

ترکیبات ساختمانی ماده آلی خاک و شناسایی برخی عوامل مؤثر بر آن در مراتع احیاشده دشت قهاوند

مریم حمیدی^۱، بهناز عطائیان^{۲*}، لیما طیبی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

چکیده

افزایش ذخیره کربن آلی خاک برای تعدیل تغییرات اقلیمی، اهمیت ویژه‌ای دارد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات ذخیره کربن آلی و ارتباط آن با میزان ترکیبات ماده آلی خاک (سلولز، همی سلولز و لیگنین) در دو عمق سطحی (۰-۱۰ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۱۰-۳۰ سانتی‌متر) در مراتع احیاشده دشت قهاوند در سال ۱۳۹۵ انجام شد. آنالیزهای آماری داده‌های حاصل با استفاده از آزمون نرمالیتی Kolomogrov-Smirnov بررسی گردید و سپس از رویه Proc ttest برای بررسی تغییرات معنی‌دار میزان کربن آلی و سایر خصوصیات خاک سطحی و زیرسطحی استفاده شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که تغییرات عمق بر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری‌شده، تأثیرات معنی‌داری داشته است و افزایش معنی‌دار ماده آلی، سلولز و همی سلولز در خاک زیر سطحی به ترتیب معادل ۳/۲، ۵/۰۲ و ۲/۶ برابر مشاهده شد. افزون بر این، بین ماده آلی خاک و برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اسیدیته، هدایت الکتریکی و درصد رس و سیلت همبستگی مثبت مشاهده شد. این یافته‌ها بیانگر آن است که احیای پوشش گیاهی و مدیریت قرق، با بهبود ورودی بقایای گیاهی و تثبیت ترکیبات سلولزی، می‌تواند به افزایش پایداری کربن آلی و بهبود کیفیت خاک در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک منجر شود.

کلیدواژه‌ها: ماده آلی خاک، ترسیب کربن، پایداری کربن آلی، کیفیت خاک، بیابان‌زایی.

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، ma.ha9610@yahoo.com

۲. استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، نویسنده مسئول، b.attaiean@malayeru.ac.ir

۳. استادیار گروه علوم و مهندسی شیلات، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، L.tayebi@malayeru.ac.ir

مقدمه

قابل توجه بوده و موجب افزایش ۱۷ و ۱۲/۷ درصدی ارزش ترسیب کربن در منطقه ایزه و رامهرمز گردیده است. ژائنه و وو^۸ (۲۰۱۶) با مطالعه اثرات شدت چرا بر کربن‌های آلی خاکی بخشی از مراتع چین، بیان داشتند که قرق باعث افزایش کربن آلی خاک سطحی شده است و می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مطلوب در حفظ ذخایر کربن آلی خاک در گراسلندها در نظر گرفته شود. مریم^۹ و همکاران (۲۰۱۷) با ارزیابی عوامل مؤثر بر تجزیه کربن خاک حوزه‌های آبخیز در چهار اقلیم مختلف، بیان نمودند که پوشش گیاهی ناحیه ساحلی برای ذخیره کربن خاک این منطقه نسبت به سایر حوزه‌های آبخیز نقش حیاتی داشته باشد. تأثیر پوشش گیاهی و مدیریت مراتع بر کیفیت و ترکیبات شیمیایی و پایداری ماده آلی خاک و در نتیجه بر سرعت و روند تجزیه آن در مطالعات مختلفی گزارش شده است (داس^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۳؛ سوکول و بردفورد،^{۱۱} ۲۰۱۹). برای مثال افزایش میزان N می‌تواند کیفیت و ترکیبات ماده آلی را و یا فرایند تجزیه کربن آلی گیاهی را در اکوسیستم‌های خاکی تغییر دهد. افزایش مقدار نیتروژن بر محتوای لیگنین گیاهی و تجزیه لیگنین در خاک تأثیر معنی‌دار داشته است (کنور^{۱۲} و همکاران، ۲۰۰۵؛ داس و همکاران، ۲۰۱۳). تغییرات ترکیب شیمیایی کربن می‌تواند تأثیرات مهمی بر جامعه گیاهی، میکروارگانیسم‌های خاک و کل فرایند چرخه کربن آلی داشته باشد (پیکولو^{۱۳} و همکاران، ۱۹۹۶). مطالعات ذکرشده بیانگر اهمیت نوع پوشش گیاهی و ترکیبات آن مانند لیگنین، سلولز بر میزان و چرخه کربن آلی خاک است (هونگ^{۱۴} و همکاران، ۲۰۲۴). نوع مدیریت مرتع با تغییر کیفیت و ترکیب بقایای گیاهی (مثلاً میزان لیگنین) می‌تواند ترکیب ماده آلی خاک و در نتیجه پایداری کربن را تحت تأثیر قرار دهد (گیلمولینا^{۱۵} و همکاران، ۲۰۲۱). چرا می‌تواند منجر به افزایش نسبت ترکیبات کربن تجزیه‌پذیرتر مانند سلولز یا کاهش ترکیبات پایدار مانند لیگنین شود. هدف از این پژوهش، بررسی تغییرات کمی و کیفی ترکیبات ماده آلی خاک شامل سلولز،

ذخیره و پایداری کربن آلی خاک از مهم‌ترین راهکارهای طبیعی برای تعدیل تغییرات اقلیمی به شمار می‌رود. دی‌اکسید کربن (CO₂) یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌گردد که غلظت آن از ۲۸۰ ppm قبل از انقلاب صنعتی به ۳۹۴ ppm (هوی^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). دخالت‌های بی‌رویه بشر در اکوسیستم‌های طبیعی تعادل و عملکرد این اکوسیستم‌ها را بر هم زده و تأثیرات منفی فراوانی بر محیط زیست انسان به جا گذاشته است. ازجمله این تغییرات، بر هم خوردن چرخه عناصر به‌ویژه کربن (C) در مقیاس جهانی است (ولتزین^۲ و همکاران، ۲۰۰۳). افزایش ذخیره کربن آلی خاک برای تعدیل تغییرات اقلیمی، اهمیت ویژه‌ای دارد (سرینی‌واسارو^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). مقدار ترسیب کربن در خاک به تعامل میان هوا، خاک، نوع گونه‌های درختی، ترکیب شیمیایی لاشبرگ و مدیریت محیط‌زیست بستگی دارد (تنگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، جذب و ترسیب کربن اتمسفری به‌منظور کاهش دی‌اکسید کربن و و تعدیل گرمایش اقلیمی ضروری است (کنل،^۵ ۲۰۰۳). آموندسون و بیاردنو^۶ (۲۰۱۸) خاک اکوسیستم‌های طبیعی را یک منبع مهم برای ترسیب بلندمدت کربن و تعدیل تغییرات آب‌وهوایی دانستند. قاسمی‌نژاد رائینی و صادقی (۲۰۱۷) به مطالعه پتانسیل ترسیب کربن در اندام‌های مختلف گیاه و خاک زیر اشکوب گونه‌های قیچ (*Zygophyllum atriplicoides*) و گروج (*Gymnocarpus decander*) مراتع صالح‌آباد هرمزگان پرداختند و بیان نمودند نوع گیاه و اندام گیاهی بر مقدار کربن ذخیره‌شده در بافت گیاه تأثیر معنی‌داری دارد. اوجی^۷ و همکاران (۲۰۱۸) با هدف بررسی تأثیر مدیریت قرق بر میزان و تغییرات ترسیب کربن خاک، ارزش اقتصادی ترسیب کربن را در خاک مراتع دشت پتی ایزه و منطقه دیمه رامهرمز در استان خوزستان بررسی نمودند. نتایج نشان داد که برآورد ارزش اقتصادی ترسیب کربن طی قرق در مراتع مطالعاتی

8. Xie & Wu
9. Merriman
10. Dias
11. Sokol & Bradford
12. Knorr
13. Piccolo
14. Huang
15. Gilmullina

1. Hui
2. Weltzin
3. Srinivasarao
4. Teng
5. Cannell
6. Amundson & Biardeau
7. Oji

روش تحقیق

در این پژوهش، نمونه‌برداری از مناطق مرتع‌کاری شده (*Atriplex* *canenses* و *Nitraria schoberi*) منطقه (شکل ۲) در اواخر فصل رویش سال ۱۳۹۵ انجام شد. تعداد ۶۰ نمونه خاک به صورت سیستماتیک- تصادفی در طول ۶ ترانسکت ۱۰۰ متری (۳ ترانسکت در جهت خطوط تراز و ۳ ترانسکت عمود بر خطوط تراز) و در هر ترانسکت ۵ پلات تصادفی برداشت شدند.



شکل (۲): نمایی از عرصه منطقه مورد مطالعه

Figure (2): Field view of the study area

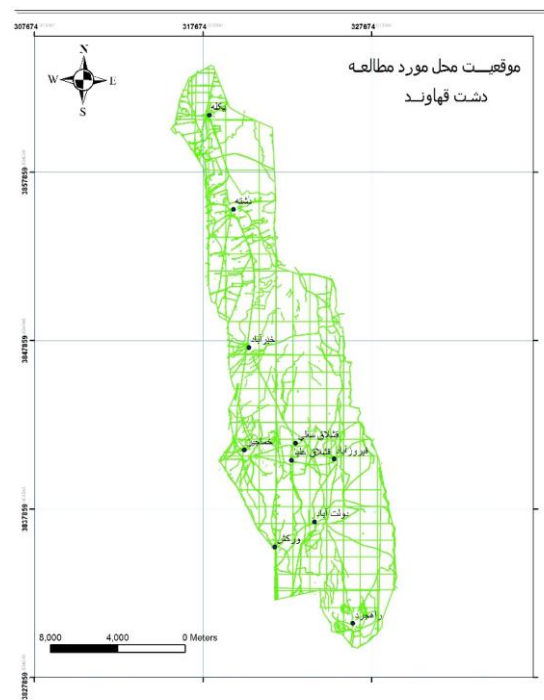
نمونه‌برداری از خاک در دو عمق سطحی (۰-۱۰ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۱۰-۳۰ سانتی‌متر) انجام شد. انتخاب این عمق‌ها با هدف تفکیک لایه زیستی فعال سطحی از لایه معدنی زیرین صورت گرفت. در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک، مانند منطقه مورد مطالعه، تغییرات ماده آلی و تبادلات زیستی عمدتاً در لایه بالایی خاک رخ می‌دهد (لی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن خرد شده و از الک دومیلی متری عبور داده شدند. ماده آلی خاک با استفاده از کوره

همی سلولز و لیگنین در عمق‌های مختلف خاک و تبیین ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در مراتع احیاشده دشت قهاوند، همدان است. نتایج این بررسی می‌تواند درک بهتری از فرایندهای ترسیب و پایداری کربن آلی خاک در اکوسیستم‌های مرتعی منطقه فراهم آورد. منطقه مذکور به دلیل بهره‌برداری‌های غیراصولی و چرای بی‌رویه به شدت تخریب شده است. خشکسالی‌های اخیر نیز منجر به تشدید فرسایش خاک و بیابانی شدن دشت قهاوند شده است. به همین دلیل، مراتع تخریب‌شده منطقه با استفاده از گونه‌های *Atriplex canenses* و *Nitraria schoberi* احیا و سپس تحت مدیریت قرق قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در محدوده دشت قهاوند، عرض جغرافیایی $34^{\circ} 34'$ تا $34^{\circ} 47'$ و طول جغرافیایی $49^{\circ} 01'$ تا $49^{\circ} 07'$ ، ارتفاع متوسط منطقه $1631/05$ متر، میانگین حداقل دمای سالانه $11/3$ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه 270 میلی‌متر از توابع شهرستان همدان واقع شده است (احمدیان و همکاران، ۲۰۱۰).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure (1): Geographical position of the Study Area

به موازات آن، روابط آماری بین این ترکیبات و برخی شاخص‌های فیزیکوشیمیایی خاک (pH، EC، درصد سیلت و رس) تحلیل گردید تا نقش احیای مرتع در بهبود ویژگی‌های خاک و پایداری کربن آلی بررسی شود.

تغییرات عمقی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

پارامترهای توصیفی خصوصیات فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده در خاک در جدول (۱) ارائه شده است.

نتایج بررسی تغییرات معنی‌داری پارامترهای اندازه‌گیری شده در دو عمق ۰-۱۰ و ۳۰-۱۰ سانتی‌متری بیانگر تفاوت معنی‌دار میزان اسیدیته، هدایت الکتریکی، ماده آلی، سیلت، رس، سلولز و همی سلولز خاک است (جدول ۲) ($p < 0.01$). طبق یافته‌های مطالعه حاضر، میانگین مقدار سیلت-رس در خاک سطحی و زیرسطحی به ترتیب معادل ۳۶/۴۷ و ۴۷/۳۹ درصد بوده است. بافت خاک سطحی منطقه عمدتاً دارای بافت شنی-لومی و لومی-شنی بوده و خاک زیرسطحی دارای بافت لومی و لوم‌رسی-شنی است.

مقدار ماده آلی در دو عمق (سطحی و زیرسطحی) تغییرات معنی‌داری داشته است (جدول ۲) ($p < 0.0001$)؛ به‌طوری‌که تغییرات میزان ماده آلی در خاک سطحی با میانگین ۵۸/۳۲ گرم در هکتار و در خاک زیرسطحی با میانگین ۱۸۶/۳۶ گرم در هکتار اندازه‌گیری شد. در این مطالعه، به‌منظور بررسی ترکیبات کربن آلی در خاک منطقه میزان سلولز، همی سلولز و لیگنین بررسی شدند. تغییرات دو پارامتر سلولز و همی سلولز در خاک سطحی و زیرسطحی معنی‌دار بوده است، اما در تغییرات عمقی لیگنین تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین، تغییرات جرم مخصوص ظاهری خاک در خاک سطحی و زیرسطحی تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۲) ($p \geq 0.05$).

الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت اندازه‌گیری شد (شولت و هاپکینز،^۱ ۱۹۹۶). پارامترهای اسیدیته و هدایت الکتریکی با استفاده از pH سنج و EC متر اندازه‌گیری شدند (توماس،^۲ ۱۹۹۶). بافت خاک و مقدار شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری (گی و بودر،^۳ ۱۹۸۶؛ بویوکوس،^۴ ۱۹۶۲) و وزن مخصوص ظاهری به روش کلوخه (بلیک و هارتج،^۵ ۱۹۸۶). اندازه‌گیری شدند. ترکیبات ماده آلی شامل همی سلولز Hemicellulose، سلولز Cellose با استفاده از روش ون سوست اندازه‌گیری شدند. در این روش، فیبر نامحلول در شوینده خنثی (NDF^۶) و فیبر شوینده اسیدی (ADF^۷) به عنوان شاخص‌های ماده آلی دیواره سلولی برآورد شدند. در انتها از اختلاف مقدار فیبر نامحلول در شوینده خنثی و فیبر نامحلول در شوینده اسیدی مقدار همی سلولز و از اختلاف فیبر نامحلول در شوینده اسیدی و لیگنین نامحلول در اسید، مقدار سلولز باقی‌مانده در انتهای تجزیه محاسبه شد.

قبل از انجام آنالیزهای آماری، داده‌های حاصل با استفاده از آزمون نرمالیتی Kolmogorov-Smirnov بررسی شدند و داده‌هایی که شرایط نرمال بودن را احراز نکردند، با استفاده از تغییرات معکوس کردن (سلولز)، کسینوس (رس، لیگنین)، جذر ریشه دوم (درصد سیلت، همی سلولز) به توزیع نرمال رسیدند. سپس از رویه Proc ttest برای بررسی تغییرات معنی‌دار میزان کربن آلی و سایر خصوصیات خاک سطحی و زیرسطحی استفاده شد. این آنالیزها در نرم‌افزار SAS v.9.4 صورت گرفتند. سپس برای بررسی رابطه بین ترکیبات و میزان کربن آلی ذخیره‌شده از روابط همبستگی و تجزیه مؤلفه اصلی در نرم‌افزار R و Brodgar استفاده شد.

نتایج

در این بخش، تغییرات ترکیبات ساختمانی ماده آلی خاک (سلولز، همی سلولز و لیگنین) در دو عمق خاک بررسی شده و

1. Schulte & Hopkins
2. Thomas
3. Gee & Bauder
4. Bouyoucos
5. Blake & Hartge
6. Neutral Detergent Fibr
7. Acid Detergent Fibr

جدول (۱): خلاصه پارامترهای توصیفی خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک

Table (1): Summary of the descriptive parameters of the measured soil properties

عمق	متغیر	تعداد مشاهدات	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
۱۰-۰	اسیدیته	۳۰	۸/۰۳	۰/۳۴	۷/۵۶	۸/۹۲
	هدایت الکتریکی	۳۰	۰/۶۳	۰/۳۰	۰/۲۰	۱/۳۵
	جرم مخصوص (گرم/ سانتی متر مکعب)	۳۰	۱/۵۳	۰/۲۵	۱/۱۶	۲/۲۵
	ماده آلی (گرم/ هکتار)	۳۰	۵۸/۳۲	۱۹/۰۳	۲۵/۶۵	۱۰۲/۷۸
	سیلت (درصد)	۳۰	۲۶/۴۹	۷/۷۶	۱۳/۵۵	۴۰/۳۵
	رس (درصد)	۳۰	۱۰/۰۴	۴/۱۱	۴/۹۵	۲۰/۴۰
	سلولز	۳۰	۰/۴۳	۰/۳۰	۰/۱۳	۱/۳۸
	همی سلولز	۳۰	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۰۰۶	۱/۵۷
	لیگنین	۳۰	۱/۶۳	۱/۰۲	۰/۴۵	۴/۶۴
	اسیدیته	۳۰	۹/۱۰	۰/۴۷	۸/۱۸	۹/۹۵
۳۰-۱۰	هدایت الکتریکی	۳۰	۱/۶۸	۰/۵۰	۰/۷۴	۲/۷۲
	جرم مخصوص (گرم/ سانتی متر مکعب)	۳۰	۱/۶۷	۰/۲۸	۱/۲۲	۲/۹۰
	ماده آلی (گرم/ هکتار)	۳۰	۱۸۶/۳۶	۷۰/۴۱	۱۱۳/۸۴	۳۲۵/۱۵
	سیلت (درصد)	۳۰	۲۱/۶۷	۴/۴۱	۱۰/۳۵	۲۹/۶۰
	رس (درصد)	۳۰	۲۵/۷۲	۴/۴۳	۱۶/۸۰	۳۳/۷۰
	سلولز	۳۰	۲/۱۶	۱/۴۷	۰/۱۶	۵/۵۵
	همی سلولز	۳۰	۰/۶۴	۰/۳۹	۰/۱۷	۱/۶۸
	لیگنین	۳۰	۶/۸۱	۲/۵۳	۱۴/۴۵	۳/۲۱

جدول (۲): نتایج مقایسه خصوصیات اندازه‌گیری شده در خاک سطحی و زیرسطحی

Table (2): Results of comparing measured properties in surface and subsurface soil

متغیر	درجه آزادی	مگنی واریانس $pr > F$	آماره t	$pr > t $
اسیدیته	۵۸	۰/۱۰	-۹/۹۵	** ۰/۰۰۰۱
هدایت الکتریکی	۴۷/۳۴	۰/۰۰۷	-۹/۶۵	** ۰/۰۰۰۱
جرم مخصوص (گرم/ سانتی متر مکعب)	۵۸	۰/۵۲	-۱/۹۰	ns ۰/۰۶۲
ماده آلی (گرم/ هکتار)	۴۰/۵۸	۰/۰۰۰۱	-۱۵/۳۰	** ۰/۰۰۰۱
سیلت (درصد)	۵۰/۸۳	۰/۰۳۷	۲/۷۹	** ۰/۰۰۰۷
رس (درصد)	۵۸	۰/۵۶	-۳/۹۱	** ۰/۰۰۰۲
سلولز	۵۷	۰/۰۶۸	۶/۰۶	** ۰/۰۰۰۱
همی سلولز	۵۸	۰/۹۲	-۵/۰۵	** ۰/۰۰۰۱
لیگنین	۵۸	۰/۳۰	۱/۵۴	ns ۰/۱۳۰

لی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که ماده آلی و خصوصیات شیمیایی خاک معمولاً در عمق‌های مختلف خاک، به‌ویژه در مراتع احیاشده، تفاوت معنی‌داری دارند. بااین‌حال، عدم تغییرات معنی‌دار میزان لیگنین و جرم مخصوص ظاهری خاک

به نظر می‌رسد خصوصیات تجمع برگ‌ها، شاخه‌ها و لاشبرگ‌های محتوی نمک گیاهان آتریپلکس و قره‌داغ در خاک سطحی منطقه مورد مطالعه، تغییرات معنی‌داری در خواص شیمیایی خاک سطحی ایجاد کرده و سبب افزایش اسیدیته، هدایت الکتریکی و ماده آلی در خاک شده است.

در این مطالعه با مطالعات قبلی مانند سیز^۱ و همکاران (۲۰۱۵) که تفاوت‌های عمقی قابل توجهی در میزان لیگنین خاک در اکوسیستم‌های مشابه گزارش کردند، متناقض است که می‌تواند ناشی از تفاوت در گونه‌های گیاهی، شرایط اقلیمی، یا مدت زمان مدیریت قرق پس از احیا مراتع باشد. عدم تغییرات معنی‌دار در میزان لیگنین می‌تواند ناشی از پیچیده بودن پلیمرهای لیگنین باشد که به بازدهی پایین در مصرف میکروارگانیسم‌ها منجر شده و بخش اندکی از کربن آن در خاک پایدار می‌شود و عمدتاً به CO₂ تبدیل و از دسترس خارج می‌شود (سوکول و بردفورد، ۲۰۱۹)؛ هرچند این رفتار با توجه به ترکیبات معدنی همراه متفاوت است و لیگنین در حضور ترکیبات معدنی آهن در خاک‌های گرمسیری سهم چشمگیری در ترسیب طولانی‌مدت کربن خاک نشان داده است (هونگ و همکاران، ۲۰۱۹).

میزان بیشتر اکثر شاخص‌ها، ازجمله ماده آلی، سلولز و همی سلولز در عمق ۱۰-۳۰ سانتی‌متری، نشان می‌دهد که لایه‌های عمیق‌تر خاک نقش مهمی در نگهداری مواد مغذی و ذخیره‌سازی کربن ایفا می‌کنند. این موضوع با یافته‌های نوردرهاگ^۲ و همکاران (۲۰۲۳) مطابقت دارد، که تأکید کردند لایه‌های زیرسطحی خاک در مراتع نیمه‌خشک اغلب به دلیل کاهش فرسایش و سایر فشارهای محیطی، ماده آلی بیشتری ذخیره می‌کنند. کاهش معنی‌دار ۴/۸ درصدی میزان درصد سیلت در لایه زیرسطحی برخلاف انتظارات معمول است. همان‌طور که دورو^۳ و همکاران (۲۰۲۲) توضیح داده‌اند معمولاً توزیع سیلت در عمق‌های مختلف خاک در مناطق نیمه‌خشک یکنواخت است. هرچند توزیع درصد سیلت می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند مواد مادر، فرایندهای تشکیل خاک و شرایط محیطی در اعماق مختلف تغییراتی داشته باشد. یمر^۴ و همکاران همکاران (۲۰۰۶) ماده آلی و درصد سیلت بالاتری را در خاک سطحی گزارش کردند. این نتایج اهمیت تحلیل تغییرات خصوصیات شیمیایی در عمق خاک در مراتع نیمه‌خشک را، به‌ویژه در مناطقی که چرای دام مدیریت می‌شود، برجسته

می‌کند. مقادیر بالاتر ماده آلی و ترکیبات سلولزی آن در لایه‌های عمیق‌تر، اهمیت آن‌ها را برای ذخیره‌سازی بلندمدت کربن و بهبود سلامت خاک نشان می‌دهد. قسمت اعظم دیواره سلولی ترکیبات گیاهان عالی از سلولز تشکیل می‌شود. در دیواره سلولی گیاهان، سلولز همانند سایر پلی‌ساکاریدهای دیگر ازجمله همی سلولز، لیگنین و پکتین قرار دارد که پایداری نسبی کربن آلی در خاک را به‌علت پیچیدگی ساختمان سلولی و عدم دسترسی آنزیم‌های تجزیه‌کننده به کربن، فراهم می‌سازد (بگوین،^۵ ۱۹۹۰). همی سلولز بعد از سلولز، فراوان‌ترین ماده آلی آلی در دیواره اولیه گیاهان است. همی سلولز ۳۰ درصد وزن خشک بقایای گیاهی را تشکیل می‌دهد و چون ساختمان شیمیایی غیریکنواختی دارد، زودتر از سلولز تجزیه می‌شود. میکروارگانیسم‌هایی که در تجزیه سلولز فعالیت دارند، در تجزیه همی سلولز نیز دخالت دارند. رضوی و همکاران (۲۰۱۵) به مطالعه تجزیه بقایای پنج گیاه زراعی به کمک چهار گونه قارچ گندروی خاک‌زی و چوب‌زی پرداختند. آن‌ها در نتایج خود اعلام کردند که تجزیه ترکیبات همی سلولزی در تمامی بقایای گیاهی بیشتر از سلولز و لیگنین بود. میزان تجزیه در بین قارچ‌ها متفاوت بود. بیشترین تجزیه همی سلولز، توسط قارچ *P. ostreatus* و بعد از آن *T. viride* A. *niger* و *P. chrysosporium* صورت گرفت. آن‌ها همچنین بیان کردند که قارچ‌ها به‌طور هم‌زمان چند آنزیم ترشح می‌کنند و امکان تجزیه مواد خشبی شامل همی سلولز، سلولز و لیگنین را بهتر از سایر تجزیه‌کنندگان فراهم می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهند که لیگنین به‌دلیل ساختار سه‌بعدی و پیچیده‌اش، به‌عنوان مانعی فیزیکی در برابر حمله آنزیم‌های سلولازی و همی سلولازی عمل می‌کند، که این امر بر عملکرد این آنزیم‌ها تأثیر می‌گذارد. باین‌حال، این ساختار پیچیده، لیگنین را به منبعی پایدار برای تولید سوخت‌های زیستی تبدیل کرده است (تولابی و همکاران، ۲۰۲۲).

بررسی رابطه همبستگی خطی بین ماده آلی خاک با خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

با توجه به جدول آنالیز همبستگی در این تحقیق (جدول ۲)، رابطه مستقیم و مثبتی بین ماده آلی خاک و پارامترهای

1. Saiz
2. Norderhaug
3. Doro
4. Yimer

هدایت الکتریکی، اسیدیته، درصد سیلت-رس و وزن مخصوص ظاهری خاک مشاهده شد (جدول ۳) ($\alpha=0/01$).

جدول (۳): ضرایب همبستگی متغیرهای خاک							
Table (3): Correlation coefficient of soil variables							
متغیر	هدایت الکتریکی	اسیدیته	وزن مخصوص ظاهری	سیلت-رس	ماده آلی	سلولز	همی سلولز لیگنین
هدایت الکتریکی	۱						
اسیدیته	**۰/۷۵۶۶۷	۱					
وزن مخصوص ظاهری	ns۰/۲۱۷۶۰	*۰/۳۰۳۵۱	۱				
سیلت-رس	**۰/۶۳۸۲۱	**۰/۶۲۰۹۳	ns۰/۲۲۰۸۴	۱			
ماده آلی	**۰/۷۲۴۸۵	**۰/۷۸۲۹۰	**۰/۴۷۱۶۶	**۰/۷۰۰۳۷	۱		
سلولز	**۰/۷۶۳۵۶	**۰/۵۸۶۵۲	*۰/۲۶۸۲۴	**۰/۵۶۸۶۸	**۰/۷۱۷۸۸	۱	
همی سلولز	**۰/۵۰۰۰۵	**۰/۵۶۸۶۷	*۰/۳۱۲۲۸	**۰/۴۹۶۰۵	**۰/۷۲۷۷۰	**۰/۴۷۴۸۵	۱
لیگنین	**۰/۶۹۱۶۱	**۰/۷۷۰۶۸	*۰/۲۸۰۶۷	**۰/۶۰۴۷۲	**۰/۸۴۸۳۴	**۰/۶۳۴۳۳	**۰/۶۶۸۴۱

** همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنی دار است. * همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنی دار است. ns همبستگی معنی دار نیست.

اسیدیته اضافی را خشتی کرده و به عنوان یک بافر عمل کند (سیکس^۱ و همکاران، ۲۰۰۲). این اثر بافری به ویژه در خاک‌هایی که سطح بافر معدنی کمتری دارند، مانند مناطق نیمه خشک، مشهودتر است. علاوه بر این، SOM می‌تواند ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک را بهبود بخشد، که این امر توانایی خاک برای نگهداری و تبادل کاتیون‌های بازی مانند کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+}) و پتاسیم (K^+) را افزایش می‌دهد. این کاتیون‌ها می‌توانند اسیدیته خاک را کاهش دهند و باعث ایجاد رابطه مثبت بین SOM و pH شوند (سیلوا^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). این پدیده با یافته‌های چویلاگ پیاستسکا^۳ و همکاران (۲۰۲۳) هم خوانی دارد که نشان دادند SOM به طور قابل توجهی پایداری pH را در خاک‌های تخریب شده، به ویژه در شرایط کمبود ورودی‌های خارجی، بهبود می‌بخشد. با این حال، قدرت این رابطه می‌تواند بسته به نوع خاک، سطح اولیه pH و شیوه‌های مدیریت زمین متفاوت باشد. برای مثال، تجمع SOM در خاک‌های قلیایی ممکن است تأثیر کمی بر pH داشته باشد،

نتایج تحلیل همبستگی خطی، همبستگی مثبت معنی داری بین ماده آلی خاک و اسیدیته، هدایت الکتریکی و درصد سیلت + رس مشاهده شد که با در نظر گرفتن میزان ضرایب همبستگی بالاتر از ۰/۷، نشان دهنده ارتباط نسبتاً قوی هستند. با این حال، همبستگی بین SOM و وزن مخصوص ظاهری ضعیف تر بود که با ضریبی حدود ۰/۴۷ مشاهده شد که نشان دهنده رابطه‌ای متوسط است. همبستگی قوی و مثبت بین SOM و EC با یافته‌های مطالعات قبلی مطابقت دارد. تجزیه ماده آلی، باعث آزادسازی یون‌های محلول می‌شود که هدایت الکتریکی خاک را افزایش می‌دهد. این موضوع به ویژه در مناطق نیمه خشک گزارش شده است که در آن تجزیه SOM می‌تواند به طور قابل توجهی بر غلظت یون‌ها و هدایت الکتریکی خاک تأثیر بگذارد (لی و همکاران، ۲۰۲۰).

همبستگی مثبت معنی دار بین ماده آلی خاک (SOM) و pH که در این مطالعه مشاهده شد، می‌تواند به ظرفیت بافری ماده آلی نسبت داده شود. ماده آلی نقش دوگانه‌ای در دینامیک pH خاک ایفا می‌کند: از یک سو، می‌تواند در طول تجزیه، یون‌های هیدروژن آزاد کرده و خاک را اسیدی کند، و از سوی دیگر، با گروه‌های عاملی خود مانند گروه‌های کربوکسیلیک و فنلی،

درحالی که در خاک‌های اسیدی این اثر برجسته‌تر است (رودینا،^۱ ۲۰۲۳). در منطقه مورد مطالعه، همبستگی مثبت نشان می‌دهد که SOM به کاهش اسیدیته خاک کمک می‌کند، که این امر برای حفظ باروری خاک در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک حیاتی است. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین ماده آلی خاک (SOM) و بخش ترکیبی سیلت + رس که در این مطالعه مشاهده شد، با پیش‌بینی‌های علمی هم‌خوانی دارد. ذرات ریز خاک، به‌ویژه سیلت و رس، نقش مهمی در تثبیت و حفاظت از ماده آلی از طریق مکانیسم‌های مختلف ازجمله پیوند شیمیایی، انسداد فیزیکی و کاهش دسترسی میکروبی به ماده آلی ایفا می‌کنند (لهمن و کلیر،^۲ ۲۰۱۵). ارتباط بین SOM و ذرات ریز می‌تواند به سطح ویژه بالا و چگالی بار ذرات سیلت و رس نسبت داده شود، که باعث جذب و تثبیت ترکیبات آلی می‌شود. این ذرات به‌طور مؤثری SOM را از تجزیه میکروبی محافظت می‌کنند و پایداری آن را در ماتریس خاک افزایش می‌دهند (سیکس و همکاران، ۲۰۰۲). برای مثال، مطالعات آدامسیزک^۳ و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که خاک‌هایی با محتوای رس بالاتر، به دلیل تشکیل کمپلکس‌های Organo-Mineral که کمتر در معرض حمله میکروبی هستند، فرصت حفظ و نگهداری کربن آلی خاک را افزایش می‌دهد. همبستگی معنی‌داری که در این مطالعه مشاهده شد، نقش حیاتی ذرات ریز خاک را در تثبیت SOM و چرخه کربن برجسته می‌کند. این یافته‌ها بر اهمیت حفاظت از ساختار خاک و کاهش فرسایش در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک برای حفظ سطح SOM و بهبود سلامت خاک تأکید دارد. همبستگی متوسط بین SOM و وزن مخصوص ظاهری خاک می‌تواند مؤید این باور باشد که وزن مخصوص ظاهری عمدتاً ارتباط معکوسی با SOM دارد، اما از آنجاکه می‌تواند تحت تأثیر عوامل دیگری مانند ساختار خاک و تراکم نیز قرار گیرد، رفتار متفاوتی در مناطق مختلف نشان می‌دهد (لال،^۴ ۲۰۰۴). در این مطالعه، تغییرات عمقی میزان وزن مخصوص ظاهری معنی‌دار نبود و از آنجاکه این پارامتر معمولاً با افزایش تخلخل خاک و میزان ماده آلی کاهش

می‌یابد، همبستگی متوسط نشان می‌دهد که عوامل دیگری مانند تنوع در تراکم خاک یا شیوه‌های مدیریت ممکن است در این منطقه مطالعه، نقش مهم‌تری داشته باشند. همبستگی‌های قوی بین SOM و EC، pH و ذرات ریز خاک اهمیت ماده آلی را در بهبود کیفیت و حاصلخیزی خاک در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک نشان می‌دهد. این روابط بر نقش حیاتی SOM در چرخه مواد مغذی، ساختار خاک و انعطاف‌پذیری کلی اکوسیستم تأکید دارند (اشمیت^۵ و همکاران، ۲۰۱۱). همبستگی ضعیف‌تر با چگالی ظاهری نشان می‌دهد که تلاش‌ها برای بهبود SOM ممکن است اثرات متفاوتی بر تراکم خاک داشته باشد که باید در راهبردهای مدیریت مراتع در نظر گرفته شود. همبستگی مثبت و قوی ($r > 0.7$) مشاهده‌شده بین ماده آلی خاک و محتوای سلولز، همی‌سلولز، و لیگنین آن با یافته‌های علمی مطابقت دارد. این ترکیبات آلی اجزای اساسی باقی‌مانده‌های گیاهی هستند که ورودی اولیه برای SOM را تشکیل می‌دهند. فرایندهای تجزیه، تبدیل و تثبیت این ترکیبات تأثیر قابل توجهی بر تجمع و پویایی SOM دارند. سلولز که فراوان‌ترین پلیمر آلی در باقی‌مانده‌های گیاهی است، مستقیماً با تجزیه و وارد شدن به اجزای آلی خاک باعث افزایش ماده آلی خاک می‌شود. به‌واسطه تجزیه میکروبی، سلولز واسطه‌هایی آلی آزاد می‌کند که منجر به افزایش ماده آلی ناپایدار و پایدار خاک می‌شود. این مسئله به‌ویژه در خاک‌های نیمه‌خشک که فعالیت میکروبی وابسته به دما و رطوبت است، مشهودتر است (آدامسیزک و همکاران، ۲۰۲۰). همی‌سلولز نیز به‌عنوان یک پلی‌ساکارید شیمیایی متنوع‌تر و کمتر کریستالی در مقایسه با سلولز، همبستگی قوی با ماده آلی نشان می‌دهد. تجزیه همی‌سلولز، انواع مختلفی از قندهای ساده و اسیدهای آلی آزاد می‌کند که به سرعت توسط میکروب‌ها متابولیزه شده و به ستنز SOM کمک می‌کند (سرک^۶ و همکاران، ۲۰۲۲). پیچیدگی ساختاری همی‌سلولز اجازه می‌دهد تا ترکیبات واسطه‌ای تشکیل شود که از طریق ترکیب با مواد معدنی و خاکدانه‌ها، پایداری SOM را افزایش می‌دهد. نقش دوگانه آن به‌عنوان منبع کربن ناپایدار و پیش‌ساز ترکیبات آلی تثبیت‌شده پایدار، اهمیت

1. Raudina
2. Lehmann & Kleber
3. Adamczyk
4. Lal

5. Schmidt
6. Serk

از آن است که احیای مرتع از طریق بهبود بافت خاک، افزایش هدایت الکتریکی در محدوده طبیعی و ارتقای ویژگی‌های ساختمانی ماده آلی، به بهبود کیفیت و پایداری خاک منجر می‌شود.

بررسی ارتباط ماده آلی خاک با خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه^۲ (PCA)

به منظور بررسی الگوی همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و ترکیبات ساختمانی ماده آلی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از هشت متغیر انجام شد. براساس بای پلات به دست آمده (شکل ۳)، محور نخست (PC1) عمدتاً با هدایت الکتریکی (EC) و سهم سلولز تعریف می‌شود و جهت مشابه پیکان‌های آن‌ها بیانگر ارتباط مثبت بین EC و سلولز ماده آلی است. شاخص pH نیز تا حدی در همین راستا قرار دارد و همبستگی مثبت ضعیف‌تری با این گرادیان نشان می‌دهد. محور دوم (PC2) عمدتاً با چگالی ظاهری (BD) مرتبط است که جهت آن تقریباً عمود بر محور اول بوده و بنابراین با متغیرهای شیمیایی خاک همبستگی ضعیف یا منفی دارد. متغیرهای سیلت و همی سلولز نزدیک مبدأ قرار گرفته‌اند و سهم اندکی در تفکیک مؤلفه‌ها دارند، درحالی‌که لیگنین هم جهت با pH و EC بوده و رابطه مثبت خفیفی را نشان می‌دهد. از میان متغیرهای بررسی شده، هدایت الکتریکی (EC) بیشترین طول بردار و کمترین زاویه را با محور اول داشته و بنابراین بیشترین بار عاملی روی مؤلفه نخست (PC1) را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر نقش تعیین‌کننده EC در تبیین تغییرات داده‌ها و ارتباط مستقیم آن با سلولز است. به دنبال آن، چگالی ظاهری (BD) بیشترین بار عاملی را بر محور دوم (PC2) دارد و بیانگر سهم ویژگی‌های فیزیکی خاک در تبیین بخش باقی‌مانده واریانس داده‌هاست.

نتایج کلی PCA بیانگر آن است که بخش‌های سلولزی ماده آلی خاک بیش از سایر ترکیبات تحت تأثیر ویژگی‌های شیمیایی قرار دارند و تغییرات آن‌ها می‌تواند شاخص مناسبی

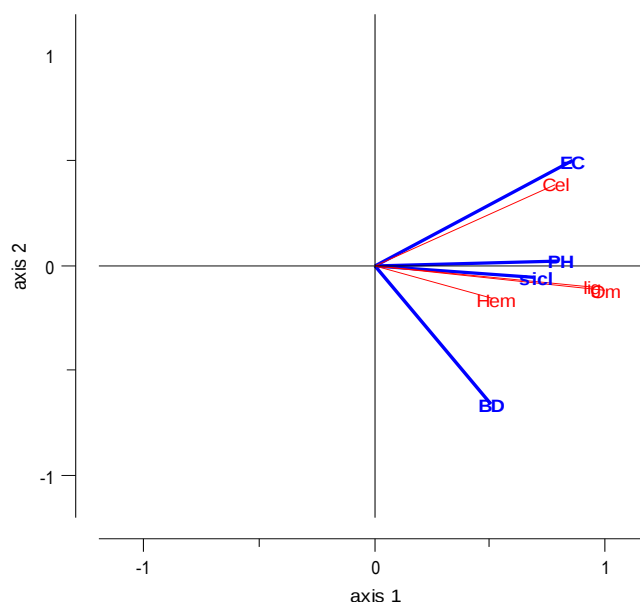
رابطه آن با SOM را برجسته می‌کند. لیگنین، یک پلیمر آروماتیک پیچیده، در مقایسه با سلولز و همی سلولز، در برابر تجزیه میکروبی مقاوم‌تر است که توضیح‌دهنده گردش کندتر آن در خاک است. این مقاومت باعث می‌شود لیگنین نقشی کلیدی در تثبیت SOM ایفا کند. برخی مطالعات نشان دادند که در طی توالی زمانی احیای مراتع تخریب‌شده، سهم کربن منشأ میکروبی در ترکیب ماده آلی خاک افزایش یافته، درحالی‌که سهم کربن منشأ گیاهی (مانند فنل‌های لیگنین) تقریباً ثابت یا با کاهش نسبی همراه بوده است. همچنین با افزایش سن مرتع پس از احیا، مقادیر هر دو گروه ترکیبات آلی گیاهی و میکروبی افزایش می‌یابند (یانگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). همبستگی مثبت و بالاتر بین لیگنین و SOM به توانایی آن در تشکیل کمپلکس‌های پایدار آلی-معدنی و مواد هیومیکی که به ذخیره طولانی مدت کربن در خاک کمک می‌کنند، مربوط است (لهمن و کلیر، ۲۰۱۵). ترکیبات مشتق‌شده از لیگنین همچنین به عنوان پیش‌ساز مواد هیومیکی عمل می‌کنند که یک جزء اصلی SOM پایدار است.

همبستگی‌های قوی بین SOM و محتوای سلولز، همی سلولز، و لیگنین اهمیت این ترکیبات را به عنوان عوامل اصلی پویایی SOM برجسته می‌کند. این رابطه نقش باقی‌مانده‌های گیاهی و ترکیب بیوشیمیایی آن‌ها در شکل‌گیری کیفیت و کمیت SOM را برجسته می‌سازد. از دیدگاه مدیریت مراتع، حفظ پوشش گیاهی و تنوع آن منجر به افزایش ورودی‌های سلولز، همی سلولز و لیگنین می‌شود که می‌تواند تجمع SOM و حاصلخیزی خاک را افزایش دهد.

نتایج کلی این پژوهش نشان داد که هدایت الکتریکی (EC) و درصد سیلت بیشترین همبستگی مثبت را با میزان ماده آلی خاک (SOM) دارند. این موضوع بیانگر نقش ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در تجمع و پایداری ماده آلی در مراتع احیاشده است. همچنین، ارتباط مثبت بین ترکیبات ساختمانی ماده آلی (سلولز و همی سلولز) با خصوصیات خاک، حاکی از بهبود شرایط فیزیکوشیمیایی و فراهم شدن بستر مناسب‌تر برای پایداری کربن آلی در این اراضی است. در مجموع، نتایج حاکی

دارد. آن‌ها نیز در مطالعه‌ای مشابه بر روی خاک‌های مرتعی استان کرمانشاه گزارش کردند که کربن آلی خاک با ذرات سیلت و رس در یک مؤلفه قرار می‌گیرد و افزایش سهم ریزدانه‌ها موجب تثبیت و پایداری بیشتر کربن آلی می‌شود.

برای بهبود کیفیت و پایداری کربن آلی در خاک‌های احیاشده باشد. دو مؤلفه نخست در مجموع ۹۹ درصد از کل واریانس داده‌ها را تبیین کردند (جدول ۴) که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در تفکیک متغیرهای مؤثر است. یافته‌های این پژوهش با نتایج گزارش شده توسط منصوری و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت



شکل (۳): رابطه بین ماده آلی خاک و پارامترهای محیطی

Figure (3): The relationship between soil organic matter and environmental parameters

جدول (۴): تغییرات مقدار ویژه و درصد تجمعی واریانس ایجاد شده توسط PCA

Table (4): Eigenvalue changes and cumulative percentage of variance generated by PCA

PC	مقدار ویژه	مقدار ویژه به درصد	درصد تجمعی مقدار ویژه
۱	۰/۵۵۸	۵۵/۸۳۹	۹۲/۵۲۶
۲	۰/۰۴۰	۵۹/۸۲۷	۹۹/۲۱۰

مشاهده شد و این امر بیانگر نقش مهم ساختار فیزیکی خاک در حفظ و پایداری ماده آلی است.

شیدایی کرکج و همکاران (۲۰۱۵) در مراتع آذربایجان شرقی نیز گزارش کردند که افزایش شوری (EC)، اسیدیته و چگالی ظاهری اثر منفی بر میزان ذخیره کربن آلی دارد، درحالی‌که افزایش درصد رس، سیلت و توان نگهداری رطوبت اثر مثبت بر آن می‌گذارد. نتایج پژوهش ما نیز نشان داد که هدایت الکتریکی در محدوده طبیعی (غیرشور) می‌تواند در حضور پوشش گیاهی احیاشده، با تسهیل فرایندهای بیوشیمیایی و افزایش پایداری بخش‌های سلولزی، موجب افزایش ذخیره کربن آلی خاک شود. در جمع‌بندی، نتایج این بخش تأکید

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی در مطالعه خیامیم و خادمی^۱ (۲۰۱۵) درباره توزیع مکانی ماده آلی در خاک‌های سطحی سه اقلیم استان اصفهان نشان داد که خاک‌ها تحت تأثیر چهار گروه اصلی از عوامل شامل اقلیم و بافت خاک، شوری، درصد گچ و آهک قرار دارند. مدل‌سازی رگرسیون چندمتغیره آن‌ها نیز تأیید کرد که اقلیم و بافت خاک نقش تعیین‌کننده‌ای در پیش‌بینی مقدار کربن آلی خاک دارند. یافته‌های پژوهش حاضر نیز با نتایج آن مطالعه هم‌خوان است، به گونه‌ای که همبستگی مثبت بین ماده آلی خاک و اجزای ریزدانه (به ویژه رس و سیلت)

داده است. همچنین بین دو عمق مورد بررسی، اختلاف معنی داری در مقادیر pH، هدایت الکتریکی (EC) و وزن مخصوص ظاهری مشاهده شد، به گونه ای که خاک زیرسطحی بر اثر افزایش ماده آلی، وزن مخصوص کمتری داشت. این موضوع نشانگر تأثیر غیرمستقیم ماده آلی بر بهبود تهویه و رشد ریشه است، درحالی که افزایش بیش از حد آن (بیش از حدود ۰/۸۶ درصد براساس روابط تجربی گزارش شده) می تواند منجر به تراکم نسبی خاک شود.

نتایج همبستگی میان پارامترهای فیزیکوشیمیایی و ترکیبات ساختمانی ماده آلی نشان داد که از میان متغیرهای بررسی شده، اسیدیته، هدایت الکتریکی، مجموع سیلت و رس، وزن مخصوص ظاهری، سلولز، همی سلولز و لیگنین رابطه ای معنی دار با میزان ماده آلی دارند. از میان این پارامترها، اسیدیته، سلولز، همی سلولز و لیگنین بیشترین همبستگی مثبت را نشان دادند. این یافته ها نشان می دهد که تغییر در ترکیبات ساختمانی ماده آلی، به ویژه اجزای سلولزی و همی سلولزی، شاخصی مناسب برای ارزیابی کیفیت خاک و پایداری کربن آلی است. افزایش میانگین ماده آلی در عمق زیرسطحی (۱۰-۳۰ سانتی متر) به میزان حدود ۳۴/۷۵ درصد نسبت به خاک سطحی، تأییدکننده اثر مثبت احیای پوشش گیاهی بر افزایش ذی توده، تجمع لاشبرگ و پایداری بیشتر کربن آلی در خاک است. هرچند فعالیت های میکروبی در این پژوهش مستقیماً اندازه گیری نشدند، می توان استنباط کرد که شرایط ایجاد شده بر اثر احیای مراتع، بستر زیستی مناسب تری برای پایداری ترکیبات آلی و کاهش سرعت تجزیه آن ها فراهم آورده است. فرایند تجزیه بقایای گیاهی شامل دو مرحله اصلی است: در مرحله نخست، ترکیبات محلول مانند سلولز و همی سلولز سریع تر تجزیه می شوند، درحالی که در مرحله دوم، ترکیبات دیرتجزیه تری چون لیگنین باقی می ماند و سبب تثبیت بلندمدت تر کربن در خاک می شوند. این نتایج، فرضیه اصلی پژوهش مبنی بر افزایش پایداری ماده آلی بر اثر احیای پوشش گیاهی را تأیید می کند.

به طور کلی، احیای مراتع با افزایش ورودی های آلی به خاک، بهبود ساختار و ارتقای ویژگی های فیزیکوشیمیایی آن،

می کند که در اکوسیستم های مرتعی، میزان و پایداری کربن آلی خاک تحت تأثیر سه گروه اصلی از عوامل قرار دارد: شرایط اقلیمی (دما و رطوبت)، ویژگی های زیستی (ترکیب پوشش گیاهی و ورود بقایای آلی)، و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک (بافت، ساختار، کانی شناسی و اسیدیته) که این الگو با یافته های پوستیان^۱ و همکاران (۱۹۹۷)، براهیم^۲ و همکاران (۲۰۱۱) و برنوکس^۳ و همکاران (۲۰۰۲) مطابقت دارد.

در مناطق نیمه خشک مانند دشت قهقون، که بازگشت بقایای گیاهی محدود و دما بالاست، نقش ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک در کنترل و پایداری ماده آلی بیشتر از سایر عوامل است؛ بنابراین احیای پوشش گیاهی از طریق افزایش ریزدانه ها، تعادل شیمیایی و تثبیت ترکیبات ساختمانی ماده آلی، می تواند به بهبود پایداری و ترسیب کربن در خاک های این مناطق منجر شود.

بحث و نتیجه گیری

کربن آلی به عنوان یکی از اجزای اصلی ماده آلی خاک، از طریق تأثیر بر پیوستگی و چسبندگی ذرات، نقش اساسی در بهبود ساختمان خاک دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که احیای مراتع بیابانی با کاشت گونه آتریپلکس در دشت قهقون، به دلیل افزایش پوشش گیاهی و بهبود شرایط رطوبتی خاک، موجب افزایش معنی دار میزان ماده آلی و ترکیبات مرتبط با آن در عمق های مختلف خاک شده است. مقایسه میان دو عمق نشان داد که غلظت ماده آلی خاک (کربن آلی) در عمق زیرسطحی (۱۰-۳۰ سانتی متر) نسبت به خاک سطحی (۰-۱۰ سانتی متر) افزایش معنی داری دارد. این تغییرات بیانگر انتقال و تجمع ترکیبات آلی در عمق بیشتر خاک و افزایش پایداری آن ها در نتیجه احیای پوشش گیاهی توسط گونه آتریپلکس است. افزایش کربن آلی خاک می تواند نشانگر کاهش نرخ تجزیه سریع ترکیبات آلی و بهبود ویژگی های فیزیکی خاک مانند نفوذپذیری، تخلخل و ظرفیت نگهداری آب باشد. این امر نشان می دهد که احیای مراتع با تثبیت بیشتر ترکیبات آلی و کاهش اثرات تخریب ساختمان خاک، کیفیت فیزیکی خاک را ارتقا

1. Paustian
2. Brahim
3. Bernoux

روش‌های متنوع احیا، افزون بر کاشت آترپلکس، برای افزایش پایداری و ترسیب کربن استفاده شود تا سهم این مراتع در کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفری و بهبود پایداری خاک تقویت گردد.

نقش مهمی در بازسازی عملکرد اکوسیستم‌های تخریب‌شده و ترسیب کربن ایفا می‌کند. با توجه به تغییرات اقلیمی و اهمیت ذخیره کربن در خاک‌های خشک و نیمه‌خشک، پیشنهاد می‌شود اثر مدیریت احیا بر پایداری ترکیبات ماده آلی و ذخیره کربن در سایر رویشگاه‌های مرتعی و جنگلی مورد بررسی قرار گیرد و از

منابع

- Adamczyk, B., Heinonsalo, J., & Simon, J. (2020). Mechanisms of carbon sequestration in highly organic ecosystems – importance of chemical ecology. *ChemistryOpen*, 9(4), 464–469. <https://doi.org/10.1002/open.202000015>
- Ahmadian, M., Pakparvar, M., & Ashourloo, D. (2010). Evaluation of soil salinity changes using digital processing of Landsat satellite data in the plain (Hamedan Province). *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 24(2), 179–191. (In Persian).
- Amundson, R., & Biardeau, L. (2018). Opinion: Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(46), 11652–11656. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115>
- Béguin, P. (1990). Molecular biology of cellulose degradation. *Annual Review of Microbiology*, 44, 219–248. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.44.100190.001251>
- Bernoux, M., Carvalho, M. C. S., Volkoff, B., & Cerri, C. C. (2002). Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), 888–896. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.8880>
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk density. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods* (pp. 363–376). Madison, WI: American Society of Agronomy.
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Brahim, N., Blavet, D., Gallali, T., & Bernoux, M. (2011). Application of structural equation modeling for assessing relationships between organic carbon and soil properties in a semiarid Mediterranean region. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 8(2), 305–320. <https://doi.org/10.1007/BF03326218>
- Cannell, M. G. R. (2003). Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK. *Biomass and Bioenergy*, 24(2), 97–116. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00103-4)
- Ćwieląg-Piasecka, I., Medyńska-Juraszek, A., Winiewska, K., Adamczuk, A., & Słowik, T. (2023). Soil organic matter composition and pH as factors affecting retention of carbaryl, carbofuran and metolachlor in soil. *Molecules*, 28(14): 5552. <https://doi.org/10.3390/molecules28145552>
- Dias, T., Oakley, S., Alarcon-Gutierrez, E., Ziarelli, F., Trindade, H., Martins-Loução, M. A., Sheppard, L., Ostle, N., & Cruz, C. (2013). N-driven changes in a plant community affect leaf-litter traits and may delay organic matter decomposition in a Mediterranean maquis. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.027>
- Doro, K. O., Stoikopoulos, N. P., Bank, C. G., & Ferris, F. G. (2022). Self-potential time series reveal emergent behavior in soil organic matter dynamics. *Scientific Reports*, 12(1), 13531. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17914-5>
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods* (pp. 383–411). Madison, WI: American Society of Agronomy.
- GhasemiNejad Raeini, M., & Sadeghi, H. (2017). The evaluation of carbon sequestration at plant's organs and soil characteristics in understory of *Zygophyllum atriplicoides* and *Gymnocarpus decander* (Case study: Saleh-Abad, Hormozgan). *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 24(4), 699–710. (In Persian).
- Gilmullina, A., Rumpel, C., Klumpp, K., & Chabbi, A. (2021). Do grassland management practices affect soil lignin chemistry by changing the composition of plant-derived organic matter input? *Plant and Soil*, 469(1), 443–455. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05156-9>
- Huang, W., Hammel, K. E., Hao, J., Thompson, A., Timokhin, V. I., & Hall, S. J. (2019). Enrichment of lignin-derived carbon in mineral-associated soil organic matter. *Environmental Science & Technology*, 53(13), 7522–7531. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01724>
- Huang, Q., Wang, B., Shen, J., Xu, F., Li, N., Jia, P., Jia, Y., An, S., Amoah, I. D., & Huang, Y. (2024). Shifts in C-degradation genes and microbial metabolic activity with vegetation types affected the surface soil organic carbon pool. *Soil Biology and Biochemistry*, 192, 109371. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109371>
- Hui, D., Deng, Q., Tian, H., & Luo, Y. (2015). Climate change and carbon sequestration in forest

- ecosystems. In *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 555–594). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14409-2_13
19. Khayamim, F., & Khademi, H. (2015). Spatial distribution of organic matter in surface soils in three climates of Isfahan province. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 29(1), 27–38. (In Persian).
 20. Knorr, W., Prentice, I. C., House, J. I., & Holland, E. A. (2005). Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 433(7023), 298–301. <https://doi.org/10.1038/nature03226>
 21. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
 22. Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
 23. Li, L. B., Wang, X. D., Zhang, P., Zhu, Y. Q., Ren, M. Q., & Cai, D. W. (2020). Dynamics of organic matter of soil profiles with different vegetation conditions from the Chinese Loess Plateau: $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ approaches. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 570, No. 2, p. 022008). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/570/2/022008>
 24. Mansouri, A., Karimi, A. R., Parvizi, Y., & Emami, H. (2015). Studying the effect of temperature and precipitation on soil organic carbon in part of the rangelands of Kermanshah province. *Proceedings of the Second National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources*, Tehran, Iran: Mehr Arvand Higher Education Institute, Environmentalists Extension Group and Iranian Nature Protection Association. (In Persian).
 25. Merriman, L. S., Moore, T. L. C., Wang, J. W., Osmond, D. L., Al-Rubaei, A. M., Smolek, A. P., & Hunt, W. F. (2017). Evaluation of factors affecting soil carbon sequestration services of stormwater wet retention ponds in varying climate zones. *Science of the Total Environment*, 583, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.040>
 26. Norderhaug, A., Clemmensen, K. E., Kardol, P., & Thorhallsdottir, A. G. (2023). Carbon sequestration potential and the multiple functions of Nordic grasslands. *Climatic Change*, 176, 55. <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03537-w>
 27. Oji, A., Landi, A., & Hojjati, S. (2018). Carbon sequestration and estimation of its economic value in a part of protected and grazed rangelands of Khuzestan province. *Water and Soil*, 32(2): 375–386. <https://doi.org/20.1001.1.20084757.1397.32.2.1.7>. (In Persian)
 28. Paustian, K., Levine, E., Post, W. M., & Ryzhova, I. M. (1997). The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale. *Geoderma*, 79(1–4), 227–260. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00043-8)
 29. Piccolo, A. (1996). Humus and soil conservation. In *Humic substances in terrestrial ecosystems* (pp. 225–264). Elsevier.
 30. Raudina, T. V., Smirnov, S. V., & Istigechev, G. I. (2023). Photochemical transformation of dissolved organic matter and behavior of metals in the waters of the southern taiga bog complex, Western Siberia. **Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 334(9), 182–193. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4115>
 31. Razavi, S. A., Kamkar, B., & Sadeghipour, H. R. (2015). Decomposition of five crop residues using four species of soil and woody fungi. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 4(4), 331–346. (In Persian).
 32. Saiz, G., Bird, M., Wurster, C., Quesada, C. A., Ascough, P., Domingues, T., Schrod, F., Schwarz, M., Feldpausch, T. R., Veenendaal, E., & Djabbletey, G. (2015). The influence of C3 and C4 vegetation on soil organic matter dynamics in contrasting semi-natural tropical ecosystems. *Biogeosciences*, 12(16), 5041–5059. <https://doi.org/10.5194/bg-12-5041-2015>
 33. Serk, H., Nilsson, M. B., Figueira, J., Krüger, J. P., Leifeld, J., Alewell, C., & Schleucher, J. (2022). Organochemical characterization of peat reveals decomposition of specific hemicellulose structures as the main cause of organic matter loss in the acrotelm. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 17410–17419. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03513>
 34. Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49–56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
 35. Silva, L. J. R., Souza, T., Laurindo, L. K., Nascimento, G. S., Lucena, E. O., & Freitas, H. (2022). Aboveground biomass, carbon sequestration, and yield of *Pyrus pyrifolia* under the management of organic residues in the subtropical ecosystem of Southern Brazil. *Agronomy*, 12(2), 231. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020231>
 36. Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241(2), 155–176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
 37. Srinivasarao, Ch., Venkateswarlu, B., Lal, R., Singh, A. K., Kundu, S., Vittal, D. G., Balaguravaiah, M., Vijaya Sh., B., Ravindra, Ch., Prasadbabu, T., & Yellamanda, R. (2012). Soil carbon sequestration and agronomic productivity of an Alfisol for a groundnut-based system in a semiarid environment in southern India. *European Journal of Agronomy*, 43, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.05.001>
 38. Sokol, N. W., & Bradford, M. A. (2019). Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input. *Nature*

- Geoscience*, 12(1), 46–53. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0258-6>
39. Schulte, E. E., & Hopkins, B. G. (1996). Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition. p. 21–31. In: Magdoff, F. R., et al. (eds.) *Soil organic matter: Analysis and interpretation*. SSSA *Special Publication* No. 46. SSSA, Madison, WI.
 40. Sheidai Karkaj, E., Sepehri, A., Barani, H., & Mo'tamedi, J. (2017). Relationship of soil organic carbon reserve with some soil properties in East Azerbaijan rangelands. *Rangeland*, 1(1)(2), 125–138. <https://doi.org/20.1001.1.20080891.1396.11.2.1.0> (In Persian)
 41. Tavallaei, S., Harirchi, Sh., Etemadifar, Z., & Taherzadeh, M. (2022). Lignocellulosic biomass: renewable resources for bioethanol production. *Biological Journal of Microorganism*, 11(43), 71–95. (In Persian).
 42. Teng, J., Xiang, T., Huang, Z., Wu, J., Jiang, P., Meng, C., Li, Y., & Fuhrmann, J. J. (2015). Spatial distribution and variability of carbon storage in different sympodial bamboo species in China. *Journal of Environmental Management*, 168, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.034>
 43. Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods* (pp. 475–490). Madison, WI: American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.22108/bjm.2022.131065.1425>
 44. Weltzin, J. F., Loik, M. E., Schwinning, S., Williams, D. G., Fay, P. A., Haddad, B. M., Harte, J., Huxman, T. E., Knapp, A. K., Lin, G. H., Pockman, W. T., Shaw, M. R., Small, E. E., Smith, S. D., Tissue, D. T., & Zak, J. C. (2003). Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 53(10), 941–952. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0941:ATROTE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0941:ATROTE]2.0.CO;2)
 45. Xie, R., & Wu, X. (2016). Effects of grazing intensity on soil organic carbon of rangelands in Xilin Gol League, Inner Mongolia, China. *Journal of Geographical Sciences*, 26(11), 1550–1560. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1343-7>
 46. Yang, Y., Dou, Y., Wang, B., Wang, Y., Liang, C., An, S., & Kuzyakov, Y. (2022). Increasing contribution of microbial residues to soil organic carbon in grassland restoration chronosequence. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.10868847>
 47. Yimer, F., Ledin, S., & Abdelkadir, A. (2006). Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia. *Geoderma*, 1135(1–2), 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.01.005>

Assessing Soil Organic Matter Composition and Key Influencing Factors in a Reclaimed Rangeland, Ghahavand Plain

Maryam Hamidi,¹ Behnaz Attaeian,^{2*} Lima Tayebi³

Received: 11/05/2025

Accepted: 10/11/2025

Extended Abstract

Introduction: Increasing the soil organic carbon (SOC) stock is critically important for mitigating climate change. Soil carbon sequestration is governed by complex interactions between the atmosphere, soil properties, tree species, the chemical composition of litter, and environmental management. Management practices, particularly grazing and enclosure, can significantly alter the chemical composition of SOC. For instance, grazing pressure has been shown to increase the proportion of more readily degradable carbon compounds, such as cellulose. Despite the recognized significance of carbon sequestration in rangeland ecosystems, the chemical composition of soil organic matter (SOM) and its relationship with soil physicochemical properties remain poorly studied.

The rangelands in the Qahavand Plain have experienced severe degradation due to unsustainable exploitation and overgrazing. Compounding this issue, recurrent droughts have accelerated soil erosion and desertification in the region. In response, restoration initiatives were implemented in degraded rangelands using the species *Atriplex canenses* and *Nitraria schoberi*, followed by enclosure management.

Materials and Methods: This study was conducted to investigate changes in organic carbon storage and its relationship with soil organic matter components—specifically cellulose, hemicellulose, and lignin—in the surface and subsurface soils of the restored rangelands in the Qahavand Plain. Sampling was carried out in 2016. A total of 60 soil samples were collected systematically and randomly from two depth intervals: 0-10 cm (surface soil) and 10-30 cm (sub-soil). Various physicochemical properties of these samples were measured.

Prior to statistical analysis, the data were tested for normality using the Kolmogorov-Smirnov test. Variables that violated the assumption of normality were normalized using appropriate transformations: inversion for cellulose, cosine for clay and lignin, and square root for silt and hemicellulose percentages.

Subsequently, a t-test (Proc ttest procedure in SAS v.9.4) was employed to identify significant differences in organic carbon content and other soil properties between the surface and sub-soil layers. Finally, correlation analysis and Principal Component Analysis (PCA) were performed using R and Brodgar software to examine the relationships between organic matter compounds and stored organic carbon.

Results and Discussion: The results demonstrated that soil depth had a significant effect on all measured physical and chemical parameters. Notably, the concentrations of organic matter, cellulose, and lignin were significantly higher in the subsurface soil (10-30 cm) compared to the surface layer (0-10 cm), with increases of 34.75%, 79.12%, and 67.57%, respectively.

Several parameters, including pH, electrical conductivity (EC), bulk density, cellulose, hemicellulose, and lignin, were strongly correlated with soil organic matter (SOM) across both depths. Among these, lignin exhibited the strongest positive correlation ($r = 0.84$), followed by pH ($r = 0.78$), hemicellulose ($r = 0.72$), and cellulose ($r = 0.71$).

The 34.75% increase in the average SOM content in the subsurface soil represents a significant change, underscoring the positive impact of vegetation restoration. This accumulation is likely driven by increased aerial biomass and litter input from the established *Atriplex canenses* and *Nitraria schoberi*, a finding that supports our initial hypothesis.

1. Graduate MSc., Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. Email: ma.ha9610@yahoo.com

2. Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. (Corresponding author); Email: b.attaeian@malayeru.ac.ir

3. Assistant Professor, Department of Fisheries Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. Email: L.tayebi@malayeru.ac.ir

The significant relationships observed between SOM and the physicochemical parameters reinforce the central role of organic matter in soil ecosystems. SOM serves as the primary source of carbon and energy for decomposer and heterotrophic microorganisms. Consequently, any reduction in organic matter input can disrupt microbial activity and impede the decomposition process, creating a feedback loop that further limits soil organic carbon sequestration.

Conclusions: In conclusion, this study demonstrates that rangeland rehabilitation in the Qahavand Plain plays a crucial role in enhancing soil organic carbon (SOC) stability and mitigating desertification. The observed relationships between organic matter composition and soil properties, particularly the significant accumulation of the more recalcitrant lignin fraction in the subsurface soil, support this finding. The decomposition process of plant litter typically occurs in two stages: an initial, rapid phase where soluble compounds like cellulose and hemicellulose are broken down, followed by a slower phase governed by the decay of lignin and nitrogen mineralization. Our results, showing a strong correlation between lignin and stable SOC, align with this model and confirm the success of the restoration efforts in building a more stable carbon pool.

Given the context of ongoing climate change, it is recommended that the effects of vegetation restoration on SOC storage be further investigated across other rangeland and forest ecosystems. Furthermore, to enhance carbon sequestration potential and ecosystem resilience in degraded areas like the Qahavand Plain, future restoration programs should consider incorporating alternative native species alongside *Atriplex*.

Keywords: Soil Organic Matter, Carbon Sequestration, SOC Stability, Soil Quality, Desertification.