



سینتیک معدنی شدن کربن آلی و تغییرات آن در سه نوع خاک تیمار شده با بقایای گیاهی مختلف (مطالعه موردی: خاک‌های اطراف دریاچه ارومیه)

جواد عبدالهی قره‌کند^۱، *ابراهیم سپهر^۲، ولی فیضی اصل^۳، میرحسن رسولی صدقیانی^۴ و عباس صمدی^۴

^۱ دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، آستادیار مؤسسه تحقیقات

کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران، ^۴استاد گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳

چکیده

سابقه و هدف: پویایی کربن خاک پس از برگرداندن بقایای گیاهی با ویژگی‌های کیفی متفاوت در خاک‌های مختلف، به‌طور متفاوت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. یکی از راه‌های صحیح و عملی برای بهبود ماده آلی خاک، مدیریت صحیح استفاده از بقایای گیاهی محصولات کشاورزی است، به گونه‌ای که با برگرداندن این بقایا به خاک، متوسط سالانه ورودی کربن به خاک افزایش یافته و بخشی از کربن خروجی حاصل از تجزیه میکروبی جبران می‌گردد. از این‌رو، هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر بقایای گیاهی مختلف بر سینتیک معدنی شدن کربن و میزان کربن آلی در خاک‌های مختلف اطراف دریاچه ارومیه بود.

مواد و روش‌ها: این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با فاکتورهای نوع خاک (آهکی، سدیمی و شور- سدیمی) و بقایای گیاهی (گندم، ذرت، آفتابگردان، ماشک و شبدر) به‌میزان ۲ درصد، به‌همراه تیمار شاهد (خاک بدون بقایا) در سه تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی به‌مدت ۱۰ هفته (۷۰ روز) در دمای 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد و با رطوبت ۵۰ درصد ظرفیت زراعی انکوباسیون شدند. میزان خروج CO_2 به‌صورت منظم هفته‌ای یک‌بار به‌مدت ۱۰ هفته اندازه‌گیری شد و سپس پارامترهای معادله سینتیکی معدنی شدن کربن (شاخص C_0 (ذخیره کل کربن قابل تجزیه) و kC_0 (سرعت بالقوه اولیه معدنی شدن کربن)) محاسبه شد. در نهایت، درصد کربن آلی خاک‌ها بلافاصله بعد از اتمام آزمایش در تمامی تیمارها اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج تجزیه واریانس نشان داد، اثر نوع خاک و بقایای گیاهی بر معدنی شدن کربن در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود. بیش‌ترین خروج CO_2 در هفته اول انکوباسیون اتفاق افتاد و سپس روند کاهشی را تا انتهای زمان انکوباسیون نشان داد. بیش‌ترین مقادیر تجمعی کربن معدنی شده، مربوط به بقایای ماشک و شبدر در خاک آهکی بود. هم‌چنین، همبستگی مثبت و معنی‌داری بین غلظت نیتروژن بقایا و کربن معدنی شده و همبستگی منفی بین کربن معدنی شده با نسبت C/N ، $Lignin/N$ ، $Cellulose/N$ ، $Hemicellulose/N$ ، $Cellulose+N$ و N/P مشاهده شد. شاخص C_0K نسبت به C_0 ، میزان معدنی شدن کربن را در خاک‌های مورد بررسی به‌خوبی توجیه نمود.

* مسئول مکاتبه: e.sepahr@urmia.ac.ir

با افزودن بقایای گیاهی به خاک، مقدار کربن آلی در هر سه نوع خاک به صورت گندم < ذرت > آفتابگردان < ماشک > شبدر افزایش یافت.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی بالا بودن کربن معدنی تجمعی در خاک آهکی در بین سه نوع خاک مورد مطالعه، نشان از تجزیه بیشتر بقایا در این خاک آهکی می‌باشد. بنابراین باید سالیانه با بازگشت بیشتر بقایا به این نوع خاک‌ها (خاک‌های آهکی) بخشی از کربن خروجی حاصل از تجزیه میکروبی جبران گردد. با توجه به این‌که هدف اصلی از کاربرد مواد آلی در خاک‌ها، افزایش ماده آلی خاک می‌باشد، نتایج این پژوهش نشان داد که بیش‌ترین تأثیر را در افزایش کربن آلی در هر سه خاک (آهکی، سدیمی و شور-سدیمی) بقایای گندم و سپس ذرت با نسبت C/N بالا و کم‌ترین نقش را شبدر و ماشک با کم‌ترین C/N داشتند. این موضوع نشان‌دهنده این مطلب است که افزایش مقدار کربن آلی خاک با افزودن بقایای گیاهی بیش‌تر به کیفیت بقایای گیاهی (C/N, Lignin/N, Cellulose/N, Hemicellulose/N, Cellulose+Lignin/N و N/P) بستگی دارد. بنابراین برای ترسیب کربن در این خاک‌ها استفاده از بقایای گیاهی با C/N بالا توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بقایای گیاهی، خاک شور-سدیمی، معدنی‌شدن کربن، نسبت C/N, CO₂

مقدمه

کربن و انرژی، مورد استفاده جمعیت میکروب‌های هتروتروف خاک قرار گرفته و در نتیجه تنفس میکروبی (تولید CO₂) خاک را به‌عنوان یک شاخص فعالیت میکروبی افزایش دهد. بدین‌ترتیب، تنفس میکروبی در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی نسبت به خاکی که بقایای گیاهی به آن افزوده نشده است، افزایش معنی‌داری نشان خواهد داد (۲۰). شرایط آب و هوایی، شرایط خاکی، ترکیب شیمیایی بقایای گیاهی و همچنین قابل‌دسترس بودن مواد آلی از جمله عواملی هستند که بر دینامیک کربن آلی و سرعت تجزیه آن اثر می‌گذارند (۵). سرعت تجزیه بقایای گیاهی مختلف در خاک، به‌دلیل اختلاف در کیفیت شیمیایی بقایای گیاهی (پروتئین، سلولز، لیگنین و همی‌سلولز، نسبت C/N) متفاوت است (۱۶ و ۲۵). لئو و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعات خود بیان کردند، بقایای گیاهی که کیفیت شیمیایی بالا (C/N پایین) دارند، نسبت به بقایایی با کیفیت شیمیایی پایین، سریع‌تر مورد تجزیه میکروبی قرار می‌گیرند. با

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان پایین بودن مقدار ماده آلی آن‌ها است (۲۲). در بیش از ۶۰ درصد از زمین‌های کشاورزی کشور، مقدار ماده آلی اغلب کم‌تر از یک درصد می‌باشد. یکی از راه‌های صحیح و عملی برای بهبود ماده آلی خاک، مدیریت استفاده صحیح از بقایای گیاهی محصولات کشاورزی است، به‌گونه‌ای که با برگرداندن بقایای گیاهی به خاک، متوسط سالانه ورودی کربن به خاک افزایش یافته و بخشی از کربن خروجی حاصل از تجزیه میکروبی جبران می‌گردد (۱۰ و ۱۶). در بعضی از مناطق، به‌دلیل عدم توجه به اهمیت بقایای باقی‌مانده از محصولات قبلی و نقش آن در بهبود خواص فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک، این بقایا در مزارع به آتش کشیده می‌شوند. بدین‌ترتیب از برگشت مقادیر زیادی از ماده آلی به خاک جلوگیری به‌عمل می‌آید (۱۲). به‌طور کلی، بقایای گیاهی می‌توانند به‌عنوان منبع

علاوه بر کیفیت شیمیایی بقایای گیاهی که تأثیر زیادی بر دینامیک کربن در خاک دارند، عوامل محیطی مانند دما، رطوبت و نوع خاک نیز بر این فرایند تأثیرگذار هستند (۸). از بین عوامل نام‌برده شده، تأثیر نوع خاک کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. خاک‌هایی با شن بالا، CEC بالا و رس پایین، فرایند معدنی‌شدن کربن را تحریک می‌کنند (۱۳). به‌طور معمول، مقادیر بالای رس در خاک به‌طور موقتی فعالیت‌های میکروبی را به‌خاطر جذب محصولات حاصل از تجزیه و هم‌چنین جذب بقایای گیاهی (سویسترا) روی ذرات معدنی و مخلوط کردن آن‌ها با خاکدانه‌ها، محدود می‌کند (۱۳ و ۳۰). ویژگی‌های دیگر خاک مانند شوری و سدیمی بودن نیز ممکن است، تجزیه بقایای آلی و معدنی‌شدن کربن را تحت تأثیر قرار دهند. پژوهش‌های ریتز و هاینس (۲۰۰۳) روی تأثیر شوری بر تجزیه ماده آلی، بیانگر کاهش خروج گاز CO₂ از خاک (کاهش تجزیه ماده آلی)، کاهش فعالیت‌های آنزیمی و کاهش بیوماس میکروبی در خاک‌های شور می‌باشد. تریپاتای و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که شوری، موجب کاهش تنفس میکروبی هنگام تجزیه گلوکز نشاندار و تجزیه بقایای گیاه ذرت شد. سیتیا و همکاران (۲۰۱۱) متوجه شدند، با افزایش EC و SAR خاک، میزان خروج CO₂ (تنفس میکروبی) در خاک‌های شور-سدیمی تیمارشده با بقایای کاه و کلش گندم به‌شدت کاهش می‌یابد. نتایج آن‌ها نشان داد که شوری (EC) عامل اصلی این کاهش تنفس میکروبی بود که دلیل آن را به کاهش فعالیت میکروبی از طریق سمیت یونی و اثرات اسمزی یونها در خاک‌های شور و سدیمی مربوط دانستند. برای درک بیشتر مکانیسم‌های درگیر در اثرات نوع خاک بر روند تجزیه ماده آلی، آزمایش‌های زیادی باید انجام گیرد. با مشخص شدن روند تجزیه ماده آلی در انواع خاک‌ها می‌توان نسبت

بازگشت بقایای گیاهی به خاک، مقدار کربن آلی خاک افزایش می‌یابد که این افزایش بیش‌تر به کیفیت بقایای گیاهی (C/N) بستگی دارد. بقایای گیاهی با C/N بالا و سرعت تجزیه کم‌تر مانند بقایای ذرت و گندم، نقش بیش‌تری را در خصوص افزایش مقدار کربن آلی خاک داشته‌اند، چرا که در این شرایط شدت تجزیه کاهش می‌یابد که نتیجه آن تشکیل هوموس با پایداری بیش‌تر و نیز آزادسازی کم‌تر CO₂ به اتمسفر می‌باشد (۹). رئیس‌ی و آقابابایی (۲۰۱۱) گزارش کردند که برازش مدل یک‌جزئی (معادله سینتیکی مرتبه اول) $C_m = C_0(1 - e^{-kt})$ بر داده‌های معدنی‌شدن کربن نشان می‌دهد که در تیمارهای انگور، ذرت و یونجه که پسماندهای آن‌ها دارای نسبت C/N پایین‌تری هستند، نسبت به تیمارهای گردو و بادام که پسماندهای آن‌ها دارای نسبت C/N بیش‌تری بوده‌اند، ضریب ثابت تجزیه کربن (k) بزرگ‌تری دارند. در واقع پایین بودن نسبت C/N، موجب افزایش سرعت معدنی‌شدن کربن در واحد زمان شده است. هم‌چنین در این مطالعه، در همه تیمارها ضریب همبستگی معادله سینتیکی مرتبه اول بسیار بالا بوده و خطای استاندارد نیز در حد قابل‌قبول بود. ساویوزی و همکاران (۲۰۱۴) استفاده از این مدل را به‌دلیل انطباق با شرایط واقعی و توجیه پارامترهای آن، برای تخمین میزان دی‌اکسیدکربن آزاد شده از خاک توصیه کردند. پاسکووال و همکاران (۱۹۹۸) گزارش کرده‌اند که شاخص KC₀ (مشتق شده از معادله سینتیکی مرتبه اول) یک شاخص مفید و حساس برای درک کیفیت تجزیه‌ای بقایای آلی اضافه شده (بقایای گیاهی با سرعت تجزیه متفاوت) به خاک‌های مناطق خشک است، زیرا این شاخص هم اثرات سرعت و هم جنبه‌های ذخیره‌ای را نشان می‌دهد. از این‌رو بهترین شاخص برای مقایسه کیفیت بقایای گیاهی است.

نسبت جذب سدیم (SAR) در عصاره اشباع خاک ($SAR = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2]^{0.5}$)، نیتروژن کل با استفاده از روش کج‌لدال، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با استفاده از روش اشباع با استات سدیم، شستشوی املاح اضافی با الکل و جایگزینی توسط استات آمونیوم، درصد اشباع به روش وزنی، فسفر قابل جذب با عصاره‌گیر اولسن، پتاسیم با عصاره‌گیر استات آمونیوم در سه تکرار اندازه‌گیری شدند (۲۹).

تهیه و تجزیه بقایای گیاهی: پنج نوع بقایای گیاهی شامل کاه و کلش گندم (*Triticum aestivum* L.)، ساقه ذرت (*Zea mays* L.)، ساقه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)، ماشک گل‌خوشه‌ای (*Vicia villosa* L.) و شبدر سفید (*Trifolium repens* L.) در زمان رسیدگی فیزیولوژیک برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های گیاهی پس از خشک شدن در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت، آسیاب شده و از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شدند تا اندازه همگنی حاصل شود. مقدار خاکستر نمونه‌های گیاهی به روش سوزاندن در کوره (۲۴)، کربن آلی به روش اکسیداسیون مرطوب در مجاورت بیکرومات پتاسیم و اسید سولفوریک غلیظ (۱۷)، نیتروژن کل پس از هضم به روش کج‌لدال (۶)، غلظت فسفر در بقایا با روش مولبدات وانادات (۱۴) در سه تکرار اندازه‌گیری شد. مقدار ترکیبات قابل حل در آب (WSC) نمونه‌های گیاهی به وسیله تیمار با آب گرم اندازه‌گیری شد (۱۱). برای تعیین همی سلولز، سلولز و لیگنین بقایا از روش سه‌مرحله‌ای وان سوئیست و همکاران (۱۹۹۱) استفاده شد. در این روش، در سه گام متوالی با افزودن دترجنت خنثی (ND)، دترجنت اسیدی (AD) و سپس پرمنگنات پتاسیم به ترتیب مقادیر همی سلولز، سلولز و لیگنین به روش وزنی اندازه‌گیری شد.

به مدیریت صحیح ماده آلی در این خاک‌ها و همچنین اصلاح خاک‌های غیرنرمال (شور، سدیمی و شور-سدیمی) از طریق افزودن بقایای گیاهی اقدام نمود.

با توجه به این‌که روند معدنی‌شدن کربن در خاک‌های مختلف اطراف دریاچه ارومیه بعد از افزودن بقایای گیاهی با کیفیت‌های متفاوت، اطلاعات کافی در دسترس نیست و با توجه به این‌که برگرداندن بقایای گیاهی به خاک‌های مسأله‌دار (خاک‌های شور، سدیمی و شور-سدیمی) اطراف دریاچه ارومیه می‌تواند موجب تعدیل اثرات نامطلوب این خاک‌ها بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌ها و رشد محصول بعدی گردد. از این‌رو در پژوهش حاضر روند معدنی‌شدن کربن و تغییرات کربن آلی در سه نوع خاک (آهکی، سدیمی و شور-سدیمی) بعد از افزودن بقایای گیاهی گندم، ذرت، آفتابگردان، شبدر و ماشک با فرض ارتباط تجزیه‌پذیری بقایای گیاهی با کیفیت شیمیایی آن‌ها بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تجزیه خاک: در این مطالعه، با بررسی نقشه‌های خاک، سه نمونه خاک از لایه سطحی (عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری) شامل خاک آهکی، خاک سدیمی و خاک شور-سدیمی با بافت یکسان (لوم شنی) از اراضی دیم اطراف دریاچه ارومیه (۳۷ درجه و ۳۵ دقیقه شمالی عرض جغرافیایی و ۴۵ درجه و ۲۶ دقیقه شرقی طول جغرافیایی) تهیه و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه‌های خاک هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراژ با سود، کربن آلی به روش اکسایش تر، pH در عصاره ۱:۵ خاک: کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار، EC در عصاره اشباع خاک،

تجزیه‌های آماری: نمودارها و پارامترهای معادله سینتیکی معدنی‌شدن کربن (معادله سینتیکی مرتبه اول) با استفاده از نرم‌افزار CurveExpert 2.03 محاسبه شد. برای محاسبه آماری و تجزیه واریانس داده‌ها از نرم‌افزار آماری GenStat14 و همچنین از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد برای مقایسه میانگین داده‌ها و از نرم‌افزار Excel برای مرتب کردن داده‌ها و رسم نمودارها استفاده گردید.

نتایج و بحث

مقایسه خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه: ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. تمامی خاک‌ها دارای بافت لوم شنی (Sandy loam) هستند و از لحاظ میزان شن، رس و سیلت اختلاف معنی‌داری با هم ندارند (جدول ۱). pH خاک سدیمی (۸/۵۱) نسبت به خاک آهکی (۷/۶۵) و شور-سدیمی (۷/۳۶) بالاتر می‌باشد. بیش‌ترین میزان EC مربوط به خاک شور می‌باشد ولی بین دو خاک سدیمی و آهکی از لحاظ EC اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و هر دو خاک در یک کلاس آماری مشترک (b) هستند (جدول ۱). خاک آهکی بیش‌ترین مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و کربنات کلسیم معادل (CCE) در بین خاک‌های مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. بیش‌ترین مقدار کربن آلی و نیتروژن کل مربوط به خاک سدیمی بود (جدول ۱).

آزمایش انکوباسیونی: یک آزمایش انکوباسیونی به صورت طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل، شامل دو فاکتور نوع خاک در سه سطح (آهکی، سدیمی و شور-سدیمی) و بقایای گیاهی در شش سطح (کاه گندم، ساقه ذرت، ساقه آفتابگردان، ماشک، شبدر و بدون بقایای گیاهی) و با سه تکرار (جمعاً ۵۴ تیمار) انجام شد. به منظور اندازه‌گیری کربن معدنی شده به ۱۰۰ گرم از نمونه‌های خاک هوا خشک شده، به میزان ۲ درصد از هر یک از بقایای گیاهی افزوده و در ظروف پلاستیکی یک لیتری ریخته شدند. رطوبت نمونه‌های خاک پس از اختلاط با بقایای گیاهی در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی تنظیم شد (۱۹). نمونه‌ها به مدت ۱۰ هفته در دمای 25 ± 1 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سرعت تنفس (دی‌اکسیدکربن آزاد شده) به صورت منظم هفته‌ای یک‌بار به مدت ۱۰ هفته با روش تیتراسیون برگشتی با سود (NaOH) باقی‌مانده اندازه‌گیری شد (۳). پس از محاسبه دی‌اکسیدکربن آزاد شده در هر مرحله و ترسیم آن به صورت تجمعی، مقادیر پتانسیل معدنی شدن کربن (C_0) و ثابت سینتیکی مرتبه اول (k) به عنوان پارامترهای معادله سینتیکی معدنی‌شدن کربن با استفاده از تابع سینتیک مرتبه اول محاسبه شد (رابطه ۱).

$$C_t = C_0 (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

که در آن، C_t کربن معدنی‌شده در زمان t ، C_0 پتانسیل معدنی‌شدن کربن (پتانسیل کربن قابل تجزیه) و K ضریب ثابت واکنش تجزیه کربن می‌باشد.

در نهایت، درصد کربن آلی خاک‌ها بلافاصله بعد از اتمام آزمایش روی تمامی تیمارها اندازه‌گیری شد.

جدول ۱ - مقایسه میانگین خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در این آزمایش (n=3).

Table 1. Mean comparison of physical and chemical characteristics of the studied soils (n=3).

کربنات کلسیم معادل CCE ^e	کربن آلی OC ^d	نیترژن کل Total N	نسبت جذب سدیم SAR ^c (mmol/l) ^{0.5}	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC ^b (cmol _e kg ⁻¹)	هدایت الکتریکی EC ^e (dS m ⁻¹)	pH	بافت Texture	نسبت			نوع خاک Soil type
								سیلت Silt	رس Clay	شن Sand	
			%			(g kg ⁻¹)					
29.27 ^a	1.58 ^{ab}	0.127 ^b	1.01 ^b	27.31 ^a	1.14 ^b	7.65 ^b	لوم شنی Sandy loam	140 ^a	260 ^a	600 ^a	آهکی Calcareous
24.53 ^b	1.41 ^b	0.112 ^c	15.4 ^a	19.73 ^b	19.43 ^a	7.36 ^c	لوم شنی Sandy loam	120 ^a	280 ^a	620 ^a	شور- سدیمی Saline-Sodic
23.77 ^b	1.77 ^a	0.146 ^a	16.17 ^a	13.73 ^c	1.57 ^b	8.51 ^a	لوم شنی Sandy loam	130 ^a	270 ^a	600 ^a	سدیمی Sodic
3.23	0.24	0.01	1.39	4.29	2.30	0.14	-	2.83	4.31	3.26	LSD (P ≤ 0.05)

^aEC: electrical conductivity, ^bCEC: cation exchange capacity, ^cSAR: sodium adsorption ratio, ^dOC: organic carbon and ^eCCE: CaCO₃ equivalent.

Means in each column having at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level using Duncan test.

مقایسه ویژگی‌های بیوشیمیایی بقایای مورد مطالعه: ویژگی‌های بیوشیمیایی بقایای گیاهی مورد استفاده در این بررسی در جدول ۲ آورده شده است. غلظت فسفر در بقایای گیاهی دارای دامنه‌ای بین ۰/۰۹ تا ۰/۱۹ درصد بود. بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت فسفر در بین بقایای گیاهی به‌ترتیب مربوط به ماشک و گاه گندم بود. بقایای ماشک و شبدر بیش‌ترین میزان نیتروژن را دارا می‌باشند و گاه گندم کم‌ترین میزان نیتروژن را در بین بقایای گیاهی دارا بود. کربن بقایای مورد مطالعه تا حدودی مشابه هم می‌باشد و اختلاف معنی‌داری از لحاظ آماری با یکدیگر نداشتند ولی درصد نیتروژن بقایا بسیار متفاوت از یکدیگر هستند. از این رو می‌توان استنباط نمود، اختلافی که بین نسبت C/N بقایای گیاهی مورد بررسی وجود دارد، ناشی از

اختلاف نیتروژن در بقایای گیاهی می‌باشد و اختلاف درصد کربن در بقایای آن‌ها نقش چندانی در تفاوت نسبت C/N آن‌ها ندارد. بیش‌ترین مقدار سلولز با مقدار ۳۸/۵ درصد مربوط به بقایای آفتابگردان و کم‌ترین آن مربوط به بقایای شبدر و ماشک بود. در بین بقایای مورد مطالعه، آفتابگردان بیش‌ترین مقدار لیگنین (۱۴/۱ درصد) و ماشک کم‌ترین (۹ درصد) را دارا بود. ترتیب مقدار همی‌سلولز در بین بقایای گیاهی به‌صورت شبدر < گندم < ذرت < آفتابگردان < ماشک بود. در بین بقایای مورد بررسی، آفتابگردان بیش‌ترین مقدار خاکستر (Ash) و ذرت کم‌ترین میزان خاکستر را دارا بود. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ترکیبات قابل‌حل در آب (WSC) به‌ترتیب مربوط به بقایای ذرت و گاه گندم بود (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین خصوصیات بیوشیمیایی بقایای مورد استفاده در این آزمایش (n=3).

Table 2. Mean biochemical composition of the studied plant residues (n=3).

C/N	N/P	Lignin/N	سلولز Cellulose	لیگنین Lignin	همی‌سلولز Hemicellulose	خاکستر Ash	ترکیبات قابل‌حل در آب WSC	کربن کل Total C	نیتروژن کل Total N	فسفر P	بقایای گیاهی Plant residues
16	15.2	4.1	21.0 ^b	11.1 ^a	34.1 ^a	9.6 ^b	40 ^a	43.2 ^a	2.70 ^a	0.178 ^{ab}	شبدر Trifolium
59	7.1	14	31.5 ^{ab}	10.2 ^a	25.2 ^{ab}	4.5 ^c	42 ^a	44.5 ^a	0.75 ^b	0.105 ^{ab}	ذرت Corn
38	8.3	13	38.5 ^a	14.1 ^a	20.9 ^c	14.1 ^a	25 ^{bc}	40.1 ^a	1.05 ^b	0.126 ^{ab}	آفتابگردان Sunflower
14	14.9	3.1	22.5 ^b	9.0 ^a	15.5 ^{bc}	13.0 ^a	33 ^b	41.1 ^a	2.90 ^a	0.194 ^a	ماشک Vetch
61	7.8	17	33.0 ^{ab}	12.0 ^a	30.1 ^a	10.2 ^b	20 ^c	42.9 ^a	0.70 ^b	0.090 ^b	گندم Wheat
-	-	-	13.4	5.8	10.4	2.5	4.14	5.12	0.474	0.094	LSD (P ≤ 0.05)

میانگین‌های دارای حروف مشترک در هر ستون، فاقد اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد به روش آزمون دانکن می‌باشند.

Means in each column having at least one similar letter are not significantly different at 5% probability level using Duncan test.

گیاهی و هم‌چنین اثرات متقابل نوع خاک در بقایای گیاهی بر معدنی‌شدن کربن در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳).

تأثیر نوع خاک و بقایای گیاهی بر معدنی‌شدن کربن: نتایج تجزیه واریانس (ANOVA) داده‌ها نشان داد که اثر هر دو پارامتر نوع خاک و بقایای

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر نوع خاک و بقایای گیاهی بر معدنی شدن کربن.
Table 3. Analysis of variance of the effect of plant residues and soil type on carbon mineralization.

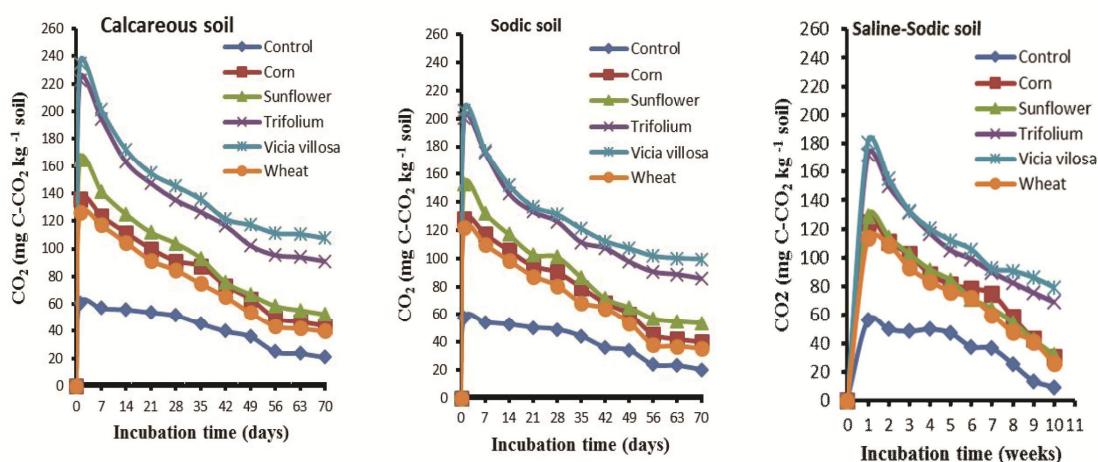
		میانگین مربعات										درجه آزادی	منابع تغییر							
		Mean Square										Degree of freedom	Source of variance							
هفته ۱۰	هفته ۹	هفته ۸	هفته ۷	هفته ۶	هفته ۵	هفته ۴	هفته ۳	هفته ۲	هفته ۱	Week 10	Week 9	Week 8	Week 7	Week 6	Week 5	Week 4	Week 3	Week 2	Week 1	
674.9**	852.6**	944.4**	860.1**	1216.4**	1416.1**	1446.4**	1804.5**	2637.1**	3499.3**	2	خاک	Soil								
8054.1**	8000.6**	6593.1**	6251.4**	2515.9**	7678.1**	8964.1**	11890.1**	18751.4**	27090**	5	بقایا	Residues								
42.5**	68.6**	45.1**	122.1**	113.5**	120.1**	117.2**	131.4**	256.6**	356.2**	10	خاک × بقایای	Soil × Residues								
11.9	9.48	4.34	6.29	4.38	5.57	8.25	11.23	11.38	27.9	30	خطا	Error								
7.2	5.3	3	3.3	7.5	4.5	2.8	3	5.6	3.7	-	ضریب تغییرات (%)	Coefficient of variation (%)								

** معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد.

** Significant at 1% probability levels

میزان خروج CO_2 در هر سه نوع خاک از تیمار شاهد به‌دست آمد (شکل ۱). این موضوع که فرآیند تجزیه شامل دو مرحله کلی تند و آهسته می‌باشد، مورد پذیرش اغلب پژوهشگران است (۲ و ۳۳). خروج سریع CO_2 در ابتدای انکوباسیون به‌دلیل تجزیه سریع ترکیبات به آسانی تجزیه‌پذیر^۱ و ترکیباتی با وزن مولکولی کم (فاز سریع تجزیه) می‌باشد. بعد از اتمام تجزیه ترکیبات سهل‌التجزیه، اجزایی با تجزیه‌پذیری کم‌تر^۲ مورد تهاجم میکروارگانیسم‌ها قرار می‌گیرند و در نتیجه فاز کند تجزیه آغاز می‌شود (۲).

روند معدنی‌شدن کربن: نتایج آزمایش نشان داد، وقتی که بقایای گیاهی به خاک افزوده می‌شوند، در ابتدا (هفته اول) سرعت تجزیه زیاد بوده و بیش‌ترین اتلاف کربن به‌صورت CO_2 در مراحل اولیه تجزیه اتفاق افتاده است. در بین سه خاک مورد بررسی، بیش‌ترین مقدار خروج CO_2 در هفته اول مربوط به بقایای ماشک و شبدر در خاک آهکی بود. در دو خاک شور-سدیمی و سدیمی نیز بیش‌ترین خروج CO_2 در بین بقایای گیاهی افزوده شده به خاک به بقایای ماشک و شبدر اختصاص یافت و کم‌ترین



شکل ۱- روند معدنی‌شدن کربن در تیمارهای شاهد و تیمارهای حاوی بقایای گیاهی در خاک‌های مورد مطالعه با گذشت زمان انکوباسیون.

Figure 1. Carbon mineralization in the unamended and amended treatments in the studied soils in relation to incubation time.

بقایای گیاهی می‌توانند به‌عنوان منبع کربن و انرژی مورد استفاده جمعیت میکروب‌های هتروتروف خاک قرار گرفته و در نتیجه تنفس میکروبی (تولید CO_2) خاک را به‌عنوان یک شاخص فعالیت میکروبی افزایش دهد. بدین ترتیب، تنفس میکروبی در خاک تیمار شده با بقایای گیاهی نسبت به خاک شاهد (خاکی که بقایای گیاهی به آن افزوده نشده است) افزایش معنی‌دار نشان خواهد داد (۲۰). مطالعه رئیسی (۲۰۰۶) نیز نشان داد که خاک‌های تیمار شده با بقایای یونجه و گندم دارای میزان کربن معدنی‌شده تجمعی

روند تجمعی معدنی‌شدن کربن و همبستگی بین معدنی‌شدن کربن و ویژگی‌های بیوشیمیایی بقایای گیاهی: روند تجمعی معدنی‌شدن کربن در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی و تیمار شاهد در هر سه خاک مورد بررسی در شکل ۲ نشان آمده است. نتایج آزمایش نشان داد که افزودن بقایای گیاهی به هر سه نوع خاک مورد بررسی به‌طور معنی‌داری افزایش معدنی‌شدن کربن را به‌دنبال داشته است. به‌طورکلی،

- 1- Labile fractions
- 2- Non-labile fractions

حدود ۹/۵، ۸/۸، ۶/۳، ۵/۶ و ۵ درصد، برای خاک شور- سدیمی به ترتیب حدود ۸/۲، ۷/۸، ۵/۷، ۵/۶ و ۵ درصد و برای خاک سدیمی به ترتیب حدود ۷/۵، ۷/۲، ۵/۲، ۴/۸ و ۴/۲ درصد بود (شکل ۲). نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داده است که مهم‌ترین عامل مؤثر بر سرعت تجزیه بقایای گیاهی و معدنی شدن کربن و نیتروژن، غلظت نیتروژن بقایا و نسبت C/N در این بقایا می‌باشد (۱، ۱۶ و ۳۲). پژوهش‌های نوربخش و شیخ‌حسینی (۲۰۰۶) نیز نشان داد که بقایای یونجه با داشتن C/N کم‌تر (نیتروژن بیش‌تر) نسبت به بقایای گندم و ذرت دارای سرعت معدنی‌شدن کربن بیش‌تری بود. در پژوهش حاضر نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار ($r=0.96^{**}-0.98^{**}$) بین غلظت نیتروژن بقایا و کربن معدنی‌شده و همچنین همبستگی منفی و معنی‌داری ($r=0.90^{**}-0.98^{**}$) بین نسبت C/N بقایا و کربن معدنی‌شده وجود دارد (جدول ۴). همبستگی بین نسبت Lignin/N و کربن معدنی‌شده منفی و معنی‌دار ($r=0.94^{**}-0.96^{**}$)، همبستگی بین نسبت Cellulose/N و کربن معدنی‌شده منفی و معنی‌دار ($r=0.95^{**}-0.97^{**}$)، همبستگی بین نسبت Hemicellulose/N و کربن معدنی‌شده منفی و معنی‌دار ($r=0.78^{**}-0.81^{**}$)، همبستگی بین نسبت Cellulose+Lignin /N و کربن معدنی‌شده منفی و معنی‌دار ($r=0.96^{**}-0.98^{**}$) بود و در نهایت همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r=0.70^{*}-0.75^{*}$) بین نسبت N/P بقایا و کربن معدنی‌شده وجود دارد (جدول ۴). در پژوهش حاضر بین لیگنین، همی سلولوز، درصد خاکستر و کربن کل بقایا با کربن معدنی‌شده همبستگی معنی‌داری وجود نداشت (جدول ۴).

بالاتری نسبت به خاک تیمار نشده بودند. معدنی‌شدن کربن در خاک آهکی نسبت به خاک‌های سدیمی و شور- سدیمی در همه تیمارها بیش‌تر بود. مقدار کل CO₂ آزاد شده در خاک آهکی در تیمارهای حاوی ماشک، شبدر، آفتابگردان، ذرت و گندم نسبت به خاک سدیمی به ترتیب حدود ۱۲، ۹، ۶/۴ و ۵/۳ درصد و نسبت به خاک شور- سدیمی به ترتیب حدود ۳۱، ۲۶، ۲۴ و ۹ درصد بیش‌تر بود (شکل ۲). نتایج آزمایش‌های تریپاتای و همکاران (۲۰۰۶)، نوربخش و شیخ‌حسینی (۲۰۰۶) و سبتیا و همکاران (۲۰۱۱) نیز نشان می‌دهد که در خاک‌های شور، میزان خروج گاز CO₂ از پلات‌های تیمار شده با بقایای گیاهی کاهش می‌یابد که دلیل آن را به کاهش فعالیت میکروبی از طریق سمیت یونی و اثرات اسمزی یونها در خاک‌های شور مربوط دانستند، چرا که در این شرایط، میکروارگانیسم‌ها از تنش اسمزی رنج می‌برند که در نتیجه این تنش، سلول‌های این میکروارگانیسم‌ها خشک شده و تجزیه می‌گردند. در خاک‌ها افزایش غلظت سدیم نیز همبستگی منفی با معدنی‌شدن کربن نشان می‌دهد که به علت کاهش در مقدار بیوماس میکروبی می‌باشد (۷ و ۲۸).

میزان معدنی‌شدن کربن بسته به نوع بقایای گیاهی در این آزمایش متفاوت است. ترتیب معدنی‌شدن کربن در تیمارهای مختلف بقایای گیاهی در هر سه نوع خاک مورد بررسی به صورت ماشک < شبدر < آفتابگردان < ذرت < گندم می‌باشد. درصد کربن معدنی شده ($100 \times \text{کربن آلی خاک} \text{ (mg kg}^{-1})$ / میزان کربن متصاعد شده از خاک (mg kg^{-1}) = (%)) کربن معدنی‌شده) برای بقایای ماشک، شبدر، آفتابگردان، ذرت و گندم در خاک آهکی به ترتیب

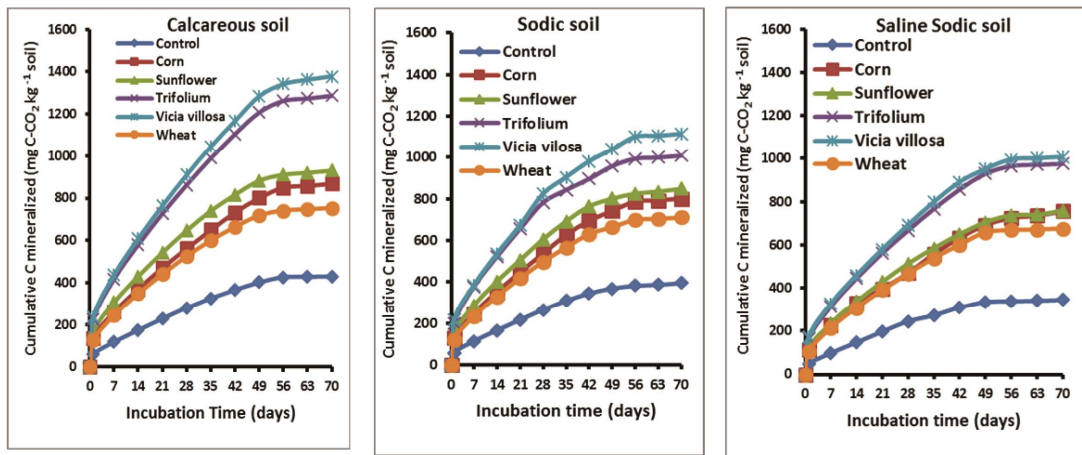
جدول 4- ضرايب همبستگي خطي پيرسون بين تركيب بيوشيميايي بقاياي گياهي مطالعه شده.

Table 4. Pearson linear correlation coefficients between C mineralized and initial biochemical composition of the studied plant residues.

CO ₂ (W1)	1																																																								
CO ₂ (W2)	0.99**	1																																																							
CO ₂ (W3)	0.99**	0.99**	1																																																						
CO ₂ (W4)	0.99**	0.99**	0.99**	1																																																					
CO ₂ (W5)	0.99**	0.99**	0.99**	0.99**	1																																																				
CO ₂ (W6)	0.98**	0.98**	0.99**	0.98**	0.98**	1																																																			
CO ₂ (W7)	0.97**	0.97**	0.97**	0.98**	0.97**	0.97**	1																																																		
CO ₂ (W8)	0.97**	0.97**	0.98**	0.98**	0.98**	0.99**	0.99**	1																																																	
CO ₂ (W9)	0.99**	0.99**	0.99**	0.99**	0.99**	0.99**	0.99**	0.98**	0.98**	1																																															
CO ₂ (W10)	0.99**	0.99**	0.99**	0.98**	0.99**	0.98**	0.99**	0.98**	0.97**	0.99**	1																																														
Cellulose	-0.70*	-0.72*	-0.70*	-0.71*	-0.71*	-0.74*	-0.80**	-0.76*	-0.73*	-0.73*	0.72*	1																																													
Total N	0.98**	0.99**	0.97**	0.98**	0.98**	0.96**	0.97**	0.97**	0.98**	0.98**	0.98**	0.77**	1																																												
C/N	-0.98**	-0.97**	-0.97**	-0.97**	-0.97**	-0.93**	-0.91**	-0.95**	-0.95**	-0.95**	0.61 ^{ns}	0.95**	1																																												
Lignin/N	-0.94**	-0.95**	-0.95**	-0.96**	-0.95**	-0.95**	-0.95**	-0.95**	-0.94**	-0.94**	0.67*	-0.94**	0.93**	1																																											
Cellulose/N	-0.96**	-0.97**	-0.96**	-0.97**	-0.96**	-0.95**	-0.96**	-0.95**	-0.96**	-0.95**	0.83**	-0.97**	0.94**	0.92**	1																																										
Hemicellulose/N	-0.81**	-0.78**	-0.81**	-0.80**	-0.81**	-0.76**	-0.68*	-0.73**	-0.77**	-0.78**	0.25 ^{ns}	-0.73*	0.88**	0.73*	0.71*	1																																									
Cellulose+Lignin/N	-0.97**	-0.98**	-0.97**	-0.98**	-0.97**	-0.97**	-0.97**	-0.97**	-0.97**	-0.96**	0.80**	-0.98**	0.95**	0.95**	0.99**	0.73*	1																																								
N/P	0.71*	0.73*	0.71*	0.70*	0.72*	0.70*	0.75*	0.74*	0.74*	0.74*	0.70*	-0.79**	-0.67*	-0.76*	-0.74*	-0.33 ^{ns}	-0.76*	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**	0.77**						
CO ₂ (W1)		CO ₂ (W2)		CO ₂ (W3)		CO ₂ (W4)		CO ₂ (W5)		CO ₂ (W6)		CO ₂ (W7)		CO ₂ (W8)		CO ₂ (W9)		CO ₂ (W10)		Cellulose		Total N		C/N		Lignin/N		Cellulose/N		Hemicellulose/N		Cellulose+Lignin/N		N/P		Cellulose /N		Cellulose /N		Hemice llulose/N		Cellulose+ Lignin/N		N/P													

^{ns}, * and ** not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

^{ns}, * and ** not significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively.



شکل ۲- روند معدنی شدن کربن در خاک‌های تیمار شده با بقایای گیاهی مختلف با گذشت زمان انکوباسیون.

Figure 2. Amount of cumulative C mineralized in the amended soils in relation to incubation time.

پارامترهای مربوط به مدل سینتیکی مرتبه اول برای تیمارهای شاهد و تیمارهای بقایای گیاهی در خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۵ نشان داده شده است. در بین تیمارهای شاهد (خاک بدون بقایای گیاهی) خاک آهکی دارای بیشترین مقدار C_0 (ذخیره کل کربن قابل تجزیه) و kC_0 (سرعت بالقوه اولیه معدنی شدن کربن) بود، در حالی که خاک شور-سدیمی دارای کمترین مقدار C_0 و kC_0 و خاک سدیمی حد وسط بود. در بین بقایای گیاهی بیشترین مقدار C_0 و kC_0 در تمامی خاک‌ها مربوط به بقایای ماشک بود، در حالی که بقایای گندم دارای کمترین مقدار این پارامترها (ضرایب) در بین بقایای مورد مطالعه بود. پاسکووال و همکاران (۱۹۹۸) گزارش کرده‌اند که شاخص kC_0 یک شاخص مفید و حساس برای درک کیفیت تجزیه‌ای بقایای آلی اضافه شده (بقایای گیاهی با سرعت تجزیه متفاوت) به خاک‌ها است، زیرا این شاخص هم اثرات سرعت و هم جنبه‌های ذخیره‌ای را نشان می‌دهد. از این رو بهترین شاخص برای مقایسه کردن کیفیت بقایای گیاهی است. نتایج همبستگی بین شاخص‌های سینتیکی معدنی شدن کربن نشان داد که بین شاخص‌های

ضرایب معادله سینتیکی مرتبه اول $C_t = C_0 (1 - e^{-kt})$ برازش شده بر داده‌های معدنی شدن کربن: در تمامی تیمارها، معدنی شدن کربن با زمان (شکل ۲)، دارای توزیع نمایی بوده و روند آن از سینتیک مرتبه اول $C_t = C_0 (1 - e^{-kt})$ پیروی می‌کند. همچنین در این پژوهش، در همه تیمارها ضریب همبستگی معادله سینتیکی مرتبه اول بسیار بالا بوده و خطای استاندارد نیز در حد قابل قبول می‌باشد (جدول ۵). در آزمایشی توسط ساویوزی و همکاران (۲۰۱۴)، در بین معادلات مختلف، مدل سینتیکی مرتبه اول به‌عنوان بهترین مدل برای برازش داده‌های مربوط به معدنی شدن کربن در خاک‌های مورد بررسی پیشنهاد شد. در آزمایشی دیگر، توسط رئیسی و آقابابایی (۲۰۱۱) برازش مدل یک جزئی (تابع سینتیک مرتبه اول) بر داده‌های معدنی شدن کربن در تیمارهای مختلف بقایای گیاهی نشان داد که در همه تیمارها ضریب همبستگی معادله سینتیکی مرتبه اول بسیار بالا بوده و خطای استاندارد نیز در حد قابل قبول می‌باشد. بنابراین، استفاده از این مدل به دلیل انطباق با شرایط واقعی و توجیه پارامترهای آن، برای تخمین میزان دی‌اکسیدکربن آزاد شده از خاک توصیه شده است (۲۷).

سینتیکی معدنی شدن کربن در خاک‌های مورد مطالعه همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. مقادیر همبستگی بین شاخص‌های سینتیکی معدنی شدن کربن نشان می‌دهد که در بین شاخص‌های سینتیکی معدنی شدن کربن، شاخص kC_0 نسبت به شاخص C_0 میزان معدنی شدن کربن (C_t) در خاک‌های مورد مطالعه را به خوبی نشان می‌دهد (جدول ۶).

جدول ۵- پارامترهای معادله سینتیکی مرتبه اول $C_t = C_0 (1 - e^{-kt})$ برازش شده بر داده‌های معدنی شدن کربن.

Table 5. The parameters of first order model [$C_t = C_0 (1 - e^{-kt})$] fitted on mineralized carbon.

SE	r^2	kC_0 (mg/(kg day))	k (day ⁻¹)	C_0 (mg kg ⁻¹)	C_{min} (mg kg ⁻¹)	بقایا Residues	نوع خاک Soil type
7.26	0.989	9.80	0.0128	765.43	453.98	شاهد Control	
7.28	0.999	20.62	0.0148	1393.37	898.9	ذرت Corn	
3.44	0.999	24.73	0.0177	1397.18	992.45	آفتابگردان Sunflower	آهکی Calcareous
6.61	0.999	31.96	0.0151	2116.52	1381.04	شبدر Trifolium	
6.69	0.989	32.89	0.0136	2421.71	1487.04	ماشک Vetch	
5.77	0.999	20.09	0.0179	1125.5	804.01	گندم Wheat	
7.18	0.997	9.34	0.0131	714.8	429.08	شاهد Control	
7.94	0.999	19.76	0.0150	1318.21	856.92	ذرت Corn	
3.90	0.989	22.95	0.0173	1329.08	933.15	آفتابگردان Sunflower	سدیمی Sodic
7.42	0.999	28.56	0.0143	1995.57	1262.17	شبدر Trifolium	
9.84	0.999	28.69	0.0129	2229.26	1325.63	ماشک Vetch	
6.23	0.979	19.09	0.0179	1068.71	763.44	گندم Wheat	
8.75	0.996	9.28	0.0159	583.45	391.75	شاهد Control	
7.71	0.979	19.06	0.0157	1213.87	809.39	ذرت Corn	
5.15	0.988	20.04	0.0181	1113.86	797.39	آفتابگردان Sunflower	شور- سدیمی Saline-sodic
4.64	0.999	24.91	0.0147	1696.53	1090.25	شبدر Trifolium	
6.98	0.998	25.50	0.0139	1838.16	1142.43	ماشک Vetch	
6.43	0.999	18.26	0.0175	1042.56	736.36	گندم Wheat	

C_0 : ذخیره کل (پتانسیل) کربن قابل تجزیه؛ k: ضریب ثابت واکنش تجزیه کربن؛ C_0K : سرعت بالقوه اولیه معدنی شدن کربن؛ r^2 : ضریب برازش؛ SE: خطای استاندارد برازش مدل.

جدول ۶- همبستگی بین پارامترهای سیتیکی معدنی شدن کربن.

Table 6. Correlation between Carbon mineralization parameters.

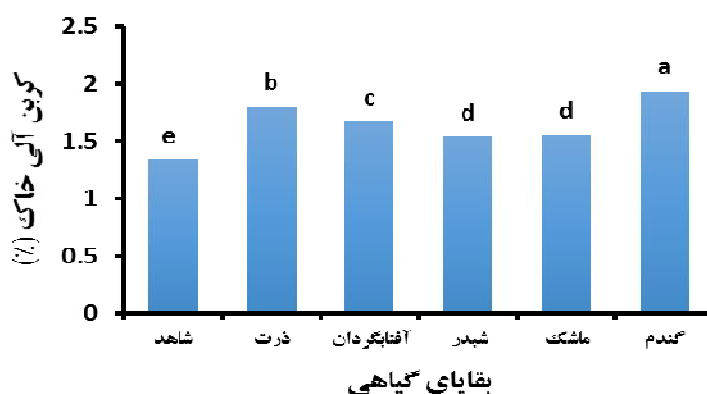
			1	C _t
		1	0.98**	C ₀
	1	-0.36 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	K
1	0.07 ^{ns}	0.95**	0.99**	kC ₀
kC ₀	k	C ₀	C _t	

^{ns} و ** به ترتیب غیرمعنی دار و معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد.

^{ns} and ** not significant, significant at 1% probability levels, respectively.

در آزمایش حاضر، بقایای گندم، ذرت و آفتابگردان به دلیل سرعت تجزیه کم تر توانستند ماده آلی خاک را نسب به سایر بقایا بیش تر افزایش دهند، زیرا بقایای گیاهی با سرعت تجزیه کم تر به ذخیره بیش تر کربن آلی در خاک کمک می کنند. مارتینز (۲۰۰۰) مشاهده کرد که ۶۹ درصد از کاه و کلش گندم و ۶۷ درصد از کلش ذرت در سال اول در شرایط آزمایشگاهی تجزیه می شوند و بقیه کربن باقی مانده در خاک به صورت هوموس جدید نسبت به تجزیه پایدار می ماند. در آزمایش بشارتی و همکاران (۲۰۰۷) افزودن بقایای اسپرس، کلزا، گندم و خلر به خاک توانست ماده آلی خاک را افزایش دهد که این افزایش در تیمارهای بقایای گیاهی با نسبت C/N بالا و سرعت تجزیه کم تر (گندم و کلزا) بیش تر بود. نتایج پژوهش های گلچین و همکاران (۲۰۰۷) نیز نشان داد که با افزودن ۱۰ و ۲۰ تن در هکتار کاه و کلش گندم به یک خاک لوم رسی، درصد کربن آلی خاک به ترتیب ۳۵ و ۶۱ درصد افزایش یافت.

تأثیر کاربرد بقایای گیاهی بر میزان کربن آلی خاک ها: نتایج مقایسه میانگین داده ها نشان داد که در انتهای آزمایش (هفته ۱۰) تیمارهایی که بقایای گیاهی دریافت نمودند، از نظر کربن آلی نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی داری ($P < 0.01$) داشتند، این افزایش به طور متوسط ۲۷ درصد بود. بیش ترین افزایش کربن آلی به ترتیب مربوط به بقایای گندم، ذرت و آفتابگردان به میزان ۰/۶۰، ۰/۴۶ و ۰/۳۲ درصد و کم ترین افزایش به ترتیب مربوط به بقایای ماشک و شبدر به میزان ۰/۲۲ و ۰/۲ درصد بود (شکل ۳). در آزمایشی توسط گلچین و همکاران (۲۰۰۷) نیز با بازگشت بقایای گیاهی به خاک، مقدار کربن آلی خاک افزایش یافت که این افزایش بیش تر به کیفیت بقایای گیاهی (C/N) بستگی داشت. به طوری که بقایای گیاهی با C/N بالا و سرعت تجزیه کم تر مانند بقایای ذرت و گندم نقش بیشتری را در این خصوص داشتند، چرا که در این شرایط شدت تجزیه کاهش می یابد که نتیجه آن تشکیل هوموس با پایداری بیش تر و نیز آزادسازی کم تر CO₂ به اتمسفر می باشد.

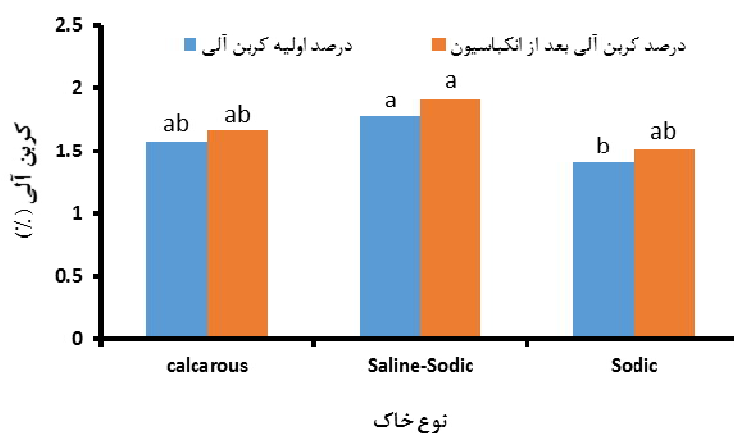


شکل ۳- میانگین اثرات کاربرد بقایای گیاهی بر میزان کربن آلی خاک.

Figure 3. Mean effects of plant residues application on soil organic carbon content.

توانایی بقایا در بهبود میزان ماده آلی این خاک‌ها و متعاقب آن بهبود خصوصیات شیمیایی و فیزیکی مرتبط با افزایش ماده آلی در این خاک‌ها باشد. به‌علت بالا بودن درصد ماده آلی اولیه در خاک شور- سدیمی و تجزیه کم‌تر ماده آلی در این خاک به‌علت فعالیت‌های میکروبی پایین در خاک‌های شور- سدیمی نسبت به دو خاک دیگر، هم‌چنان درصد ماده آلی در این خاک پس از انکوباسیون نیز بیش‌تر از دو خاک دیگر می‌باشد. این در حالی است که بعد از انکوباسیون بیش‌ترین افزایش درصد کربن آلی در خاک‌ها مربوط به خاک آهکی با ۳۸ درصد و سپس خاک سدیمی با ۳۳ درصد و شور- سدیمی با ۱۵ درصد بود (شکل ۴).

هم‌چنین نتایج نشان داد که در هر سه نوع خاک مورد بررسی، میزان ماده آلی بعد از انکوباسیون افزایش یافت. درصد کربن آلی در خاک آهکی، شور- سدیمی و سدیمی به‌ترتیب از ۱/۵۸، ۱/۷۷ و ۱/۴۱ درصد در قبل از انکوباسیون به مقدار ۱/۶۷، ۱/۹۱ و ۱/۵۲ درصد بعد از انکوباسیون رسید (شکل ۵). افزایش درصد کربن آلی در خاک آهکی، شور- سدیمی و سدیمی به‌ترتیب حدود ۵/۷، ۸ و ۷/۸ درصد بود. افزایش بیش‌تر درصد کربن آلی در دو خاک شور و شور- سدیمی می‌تواند به‌دلیل جمعیت و فعالیت میکروبی کم‌تر در این خاک‌ها و در نتیجه تجزیه کم‌تر بقایا در این خاک‌ها باشد که نشانی از



شکل ۴- مقادیر کربن آلی قبل و بعد از انکوباسیون در خاک‌های مورد مطالعه.

Figure 4. The amounts of organic carbon before and after incubation in the studied soils.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن بقایای گیاهی با کیفیت‌های مختلف به هر سه نوع خاک مورد بررسی، افزایش معدنی‌شدن کربن را به دنبال داشت. بیش‌ترین معدنی‌شدن کربن آلی (خروج CO₂) در بین بقایای گیاهی در هر سه نوع خاک مورد بررسی به ماشک و شبدر و کم‌ترین آن به گندم و ذرت اختصاص یافت اما در خاک آهکی این مقدار بیش‌تر از دو خاک دیگر بود. مقدار کربن معدنی‌شده به کیفیت بقایای افزوده شده (C/N) به خاک بستگی داشت. در حالی‌که با افزایش میزان لیگنین، سلولز، همی‌سلولز در مقایسه با غلظت نیتروژن موجود در بقایای گیاهی، مقدار معدنی‌شدن کربن آلی در خاک کاهش یافت.

بیش‌ترین مقدار معدنی‌شدن کربن در خاک آهکی و کم‌ترین خاک شور- سدیمی بود. به‌منظور افزایش کربن آلی خاک، مناسب‌ترین بقایای گیاهی با C/N بالا و سرعت تجزیه کم‌تر مانند بقایای گندم، ذرت و آفتابگردان و مناسب‌ترین شاخص برای توجیه میزان معدنی‌شدن نیتروژن در خاک در بین شاخص‌های سینتیک، شاخص kC₀ می‌باشد. در کل، پویایی کربن خاک پس از برگرداندن بقایای گیاهی با ویژگی‌های کیفی متفاوت در خاک‌های مختلف، به‌طور متفاوت تحت‌تأثیر قرار گرفت که به همین دلیل باید مدیریت‌های متفاوتی در برگرداندن هر یک از این بقایا در خاک‌های مورد مطالعه صورت پذیرد.

منابع

1. Abera, G., Wolde-Meskel, E., and Bakken, L.R. 2012. Carbon and nitrogen mineralization dynamics in different soils of the tropics amended with legume residues and contrasting soil moisture contents. *Biology and Fertility of Soils*. 48: 51-66.
2. Ajwa, H.A., and Tabatabai, M.A. 1994. Decomposition of different organic materials in soils. *Biology and Fertility of Soils*. 18: 175-182.
3. Anderson, J.P.E. 1982. Soil respiration. P 831-871. In: A.L. Page and R.H Miller (eds), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
4. Basharati, H., Golchin, A., and Atashnama, K. 2007. Effect of nitrogen addition and regulation of C/N ratio of different plant residues on the rate of decomposition of residues. The 10th Iranian Soil Science Congress. 4-6 September, Karaj, Iran. (Translated in Persian)
5. Boldock, J.A. 2007. Composition and cycling of organic soil carbon in soil. P 1-396, In: P. Marchner and Z. Rengel (Eds.), *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
6. Bremner, J.M., and Mulvaney, M. 1982. Nitrogen total. P 595-624. In: A.L. Page, R.H. Miller and R.R. Keeney (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2*. American Society of Agronomy, Madison, WI.
7. Chander, K., Goyal, S., and Kapoor, K.K. 1994. Effect of sodic water irrigation and farmyard manure application on soil microbial biomass and microbial activity. *Applied Soil Ecology*. 1: 139-144.
8. Dalal, R.C., and Allen, D.E. 2008. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Australian Journal of Botany*. 56: 369-407.
9. Golchin, A., Kelych, S., and Ajudanzadeh, M. 2007. The role of organic materials in improving the physicochemical properties of soils in arid and semi-arid regions. The 10th Iranian Soil Science Congress. 4-6 September. Karaj. Iran. (Translated in Persian)
10. Hadas, A., Kautsky, L., Goek, M., and Kara, E.E. 2004. Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biology and Biochemistry*. 36: 255-266.

11. Harper, S.H.T., and Lynch, J.M. 1981. The Chemical components and decomposition of wheat straw leaves, internodes and nodes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 32: 1057-1062.
12. Hongmei, Z., Daniel, Q.T., Qianxin, L., Xianguo, L., and Guoping, W. 2012. Effects of fires on soil organic carbon pool and mineralization in a Northeastern China wetland. *Geoderma*. 189-190: 532-539.
13. Khalil, M.I., Hossain, M.B., and Schmidhalter, U. 2005. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials. *Soil Biology and Biochemistry*. 37: 1507-1518.
14. Kitson, R.E., and Mellon, M.G. 1944. A spectrophotometric study of the molybdivanadophosphoric acid method for the determination of phosphorus. *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*. 16: 379-383.
15. Liu, P.J., Huang, X.J., Han, O., Sun, O.J., and Zhou, Z.H. 2006. Differential responses of litter decomposition to increased soil nutrients and water between two contrasting grassland plant species of Inner Mongolia, China. *Applied Soil Ecology*. 34: 266-275.
16. Martens, D.A. 2000. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*. 32: 361-369.
17. Nelson, D.W., and Sommers, L.P. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. P 539-579. In: A.L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
18. Nourbakhsh, F., and Sheikh-Hosseini, A.R. 2006. A kinetic approach to evaluate salinity effects on carbon mineralization in a plant residue amended soil. *Journal of Zhejiang University Science B*. 7: 10. 788-793.
19. Nourbakhsh, F. 2006. Fate of carbon and nitrogen from plant residue decomposition in a calcareous soil. *Plant Soil and Environment*. 52: 137-140.
20. Nourbakhsh, F. 2005. Study of kinetics of barley residue decomposition in soil under laboratory conditions. *J. Res. Agric. Sci*. 4: 1. 69-77.
21. Pascual, J.A., Hernandez, T., Garcia, C., and Ayuso, M. 1998. Carbon mineralization in an arid soil amended with organic wastes of varying degrees of stability. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*. 29: 835-846.
22. Raiesi, F. 2006. Carbon and N mineralization as affected by soil cultivation and crop residue in a calcareous wetland ecosystem in Central Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 112: 3-20.
23. Raiesi, F., and Aghababae, F. 2011. The Decomposability of Some Plant Residues and Their Subsequent Influence on Soil Microbial Respiration and Biomass and Enzyme Activity. *Journal of Water and Soil*. 25: 4. 873-863. (In Persian)
24. Rao, Y., and Xiang, B. 2009. Determination of total ash and acid-insoluble ash of Chinese herbal medicine *Prunellae Spica* by near infrared spectroscopy. *Yakugaku zasshi J. Pharm. Soc. Japan*. 129: 7. 881-886.
25. Rees, R.M., Bingham, I.J., Baddeley, J.A., and Watson, C.A. 2005. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. *Geoderma*. 128: 130-154.
26. Rietz, D.N., and Haynes, R.J. 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*. 35: 845-854.
27. Saviozzi, A., Vanni, G., and Cardelli, R. 2014. Carbon mineralization kinetics in soils under urban environment. *Soil Ecology*. 73: 64-69.
28. Setia, R., Marschner, P., Baldock, J., Chittleborough, D., and Verma, V. 2011. Relationships between carbon dioxide emission and soil properties in salt-affected landscapes. *Soil Biology and Biochemistry*. 43: 667-674.
29. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., and Sumner, M.E. 1996. *Methods of soils analysis part-3 Chemical methods*. Soil Science Society of America Book Ser. 5, Madison, Wisconsin, USA. 1390p.

30. Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Schjøning, P., Jensen, B., and Christensen, B.T. 2001. Net mineralization of soil N and 15N-ryegrass residues in differently textured soils of similar mineralogical composition. *Soil Biology and Biochemistry*. 33: 277-285.
31. Tripathi, S., Kumari, S., Chakraborty, A., Gupta, A., Chakrabarti, K., and Bandyopadhyay, B.K. 2006. Microbial biomass and its activities in salt-affected coastal soils. *Biology and Fertility of Soils*. 42: 273-277.
32. Vahdat, E., Nourbakhsh, F., and Basiri, M. 2011. Lignin content of range plant residues controls N mineralization in soil. *European Journal of Soil Biology*. 47: 243-246.
33. Vaieretti, M.V., Pérez, H.N., and Gurvich, D.E. 2005. Decomposition dynamics and physicochemical leaf quality of abundant species in montane woodland in central Argentina. *Plant and Soil*. 21: 205-278.
34. Van Soest, P.J., Robertson, J.B., and Lewis, B.A. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*. 74: 3584-3597.



Kinetics of organic carbon mineralization and its changes in three soil types treated with different plant residues (Case study: soils around the Lake of Urmia)

J. Abdollahi Gharekand¹, *E. Sepehr², V. Feziasl³, M.H. Rasouli-Sadaghiani⁴ and A. Samadi⁴

¹Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science, University of Urmia, ²Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Urmia, ³Assistant Prof., Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran, ⁴Professor, Dept. of Soil Science, University of Urmia
Received: 04.05.2019; Accepted: 12.14.2019

Abstract

Background and Objectives: Soil C dynamics will be influenced differently following incorporation of various plant residues with different qualitative characteristics. One of the most important ways to improve soil organic matter is to manage the correct use of plant residues in agricultural products, so that by bringing these residues back to the soil, the average annual carbon input to soil is increased and part of the carbon output from decomposition microbial is compensated. Hence, the purpose of this study was to investigate the effect of various plant residues on the mineralization kinetics of carbon and organic carbon content in different soils around the Lake of Urmia.

Materials and Methods: This study was conducted as a laboratory incubation experiment in a completely randomized factorial design, including three soil types (calcareous, saline-sodic and sodic) and five plant residues (corn stalks, sunflower stalks, wheat straw, clover and vetch residues) with control treatment (soil without plant residues) in three replications. Plant residues (20 g kg⁻¹) were added to the soils and incubated for 10 weeks (70 days) at 25±1 °C. CO₂ emissions were measured once a week for 10 weeks, and then the parameters of the kinetic equation of mineralization of carbon were calculated. Finally, the organic carbon content of soils was measured immediately after the completion of the experiment on all treatments.

Results: The results of analysis of variance showed that the soil type and plant residue significantly ($P < 0.01$) affected C mineralization. In all treatments, the highest CO₂ emissions occurred during the first week of incubation and then there was a decreasing trend until the end of the incubation time. The highest amount of cumulative C mineralized obtained from calcareous soils treated with vetch and clover residues. There was a positive and significant correlation between plant N concentration and C mineralized, while there was a negative and significant correlation between ratios of C/N, Lignin/N, Cellulose/N, Hemicellulose/N, Cellulose+Lignin/N, N/P ratio and C mineralized. Carbon mineralization in all three studied soils is better estimated with C₀K than C₀. Also, with the return of plant residues to the soils, the amount of organic carbon increased in all three studied soils. The order of increasing organic carbon in different treatments of plant residues in all three studied soils was wheat > corn > sunflower > vetch > clover.

Conclusion: In general, the highest cumulative mineral carbon in calcareous soils among the three studied soils, indicates the further decomposition of residues in these soils. Therefore, it should be compensated annually for the return of more residues to these soils, part of the carbon

* Corresponding Author; Email: e.sepehr@urmia.ac.ir

output resulting from microbial decomposition. Considering that the main purpose of using organic matter in soils was to increase soil organic matter, the results of this study showed that the greatest effect was on organic carbon increase in all three soils (calcareous, sodic and saline-sodic) of wheat residues and then corn with high C/N ratios and the smallest role obtained from clover and vetch with the lowest C/N. This suggests that increasing the amount of soil organic carbon content by adding plant residues depends on the quality of plant remains (C/N, Lignin/N, Cellulose/N, Hemicellulose/N, Cellulose+Lignin/N and N/P). Therefore, the use of plant residues with high C/N ratio is recommended for carbon sequestration in these soils.

Keywords: Carbon mineralization, C/N ratio, CO₂, Plant residues, Saline-sodic soil