد افزایش داد که احتمالاً ناشی از ورود کربن جدید و بهبود شرایط فیزیکی خاک برای حفاظت از مواد آلی است

جدول ۱۰. آماره‌های توصیفی شاخص‌های کیفیت خاک در تیمارهای مختلف بیوچار

Table 10. Descriptive statistics of soil quality indices under different biochar treatments

بیوچار پوست انار Walnut shell biochar			بیوچار پوست گردو Walnut shell biochar			شاهد Control	آماره Statistic	شاخص Index
Po400	Po500	Po600	Wa400	Wa500	Wa600			
0.017	0.017	0.019	0.017	0.018	0.019	0.012	Average	NQI-TDS
0.004	0.002	0.002	0.004	0.002	0.002	0.09	CV	
0.046	0.050	0.050	0.046	0.050	0.050	0.034	Average	NQI-MDS
0.003	0.012	0.013	0.013	0.012	0.011	0.140	CV	
0.52	0.65	0.64	0.58	0.61	0.62	0.46	Average	IQI-TDS
0.08	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.12	CV	
0.46	0.27	0.42	0.41	0.57	0.59	0.20	Average	IQI-MDS
0.13	0.12	0.012	0.13	0.12	0.014	0.13	CV	

CV: ضریب تغییرات، NQI-TDS: شاخص کیفیت نرمال شده بر اساس مجموعه داده کامل، NQI-MDS: شاخص کیفیت نرمال شده بر اساس حداقل مجموعه

داده، IQI-TDS: شاخص کیفیت یکپارچه بر اساس مجموعه داده کامل، IQI-MDS: شاخص کیفیت یکپارچه بر اساس حداقل مجموعه داده.

CV: coefficient of variation, NQI-TDS: normalized quality index based on total data set, NQI-MDS: normalized quality index based on minimum data set, IQI-TDS: integrated quality index based on total data set, IQI-MDS: integrated quality index based on minimum data set.

گرفت و بر اساس مقدار ویژه بزرگ‌تر از یک، هشت مؤلفه اصلی با تبیین ۷۸/۴۸ درصد از تغییرات داده‌ها انتخاب شدند. سپس، با توجه به بارهای عاملی و حذف ویژگی‌های دارای اطلاعات مشابه، GMD، BR، NSI، PAD و OC به عنوان ویژگی‌های MDS انتخاب شدند. در ادامه، شاخص‌های IQI و NQI بر پایه TDS و MDS محاسبه شدند. NQI-TDS کمترین ضریب تغییرات را داشت (جدول ۱۰) و بین شاخص‌های مبتنی بر TDS و MDS همبستگی معنی‌دار مشاهده شد؛ این همبستگی برای IQI بیشتر و در بیوچار انار بیشتر از گردو بود (جدول ۱۱). با این حال، ضرایب همبستگی در محدوده متوسط قرار داشتند؛ بنابراین، MDS با کاهش تعداد ویژگی‌ها می‌تواند روشی ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر برای ارزیابی کیفیت خاک باشد، اما تعمیم آن به شرایط دیگر نیازمند اعتبارسنجی است.

نتایج Rahmanipour et al., (2014) در اراضی کشاورزی استان قزوین نیز نشان داد که IQI نسبت به NQI انطباق مناسب‌تری با کیفیت خاک داشت و IQI-MDS توانست اثرات مدیریت را نشان دهد، هرچند انطباق TDS بیشتر بود. در مقابل، Samaei et al., (2022) در اراضی کشاورزی و مرتعی شان‌دیز، همبستگی بسیار بالاتری بین TDS و MDS گزارش کردند؛

بیشتر تیمارها نسبت به شاهد کاهش داشت و در تیمارهای ۶۰۰ درجه سلسیوس نیز با شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. بنابراین، این کاهش احتمالاً با تغییرات دیگری در شرایط شیمیایی و زیستی خاک مرتبط بوده است که در این پژوهش به‌طور مستقیم بررسی نشدند (Wojewódzki et al., 2022). افزایش آلکالین فسفاتاز نیز می‌تواند با تغییر شرایط زیستی و شیمیایی خاک و پویایی چرخه فسفر مرتبط باشد.

در مجموع، بیوچار و دمای پیرولیز برخی شاخص‌های زیستی خاک را تغییر دادند؛ به‌طوری‌که افزایش MBC و POC، کاهش QCO₂ و تغییر فعالیت آنزیم‌ها، بهبود برخی جنبه‌های زیستی خاک را نشان داد و تفاوت پاسخ Wa و Po نیز اهمیت نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز را در عملکرد زیستی بیوچار تأیید کرد.

تعیین شاخص کیفیت خاک

به منظور ارزیابی کیفیت خاک، ۱۵ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و زیستی شامل pH، EC، Porosity، MWD، GMD، BD، QCO₂، ECC، WSSI، MBC، BR، NSI، PAD، OC و θ_m در تیمارهای بیوچار پوست گردو (Wa)، پوست انار (Po) و شاهد (Control) بررسی شد. برای تشکیل MDS، تحلیل PCA انجام

جدول ۱۱. همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک مبتنی بر TDS و MDS

Table 11. Correlations between soil quality indices based on TDS and MDS

شاخص کیفیت تجمعی (IQI) (MDS در مقابل MDS) IQI (TDS vs. MDS)	شاخص کیفیت نمره (NQI) (MDS در مقابل MDS) NQI (TDS vs. MDS)	تیمار Treatment
0.42**	0.42**	بیوچار پوست گردو (Wa) Walnut shell biochar
0.66**	0.6**	بیوچار پوست انار (Po) Pomegranate peel biochar
0.61**	0.55**	شاهد Control

** معنی‌دار در سطح احتمال $p < 0.01$

** Significant at $p < 0.01$

وارد شده به شاخص وابسته بود. در IQI-TDS، تیمارهای Wa در درجه II و تیمارهای Po در درجه III قرار گرفتند، در حالی که در IQI-MDS این الگو معکوس شد. این تغییر بیانگر آن است که حذف برخی ویژگی‌ها و تشکیل MDS می‌تواند بر طبقه‌بندی نهایی کیفیت خاک اثرگذار باشد؛ موضوعی که با نتایج (2014) Rahmanipour et al. و Samaei et al., (2022) نیز قابل مقایسه است.

در مقابل، NQI در هر دو مجموعه داده، همه تیمارها را در درجه IV قرار داد و توان تفکیک مناسبی بین تیمارها نشان نداد. بنابراین، انتخاب شاخص کیفیت و مجموعه ویژگی‌های مورد استفاده می‌تواند بر ارزیابی نهایی کیفیت خاک اثرگذار باشد و تفسیر نتایج باید با توجه به شرایط آزمایش و ویژگی‌های وارد شده به شاخص انجام شود.

نتیجه‌گیری

کاربرد بیوچار پوست گردو و انار در شرایط آزمایش حاضر موجب بهبود برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک نسبت به شاهد شد، هرچند پاسخ ویژگی‌ها به نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز متفاوت بود. افزایش دمای پیرولیز، به‌ویژه در ۶۰۰ درجه سلسیوس، در بسیاری از ویژگی‌ها با تغییرات مطلوب‌تری

ضرایب همبستگی IQI برابر ۰/۹۸ و ۰/۹۴ و NQI برابر ۰/۸۸ و ۰/۸۲ بود. در مقایسه با این مطالعات، همبستگی‌های مطالعه حاضر برای IQI (۰/۴۲ تا ۰/۶۶) و NQI (۰/۴۲ تا ۰/۶۰) متوسط بود که می‌تواند ناشی از تفاوت نوع خاک، ویژگی‌های انتخاب‌شده، روش تشکیل MDS و شرایط آزمایش باشد. بنابراین، کارایی MDS برای بازنمایی TDS به شرایط مطالعه وابسته است.

کاربرد بیوچار شاخص‌های کیفیت خاک را نسبت به شاهد افزایش داد (جدول ۱۲)، بیشترین (۰/۷۲۲) IQI-TDS در Wa600 و بیشترین (۰/۶۹۵) IQI-MDS در Po400 مشاهده شد. تفاوت این دو رویکرد نشان داد که انتخاب مجموعه ویژگی‌ها می‌تواند بر مقدار و تفسیر شاخص کیفیت خاک اثرگذار باشد؛ به‌طوری‌که در IQI-MDS، Po400 و در IQI-TDS، Wa600 مقدار بیشتری داشت. بنابراین، هر دو روش در شرایط این پژوهش قابل استفاده‌اند، اما IQI-MDS به دلیل نیاز به اندازه‌گیری ویژگی‌های کمتر، می‌تواند گزینه‌ای ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر برای پایش کیفیت خاک باشد؛ مشروط بر اینکه ویژگی‌های منتخب، تغییرات اصلی کیفیت خاک را به‌خوبی بازنمایی کنند.

نتایج طبقه‌بندی شاخص کیفیت خاک (جدول ۱۳) نیز نشان داد که پاسخ کیفیت خاک به نوع بیوچار و مجموعه ویژگی‌های

جدول ۱۲. مقایسه میانگین شاخص‌های کیفیت خاک در تیمارهای بیوچار پوست گردو (Wa) و انار (Po) و شاهد (Control)

Table 12. Comparison of mean soil quality indices among walnut shell (Wa), pomegranate peel (Po), and control treatments

NQI-MDS	NQI-TDS	IQI-MDS	IQI-TDS	تیمار Treatment
0.083 ^b	0.030 ^b	0.674 ^a	0.722 ^a	بیوچار پوست گردو در دمای پیرولیز ۶۰۰ °C Wa600
0.081 ^c	0.029 ^c	0.600 ^b	0.719 ^a	بیوچار پوست گردو در دمای پیرولیز ۵۰۰ °C Wa500
0.063 ^b	0.017 ^b	0.620 ^a	0.698 ^a	بیوچار پوست گردو در دمای پیرولیز ۴۰۰ °C Wa400
0.080 ^b	0.028 ^c	0.660 ^a	0.666 ^a	بیوچار پوست انار در دمای پیرولیز ۶۰۰ °C Po600
0.070 ^b	0.038 ^c	0.692 ^a	0.563 ^a	بیوچار پوست انار در دمای پیرولیز ۵۰۰ °C Po500
0.072 ^c	0.018 ^d	0.695 ^a	0.566 ^b	بیوچار پوست انار در دمای پیرولیز ۴۰۰ °C Po400
0.052 ^b	0.010 ^b	0.392 ^a	0.406 ^a	شاهد Control

در هر ستون، میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Within each column, means sharing letters are not significantly different (LSD, $p < 0.05$)

Wa: بیوچار پوست گردو، Po: بیوچار پوست انار، اعداد 400، 500 و 600 نشان‌دهنده دمای پیرولیز بر حسب درجه سلسیوس هستند. IQI: شاخص کیفیت

تجمعی، NQI: شاخص کیفیت نرمال‌شده، TDS: مجموعه داده کامل، MDS: حداقل مجموعه داده.

Wa: walnut shell biochar, Po: pomegranate peel biochar, IQI: integrated quality index, NQI: normalized quality index, TDS: total data set, MDS: minimum data set. The numbers 400, 500, and 600 indicate pyrolysis temperatures in °C.

جدول ۱۳. درجه شاخص کیفیت خاک در تیمارهای مختلف بیوچار

Table 13. Soil quality index classes across different biochar treatments

NQI-MDS	NQI-TDS	IQI-MDS	IQI-TDS	تیمار treatment
IV	IV	III	II	بیوچار پوست گردو در دمای پیرولیز ۶۰۰ °C Wa600
IV	IV	III	II	بیوچار پوست گردو در دمای پیرولیز ۵۰۰ °C Wa500
IV	IV	III	II	بیوچار پوست گردو در دمای پیرولیز ۴۰۰ °C Wa400
IV	IV	II	III	بیوچار پوست انار در دمای پیرولیز ۶۰۰ °C Po600
IV	IV	II	III	بیوچار پوست انار در دمای پیرولیز ۵۰۰ °C Po500
IV	IV	II	III	بیوچار پوست انار در دمای پیرولیز ۴۰۰ °C Po400
IV	IV	IV	IV	شاهد Control

Wa: بیوچار پوست گردو، Po: بیوچار پوست انار، IQI: شاخص کیفیت تجمعی، NQI: شاخص کیفیت نرمال‌شده، TDS: مجموعه داده کامل، MDS: حداقل

مجموعه داده. درجات I تا IV به ترتیب نشان‌دهنده طبقات کیفیت خاک از بالاترین تا پایین‌ترین هستند.

Wa: walnut shell biochar, Po: pomegranate peel biochar, IQI: integrated quality index, NQI: normalized quality index, TDS: total data set, MDS: minimum data set. Classes I to IV indicate soil quality levels from highest to lowest, respectively.

هستند و تعمیم آن‌ها به سایر خاک‌ها، شرایط محیطی و دوره‌های طولانی‌تر نیازمند شواهد بیشتر است. برای پژوهش‌های آینده، انجام آزمایش‌های بلندمدت و چندفصلی در مقیاس مزرعه‌ای برای بررسی پایداری اثرات بیوجار و تغییرات تدریجی ویژگی‌های خاک، به‌ویژه EC، سدیم و شاخص‌های زیستی، پیشنهاد می‌شود. همچنین، مقایسه بیوجارهای پوست گردو و پوست انار در دماهای مختلف و بررسی ارتباط ویژگی‌های ذاتی بیوجار با پاسخ خاک می‌تواند به تعیین دامنه مناسب دمای پیرولیز و انتخاب بیوجار متناسب با شرایط هر خاک کمک کند.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از آزمایشگاه مرکزی دانشگاه لرستان بابت همکاری در تأمین تجهیزات و مواد آزمایشگاهی قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

همراه بود؛ به‌طوری‌که Wa600 در پایداری خاکدانه‌ها و فراهمی P و K و Po600 در تخلخل، نگهداری آب و کربن آلی عملکرد مطلوب‌تری داشتند. افزایش MBC و POC، کاهش QCO₂ و تغییر فعالیت آنزیم‌ها نیز بیانگر تغییر وضعیت زیستی خاک در اثر کاربرد بیوجار بود. در مقابل، افزایش EC و Na، به‌ویژه در Wa600، نشان داد که بیوجار می‌تواند هم‌زمان با بهبود برخی ویژگی‌ها، بر بعضی ویژگی‌های شیمیایی اثر نامطلوب داشته باشد. شاخص‌های کیفیت خاک نیز تغییرات ناشی از تیمارهای بیوجار نسبت به شاهد و همبستگی بین شاخص‌های مبتنی بر TDS و MDS را نشان دادند. در مجموع، Wa600 تغییرات مطلوب‌تری را در مجموعه‌ای از ویژگی‌های خاک ایجاد کرد، درحالی‌که Po600 در برخی ویژگی‌ها مانند تخلخل، نگهداری آب و کربن آلی برتری داشت. بنابراین، اثر بیوجار بر کیفیت خاک به نوع ماده اولیه و دمای پیرولیز وابسته است و انتخاب مناسب‌ترین تیمار نیازمند بررسی دامنه وسیع‌تری از خاک‌ها، نرخ‌های کاربرد و دوره‌های زمانی است.

از محدودیت‌های پژوهش حاضر، کوتاه‌بودن دوره ارزیابی (۹۰ روز) و اجرای آزمایش در مقیاس کرت‌های کوچک بود؛ بنابراین، نتایج عمدتاً بیانگر پاسخ کوتاه‌مدت خاک مورد مطالعه

References

1. Acharya, B.S., Dodla, S., Wang, J.J., Pavuluri, K., Darapuneni, M., Dattamudi, S., Maharjan, B., Kharel, G., 2024. Biochar impacts on soil water dynamics: knowns, unknowns, and research directions. *Biochar* 6(1), 34. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00323-4>.
2. Ali, H.A., Abd-Elwahed, M.S., Sheta, A.S., Mady, A.Y., 2025. Impact of agricultural practices on soil pore system parameters and physical soil quality in new reclaimed land. *Egypt. J. Soil Sci.* 65(1), 507–518. <https://doi.org/10.21608/EJSS.2025.341072.1932>
3. Alogaidi, M.A.H., Asadzadeh, F., Rezapour, S., Khosravi Aqdam, K., Shabani, F., 2025. A quantitative evaluation of landscape patterns' impact on soil quality: A regional-scale case study. *Earth Syst. Environ.* 9(2), 1021–1036. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00565-z>.
4. Andrews, S.S., Mitchell, J.P., Mancinelli, R., Karlen, D.L., Hartz, T.K., Horwath, W.R., Pettygrove, G.S., Scow, K.M., Munk, D.S., 2002. On-farm assessment of soil quality in California's Central Valley. *Agron. J.* 94(1), 12–23. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.1200>
5. Azimzadeh, Y., Najafi, N., 2017. Effects of Biochar on Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *J. Land Manage.* 4(2), 161–173. <https://doi.org/10.22092/lmj.2017.109488>. (In Persian with English abstract)
6. Baiamonte, G., De Pasquale, C., Marsala, V., Cimò, G., Alonzo, G., Crescimanno, G., Conte, P., 2015. Structure alteration of a sandy-clay soil by biochar amendments. *J. Soils Sediments* 15(4), 816–824. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0960-y>
7. Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R.G.M., Flesskens, L., Geissen, V., Kuiper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M.M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

منابع مورد استفاده

8. Cantrell, K.B., Hunt, P.G., Uchimiya, M.S., Novak, J.M., Ro, K.S., 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresour. Technol.* 107, 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084>
9. Divband Hafshejani, L., Naseri, A.A., Hooshmand, A., Abbasi, F., Soltani Mohammadi, A., 2017. Effect of sugarcane bagasse biochar application on chemical properties a sandy loam soil. *Irrig. Sci. Eng.* 40(1), 63–72. <https://doi.org/10.22055/JISE.2017.12667>. (In Persian with English abstract)
10. El Hamdouni, Y., El Hajjaji, S., Szabó, T., Trif, L., Felhősi, I., Abbi, K., Labjar, N., Harmouche, L., Shaban, A., 2022. Biomass valorization of walnut shell into biochar as a resource for electrochemical simultaneous detection of heavy metal ions in water and soil samples: Preparation, characterization, and applications. *Arab. J. Chem.* 15(11), 104252. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104252>
11. Forouhar, M., Khorassani, R., Fotovat, A., Shariatmadari, H., Khavazi, K., 2018. The influence of different biochars and their feedstock on some soil chemical properties and nutrients over the time in a calcareous soil. *J. Water Soil.* 32(2), 299–312. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i2.66097>. (In Persian with English abstract)
12. Govindasamy, P., Mahawer, S.K., Mowrer, J., Bagavathiannan, M., Prasad, M., Ramakrishnan, S., Halli, H.M., Kumar, S., 2023. Comparison of low-cost methods for soil water holding capacity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 54(2), 287–296. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2112216>
13. Guo, L.L., Sun, Z.G., Ouyang, Z., Han, D.R., Li, F.D., 2017. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. *Catena* 152, 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.015>
14. Hansen, V., Hauggaard-Nielsen, H., Petersen, C.T., Mikkelsen, T.N., Müller-Stöver, D.S., 2016. Effects of gasification biochar on plant-available water capacity and plant growth in two contrasting soil types. *Soil Tillage Res.* 161, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.002>
15. Hossain, M.K., Strezov, V., Chan, K.Y., Ziolkowski, A., Nelson, P.F., 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *J. Environ. Manage.* 92(1), 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.008>
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.313247.668793>.
16. Kemper, W.D., Rosenau, R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 425–442.
17. Khadem, A., Raiesi, F., Besharati, H., 2017. A review of biochar effects on soil physical, chemical, and biological properties. *J. Land Manage.* 5(1), 13–30. <https://doi.org/10.22092/lmj.2017.113291>. (In Persian with English abstract)
18. Li, L., Long, A., Fossum, B., Kaiser, M., 2023. Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar characteristics pertinent to soil carbon and soil health: A meta-analysis. *Soil Use Manage.* 39(1), 43–52. <https://doi.org/10.1111/sum.12848>
19. Miri, F., Zamani Babgohari, J., 2020. Effects of pyrolysis temperatures on some properties of biochar of pistachio waste. *J. Agric. Eng. Soil Sci. Agric. Mech.* 43, 81–95. <https://doi.org/10.22055/AGEN.2020.31328.1514>. (In Persian with English abstract)
20. Mohammadi, N., Khademahrasoul, A., 2021. Assessment of zeoplant and biochar of sugarcane residual on mean weight diameter and Atterberg limits of soil contaminated with total petroleum hydrocarbon. *Iran. J. Soil Water Res.* 52(2), 395–407. (In Persian with English abstract)
21. Moradi, Sh., Sarikhani, M.R., Beheshti Ale Agha, A., Alavi-Kia, S.S., Reyhanitabar, A., Sharifi, R., 2024. Changes in the activity of acid and alkaline phosphatase enzymes in oil-contaminated soils. *Iran. J. Soil Water Res.*, 55(1), 117–130. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.365078.669569>. (In Persian with English abstract)
22. Mwendwa, S., 2022. Revisiting soil texture analysis: Practices towards a more accurate Bouyoucos method. *Heliyon* 8(5), e09395. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09395>
23. Nichols, K.A., Toro, M., 2011. A whole soil stability index (WSSI) for evaluating soil aggregation. *Soil Tillage Res.* 111(2), 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.014>
24. Pandey, D., Daverey, A., Arunachalam, K., 2020. Biochar: Production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. *J. Clean. Prod.* 255, 120267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120267>
25. Qian, F., Yu, Y., Dong, X., Gu, H., 2023. Soil quality evaluation based on a minimum data set (MDS)—A case study of Tieling County, Northeast China. *Land* 12(6), 1263. <https://doi.org/10.3390/land12061263>
26. Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H.A., Fereidouni, Z., Bandarabadi, S.R., 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecol. Indic.* 40, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003>
27. Rezaee, L., Moosavi, A.A., Davatgar, N., Sepaskhah, A.R., 2020. Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecol. Indic.* 117, 106566. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106566>
28. Saffari, N., Hajabbasi, M.A., Shirani, H., Mosaddeghi, M.R., Mamedov, A.I., 2020. Biochar type and pyrolysis

- temperature effects on soil quality indicators and structural stability. *J. Environ. Manage.* 261, 110190. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110190>.
29. Salinas, J., Meca, D., del Moral, F., 2020. Short-term effects of changing soil management practices on soil quality indicators and crop yields in greenhouses. *Agronomy* 10(4), 582. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040582>
30. Santos, W.P. dos, Silva, M.L.N., Avanzi, J.C., Acuña-Guzman, S.F., Cândido, B.M., Cirillo, M.Á., Curi, N., 2021. Soil quality assessment using erosion-sensitive indices and fuzzy membership under different cropping systems on a Ferralsol in Brazil. *Geoderma Reg.* 25, e00385. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00385>
31. Selmy, S.A.H., Abd Al-Aziz, S.H., Jiménez-Ballesta, R., García-Navarro, F.J., Fadl, M.E., 2021. Soil quality assessment using multivariate approaches: A case study of the Dakhla Oasis arid lands. *Land* 10(10), 1074. <https://doi.org/10.3390/land10101074>
32. Shohab Arkhazloo, H., Emami, H., Haghnia, Gh., Karimi, A.R., 2017. Determining most important properties for soil quality indices of agriculture and range lands in some parts of Southern Mashhad. *J. Water Soil* 31(3), 591–603. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i-.11256> (In Persian with English abstract)
33. Sial, T.A., Shaheen, S.M., Lan, Z., Korai, P.K., Ghani, M.I., Khan, M.N., Syed, A.-u.-A., Asghar Ali, M.N.H., Rajpar, I., Memon, M., Bhatti, S.M., Abdelrahman, H., Ali, E.F., Rinklebe, J., Zhang, J., 2021. Addition of walnut shells biochar to alkaline arable soil caused contradictory effects on CO₂ and N₂O emissions, nutrients availability, and enzymes activity. *Sci. Total Environ.* 792, 148383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148383>
34. Tabatabai, M.A., 1994. Soil enzymes. In: Weaver, R.W., Angle, J.S., Bottomley, P.S. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*. SSSA, Madison, Wisconsin, pp. 775–833.
35. Taleb Shams, M., Gharahi, N., Pajooresh, M., 2022. Effects of biochar and powdery maize on soil properties and reducing wind erosion. *Manag. Nat. Ecosyst.* 1(1), 49–56. <https://doi.org/10.22034/emj.2021.249011>. (In Persian with English abstract)
36. Thomas, G.W., 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*, SSSA Book Series 5. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 475–490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>.
37. Witcombe, A.M., Tiemann, L.K., Chikowo, R., Snapp, S.S. (2023). Diversifying with grain legumes amplifies carbon in management-sensitive soil organic carbon pools on smallholder farms. *Agric. Ecosyst. Environ.* 356, 108611. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108611>
38. Witzgall, K., Vidal, A., Schubert, D.I., Höschen, C., Schweizer, S.A., Buegger, F., Pouteau, V., Chenu, C., Mueller, C.W., 2021. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nat. Commun.* 12, 4115. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8>.
39. Wojewódzki, P., Lemanowicz, J., Debska, B., Haddad, S.A., 2022. Soil enzyme activity response under the amendment of different types of biochar. *Agronomy* 12(3), 569. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030569>
40. Yan, S., Zhang, S., Yan, P., et al., 2022. Effect of biochar application method and amount on the soil quality and maize yield in Mollisols of Northeast China. *Biochar* 4, 56. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00180-z>
41. Zhang, H., Chen, C., Gray, E.M., Boyd, S.E., 2017. Effect of feedstock and pyrolysis temperature on properties of biochar governing end use efficacy. *Biomass Bioenergy* 105, 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.024>