

## بخش‌بندی اندازه‌ای و بیوشیمیایی کربن آلی خاک همراه با ریشه‌ی چند گیاه مرتعی

حسن لطفی پارسا<sup>۱</sup> - محسن شکل آبادی<sup>۲\*</sup> - قاسم اسدیان<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳

### چکیده

بخش‌بندی اندازه‌دانه‌ای و بیوشیمیایی کربن آلی روشی سودمند در شناخت و بررسی پویایی و فرایندهای نگهداشت، تجزیه و خروج آن‌ها از خاک می‌باشد. مراتع حاوی بیش از یک سوم ذخایر کربن زمین بوده و یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌ها جهت ذخیره کربن بشمار می‌روند. از این رو این مطالعه با هدف بررسی تغییرات بخش‌بندی اندازه‌دانه‌ای و بیوشیمیایی کربن آلی خاک در فواصل مختلف از سطح ریشه‌ی پنج گیاه مرتعی در استان همدان انجام پذیرفت. جداسازی خاک‌های ریزوسفری از ریشه‌ها انجام شد و خاک‌ها به سه بخش خاک ریزوسفری، بین ریزوسفری و توده‌ای تقسیم شدند. بخش‌بندی اندازه‌دانه‌ای و بیوشیمیایی کربن آلی روی خاک‌ها انجام شد. بیشترین میزان کربن آلی در نواحی نزدیک به ریشه‌ها و خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر مشاهده گردید. علیرغم فعالیت بالای ریزجانداران در این نواحی، میزان کربن آلی به دلیل ترشحات ریشه‌ای همچنان بالاتر از نقاط دورتر از ریشه بود. بخش‌های مختلف بیوشیمیایی کربن و MWD دارای همبستگی بسیار معناداری با کربن آلی کل بودند که نشان‌دهنده‌ی اثر کربن آلی خاک بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است. بخش‌های بیوشیمیایی در نزدیک ریشه‌ها که شدت تجزیه‌ی کمتری داشتند مربوط به کربن محلول در آب و کربن قابل دسترس بود در حالی که با افزایش فاصله از سطح ریشه مقادیر کربن مقاوم به تجزیه افزایش می‌یافت.

**واژه‌های کلیدی:** خاکدانه‌سازی، ریزوسفر، کربن آلی، کمپلکس‌های آلی-معدنی، گیاه مرتعی

### مقدمه

اضافه شدن بقایای گیاهی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نظیر ساختمان، بافت، میزان رس، کانی‌شناسی و اسیدیته می‌باشد (۲۱). فعالیت‌های میکروبی خاک در وهله‌ی اول بوسیله‌ی کربن فراهم و قابل دسترس که از ریشه‌ی گیاهان ترشح می‌شود، هدایت می‌گردد (۱۱). در حالی که در مناطق نیمه‌خشک با توجه به کمبود برگشت بقایای گیاهی و دمای بالای این مناطق، میزان ماده آلی عمدتاً توسط ویژگی‌های خاک تعیین می‌شود (۴ و ۵). مقدار کربن ذخیره‌ای در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک بیشتر تحت تأثیر زیست‌توده ریشه، رس و نیتروژن خاک، عامل ارتفاع از سطح دریا و میانگین بارش سالیانه قرار دارد و همچنین خاک با دارا بودن ۸۷ درصد کربن در خود سهم بیشتری در ذخیره کربن را نسبت به سایر مؤلفه‌های اکوسیستم نظیر زیست‌توده دارد (۱). در تحقیق دیگر طی بررسی پویایی کربن گون‌زارهای استان مرکزی گزارش شده است خاک با سهم بسیار بالایی از کل ذخیره کربن مهم‌ترین منبع ذخیره کربن در اکوسیستم است و بررسی روابط رگرسیونی گام به گام نشان داد ذخیره‌ی کربن با خصوصیات گیاه مانند ارتفاع و حجم بوته‌های گون، مقدار لاشبرگ، رطوبت اشباع خاک و کربن آلی خاک رابطه مثبت و قوی دارد (۱). علاوه بر این کربن آلی خاک تأثیر معنادار و مهمی در پایداری خاکدانه‌ها و نفوذ آب دارد (۸).

ذخیره کربن در خاک می‌تواند فرایندهای تثبیت شیمیایی و فرایندهای بیوشیمیایی و محافظت فیزیکی آن را شامل شود. علاوه بر

خاک، منبع زمینی مهم و با ارزش در ذخیره کربن آلی است که با نگهداشت حدود ۱۵۰۰ میلیارد تن کربن نقش قابل‌توجهی در فرآیند چرخه جهانی کربن دارد. مراتع در این خصوص یکی از اجزاء مهم این چرخه بوده و تخمین زده می‌شود که ۱۰ تا ۳۰ درصد کربن آلی دنیا در این اکوسیستم‌ها ذخیره شده است (۱۵). مواد آلی از کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، سلولز، همی‌سلولز و لیگنین تشکیل شده‌اند. سه ترکیب اولی به سرعت تجزیه می‌شوند، از این رو در تامین غذای جانداران خاک و نیز دانه‌بندی خاک اهمیت بیشتری دارند. اما، دو ترکیب بعدی مقاوم‌تر هستند (۳). از طرفی کربن آلی خاک یکی از پارامترهای مهم تعیین‌کننده میزان حاصلخیزی خاک، قابلیت تولید و شاخص مهمی در نشان دادن کیفیت خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است که در آن مقادیر ورودی کربن ناچیز است (۷، ۲۰ و ۳۵). فاکتورهای مهم کنترل‌کننده میزان کربن آلی خاک شامل اقلیم، دما، میزان رطوبت، عوامل بیولوژیکی، ترکیب گیاهی،

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

\* - نویسنده مسئول: (Email: sheklabadi@basu.ac.ir)

۳ - استادیار مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان

DOI: 10.22067/jsw.v33i5.80484

اکوسیستم‌های خشکی در ذخیره کربن هستند. اگر چه مقدار ذخیره کربن آن‌ها در واحد سطح ناچیز است، اما با توجه به وسعت بالای آن‌ها، این اراضی دارای قابلیت زیادی جهت ترسیب کربن می‌باشد (۲۷). گیاهان مرتعی با سیستم‌های ریشه‌ای گوناگون دارای ترشحات ریشه‌ای مختلفی هستند که می‌توانند با رهاسازی ترکیبات آلی متفاوت تاثیر بسزایی در میزان کربن آلی و همچنین بخش بندی فیزیکی و بیوشیمیایی کربن آلی خاک داشته باشند. لذا این پژوهش با هدف بررسی تغییرات بخش بندی اندازه دانه‌ای و بیوشیمیایی کربن آلی خاک در فواصل مختلف از سطح ریشه‌ی پنج گیاه مرتعی انجام پذیرفت.

## مواد و روش‌ها

### منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی نمونه برداری مرتعی در همدان با طول و عرض جغرافیای  $34^{\circ} 49' 05''$  شرقی و  $48^{\circ} 15' 11''$  شمالی بود. میانگین دما و بارندگی سالانه‌ی این منطقه به ترتیب ۱۱ درجه‌ی سلسیوس و ۳۵۰ میلی‌متر است. اقلیم این منطقه خشک و نیمه‌خشک با یک فصل تابستان خشک می‌باشد. گونه‌های گیاهی غالب در منطقه عبارت بودند از اگروپیرون (*Agropyron cristatum*)، گون (*Astragalus verus*)، فستوکا (*Festuca ovina*)، فلومیس (*Phlomis oliveri*) و بابونه (*Tanacetum parthenium*) که در یک شیب روبه شمال با خاکی به عمق تقریباً ۵۰ سانتی‌متر و دارای سنگ مادری شیست رشد کرده بودند. نمونه برداری از خاک‌های تحت تاثیر قرار گرفته توسط ریشه‌ی گیاهان فوق‌الذکر انجام پذیرفت.

### نمونه برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های خاک از ریشه‌ی پنج گیاه مرتعی غالب منطقه برداشت شدند. نمونه‌های دست‌نخورده‌ی خاک و ریشه‌ی گیاهان به صورت کامل و یک‌جا به آزمایشگاه منتقل شدند. جداسازی خاک‌های ریزوسفری از ریشه‌ها بر اساس روش تورپالت (۲۹) انجام شد. در این روش پس از خشک شدن نمونه‌ها با تکان دادن ریشه‌ها خاک‌های مختلفی بدست آمد که عبارت بودند از خاک ریزوسفری که مستقیماً به ریشه‌ها چسبیده بودند (ناحیه A) و خاک بین‌ریزوسفری که در محیط ریشه و تحت تاثیر فعالیت ریشه بودند اما به ریشه‌ها نچسبیده بودند و با تکان دادن جدا می‌شدند (ناحیه B) و همچنین خاک‌هایی که تحت تاثیر فعالیت‌های ریشه قرار نگرفته بودند و عبارتی خاک‌های توده‌ای (ناحیه C) نامیده شدند.

پس از جداسازی خاک از ریشه‌ها و عبور دادن نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متر برخی ویژگی‌های خاک شامل pH در نسبت آب به خاک ۲/۵ : ۱، کربنات کلسیم معادل با روش تغییر فشار گاز در اثر افزودن اسید کلریدریک (۱۸)، کربن آلی خاک با روش اکسایش تر (۳۲) و بافت خاک اندازه‌گیری شد.

این در مقیاس بزرگ نیز ماده آلی اساساً مسئول ثبات خاکدانه‌های بزرگ است و با این وجود این نوع ماده آلی کمتر از ماده آلی در خاکدانه‌های کوچک تر محافظت می‌گردد (۹). ذخیره کربن خاک نتیجه تعادل خالص بین ورودی کربن و خروجی آن است. این جریان بیولوژیکی بعنوان یکی از مهم‌ترین عوامل اصلی در تعیین رفتارهای فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و کلاً هویت خاک شناخته می‌شوند. کانی‌های رسی به دلیل برخورداری از سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، نقش مهمی در ایجاد اشکال پایدار با ماده آلی و تشکیل خاکدانه ایفا می‌کنند (۱۰). این عمل از طریق ایجاد پیوند با مولکول‌های آلی و غیر قابل دسترس شدن این مواد برای ریزجانداران در درون خاکدانه‌های کوچک تر صورت می‌گیرد (۲۲). بخش بندی اندازه دانه‌ای خاکدانه‌ها برای بررسی خاک‌هایی با پایداری پایین روش سودمند در بخش بندی کربن آلی خاک گزارش شده است. در این روش کربن آلی خاک در بخش‌های هم اندازه شن و سیلت و رس بخش بندی می‌شود. درصد کربن آلی در دانه‌های هم اندازه شن جدا شده با این روش بخش بندی فیزیکی، می‌تواند مواد آلی درشتی باشد که هنوز تجزیه نشده و تازه است. بخش دیگری از آن، برخی از مواد آلی نیمه‌تجزیه شده‌ای است که با مواد کانی خاک پوشیده شده و پیوند نیرومندی با آن‌ها دارد (۲۴). در خاک ریزوسفری پلی‌ساکاریدهای گیاهی و باکتریایی بیش‌تری پدید می‌آید و از سوی دیگر مرگ و رها شدن یاخته‌های مویین ریشه در خاک ریزوسفری (۲۵) می‌تواند به افزایش مواد آلی در آن بیانجامد، به گونه‌ای که می‌توانند با پیوند به کانی‌های خاک، خود را در بخش‌های گوناگون اندازه‌ای نشان دهند (۲۶). در خاک‌های معدنی، کربن آلی خاک معمولاً در فضاهای درون خاکدانه‌ای خاکدانه‌های با اندازه‌ی ۲-۵۰ میکرومتر مسدود می‌شوند که این امر جلوی دسترسی ریزجانداران به این بخش و تجزیه‌ی کربن آلی را می‌گیرد (۳۴). برهمکنش بین بخش‌های معدنی و کانی‌های رسی با مواد آلی خاک و تشکیل خاکدانه می‌تواند منجر به پایداری بیشتر کربن آلی در خاک شود. در این فرایندها معمولاً کربن آلی در منافذ خاکدانه‌ها مسدود می‌گردد یا بصورت فیزیکی توسط مواد معدنی پوشیده می‌شود تا از دسترس ریزجانداران خارج گردد (۲). از طرف دیگر برای بررسی مقاومت به تجزیه‌ی مواد آلی از روش‌های بخش بندی بیوشیمیایی استفاده می‌شود. در این بخش بندی مواد آلی بر اساس مقاومت در برابر هیدرولیز اسیدی به بخش‌های غیرمقاوم و مقاوم به تجزیه تقسیم می‌گردند (۲۸)، که هر یک شاخصی از وضعیت کربن آلی خاک و شدت و نوع فعالیت ریزجانداران در تخریب و تجزیه‌ی مواد آلی خاک می‌باشند. با افزایش مواد آلی تازه افزوده شده به خاک بخش‌های حساس‌تر به تجزیه دارای مقادیر بیشتری هستند که با گذر زمان و بیشتر شدن میزان تجزیه توسط ریزجانداران سهم کربن مقاوم به تجزیه افزایش چشمگیری دارد. (۲۳)

مراتع در حدود نیمی از خشکی‌های جهان را تشکیل می‌دهند و حاوی بیش از یک سوم ذخایر کربن زمین بوده و یکی از مهم‌ترین

داده‌های بدست آمده در این پژوهش به صورت فاکتوریل شامل فاکتورهای نوع گیاه در ۵ سطح و فاصله از ریشه گیاه در ۳ سطح و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای هر یک از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده تحلیل واریانس (ANOVA) به منظور تعیین اثرات معنادار فاکتورهای اصلی نوع گیاه و فاصله از ریشه و اثرات متقابل آنها انجام شد. برای مقایسه‌ی میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده گردید. ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مورد مطالعه محاسبه گردید. کلیه‌ی تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای SAS.9.2 و SPSS.16.0 انجام شد.

### نتایج و بحث

در این مطالعه نمونه‌های خاک در یک زمان و از مکان‌های با شدت شیب، جهت شیب و توپوگرافی تقریباً یکسان جمع‌آوری گردیدند. بنابراین می‌توان گفت عوامل خاکساز از جمله اقلیم، مواد مادری و زمان برای تمام گونه‌ها یکسان و هرگونه تغییر در ویژگی‌های خاک ناشی از اثر فعالیت ریشه‌ی گیاهان مورد مطالعه بوده است.

تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی و بیوشیمیایی اندازه‌گیری شده نشان از تاثیر فعالیت‌های ریشه‌های گیاهان بر خصوصیات وابسته به میزان اسیدیته‌ی خاک است (جدول ۱). بررسی نتایج تغییرات pH خاک بیانگر افزایش میزان اسیدیته‌ی خاک و کاهش pH با نزدیک‌تر شدن به سطح ریشه‌ها بود. کمترین مقدار میانگین pH در ناحیه‌ی A برابر با ۶/۸۵ و بیشترین مقدار در ناحیه‌ی C و برابر با ۷/۵۳ بود. همچنین تغییرات مقادیر کربنات کلسیم نیز نشان‌دهنده‌ی روندی مطابق با تغییرات اسیدیته بود و با نزدیک‌تر شدن به سطح ریشه‌ها میزان کربنات کلسیم بعنوان یکی از مهم‌ترین عوامل خاکدانه‌سازی کاهش می‌یافت. بنظر می‌رسد با نزدیک‌تر شدن به سطح ریشه‌ها میزان ترشحات ریشه‌ای افزایش و اسیدهای آلی دارای غلظت بیشتری می‌شوند که این امر موجب کاهش pH در این نواحی و متعاقباً افزایش انحلال کربنات‌های کلسیم و خروج این ترکیبات از نواحی نزدیک‌تر به ریشه‌ها می‌گردد. بالاترین میزان میانگین کربنات کلسیم در ناحیه‌ی C به میزان ۷/۵۵٪ و کمترین مقدار در ناحیه‌ی A و برابر با ۲/۸۲٪ بود. بافت خاک در تمام نمونه‌های مختلف ریشه گیاهان و فاصله‌های مختلف اندازه‌گیری گردید و علیرغم تغییرات جزئی اجزای بافت خاک در فواصل مختلف از سطح ریشه‌ها، تمامی نمونه‌های خاک دارای بافت لوم شنی بودند (جدول ۲).

مطالعه‌ی تغییرات مقادیر وزنی کلاس‌های مختلف اندازه خاکدانه‌ای در فواصل مختلف از سطح ریشه‌ها نشان داد که با افزایش فاصله از سطح ریشه مقادیر وزنی خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر به صورت معناداری افزایش یافتند. دلیل این امر می‌تواند کاهش عوامل سازنده‌ی خاکدانه‌های درشت در سطح ریشه باشد.

### بخش بندی اندازه‌ای کربن آلی

برای ارزیابی مقادیر کربن آلی خاک در اندازه‌های خاکدانه‌های مختلف از روش الک تر بهره‌گیری شد. ابتدا نمونه‌های هوا خشک سطحی از الک ۴ میلی‌متر عبور داده شدند و سپس ۵۰ گرم خاک هواخشک وزن و به آرامی نزدیک ظرفیت زراعی مرطوب شدند تا از حبس هوا در خاکدانه‌ها و متلاشی شدن آنها در موقع ورود یکباره‌ی آب جلوگیری شود. سپس نمونه‌ها در سری الک‌های مرطوب از بالا به پایین ۲ و ۰/۵ و ۰/۱۵ میلی‌متر قرار داده شدند (۱۳). الک کردن با کورس ۱/۳ سانتی‌متر و سرعت ۳۰ دور در دقیقه برای مدت ۱۰ دقیقه درون سطل پر از آب شهر با حرکت رفت و برگشتی انجام شد. سطح آب طوری تنظیم شد که موقع حرکت به سمت بالا نمونه خاک از آب بیرون نیاید. پس از پایان الک کردن، الک‌ها به آرامی از داخل سطل بیرون آورده شده و خاکدانه‌های روی هر الک و همچنین خاکدانه‌های عبور کرده از الک ۰/۱۵ میلی‌متر جمع‌آوری و در آون با دمای ۵۰ درجه سلسیوس به منظور جلوگیری از سوختن ماده آلی طی ۳ روز خشک شدند. مقادیر پایداری خاکدانه‌ها و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) به عنوان شاخص پایداری خاکدانه‌ها (۱۳) تعیین گردید. مقدار کربن آلی در هر سری از خاکدانه‌های جمع‌آوری شده به روش اکسایش تر تعیین شد (۳۲).

### بخش بندی بیوشیمیایی کربن آلی

نمونه‌های خاک برای روش عصاره‌گیری متوالی در فرایندهای هیدرولیز و اکسیداسیون براساس روش تغییر یافته‌ی روویرا و همکاران (۲۳) آماده‌سازی شدند. مقدار ۵۰۰ میلی‌گرم خاک عبور داده شده از الک ۲ میلی‌متر در هاون کوبیده و برای عصاره‌گیری متوالی منظور شد. در ابتدا برای بدست آوردن بخش کربن آلی محلول در آب دو مرتبه‌ی پیپتی سولفات پتاسیم ۰/۱ مولار در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سلسیوس به مدت یک‌ساعت به نمونه‌ها اضافه شد. عصاره‌های بدست آمده پس از سانتریفیوژ نمونه‌ها بعنوان بخش کربن محلول در آب در نظر گرفته شدند. سپس خاک باقیمانده با ۲۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۲/۵ مولار در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه تیمار گردید و پس از سانتریفیوژ و جداسازی عصاره‌ی خاک مجدداً نمونه‌ها در فضای اتاق خشک شدند. در ادامه به نمونه‌ها مقادیر ۱/۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۷۲٪ اضافه شد و به مدت یک شب در دمای اتاق تکان داده شدند. سپس نمونه‌ها سانتریفیوژ و به عصاره‌ی قبلی اضافه شدند تا بعنوان بخش قابل دسترس ماده آلی شناخته شوند. کربن موجود در بقایای جامد نمونه‌های خاک پس از عصاره‌گیری‌های مراحل قبلی، بعنوان بخش کربن مقاوم به تجزیه در نظر گرفته شد.

### تجزیه آماری

1- Mean Weight Diameter

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در فواصل مختلف از ریشه گیاهان  
Table 1- Some physiochemical properties of soils at different distances from root surface

	A	B	C	میانگین فاصله‌های مختلف از سطح ریشه Mean values of OC at different distances from root
<b>OC</b>				
Agropyron آگروپیرون	3.477	2.457	0.791	2.242
Astragalus گون	4.052	2.976	0.728	2.585
Festuca فستوکا	3.818	1.847	0.869	2.178
Phlomis فلومیس	1.707	1.173	0.730	1.203
Tanacetum بابونه	4.160	2.445	0.858	2.488
میانگین کربن در هر فاصله Mean values of OC for a given distance	3.443	2.180	0.795	CV=0.56
<b>pH</b>				
Agropyron آگروپیرون	6.54	7.16	7.66	7.12
Astragalus گون	6.76	7.38	7.63	7.26
Festuca فستوکا	6.80	7.14	7.37	7.10
Phlomis فلومیس	7.05	7.21	7.44	7.23
Tanacetum بابونه	7.11	7.28	7.57	7.32
میانگین pH در هر فاصله Mean values of pH for a given distance	6.85	7.23	7.53	CV=0.05
<b>CCE %* کربنات کلسیم</b>				
Agropyron آگروپیرون	2.36	2.83	6.73	3.976948
Astragalus گون	2.98	3.69	7.66	4.775859
Festuca فستوکا	2.99	3.99	7.74	4.907252
Phlomis فلومیس	3.21	4.15	6.80	4.721441
بابونه Tanacetum	2.54	5.67	8.81	5.67154
میانگین کربنات کلسیم در هر فاصله Mean values of CCE for a given distance	2.82	4.07	7.55	CV=0.48

CCE: Cabonate Calcium Equivalent

از طرفی با افزایش فعالیت ریزجانداران میزان تجزیه‌ی مواد آلی دانه‌ای (POM<sup>1</sup>) که شامل مواد آلی تازه و تجزیه‌نشده حاصل از فعالیت ریشه و افزودن لاشبرگ‌ها به خاک است، افزایش می‌یابد. مواد آلی دانه‌ای معمولاً با بخش معدنی پیوند نشده‌اند و بشدت برای مصرف ریزجانداران فراهم هستند. در نتیجه این مواد که موجب پیوند خاکدانه‌های ریز و تولید خاکدانه‌های درشت هستند، سریعاً تجزیه شده و مقادیر وزنی خاکدانه‌های کوچک‌تر در سطح ریشه به طرز معناداری افزایش می‌یابد (۴). همچنین با توجه به اینکه ورودی کربن

بعبارت دیگر با کاهش اندازه‌ی خاکدانه‌ها، مقادیر وزنی خاکدانه های کوچک‌تر در سطح ریشه (ناحیه‌ی A) افزایش یافت، به‌صورتی که در خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر اثر نوع گیاه و فاصله از سطح ریشه به صورت بسیار معنادار روی تغییرات وزنی این خاکدانه‌ها اثر داشت (جدول ۳). مقادیر همبستگی نشان داده شده در جدول ۶ بیانگر اثر متقابل و معنادار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (MWD) و مقادیر کربن آلی خاک با ذرات بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر می‌باشند. افزایش کربن آلی در نزدیکی سطح ریشه موجب افزایش فعالیت ریزجانداران در این ناحیه می‌گردد (۳۰).

1- Particulate Organic Matter

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب افزایش یافت و مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب بین گیاهان مختلف برای هر فاصله‌ی مشخص از ریشه به صورت معناداری باهم متفاوت بودند. کمترین میزان میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب در ناحیه ی A گیاه گون و به میزان ۰/۸۲۵ و بیشترین مقدار در ناحیه C گیاهان فلومیس و اگروپیرون با مقادیر ۱/۶۷۳ و ۱/۶۷۲ بودند.

مقادیر همبستگی بین MWD و سایر پارامترهای خاک نشانگر همبستگی بسیار معنادار بین MWD با ذرات بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر، ۰/۱۵-۰/۵ میلی‌متر و ذرات کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر بود (جدول ۶). همچنین همبستگی بسیار معناداری بین MWD و مقادیر کربن آلی خاک و همچنین مقادیر کربن در بخش‌های خاکدانه‌ای بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر مشاهده گردید (جدول ۶). افزوده شدن بقایای گیاهی از یک طرف و شدت تجزیه‌ی آن‌ها توسط ریزجانداران از طرف دیگر، عوامل اصلی تشکیل خاکدانه‌های ریز و درشت و تعیین کننده‌ی اصلی قطر ذرات در فواصل مختلف از سطح ریشه هستند (۳۱). با افزایش فاصله از سطح ریشه مقادیر MWD، به دلیل کاهش شدت تجزیه‌ی مواد آلی توسط ریزجانداران و متعاقباً افزایش مواد پیوند دهنده‌ی خاکدانه‌های کوچک و تشکیل خاکدانه‌های بزرگ‌تر، افزایش یافت.

به خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبتاً کم است، میزان ورودی بقایای گیاهی قابل دسترس برای ریزجانداران معمولاً کمتر از میزان تجزیه آنها توسط ریزجانداران است و فرصت تشکیل خاکدانه‌های درشت‌تر در نزدیکی ریشه‌ها که محل تجمع و فعالیت ریزجانداران است کمتر از مناطقی است که کمتر تحت تاثیر فعالیت‌های ریشه و ریزجانداران قرار گرفته‌اند (۵). نتایج میانگین هر فاصله برای گیاهان مختلف در ذرات بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر نشان دهنده‌ی وجود اختلاف معنادار بین نواحی A و C بود. همچنین مقادیر وزنی ذرات در فواصل مختلف از سطح ریشه برای اندازه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر نشانگر وجود تفاوت معنادار بین نواحی A و C در تمام گیاهان بغیر از فستوکا بود (جدول ۳). این اختلاف‌های معنادار بین نواحی A و C در خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر بیانگر شدت‌های متفاوت تاثیر فعالیت ریزجانداران و تجزیه بقایای گیاهی توسط آن‌ها در فواصل مختلف از سطح ریشه می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس میانگین اندازه ذرات نشان داد که معمولاً گیاهان مرئی مورد بررسی اثر معناداری روی تغییرات وزنی ذرات با اندازه‌های مختلف ندارند (جدول ۵). در ذرات بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر می‌توان اثر فاصله از ریشه را در سطح ۵ درصد معنادار یافت. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (MWD) نیز بیانگر اثر بسیار معنادار فاصله از سطح ریشه بر قطر خاکدانه‌ها می‌باشد (جدول ۵). به صورتی که در تمام گیاهان با افزایش فاصله از سطح ریشه مقادیر

جدول ۲- تغییرات اجزا بافت خاک در فواصل مختلف از ریشه‌ی گیاهان  
Table 2- Changes of soil texture components at different distances from root surface

	A	B	C
<b>اگروپیرون</b>			
رس % Clay	15.8	15.5	15.6
سیلت % Silt	30.5	30.7	30.8
شن % Sand	53.7	53.8	53.6
<b>گون</b>			
رس % Clay	15.4	15.4	15.2
سیلت % Silt	30.6	31.8	30.9
شن % Sand	54.0	52.8	53.8
<b>فستوکا</b>			
رس % Clay	16.2	15.7	15.5
سیلت % Silt	30.7	31.0	31.6
شن % Sand	53.1	53.3	52.9
<b>فلومیس</b>			
رس % Clay	15.3	15.3	15.2
سیلت % Silt	29.6	30.8	29.9
شن % Sand	55.0	53.9	54.9
<b>بابونه</b>			
رس % Clay	15.8	15.7	15.7
سیلت % Silt	30.1	30.8	29.8
شن % Sand	54.1	53.5	54.5

جدول ۳- تغییرات وزنی خاکدانه‌های موجود در هر کلاس اندازه‌ای در فواصل مختلف از ریشه‌ی گیاهان

Table 3- Changes in aggregate size at different distances from root surface

	A	B	C	میانگین اندازه خاکدانه‌ای فاصله‌های مختلف از سطح ریشه Mean values of aggregate size in aggregates at different distances from root
<b>&gt; 2 mm</b>				
Agropyron اگروپیرون	0.206	0.209	0.388	0.268
Astragalus گون	0.219	0.308	0.371	0.299
Festuca فستوکا	0.225	0.277	0.368	0.290
Phlomis فلومیس	0.214	0.416	0.456	0.362
Tanacetum بابونه	0.215	0.400	0.466	0.360
میانگین اندازه خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله Mean values of aggregate size for a given distance from root	0.216 B	0.322 AB	0.410 A	
<b>0.5-2 –mm</b>				
Agropyron اگروپیرون	0.249	0.187	0.362	0.266
Astragalus گون	0.170	0.274	0.240	0.228
Festuca فستوکا	0.261	0.124	0.327	0.238
Phlomis فلومیس	0.280	0.278	0.175	0.244
Tanacetum بابونه	0.132	0.186	0.135	0.151
میانگین اندازه خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله Mean values of aggregate size for a given distance from root	0.219	0.210	0.248	
<b>mm0.15-0.5</b>				
Agropyron اگروپیرون	0.270	0.316	0.154	0.247
Astragalus گون	0.241	0.196	0.170	0.202
Festuca فستوکا	0.280	0.236	0.193	0.236
Phlomis فلومیس	0.244	0.174	0.230	0.216
Tanacetum بابونه	0.191	0.186	0.185	0.187
میانگین اندازه خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله Mean values of aggregate size for a given distance from root	0.245	0.222	0.186	
<b>&lt;mm0.15</b>				
Agropyron اگروپیرون	0.343 abc	0.287 bcd	0.103 e	0.244
Astragalus گون	0.422 ab	0.222 cde	0.219 cde	0.287
Festuca فستوکا	0.294 bcd	0.363 abc	0.160 cde	0.272
Phlomis فلومیس	0.400 ab	0.132 de	0.139 cde	0.224
Tanacetum بابونه	0.463 a	0.229 cde	0.277 bcd	0.323
میانگین اندازه خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله Mean values of aggregate size for a given distance from root	0.384	0.246	0.179	
<b>MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب</b>				
Agropyron اگروپیرون	0.957	0.987	1.672	1.205
Astragalus گون	0.825	1.348	1.484	1.219
Festuca فستوکا	0.934	1.091	1.340	1.122
Phlomis فلومیس	0.983	1.663	1.673	1.440
Tanacetum بابونه	1.575	1.509	1.642	1.575
میانگین اندازه قطر خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله Mean values of MWD for a given distance from root	1.055 A	1.320 B	1.562 C	

اعداد با حروف مشترک در هر ستون دارای اختلاف معنادار ( $P < 0.05$ ) نمی‌باشند.

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns ( $P < 0.05$ ).

جدول ۴- تغییرات کربن آلی خاکدانه‌ای در فواصل مختلف از ریشه‌ی گیاهان  
Table 4- Changes in Organic Carbon of aggregate at different distances from root surface

	A	B	C	میانگین کربن خاکدانه‌ای فاصله‌های مختلف از سطح ریشه Mean values of OC in aggregates at different distances from root
OC				
Agropyron آگروپیرون	3.477	2.457	0.791	2.242
Astragalus گون	4.052	2.976	0.728	2.585
Festuca فستوکا	3.818	1.847	0.869	2.178
Phlomis فلومیس	1.707	1.173	0.730	1.203
Tanacetum بابونه	4.160	2.445	0.858	2.488
میانگین کربن خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله	3.443	2.180	0.795	
Mean values of OC for a given distance from root				
> 2 mm				
Agropyron آگروپیرون	0.457	0.458	0.520	0.478
Astragalus گون	0.633	1.013	0.289	0.645
Festuca فستوکا	0.624	0.435	0.409	0.489
Phlomis فلومیس	0.324	0.609	0.363	0.432
Tanacetum بابونه	0.775	0.861	0.717	0.785
میانگین کربن خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله	0.563	0.675	0.460	
Mean values of OC for a given distance from root				
0.5-2 -mm				
Agropyron آگروپیرون	0.433	0.418	0.457	0.436
Astragalus گون	0.334	0.919	0.111	0.455
Festuca فستوکا	0.843	0.179	0.575	0.532
Phlomis فلومیس	0.123	0.315	0.434	0.291
Tanacetum بابونه	0.370	0.486	0.123	0.327
میانگین کربن خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله	0.421	0.463	0.340	
Mean values of OC for a given distance from root				
0.15-0.5 mm				
Agropyron آگروپیرون	0.960	0.848	0.254	0.687
Astragalus گون	0.899	0.635	0.252	0.596
Festuca فستوکا	0.942	0.285	0.449	0.559
Phlomis فلومیس	0.251	0.287	0.402	0.313
Tanacetum بابونه	0.757	0.481	0.110	0.449
میانگین کربن خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله	0.762 A	0.507 B	0.293 B	
Mean values of OC for a given distance from root				
<mm0.15				
Agropyron آگروپیرون	1.164 bcde	1.071 bcde	0.077 g	0.771
Astragalus گون	1.558 ab	0.591 efg	0.173 fg	0.774
Festuca فستوکا	1.360 bc	0.806 cdef	0.147 g	0.771
Phlomis فلومیس	1.232 bcd	0.113 g	0.312 fg	0.552
Tanacetum بابونه	2.057 a	0.666 defg	0.428 fg	1.050
میانگین کربن خاکدانه‌ای گیاهان در هر فاصله	1.474	0.649	0.228	
Mean values of OC for a given distance from root				

اعداد با حروف مشترک در هر ستون دارای اختلاف معنادار ( $P < 0.05$ ) نمی‌باشند.  
Numbers followed by the same letter are not significantly differentns ( $P < 0.05$ ).

کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر دارای اختلاف آماری معناداری بودند (جدول ۴). افزایش درصد کربن آلی در ناحیه‌ی A با کوچک‌تر شدن اندازه‌ی خاکدانه‌ها می‌تواند به دلیل افزایش درجه‌ی تجزیه ماده آلی و ایجاد پیوند قوی بین مواد آلی و مواد معدنی با تشکیل کمپلکس‌های آلی-معدنی که به شدت در مقابل تجزیه مقاوم هستند باشد (۱۶). نتایج جدول تجزیه واریانس برای مقادیر کربن آلی خاک نشانگر اثر بسیار معنادار نوع گیاه و فاصله از سطح ریشه بر تغییرات کربن آلی خاک بود (جدول ۵). بررسی تغییرات کربن خاکدانه‌ای در اندازه‌های مختلف خاکدانه‌ای نشان از معنادار بودن اثر فاصله از سطح ریشه بر کربن آلی در خاکدانه‌های ۰/۵ - ۰/۱۵ میلی‌متر و همچنین معنادار بودن اثر نوع گیاه و فاصله از سطح ریشه در خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر داشت (جدول ۵). همچنین کربن آلی موجود در بدن ریزجانداران منبع بسیار مهم دیگری برای بالا بودن مقادیر کربن در نواحی نزدیک به ریشه و خاکدانه‌های کوچک‌تر است. بررسی مقادیر همبستگی بین کربن خاکدانه‌ای و سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده بیانگر این مطلب بود که کربن خاکدانه‌ای موجود در خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر و کربن خاکدانه‌ای خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر دارای رابطه‌ی بسیار معناداری با MWD بودند. به علاوه کربن خاکدانه‌ای خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر دارای رابطه‌ی بسیار معناداری با پارامترهای خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر، کربن آلی خاک و همه‌ی بخش‌های بیوشیمیایی کربن آلی در خاک بود (جدول ۶).

#### بخش‌بندی بیوشیمیایی کربن آلی خاک

شناخت بخش‌های بیوشیمیایی کربن آلی و مقاومت این بخش‌ها به تجزیه توسط ریزجانداران نقش بسیار مهمی در افزایش دانش درباره‌ی پویایی کربن در خاک دارد (۳۱). به منظور بررسی خصوصیات بیوشیمیایی کربن آلی در خاک از روش‌های مختلفی برای جداسازی بخش‌های کربن بر اساس ماندگاری آنها در خاک استفاده می‌شود. مقادیر کربن آلی قابل دسترس و مقاوم به تجزیه تعیین کننده‌ی کیفیت کربن آلی خاک و میزان تجزیه‌ی کربن هستند (۳۳). افزایش فعالیت میکروبی موجب افزایش کربن در بخش‌های محلول در آب و قابل دسترس می‌گردد (۱۸). مقاومت بخش‌های بیوشیمیایی کربن آلی خاک به مقادیر کل کربن آلی خاک نیز بستگی دارد (۲۳). بخش بیوشیمیایی کربن آلی خاک که حساسیت بسیار بالایی به تجزیه دارد کربن محلول در آب می‌باشد. با بررسی این بخش در فواصل مختلف از سطح ریشه مشاهده گردید که بالاترین سهم از این بخش در ناحیه‌ی A وجود دارد. ناحیه‌ی A محل تجمع ترشحات تازه‌ی ریشه که سرشار از کربوهیدرات‌های محلول و حساس به تجزیه است می‌باشد و موجب فعالیت بسیار بالای ریزجانداران در سطوح نزدیک به ریشه می‌گردد. این امر موجب اختصاص یافتن بیشتر درصد نسبی کربن محلول در آب به ناحیه‌ی A برای همه‌ی

نتایج تغییرات مقادیر کربن آلی خاک در فاصله‌های مختلف از سطح ریشه‌ها نشان داد که با افزایش فاصله از سطح گیاه میزان ماده‌ی آلی برای تمام گیاهان به صورت معنادار از ناحیه‌ی A تا ناحیه‌ی C روند کاهشی داشت. در نزدیکی سطح ریشه به دلیل بالا بودن ترشحات ریشه‌ای و همچنین تجمع کربن آلی ثانویه در بافت‌های ریزجانداران مقادیر کربن آلی به صورت معنادار بیشتر از نقاط دورتر از سطح ریشه بودند. بیشترین مقدار کربن آلی مشاهده شده برای ناحیه‌ی A گیاه بابونه با میانگین ۴/۱۶ و کمترین مقدار برای ناحیه‌ی C گیاه گون با میانگین ۰/۸۲۸ بود (جدول ۴). مقادیر همبستگی بین ماده آلی و سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده بیانگر وجود همبستگی بسیار معنادار کربن آلی خاک با پارامترهای خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر، خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر، MWD، کربن خاکدانه‌ای در خاکدانه‌های ۰/۱۵-۰/۵ میلی‌متر و کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر و کربن موجود در همه‌ی بخش‌های بیوشیمیایی بود (جدول ۶). وجود این همبستگی‌ها نشان از اهمیت بسیار زیاد کربن آلی خاک در فاکتورهای موثر بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها در خاک دارد. مواد آلی تازه افزوده شده به خاک می‌تواند در تشکیل خاکدانه‌های درشت نقش بسزایی داشته باشند در حالیکه بعد از تجزیه‌ی مواد آلی تازه، تغییر شکل و ترکیب مواد آلی موجب افزایش میزان خاکدانه‌های ریزتر که با مواد معدنی پیوند دارد شود و همچنین با افزایش میزان تجزیه تجمع ماده‌ی آلی در بخش ریزجانداران به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. با توجه به بالا بودن تجمع و فعالیت ریزجانداران در نزدیکی ریشه و همچنین بالا بودن میزان خاکدانه‌های کوچک‌تر در نزدیکی سطح ریشه‌ها، این دو عامل را می‌توان مهمترین عوامل بالا بودن ماده‌ی آلی در نزدیکی سطح ریشه‌ها نسبت به نواحی دورتر از ریشه‌ها دانست (۱۴).

در بررسی مقادیر کربن آلی در خاکدانه‌ها با اندازه‌های مختلف مشاهده شد که در خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر مقدار بیشتری از کربن آلی در نواحی B و C تجمع یافته است که به طور تقریبی در همه‌ی گیاهان میزان تجمع کربن آلی در ناحیه‌ی A دارای سهم کمتری از کل کربن آلی موجود در تمام نواحی نمونه برداری خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر بود. این امر نشاندهنده‌ی وجود کربن آلی بیشتر در خاکدانه‌های درشت‌تر در نواحی دورتر از ریشه می‌باشد که به دلیل کمتر بودن فعالیت ریزجانداران در نواحی B و C میزان تجمع کربن آلی خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر بیشتر در نواحی B و C مشاهده گردید (جدول ۴). با کاهش اندازه‌ی خاکدانه‌ها تجمع مقادیر کربن آلی از ناحیه‌ی C به سمت ناحیه‌ی A میل می‌کند. بطوریکه در خاکدانه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر میزان کربن آلی موجود در ناحیه‌ی A به مقادیری در حدود ۶۵ درصد می‌رسد. این روند افزایش کربن آلی خاک با کوچک‌تر شدن اندازه‌ی خاکدانه‌ها در ناحیه‌ی A در همه‌ی گیاهان به صورت مشهودی قابل ملاحظه بود و این تغییرات در اندازه‌های ۰/۱۵-۰/۵ میلی‌متر و



میلی‌متر، کربن آلی خاک، کربن قابل دسترس و کربن مقاوم به تجزیه بود (جدول ۶). نگاهی به ویژگی‌های مذکور بیانگر تاثیر مهم و غیرقابل انکار کربن آلی خاک به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر کربن بیوشیمیایی محلول در آب است. چرا که همه‌ی ویژگی‌های مذکور به نوعی وابسته به تغییرات کربن آلی خاک هستند و بصورت مستقیم و غیرمستقیم بر مقادیر کربن محلول در آب اثر می‌گذارند. کربن قابل دسترس نسبت به کربن محلول در آب مقاومت بیشتری نسبت به تجزیه توسط ریزجانداران دارد اما همچنان جزو بخش‌های سهل‌الوصول برای ریزجانداران به شمار می‌رود. با بررسی شکل ۱ مشاهده گردید که بیشترین میزان درصد نسبی تجمع کربن قابل دسترس در ناحیه‌ی A وجود داشت. گیاه فستوکا دارای بیشترین مقدار کربن قابل دسترس در ناحیه‌ی A با ۵/۳۸ میلی‌گرم کربن قابل دسترس در سه ناحیه‌ی A، B و C بود. همچنین میانگین درصد نسبی کربن قابل دسترس در ناحیه‌ی A بین همه‌ی گیاهان برابر با ۶۲/۵٪ بود که بیش از دو برابر مجموع مقادیر کربن فراهم در نواحی B و C می‌باشد.

گیاهان بود. بالاترین مقادیر کربن محلول در آب در ناحیه‌ی A گیاه گون با ۴/۳۶ میلی‌گرم مشاهده گردید (شکل ۱). بطور کلی میانگین تقریبی کربن محلول در آب در ناحیه‌ی A برای همه‌ی گیاهان مقداری در حدود ۶۶٪ را به خود اختصاص داده بود که از مجموع میانگین کربن محلول در آب برای نقاط B و C هم بالاتر بود. حضور گسترده‌ی ریزجانداران و ترشحات تازه و سرشار از قندهای حساس به تجزیه دلیل اصلی بالا بودن این میزان کربن محلول در آب (۳۶) در ناحیه‌ی A در گیاهان مورد مطالعه بود (شکل ۱). همچنین بررسی نتایج تجزیه واریانس بخش‌های بیوشیمیایی کربن آلی خاک حاکی از معنادار بودن اثرات فاکتورهای نوع گیاه و فاصله از سطح ریشه بر بخش‌های بیوشیمیایی کربن در سطح یک درصد بود (جدول ۵). به علاوه بررسی مقادیر همبستگی کربن محلول در آب نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی بسیار معنادار کربن محلول در آب با ویژگی‌هایی از قبیل میانگین وزنی ذرات بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر، میانگین وزنی ذرات کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر، MWD، کربن خاکدانه‌ای در اندازه‌های ۰/۱۵-۰/۵ میلی‌متر، کربن خاکدانه‌ای در اندازه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس برای خصوصیات اندازه‌گیری شده در فواصل مختلف از ریشه‌ی گیاهان

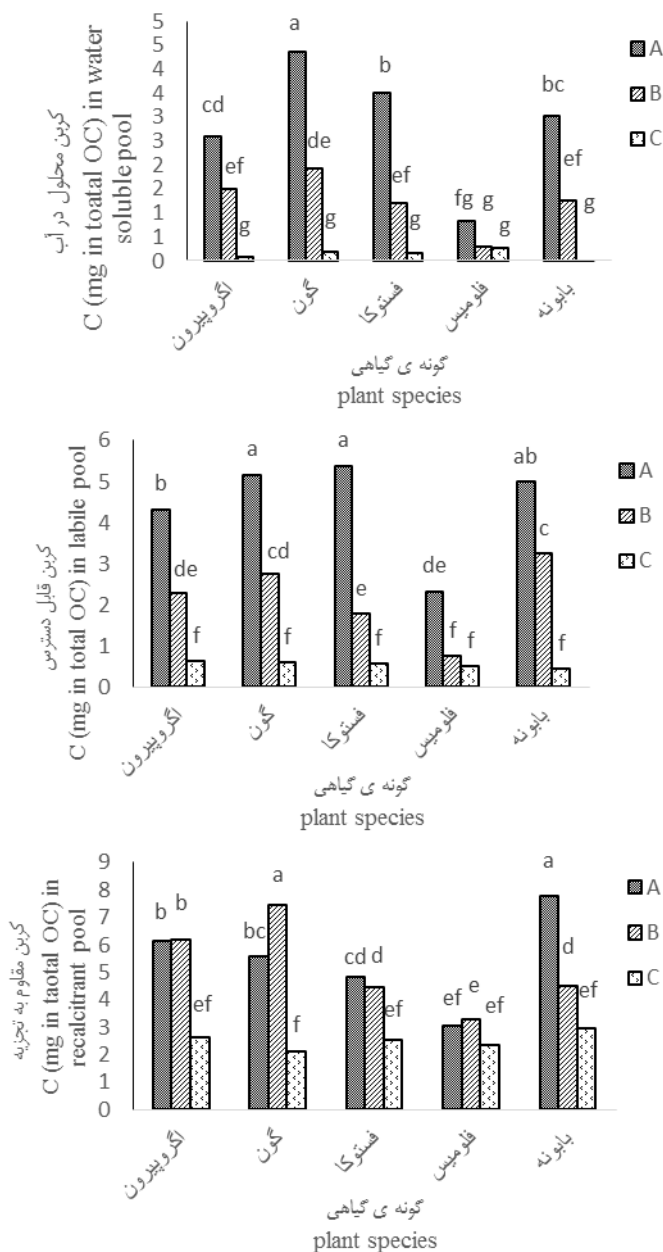
Table 5- ANOVA table of measured soil properties at different distances from root surface

پارامترها Parameters	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	f value	pr>f
<b>&gt; mm2</b>				
Plant گیاه	4	0.01623458	0.60	0.6663
Distance فاصله	2	0.12811462	4.73	0.0170*
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.00611895	0.23	0.9830
Error خطا	28	0.75875255		
<b>0.5-2 -mm</b>				
Plant گیاه	4	0.01668471	0.76	0.5632
Distance فاصله	2	0.00590366	0.27	0.7675
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.01758587	0.80	0.6110
Error خطا	28	0.61875119		
<b>mm0.15-0.5</b>				
Plant گیاه	4	0.00517356	0.80	0.5356
Distance فاصله	2	0.01191025	1.84	0.1773
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.00539376	0.83	0.5808
Error خطا	28	0.18112596		
<b>&lt;mm0.15</b>				
Plant گیاه	4	0.01215471	1.70	0.1779
Distance فاصله	2	0.15292778	21.39	<.0001**
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.01735161	2.43	0.0393*
Error خطا	28	0.20015157		
<b>MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب</b>				
Plant گیاه	4	0.24221914	2.23	0.0926
Distance فاصله	2	0.77403805	7.12	0.0033**
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.09968361	0.92	0.5180
Error خطا	27	2.93606980		

پارامترها Parameters	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	f value	pr>f
<b>کربن آلی کل</b> <b>Total OC</b>				
Plant گیاه	4	2.71859992	38.19	<.0001**
Distance فاصله	2	26.30339107	369.54	<.0001**
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.87697856	12.32	<.0001**
Error خطا	30	2.13535674		
<b>کربن آلی در ۲ mm &gt;</b> <b>OC in &gt;2 mm</b>				
Plant گیاه	4	0.18466767	0.92	0.4656
Distance فاصله	2	0.15952427	0.80	0.4613
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.08736143	0.44	0.8893
Error خطا	27	5.61425996		
<b>کربن آلی در ۲ mm - ۰.۵ /</b> <b>OC in 0.5-2 mm</b>				
Plant گیاه	4	0.08296926	0.53	0.7155
Distance فاصله	2	0.04419641	0.28	0.7568
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.19482408	1.24	0.3152
Error خطا	26	4.07901989		
<b>کربن آلی در ۰.۵ mm - ۰.۱۵ /</b> <b>OC in 0.15-0.5 mm</b>				
Plant گیاه	4	0.18452688	1.75	0.1668
Distance فاصله	2	0.78763071	7.48	0.0025**
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.15014250	1.43	0.2296
Error خطا	28	2.94978776		
<b>کربن آلی در ۰.۱۵ mm &lt;</b> <b>OC in &lt;0.15 mm</b>				
Plant گیاه	4	0.28096740	2.71	0.0511
Distance فاصله	2	5.39411232	52.02	<.0001**
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	0.25279155	2.44	0.0397*
Error خطا	27	2.79946359		
<b>کربن در بخش محلول در آب</b> <b>C in Water soluble pool</b>				
Plant گیاه	4	3.41563509	17.36	<.0001**
Distance فاصله	2	27.89228030	141.79	<.0001**
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	1.44702457	7.36	<.0001**
Error خطا	30	5.90163940		
<b>کربن در بخش قابل دسترس</b> <b>C in Labile pool</b>				
Plant گیاه	4	4.3274740	19.91	<.0001**
Distance فاصله	2	57.4307860	264.21	<.0001**
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	1.5482818	7.12	<.0001**
Error خطا	30	6.5210268		
<b>کربن در بخش مقاوم به تجزیه</b> <b>C in Recalcitrant pool</b>				
Plant گیاه	4	8.25757403	22.61	<.0001**
Distance فاصله	2	39.98987988	109.50	<.0001**
Plant*Distance گیاه * فاصله	8	4.57645188	12.53	<.0001**
Error خطا	30	10.9558495		

جدول ۶- مقادیر همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده‌ی خاک در فواصل مختلف از سطح ریشه  
Table 6- Correlation values between soil parameters of different distances from root surface

	2 mm >	mm 0.5-2	mm 0.15-0.5	mm <0.15	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها MWD	کربن > 2mm OC in	کربن 2 mm OC in 0.5-2	کربن 0.5-2 mm OC in 0.15-0.5	کربن < 0.15 mm OC in	کربن Total OC	کربن محلول در آب C in Water soluble pool	کربن قابل دسترس C in Labile pool	کربن مقاوم به تجزیه C in Recalcitrant pool
> 2 mm	1												
0.5-2-mm	-.345*	1											
mm0.15-0.5	.480**	-.242	1										
< mm0.15	.590**	-.310*	.196	1									
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها MWD	.941**	-.195	-.570**	-.699**	1								
کربن > 2mm OC in	.395*	-.363*	-.221	-.016	.346*	1							
کربن 2 mm OC in 0.5-2 mm	-.191	.663**	.006	-.327*	-.186	-.306	1						
کربن 0.5-2 mm OC in 0.15-0.5 mm	-.193	-.243	.559**	.151	-.276	.037	.145	1					
کربن < 0.15 mm OC in	.506**	-.238	.299	.806**	-.602**	.073	-.087	.443**	1				
کربن Total OC	.419**	-.172	.267	.586**	-.515**	.249	.170	.673**	.775**	1			
کربن محلول در آب C in Water soluble pool	.415**	-.151	.283	.569**	-.556**	.182	.154	.652**	.728**	.952**	1		
کربن قابل دسترس C in Labile pool	.432**	-.154	.309*	.588**	-.540**	.162	.145	.678**	.775**	.968**	.947**	1	
کربن مقاوم به تجزیه C in Recalcitrant pool	-.336*	-.178	.141	.465**	-.336*	.352*	.204	.487**	.650**	.838**	.696**	.695**	1



شکل ۱- تغییرات کربن آلی در بخش‌های بیوشیمیایی در فواصل مختلف از سطح ریشه

Figure 1- Changes in organic carbon in biochemical C pools at different distances from root surface

ویژگی‌های خاک نشان از همبستگی بسیار معنادار کربن قابل دسترس با ویژگی‌های میانگین وزنی ذرات بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر، میانگین وزنی ذرات اندازه‌های ۰/۵-۰/۱۵ میلی‌متر، میانگین وزنی ذرات کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر، MWD، کربن خاکدانه‌ای در اندازه‌های ۰/۵-۰/۱۵ میلی‌متر، کربن خاکدانه‌ای در اندازه‌های کوچک‌تر از ۰/۱۵ میلی‌متر، کربن آلی خاک، کربن قابل دسترس و کربن مقاوم به تجزیه داشت (جدول ۶). بالاترین میزان همبستگی بین کربن قابل دسترس و کربن آلی خاک با رقم ۰/۹۶۸ بود. از طرفی سایر ویژگی‌های فوق‌الذکر به صورت مستقیم و غیرمستقیم از

نتایج شکل ۱ نشان داد که میزان کربن قابل دسترس نسبت به کربن محلول در آب در نواحی B و C دارای اندکی افزایش بود که نشان‌دهنده‌ی بالاتر بودن مقاومت به تجزیه کربن قابل دسترس و حضور بیشتر این بخش از کربن در نقاط دورتر از ریشه می‌باشد. با نزدیک شدن به سطح ریشه در ناحیه‌ی A مقدار ترشحات تازه‌ی ریشه که هنوز در مراحل ابتدایی تجزیه هستند و با مواد معدنی پیوند نشده‌اند افزایش می‌یابد که این مواد سهم بسیار مهمی از کربن محلول در آب را به خود اختصاص داده‌اند (۱۲).

بررسی نتایج همبستگی بین کربن قابل دسترس و سایر

ویژگی‌های اندازه‌گیری شده داشت و بالاترین میزان همبستگی بین کربن قابل دسترس و کربن آلی خاک با رقم ۰/۸۳۸ بود (جدول ۶). همچنین بخش‌های کربن محلول در آب و کربن مقاوم به تجزیه به صورت کلی نتایج این تحقیق نشان داد که فعالیت‌های ریشه‌ی گیاهان اثرات چشمگیری بر کربن آلی خاک و بخش‌های فیزیکی و بیوشیمیایی آن دارد. گیاهان با ترشح مداوم ترکیبات کربن‌دار بستر را برای رشد ریزجانداران در سطوح ریشه‌ها فراهم می‌کنند. افزایش جمعیت ریزجانداران در نواحی نزدیک به سطح ریشه‌ها موجب افزایش تجزیه‌ی بقایای گیاهی گردید که در پی آن از میزان خاکدانه‌های درشت‌تر کاسته و مقادیر خاکدانه‌های کوچک‌تر افزایش یافت. همچنین بخش‌های بیوشیمیایی کربن آلی که دارای پایداری کمتری بودند در نواحی نزدیک‌تر به سطوح ریشه‌ها افزایش یافتند که این امر بدلیل ترشح مداوم مواد کربن‌دار و تجزیه‌نشده از ریشه‌ها به محیط خاک بود و با افزایش فاصله از سطح ریشه‌ها بر میزان بخش‌های بیوشیمیایی کربن مقاوم‌تر به تجزیه افزوده گردید.

کربن آلی خاک تاثیر می‌پذیرند. لذا می‌توان میزان کربن آلی و را از مهم‌ترین عوامل موثر بر کربن قابل دسترس خاک دانست. بررسی مقادیر کربن مقاوم به تجزیه در فواصل مختلف از ریشه‌ی گیاهان مورد مطالعه نشان داد که میزان کربن مقاوم به تجزیه در نقاط B و C دارای درصد نسبی بیشتری از کربن محلول در آب و قابل دسترس بود (شکل ۱). ناحیه‌ی A گیاه بابونه با ۷/۷۹ میلی‌گرم کربن مقاوم به تجزیه دارای بالاترین میزان بود. وجود ترکیبات کربن‌دار تازه رها شده از ریشه در نواحی نزدیک به سطح ریشه‌ها موجب بالاتر بودن درصد نسبی کربن محلول در آب و قابل دسترس نسبت به کربن مقاوم به تجزیه در ناحیه‌ی A می‌باشد. با افزایش فاصله از سطح ریشه ترکیبات کربنی از حالت شکننده و حساس به تجزیه تبدیل به ترکیباتی که دارای شدت تجزیه‌ی بیشتری هستند می‌گردند و مقاومت آنها به تجزیه توسط ریزجانداران افزایش می‌یابد (۶ و ۳۴). جدول نتایج همبستگی بین کربن مقاوم به تجزیه و سایر ویژگی‌های خاک نشان از همبستگی بسیار معنادار کربن قابل دسترس با اکثر

## منابع

- 1- Azarnivand H., Joneidi H., Zare Chahooki M.A., and Maddah Arefi H. 2011. Investigation of the effects of some ecological factors on carbon sequestration in *Artemisia sieberi* rangelands of Semnan province. *Journal of Range and Watershed Management* 64: 107–127. (In Persian)
- 2- Baldock J.A., and Skjemstad J.O. 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry* 31: 697–710.
- 3- Barber S.A. 1984. *Soil Nutrient Bioavailability*. John Wiley and Sons Publication. New York.
- 4- Bernoux M., Carvalho M.C.S., Volkoff B., and Cerri C.C. 2002. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal* 66: 888–896.
- 5- Brahim N., Blavet D., Gallali T., and Bernoux M. 2011. Application of structural equation modeling for assessing relationships between organic carbon and soil properties in semiarid Mediterranean region. *International Journal of Environmental Science and Technology* 8: 305–320.
- 6- Chantigny M.H., Angers D.A., and Beauchamp C.J. 1999. Aggregation and organic matter decomposition in soil amended with de-inking paper sludge. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1214–1222.
- 7- Chen D.Z., Zhang J.X., and Chen J.M. 2010. Adsorption of methyl tert-butyl ether using granular activated carbon: Equilibrium and kinetic analysis. *International Journal of Environmental Science and Technology* 7: 235–242.
- 8- Chenini I., and Khemiri S. 2009. Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. *International Journal of Environmental Science and Technology* 6: 509–519.
- 9- Christensen B.T. 1996. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In *structure and organic matter storage in agricultural soils* in: Cater, M. R.; Stewart, B. A., (Eds.) 97–165. CRC Press, Boca Raton.
- 10- Deneff K., and Six J. 2005. Clay mineralogy determines the importance of biological versus abiotic processes for macroaggregate formation and stabilization. *European Journal of Soil Science* 56: 469–479.
- 11- Dijkstra F.A., Carrillo Y., Pendall E., and Morgan J.A. 2013. Rhizosphere priming: a nutrient perspective. *Frontiers in Microbiology* 4: 204–216.
- 12- Kaiser K., and Zech W. 1999. Release of natural organic matter sorbed to oxides and a subsoil. *Soil Sciences Society American Journal* 63: 1157–1166.
- 13- Kemper W.D., and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: *Methods of soil analysis. Part 1: physical and mineralogical methods*. A. Klute (eds) (Monograph no.9, 2nd edn). ASA, Madison, Wis, America.
- 14- Kuzyakov Y., Hill P.W., and Jones D.L. 2007. Root exudate components change litter decomposition in a simulated rhizosphere depending on temperature. *Plant and Soil* 290: 293–305.
- 15- Lal R. 2002. Soil carbon dynamic in cropland and rangeland. *Environment Pollution* 116: 353–362.
- 16- Liu YL., Yao SH., Han XZ., Zhang B., and Banwart SA. 2017. Soil Mineralogy Changes with Different Agricultural Practices During 8-Year Soil Development from the Parent Material of a Mollisol. *Advances in Agronomy* 142: 143–179.
- 17- Loeppert R.H., and Suarez D.L. 1996. Carbonate and gypsum. In D.L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 3. 3rd ed. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI* p. 437–474.
- 18- Lopez-Sangil L., and Rovira P. 2013. Individual closed chamber: an alternative method for quantifying <sup>14</sup>C in

- both labeled organic and inorganic carbon substrates. *Biogeochemistry* 112:139-148.
- 19- Mehra O.P., and Jackson M.L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate systems buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7: 317-327.
  - 20- Okoye A.I., Ejikeme P.M., and Onukwuli O.D. 2010. Lead removal from wastewater using fluted pumpkin seed shell activated carbon: Adsorption modeling and kinetics. *International Journal of Environmental Science and Technology* 7: 793-800.
  - 21- Paustian K., Levine E., Post W.M., and Ryzhova I.M. 1997. The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale. *Geoderma* 79: 227-260.
  - 22- Pronk G.J., Heister K., Ding G.C., Smalla K., and Kögel-Knabner I. 2012. Development of biogeochemical interfaces in an artificial soil incubation experiment; aggregation and formation of organo-mineral associations. *Geoderma* 189: 585-594.
  - 23- Rovira P., Romanyà J., and Duguy B. 2012. Long-term effects of wildfires on the biochemical quality of soil organic matter: a study on Mediterranean shrublands. *Geoderma* 179: 9-19.
  - 24- Safari Sinegani A.A., and Rashidi T. 2011. Changes in phosphorus fractions in the rhizosphere of some crop species under glasshouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174: 899-907.
  - 25- Safari Sinegani A.A. 2013. *Soil Biology and Biochemistry*. Bu-Ali Sina University Publication center, Hamadan, Iran. (In Persian)
  - 26- Safari Sinegani A.A. 2015. *Soil Organic Matter*. Bu-Ali Sina University Publication Center, Hamadan, Iran. (In Persian)
  - 27- Schuman G.E., Reeder J.P., Manley J.T., Hart R.H., and Manley W.A. 1999. Impact of grazing management on the carbon and nitrogen balance of a mixed grass rangeland. *Ecological Application* 9: 65-71.
  - 28- Silveira M.L., Comerford N.B., Reddy K.R., Cooper W.T., and El-Rifai H. 2008. Characterization of soil organic carbon pools by acid hydrolysis. *Geoderma* 144: 405-414.
  - 29- Turpault M.P. 2006. Sampling of rhizosphere soil for physico-chemical and mineralogical analyses by physical separation based on dyeing and shaking. In *Handbook of methods used in rhizosphere research*. Eds. Luster J and Finlay R. pp. 196-197. Swiss Federal Research Institute WSL.
  - 30- Turpault M.P., Nys C., and Calvaruso C. 2009. Rhizosphere impact on the dissolution of test minerals in a forest ecosystem. *Geoderma* 153: 147-154.
  - 31- Von Lütow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., and Flessa H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions—A review. *European Journal of Soil Science* 57: 426-445.
  - 32- Walkley A., and Black I.A. 1934. An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter, and A Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science* 37: 29-38.
  - 33- Zhang H., and Zhou Z. 2018. Recalcitrant carbon controls the magnitude of soil organic matter mineralization in temperate forests of northern China. *Forest Ecosystems*, 5(1), p.17.
  - 34- Zimmermann M., Meir P., Bird M., Malhi Y., and Ccahuana A. 2009. Litter contribution to diurnal and annual soil respiration in a tropical montane cloud forest. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1338-1340.
  - 35- Zornoza R., Mataix-Solera J., Guerrero C., Victoria A., García-Orenes F., Mataix B., and Morugán A. 2007. Evaluation of soil quality using multiple lineal regressions based on physical, chemical and biochemical properties. *Science of the Total Environment* 378: 233-237.
  - 36- Zubair M., Anwar F., Ashraf M., and Chatha S. 2012. Effect of green and farmyard manure on carbohydrates dynamics of salt-affected soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12: 497-510.

## Particle Size and Biochemical Fractionation of Soil Organic Carbon Associated with the Roots of some Rangeland Plants

H. Lotfi Parsa<sup>1</sup> - M. Sheklabadi<sup>2\*</sup> - Gh. Asadian<sup>3</sup>

Received: 10-06-2019

Accepted: 05-10-2019

**Introduction:** Soil organic carbon (SOC) is released from decomposition of plant residues, while root secretion products in rhizosphere are also a substantial source of SOC input to soil. Binding SOC to clay minerals leads to increase aggregate stability and protects organic carbon against microorganisms. Organo-mineral complexes have important role in decreasing organic carbon decomposition. Assessment of organic carbon, particle Size and biochemical fractionation is an appropriate approach to investigate organic carbon dynamics and durability against microorganisms in rhizosphere as a hot spot of activity.

**Materials and Methods:** This study area located in a semi-arid rangeland with main plants species including five perennial rangeland species: crested wheat grass (*Agropyron cristatum*), astragalus (*Astragalus verus*), sheep fescue (*Festuca ovina*), phlomis (*Phlomis oliveri*), feverfew (*Tanacetum parthenium*). Whole soil surrounding plant roots with all roots was taken for each plant. Three samples with different distances from root surface were taken by applying this procedure: sample A: The soil which is adhered to the root surface and separates quickly from roots after drying, sample B: The soil in root zone, which is not stuck and almost is so close to roots, sample C: The soil which is wholly far from root area and apparently not affected by the roots. Intact samples removed from ground and transferred quickly to laboratory to separate roots and soils with different distances from root surface by drying the root system before shaking. Particle size fractionation was done by wet sieving of aggregates and SOC in different aggregate sizes and was measured by wet combustion method. Biochemical fractionation of SOC was performed by acid hydrolysis method to study organic carbon stability at different distances from root surface.

**Results and Discussion:** ANOVA results showed the significant effects of plants and distance from root surface on aggregate size classes. The results showed the increasing amounts of microaggregates at root vicinities compare to macroaggregates. By increasing distance from root surface, the >2 mm aggregates increased, but, the amount of <0.15 mm aggregates decreased significantly. Towards root surface from C to A locations, the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates decreased due to decreasing macro-aggregates at root vicinity. By the way, SOC increased approaching to root surface due to root exudates and rhizodeposits. The highest and lowest SOC content were found in the A location of Feverfew and the C location of Astragalus (4.16 and 0.82%), respectively. The OC contents in root vicinity were higher than other locations due to high root exudates and rhizodeposits which had C-containing molecules. Soil OC contents had significant correlation with measured soil parameters. The highest SOC content was found in micro-aggregate and in vicinity of roots. Low-decomposed OC, which have crucial role in linking microaggregates to make macroaggregates, led to high OC contents in macroaggregates. Soil OC biochemical fractionation demonstrated the higher OC contents in recalcitrant pool at further distances from root surface, while by going toward root vicinity the amounts of OC in water soluble and labile pool increased. In average for A locations, 66% of total OC was measured as water soluble fraction, while for C location, the average fraction of labile and recalcitrant pools from total OC were found 62.5% and 50%, respectively. As the root exudates have fresh OC such as carbohydrates and sugars, the concentration of OC in water soluble and labile pools were so high at root vicinity. Also, OC in labile and water soluble pools had high correlation coefficient and, contributed to high fractions of total OC in root vicinity. Whilst C in recalcitrant pool were found higher in further distances from root surface, because activities of microorganisms and the fresh OC were decreased toward bulk soil.

**Conclusion:** This study investigated the effect of root activities of five perennial rangeland plants on the particle size and biochemical fractionation of soil OC at different distances from root surface. In root vicinity due to addition of fresh OC from roots to soil and more microorganisms' activities, mineral particles were aggregated to micro-aggregates which contained a large fraction of soluble and labile Soil OC. However recalcitrant OC were dominated in macro-aggregates far from root surface. Rangeland plants with various root systems and characteristics had strong impact on

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor of Soil Science Department, Bu Ali Sina University, Hamedan, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: sheklabadi@basu.ac.ir)

3- Assistant Professor of Agriculture and Natural Resources Research and Education Center of Hamedan

particle size and biochemical fractionation of soil OC which, needs to investigate more. Durability of biochemical C pools have important role in carbon dynamic and stability in soil.

**Keywords:** Biochemical fraction, Organo-mineral complexes, Physical fraction, Rangeland plants, Rhizosphere