



تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۲ | اسفند ۱۴۰۰ (ص ۲۹۴۹-۲۹۳۵)

<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.330447.669073>

(مقاله مروری)

A Review of the Effect of Climate and Soil Evolution on Soil Organic Carbon Storage Resources in Central Alborz

ALIREZA RAHEB^{1*}, AHMAD HEIDARI¹

1. Department of Soil Science, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
(Received: Sep. 11, 2021- Revised: Oct. 10, 2021- Accepted: Dec. 12, 2021)

ABSTRACT

Changes of soil carbon is one of the most important indicators showing the climate impacts on the soil genesis. Soil organic carbon management requires knowledge of its amount and the effective factors. In the current study, the distribution of soil properties especially soil organic carbon were studied in 76 soil profiles consist of different climatic zones arid (Alborz province), semi-arid (Alborz and Qazvin province) and semi-humid (Guilan and Mazandaran province) and humid (Mazandaran province) with aridic, xeric and udic moisture regimes and thermic and mesic temperature regimes. Changes in climatic parameters cause changes in species diversity in the ecosystem and ultimately effect on various forms of carbon, especially soil organic carbon. One of the most important climatic factors in this study is the temperature that increasing the soil temperature in arid and semi-arid regions compared to the two wetter regions causes intensification of mineralization and as a result, soil organic carbon is reduced. The results showed that the amount of organic carbon in the studied soil decreases with increasing depth and the average amount of organic carbon in Mollisols was higher than Alfisols= Inceptisols > Entisols > Aridisols. The general results of this study showed that increasing the parameters of soil electrical conductivity (salinity), soil acidity and clay content have a negative effect, while increasing the parameters of cation exchange capacity and silt content have positive effects on soil organic carbon content.

Keywords: Entisols, Organic Carbon, Semi-Arid Climate, Soil Genesis.

* Corresponding Author's Email: araheb@ut.ac.ir

مروری بر تأثیر اقلیم و تحول خاک بر منابع ذخیره کربن آلی خاک در البرز مرکزی

علیرضا راهب^{۱*}، احمد حیدری^۱

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۷/۱۸ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۹/۲۱)

چکیده

تغییرات کربن خاک یکی از مهمترین شاخص‌های نشان‌دهنده تأثیر اقلیم بر گونه‌های خاک است. مدیریت کربن آلی خاک، نیازمند آگاهی از مقدار آن و شناخت عوامل مؤثر بر آن می‌باشد. در این پژوهش برخی ویژگی‌های خاک به ویژه کربن آلی در ۷۶ خاک در اقلیم‌های مختلف متشکل از خشک (استان البرز)، نیمه‌خشک (استان البرز و استان قزوین) و نیمه‌مرطوب (استان گیلان و مازندران) و مرطوب (استان مازندران) با رژیم‌های رطوبتی اریدیک، زیریک و یودیک و رژیم‌های حرارتی ترمیک و مزیک مورد مطالعه قرار گرفتند. تغییر در پارامترهای اقلیمی سبب ایجاد تغییر تنوع گونه‌ها در اکوسیستم شده و در نهایت بر روی اشکال مختلف کربن به ویژه کربن آلی خاک مؤثر بوده است. از مهمترین عوامل اقلیمی در این مطالعه می‌توان به دما اشاره نمود که افزایش دمای خاک منطقه خشک و نیمه‌خشک نسبت به دو منطقه مرطوب‌تر سبب تشدید معدنی شدن شده و در نتیجه آن کربن آلی خاک کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که مقدار کربن آلی در خاک مناطق مورد مطالعه با افزایش عمق کاهش می‌یابد و میانگین مقدار کربن آلی در خاک‌های مالی‌سول بیشتر از آلفی‌سول‌ها، اینسپتی‌سول‌ها، انتی‌سول‌ها و اریدی‌سول‌ها بوده است. نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد افزایش پارامترهای هدایت الکتریکی خاک (شوری)، اسیدیته خاک و مقدار رس اثر منفی بر میزان کربن آلی خاک، در حالی که افزایش پارامترهای ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار سیلت خاک اثرات مثبت بر آن دارند.

واژه‌های کلیدی: انتی‌سول، کربن آلی، اقلیم نیمه‌خشک، تشکیل خاک.

مقدمه

تغییرات اقلیمی با تأثیر بر رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک سبب تغییر تراکم پوشش گیاهی شده و در نهایت بر ویژگی‌های مختلف خاک تأثیر می‌گذارد. پایداری زیست بوم‌های طبیعی، کشاورزی و منابع طبیعی به عوامل آب و هوایی و اقلیم وابستگی زیادی دارند و از این رو تنوع اقلیمی و تغییرات آن در کوتاه مدت و دراز مدت، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان تولید و پایداری این عرصه‌ها دارد (Batjes, 1996). گزارش ویژه بین‌المللی تغییرات آب و هوایی (IPCC, 2018) درباره تغییرات آب و هوایی تأکید می‌کند که جلوگیری از گرم شدن آب و هوا، مستلزم کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای به طرق مختلف است. بنابراین ترسیب کربن در خاک به عنوان راهی برای کاهش انتشار CO₂ با افزایش ذخایر جهانی کربن خاک (C) به میزان ۰/۴ درصد در سال ارائه شد (Minasny et al., 2017; Soussana et al., 2019). به دلیل نقش حیاتی کربن خاک در چرخه جهانی کربن و قابلیت آن در تعدیل یا تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیر آن بر روی گرمایش

جهانی و تغییر اقلیم، موجب تمرکز مطالعات روی کربن خاک شده و مباحث مربوط به کربن به یکی از مهمترین مباحث قرن ۲۱ تبدیل گردیده است (IPCC, 2007; Lal, 2008). به طور خاص، کربن خاک باعث افزایش خاکدانه‌سازی (Six & Paustian, 2014)، افزایش نگهداشت آب در خاک (Minasny & McBratney, 2018) و افزایش فعالیت ارگانوسم‌های خاک (Rabbi et al., 2018) می‌شود. این موضوع نه تنها برای حفظ کیفیت خاک حیاتی است، بلکه می‌تواند به عنوان فیلتر آلاینده‌های موجود در خاک عمل کند. کربن خاک همچنین به حفظ تنوع زیستی موجود در خاک نیز کمک می‌کند (Altieri & Nicholls, 2017).

کربن موجود در خاک یکی از مهم‌ترین منابع کربن موجود در جهان بوده و شامل دو شکل کربن آلی (SOC)^۱ و غیرآلی (SIC)^۲ است (Shi et al., 2012). پنج منبع کربن در کره زمین بر حسب مقدار ذخیره از بیشترین تا کمترین به ترتیب شامل سنگ‌های پوسته زمین، اقیانوس‌ها، مواد آلی خاک، اتمسفر و

* نویسنده مسئول: araheb@ut.ac.ir

^۱ SOC: Soil Organic Carbon

^۲ SIC: Soil Inorganic Carbon

اشاره کرد.

عوامل اقلیمی شامل نوع اقلیم و متغیرهای تعیین کننده آن نظیر دما، بارندگی، تبخیر و تعرق است. عوامل آب و هوایی، مانند دما و بارش، به طور کلی به عنوان مهمترین عوامل در ذخیره کربن آلی خاک در نظر گرفته می‌شوند و اغلب بخش بزرگی از تغییرات ذخیره کربن آلی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی را توضیح می‌دهند (Jackson *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2020). در بسیاری از اکوسیستم‌های زمینی، میزان بارندگی، بهره‌وری اولیه خالص تولید و مقادیر ورودی کربن را در خاک کنترل کرده و در نتیجه بر ذخیره کربن آلی تأثیر می‌گذارد. درجه حرارت نیز ارتباط تنگاتنگی با تجزیه میکروبی مواد آلی خاک و در نتیجه کاهش کربن آلی دارد (Wiesmeier *et al.*, 2019). مطالعات متعدد نشان داده است که ذخیره کربن آلی به طور کلی با افزایش دما هنگام کنترل بارندگی عمدتاً به دلیل تجزیه کربن آلی کاهش می‌یابد (Jobbágy and Jackson, 2000; Koven *et al.*, 2017). در اقلیم غالباً خشک و نیمه‌خشک ایران، نه تنها خاک‌ها عموماً از نظر کربن آلی فقیر هستند (کمتر از یک درصد و در بیشتر منابع کمتر از نیم درصد)، بلکه ثابت نگهداشتن و حفظ مقدار کربن آلی خاک نیز بسیار دشوار است. Alvarez and Lavado (1998) در یک مطالعه که در آرژانتین به انجام رساندند، نشان دادند که افزایش بارندگی ($R^2=0.75$) و کاهش دما ($R^2=0.58$) رابطه غیرخطی با افزایش کربن آلی خاک دارند (Alvarez and Lavado, 1998). از سوی دیگر منابع کربن آلی خاک در اقلیم‌های مختلف نسبت به عملیات مدیریتی، پاسخ‌های متفاوتی نشان می‌دهند. به عنوان مثال در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، مخازن کربن آلی خاک، در زمان طولانی‌تری به تعادل می‌رسند، ولی با تغییر کاربری و مدیریت، تعادل بسیار شکننده‌ای را نشان می‌دهند. یعنی دوره‌ی بازگشت کربن در اقلیم‌های مختلف متفاوت است (Iqbal *et al.*, 2008).

متغیرهای خاکی که بر تغییرات کربن آلی خاک موثرند، عمدتاً در دسته مشخصه‌های فیزیکی خاک قرار می‌گیرند. همچنین مشخصه‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک خود در درجه اول، متأثر از کمیت و کیفیت ماده آلی خاک می‌باشند. اهم مشخصه‌های اثرگذار خاک بر تغییرات کربن آلی خاک شامل بافت خاک و مقادیر اجزای اندازه‌ای رس، شن و سیلت، درصد آهک و درصد سنگریزه است. کربن موجود در اجزای اندازه‌ای ذرات خاک اطلاعات مفیدی در ارتباط با پویایی آن در محیط‌های طبیعی و کشاورزی فراهم می‌نماید (Raheb *et al.*, 2017). اجزای اندازه‌ای تشکیل دهنده خاک از پارامترهایی هستند که به صورت غیرمستقیم بر روی میزان کربن آلی موجود در خاک موثرند (Six

بیوسفر می‌باشند (Rice, 2005). اکوسیستم‌های خشکی حدود ۳۰۶۰ پتاگرم کربن دارند که حدود ۲۵۰۰ پتاگرم آن در خاک و ۵۶۰ پتاگرم دیگر در کوچکترین مخزن جهانی کربن یعنی مخزن زیستی می‌باشد (Lal, 2008). بیشترین مقدار کربن آلی در زیست کره زمین در خاک‌ها ذخیره می‌شود که تا عمق یک متری خود تقریباً حاوی ۱۵۰۰ پتاگرم کربن آلی می‌باشد (Scharlemann *et al.*, 2014)، که بیش از دو برابر کربن آلی موجود در اتمسفر یا سه برابر آن در پوشش گیاهی است (Bradford *et al.*, 2016; Rossel *et al.*, 2019).

کربن آلی خاک یکی از مهمترین شاخص‌های کلیدی پایداری محیط زیست در سیستم‌های کشاورزی است (Rahman *et al.*, 2021). برآوردها حاکی از آن است که کربن آلی خاک حدود دو سوم منبع کربن موجود در خاک‌های جهان را تشکیل می‌دهد (Wang *et al.*, 2013). ذخیره کربن در خاک به شکل ماده آلی باعث افزایش تولید محصولات کشاورزی می‌گردد (Somaratne *et al.*, 2005). کربن آلی خاک در مناطق زراعی یک ویژگی کلیدی کیفیت خاک برای تضمین امنیت غذایی و سلامت خاک، کیفیت آب و پایداری کشاورزی است و همچنین نقش اساسی در بودجه جهانی کربن (C) ایفا می‌کند (دستیابی به هدف جهانی افزایش میانگین حرارت زمین کمتر از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد بر طبق توافقنامه آب و هوایی پاریس). هنگامی که خاکهای موجود در جهان به صورت پایدار مدیریت شود، خاکها می‌توانند با کاهش کربن و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جو نقش مهمی در کاهش تغییرات آب و هوایی ایفا کنند (Ren *et al.*, 2020).

در منابع علمی عوامل مختلفی شامل اقلیم، توپوگرافی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، مواد مادری، خصوصیات خاک و مدیریت انسانی برای تحلیل ذخیره کربن آلی خاک پیشنهاد شده است (Wiesmeier *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019). ولی در مناطق وسیع و در مقیاس جهانی، تنوع اقلیمی اولین عامل کنترل کننده تغییرات کربن آلی خاک است (Wang *et al.*, 2013). با این حال، هنوز توضیح دقیقی ارائه نشده که چگونه این چند پارامتر به طور همزمان بر ذخیره کربن آلی تأثیر می‌گذارند (Wiesmeier *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2021). از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعات انجام شده توسط Osat (2010)، Faghieh (2010)، Raheb and Heidari (2012)، Raheb (2012)، Moghiseh (2013)، Ajami *et al.* (2016)، Raheb (2017)، Zhou *et al.* (2017)، Jackson *et al.* (2017)، Raheb *et al.* (2019)، Soussana *et al.* (2019)، Wiesmeier *et al.* (2019)، Li (2019) و غیره (Li *et al.*, 2021) و Rahman *et al.* (2020).



که ۶۳/۲ درصد خاک‌های کشور کمتر از ۱٪ کربن آلی دارند. این مسئله با توجه به اهمیت ماده آلی در تولید محصولات کشاورزی و محیط زیست می‌تواند چالشی مهم برای آینده کشاورزی ایران باشد. عدم توجه به افزایش و نگهداری مواد آلی خاک می‌تواند در آینده نزدیک خسارات جبران ناپذیری به تولید پایدار کشاورزی وارد آورد (Shahbazi and Besharati, 2013). بنابراین توجه به حفظ و افزایش میزان ماده آلی خاک‌ها برای افزایش و پایداری تولید و همچنین تولید محصول سالم، امری اجتناب ناپذیر می‌باشد (Parvizi and Gorji, 2014)

شناخت عوامل تأثیرگذار بر کربن خاک و درک چگونگی این فرآیند بسیار مهم بوده و ارزیابی تغییرات مکانی و ذخایر آن در مقیاس‌های ملی و محلی، گام مؤثر و ضروری برای مدیریت کربن خاک می‌باشد. پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه نقش خصوصیات اقلیمی و تحول خاک بر مقادیر کربن آلی خاک در ایران و حتی در جهان بیشتر محدود به مناطق مرطوب بوده است و اطلاعات بسیار کمی در ارتباط با مناطق خشک و نیمه‌خشک وجود دارد. از طرف دیگر بیشتر مطالعات انجام شده در ایران و دنیا در خصوص کربن آلی خاک در یک اقلیم مشخص صورت گرفته و معمولاً به تأثیر ویژگی‌های توپوگرافی، تغییرات کاربری و سایر ویژگی‌های خاک بیشتر پرداخته می‌شود و مطالعات معدودی عوامل مؤثر بر تغییرات کربن آلی را در اقلیم‌های مختلف بررسی کرده‌اند. بنابراین هدف از این مطالعه بررسی تغییرات کربن آلی خاک در اقلیم‌های مختلف و تحت تأثیر تحول خاک ناشی از تنوع مواد مادری می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در ۸ منطقه با کاربری‌های مختلف کشاورزی، مرتعی و جنگلی در چهار اقلیم متفاوت خشک، نیمه‌خشک و نیمه-مرطوب و مرطوب صورت گرفت. (شکل ۱، جدول ۱). رژیم حرارتی و رطوبتی مناطق مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار (۲۰۱۲) NSM^۱ تعیین گردید (USDA-NRCS, 2012b). پس از بررسی‌های کتابخانه‌ای و با توجه به اهداف مطالعه، اطلاعات مربوط به ۷۶ خاکرخ (۱۸ خاکرخ در اقلیم مرطوب، ۱۹ خاکرخ در اقلیم نیمه‌مرطوب، ۲۰ خاکرخ در اقلیم نیمه‌خشک و ۱۹ خاکرخ در اقلیم خشک) (۳۲۰ نمونه) انتخاب و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از نظر تنوع مواد مادری نیز انواع متعددی از تشکیلات زمین‌شناسی اعم از سنگ‌های آذرین (بازالت)، آذرآواری (توف)، آهکی، آبرفتی و کوهرفتی در مناطق مورد مطالعه وجود دارند. از نظر توپوگرافی مناطق مورد مطالعه از اراضی کاملاً مسطح

(*et al.*, 2002). بافت، بیشترین تأثیر را بر مقدار کربن آلی خاک دارد. در شرایط یکسان محیطی، خاک‌های ریز بافت، ذخیره‌ی کربن آلی بیشتری دارند (Crow *et al.*, 2007).

یکی دیگر از عوامل خاکی، ماده مادری است که تأثیر عمده آن بر مقدار مواد آلی خاک از طریق چگونگی تأثیر آن بر بافت خاک می‌باشد. خاک‌های رسی دارای مقدار ماده آلی بیشتری نسبت به خاک‌های شنی هستند، البته نوع کانی‌های رسی نیز حائز اهمیت می‌باشد. مثلاً مونت‌موریلونیت که تمایل زیادی به جذب مولکول‌های آلی دارد، در حفظ ترکیبات نیتروژن‌دار از تجزیه میکروبی بسیار موثر است (Buol *et al.*, 2011). فیلوسیلیکات‌های خاک در حفظ کربن آلی خاک بسیار تأثیرگذار هستند. اشکال مختلف فیلوسیلیکات‌های خاک، دارای خصوصیات متفاوتی (سطح ویژه و بار سطحی) هستند که توانایی جلوگیری از تجزیه کربن و افزایش نگهداشت آن را دارند (Barre *et al.*, 2014). کانی‌شناسی خاک در تخمین میزان کربن آلی حفظ شده در خاک اهمیت دارد (Adhikari and Bhattacharyya, 2015). جذب ماده آلی توسط کانی‌ها به عنوان یک راه مهم جهت نگهداری و همچنین تثبیت کربن آلی مطرح شده است (Kalbitz *et al.*, 2005). ترکیبات آلی در خاک به طرق مختلف از جمله: (۱) ساختار و ماهیت شیمیایی (۲) برهم‌کنش‌های خاص با سطوح کانی‌ها و ترکیبات فلزی و (۳) محبوس شدن در فضای درون خاکدانه‌ها قابل تثبیت هستند (Von Lützow *et al.*, 2006; Sollins *et al.*, 2009). (Wiseman and Püttmann, 2005) در بررسی حفظ کربن آلی در چندین خاک در آلمان در یکی از نمونه‌ها مشاهده کردند که رابطه ضعیفی بین سطح ویژه خاک با کربن آلی خاک وجود دارد که این نشان دهنده نفوذ مواد آلی در بین لایه‌های کانی‌هایی نظیر اسمکتایت و کانی‌های مختلط (ایلایت- اسمکتایت) می‌باشد (Wiseman and Püttmann, 2005). (Wattel-Koekkoek *et al.*, 2001) در تحقیقی اظهار داشتند که خاک‌ها با رس غالب کائولینایت عموماً در مناطق مرتفع یافت می‌شوند و تهویه خوبی دارند. تحت این شرایط ماده آلی می‌تواند به راحتی معدنی شود و تجزیه آن سریع است. خاک‌ها با رس غالب اسمکتایت که در مناطق پست یافت می‌شوند و بالا بودن سطح ایستابی آب زیرزمینی و تغییرات مکرر آن، محدودیت تهویه در این خاک‌ها را ایجاد می‌کند. تحت این شرایط، فعالیت میکروبی محدود شده و تجزیه و تخریب ماده آلی کاهش می‌یابد و ترکیبات هومیکی ممکن است انباشته شوند (Wattel-Koekkoek *et al.*, 2001).

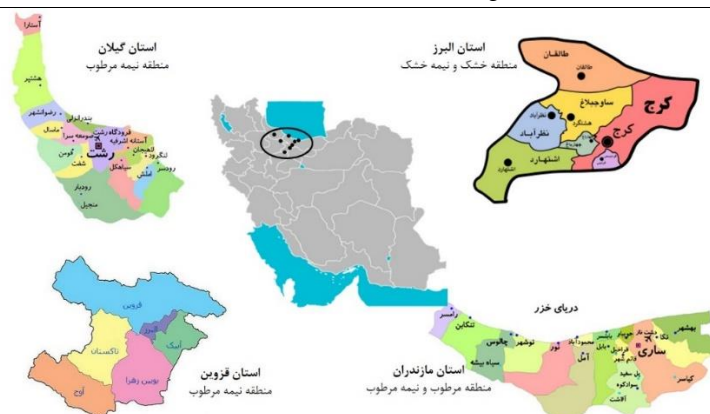
میزان مواد آلی خاک‌های کشور بسیار پائین بوده به طوری

درصد کربنات کلسیم معادل (CCE)^۱ با استفاده از روش کلسیمتری و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با استفاده از روش استات آمونیوم در $pH=8/2$ انجام گردید (Sparks, 1996). تشریح خاکرخها براساس روشهای استاندارد (USDA-NRCS, 2012a) و ردهبندی خاکها نیز براساس ردهبندی آمریکایی (Soil Survey Staff, 2014) صورت گرفت. برای آنالیز همبستگی دادهها به روش پیرسون نیز از نرم افزار SPSS 17.0 استفاده گردید.

دشت‌های ساحلی دریاچه خزر تا ارتفاعات زیاد با شیب‌های تند رشته کوه البرز متغیر بود. از طرف دیگر خاک‌های مورد مطالعه با توجه به شرایط فرسایشی و رسوبی و زمان تشکیل از نظر عمق از خاک‌های بسیار کم‌عمق تا خاک‌های بسیار عمیق متغیر هستند. مطالعات فیزیکوشیمیایی نمونه‌های برداشت شده پس از هواخشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری از جمله بافت به روش هیدرومتر، pH و EC عصاره اشباع (Carter and Gregorich, 2008)، کربن آلی بر مبنای روش والکلی-بلاک،

جدول ۱- خصوصیات زمین‌شناسی، اقلیمی و رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک در مناطق مورد مطالعه

میانگین دما (°C)	میانگین بارندگی (mm)	ارتفاع (m a.s.l)	رژیم حرارتی	رژیم رطوبتی	کاربری	مواد مادری	منطقه: اقلیم (دومارتن)
۱۵/۶	۱۳۷/۷	۱۲۹۷-۱۳۳۰	Thermic	Typic Aridic	مرتع	بازالت	اشتهارد: خشک
۱۴/۱	۲۵۱	۱۳۲۰	Thermic	Weak Aridic	کشاورزی	کوهرفت-آبرفت	کرج- خشک
۱۳/۹	۳۱۱/۲	۲۰۸۰-۲۲۰۰	Thermic	Dry Xeric	مرتع	بازالت	قزوین: نیمه‌خشک
۱۰/۷	۳۵۴	۲۳۰۰-۲۸۷۹	Mesic	Xeric	مرتع	توف	کرج- نیمه خشک
۱۱/۷	۳۹۰/۷	۲۲۰-۵۴۶	Mesic	Typic Xeric	مرتع	بازالت	رودبار: نیمه مرطوب
۱۰/۳	۵۶۶	۱۳۵۰	Mesic	Typic Xeric	جنگل	سنگ آهک	کلاردشت: نیمه مرطوب
۱۵/۸	۱۲۵۳	-۲۰	Thermic	Udic	کشاورزی/زراعت برنج	آبرفت ریزبافت	تنکابن: مرطوب
۱۵/۹	۷۵۰	۲۶۷-۸۴۲	Thermic	Udic	جنگل	سنگ آهک	نوشهر: مرطوب



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه بر روی نقشه ایران



شکل ۲- تصاویر برخی از خاکرخ‌های چهار اقلیم مورد مطالعه

براساس نتایج، خاک‌های منطقه مورد مطالعه به ترتیب فراوانی در

نتایج و بحث



ترتیب در کلاس‌های بافت رسی، لوم‌رسی‌شنی، لومی‌رسی، لومی-شنی و لومی و سایر کلاس‌ها قرار داشتند. سولوم خاک در اکثر خاک‌رخ‌های منطقه خشک دارای بافت نسبتاً سبک تا متوسط، در منطقه نیمه‌خشک دارای بافت متوسط و در منطقه نیمه‌مرطوب و مرطوب دارای بافت سنگین می‌باشند.

مقدار کربن آلی در هر چهار منطقه مورد مطالعه در افق‌های سطحی بیشتر از افق‌های زیرین بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد و دامنه تغییرات آن در نمونه‌های مورد مطالعه بین حداقل ۰/۲ تا ۸/۸ درصد است و حداکثر مقدار آن در افق سطحی خاک‌رخ منطقه مرطوب (رده مالی‌سول) و حداقل آن در افق‌های تحت‌الارضی منطقه خشک (رده انتی‌سول) مشاهده شد. مقادیر بالای ذخیره کربن آلی در لایه‌های سطحی خاک را می‌توان به دلیل پوشش و تولید در سطح و تهویه تا حدودی کمتر در اثر وجود ریشه‌های در هم تنیده و ضخیم که باعث کاهش میزان تجزیه ماده آلی می‌گردد، نسبت داد.

مقدار کربن غیرآلی (کربنات کلسیم معادل) در هر چهار منطقه مورد مطالعه برخلاف تغییرات کربن آلی در افق‌های سطحی کمتر از افق‌های زیرین بوده و با افزایش عمق افزایش می‌یابد. البته زیاد بودن میزان کربن غیرآلی در اعماق پایین‌تر خاک به ویژه در مناطق مرطوب‌تر می‌تواند به دلیل بارندگی بیشتر منطقه و پدیده آبشویی در خاک باشد که احتمالاً سبب انتقال کربنات‌ها به اعماق خاک شده است.

در میان ویژگی‌های اقلیمی، دما و بارندگی از مهمترین پارامترهایی هستند که در کنترل میزان کربن آلی موجود در خاک بیشترین اثر را دارند. دما علاوه بر اینکه در کنترل نرخ فرآیندهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی نقش دارد، بر نرخ رشد گیاهان نیز تاثیر مستقیم دارد (Shakiba and Rahnema, 2003). مطالعات متعدد گویای این مطلب است که معمولاً با کاهش دما در هر شرایطی از بارندگی، مقدار کربن آلی موجود در خاک افزایش می‌یابد (Singh et al., 2011). همچنین میزان کربن آلی خاک‌ها معمولاً با افزایش مقدار بارش، افزایش می‌یابد.

شکل ۳ میانگین مقادیر کربن آلی در خاک‌رخ‌های مطالعه شده در اقلیم‌های مختلف را نشان می‌دهد. کمترین مقدار کربن آلی در منطقه خشک (با میانگین ۰/۲۹ درصد) به دلیل پوشش گیاهی ضعیف، ورودی کمتر کربن آلی و همچنین عمق توسعه کمتر خاک‌های این مناطق، مشاهده گردید. از طرف دیگر بیشترین مقدار کربن آلی نیز در منطقه مرطوب (با میانگین ۱/۶۳ درصد) مشاهده شد که از دلایل آن می‌توان به تکامل بیشتر خاک‌رخ‌های این منطقه و افزایش عمق توسعه خاک اشاره نمود.

پنج رده اینسپتی‌سول < مالی‌سول < آلفی‌سول < اربیدی‌سول < انتی‌سول قرار گرفته‌اند. افق‌های مشخصه شناسایی شده در این خاک‌ها شامل اپی‌پدون اکریک و مالیک در سطح‌الارض خاک‌ها و افق‌های زیر سطحی آرچیلیک، کلسیک، ناتریک و کمبیک می‌باشند. نتایج نشان داد که تفاوت بسیار زیادی در تکامل خاک‌ها در اقلیم‌های مطالعه شده از منطقه خشک تا مرطوب دیده می‌شود. در منطقه خشک به لحاظ دمای بیشتر (۱۵/۶۵ درجه سانتیگراد)، بارندگی کمتر (۱۹۴/۵ میلی‌متر) و وجود پوشش گیاهی با ریشه‌های ریز و خیلی ریز، خاک‌ها دارای عمق توسعه کم بوده (حداکثر ۱۰۰ سانتیمتر) است. به عبارت دیگر خاک‌های مورد مطالعه منطقه خشک دارای تحول و تکامل نسبتاً کم می‌باشند. آهکی بودن اکثر خاک‌های مورد مطالعه در منطقه خشک، مقادیر کم درصد رس و مقادیر کمتر اکسیدهای آهن و منگنز رنگ خاک را تحت تأثیر قرار داده و تغییرات رنگ خاک را محدود می‌نماید. در حالی که در منطقه نیمه‌خشک میانگین دمای سالیانه (۱۲/۳ درجه سانتیگراد)، و میانگین سالیانه بارندگی (۳۳۲/۶ میلی‌متر) است. پوشش گیاهی با تراکم و زیست توده بیشتر و با ریشه‌های ریز و خیلی ریز به مقدار بیشتر از منطقه خشک، خاک‌ها دارای عمق توسعه بیشتری نسبت به منطقه قبل بوده (حداکثر ۱۷۰ سانتیمتر) است. به عبارت دیگر خاک‌های مورد مطالعه این منطقه دارای تحول و تکامل بالاتری می‌باشند. درصد رس بالاتر، مقدار مواد آلی بیشتر و همچنین آهکی بودن اکثر خاک‌های مورد مطالعه در این منطقه از مهمترین عوامل موثر بر رنگ خاک است. خاک‌های منطقه نیمه‌مرطوب و مرطوب در رده‌های اینسپتی‌سول، مالی‌سول و آلفی‌سول طبقه‌بندی می‌شوند. در این مناطق میانگین دمای سالیانه (به ترتیب ۱۱ و ۱۵/۸۵ درجه سانتیگراد)، و میانگین بارندگی سالیانه (به ترتیب ۴۷۸/۳ و حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر)، خاک‌ها دارای عمق توسعه بیشتری نسبت به دو منطقه دیگر است (بیشتر از ۲۵۰ سانتیمتر) و به عبارت دیگر خاک‌های مورد مطالعه این مناطق دارای تحول و تکامل بالاتری هستند. با افزایش درصد ماده آلی ساختمان دانه‌ای نیز در افق سطحی برخی خاک‌رخ‌ها مشاهده گردید. به طوری که در این مناطق با رژیم رطوبتی یودیک، بارندگی بیشتر نسبت به منطقه خشک شرایط لازم جهت آبشویی و انتقال رس و تشکیل افق آرچیلیک را فراهم نموده است (جدول ۲).

تغییرات کربن آلی در اقلیم‌های متفاوت

جدول ۳ برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. خاک‌های مورد مطالعه دارای دامنه تغییرات قابل توجهی از نظر بافت خاک بودند و به

جدول ۲- برخی خصوصیات مورفولوژیکی خاک‌های شاهد اقلیم‌های مورد مطالعه

افق	ضخامت (cm)	ساختمان ^(۱)	رنگ		حفرات ^(۲)	ریشه ^(۳)	تجمعات کربنات‌ها ^(۴)	تجمعات رس ^(۵)	تجمعات اکسیدو احیا ^(۶)
			خشک	مرطوب					
خاک‌رخ شاهد منطقه خشک- استان البرز- کاربری مرتع									
A	۰-۲۲	۱ f sbk	۱۰YR۵/۳	۵YR۳/۴	۱ f	۱ vf	-	-	-
Bw	۲۲-۴۵	۱ m sbk	۱۰YR۴/۴	۵YR۳/۳	۱ f	۱ vf	-	-	-
R	۴۵-۰۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-
خاک‌رخ شاهد منطقه نیمه خشک- استان البرز- کاربری مرتع									
A	۰-۱۵	۱ f sbk	۷/۵YR۵/۴	۷/۵YR۴/۶	۱ vf	۱ vf, f	-	-	-
۱Bk	۱۵-۴۰	۱ f sbk	۱۰YR۵/۶	۵YR۴/۶	۱ vf	۱ vf	۱ f ss	-	-
۲Bk	۴۰-۷۰	۱ f sbk	۱۰YR۵/۵	۵YR۴/۴	۱ vf	۱ vf	۱ و ۲ f ss	-	-
R	۷۰-۰۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-
خاک‌رخ شاهد منطقه نیمه خشک- استان قزوین- کاربری مرتع									
A	۰-۱۴	۱ f sbk	۱۰YR۵/۶	۵YR۴/۳	۱ m, c	۲ m	-	-	-
Bk	۱۴-۳۵	۱ m sbk	۷/۵YR۶/۶	۷/۵YR۴/۶	۱ m, c	۲ m	۲ m ss	-	-
Cr	۳۵-۸۰	۱ m sbk	۷/۵YR۸/۴	۱۰YR۶/۸	۱ vf	۱ vf	۳c, m ss	-	-
R	۸۰-۰۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-
خاک‌رخ شاهد منطقه نیمه خشک- استان قزوین- کاربری مرتع									
A	۰-۱۵	۱ m sbk	۱۰YR۴/۳	۷/۵YR۳/۳	۲ F	۲ vf, f	-	-	-
Bt	۱۵-۴۵	۲ m sbk	۲/۵YR۴/۶	۷/۵YR۳/۳	۲ F	۱ vf, f	-	۳ d c	-
Btk	۴۵-۸۰	۲ m sbk	۱۰YR۶/۴	۷/۵YR۴/۶	۲ F	۱ vf	۱ m ss	۲ d m	-
Bk	۸۰-۱۱۰	۱ f sbk	۱۰YR۷/۳	۵YR۵/۸	۱ F	۱ vf	۱ m ss	-	-
R	۱۱۰-۰۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-
خاک‌رخ شاهد منطقه نیمه مرطوب- استان گیلان- کاربری مرتع									
A	۰-۴۵	۲ m sbk	۷/۵YR۵/۳	۷/۵YR۳/۲	۲ m	۲ vf, ۱ m	-	-	-
۱Bk	۴۵-۱۲۰	۲ m sbk	۷/۵YR۶/۴	۵YR۳/۳	۲ m	۱ vf	۱ f sf	-	-
۲Bk	۱۲۰-۲۰۰	۲ m sbk	۷/۵YR۶/۶	۷/۵YR۴/۴	۲ m	۱ vf	۳ c sf, nodule	-	-
R	۲۰۰-۰۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-
خاک‌رخ شاهد منطقه نیمه مرطوب- استان گیلان- کاربری مرتع									
A	۰-۱۰	۳m, c abk	۵YR۵/۶	۵YR۳/۲	۳ c	۲ vf, f	-	-	-
۱Bt	۱۰-۴۰	۳m, c abk	۵YR۴/۶	۷/۵YR۳/۳	۳ c	۱ vf	۳ c p	-	-
۲Bt	۴۰-۹۰	۳m, c abk	۵YR۴/۶	۵YR۳/۲	۳ c	۱ vf	۳ c p	-	-
خاک‌رخ شاهد منطقه مرطوب- استان مازندران- کاربری شالیزار									
Appg	۰-۱۶	Massive	-	۱۰YR ۳/۱	-	۲ vf, f	-	-	-
۱Bg	۱۶-۴۰	Massive	-	۲/۵ Y۳/۱	-	-	-	٪ ۲-۵, F, D	-
۲Bg	۴۰-۱۰۰	Massive	-	۲/۵ Y۳/۱	-	-	-	Gleying	-
خاک‌رخ شاهد منطقه مرطوب- استان مازندران- کاربری باغات کیوی									
Ap	۰-۱۲	Massive	-	۷/۵ YR۳/۳	۱ vf	۲ vf, f	-	-	-
AB	۱۲-۲۳	۱ m sbk	-	۷/۵ YR۴/۳	۱ vf	۲ vf, f	-	-	-
Bt	۲۳-۴۵	۱ m sbk	-	۷/۵ YR۳/۵	۲ c, m	۲ c, m	۳ c p	-	-
Btg	۴۵-۷۵	Massive	-	۷/۵ YR۴/۰	۲ c, m	۱ c, m	٪۲, M, D	-	-

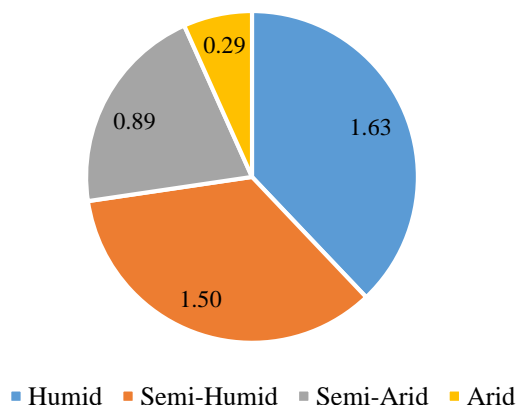
(۱) کلاس‌های ساختمان خاک: درجه وضوح: ۱: ضعیف، ۲: متوسط-اندازه: f: کوچک، m: متوسط-نوع: abk: بلوکی زاویه دار، sbk: بلوکی بدون زاویه، Massive: توده ای. (۲) - کلاس‌های حفرات خاک: فراوانی: ۱: خیلی کم (کمتر از ۲٪)، ۲: کم (۲-۵٪)، ۳: متوسط (۵-۱۵٪) - اندازه: vf: خیلی ریز، f: ریز، m: متوسط، c: درشت (۳) - کلاس‌های ریشه خاک: فراوانی: ۱: کم، ۲: متوسط، ۳: زیاد-اندازه: vf: خیلی ریز، f: ریز، m: متوسط، c: درشت (۴) کلاس‌های تجمعات کربنات: اندازه: ۱: کوچک، ۲: متوسط، ۳: بزرگ-فراوانی: f کم (کمتر از ۲٪)، c متوسط (۲۰-۲۰٪)، m زیاد (بیشتر از ۲۰٪) - شکل: SS: آهک پودری، SF: آهک میسلیومی، N: گرهک. (۵) کلاس‌های تجمعات رس: اندازه: ۱: کوچک، ۲: متوسط، ۳: بزرگ-فراوانی: f کم (کمتر از ۲٪)، c متوسط (۲۰-۲۰٪)، m زیاد (بیشتر از ۲۰٪) - وضوح: F: ضعیف، D: مشخص، P: واضح (۶) - کلاس‌های عوارض اکسایش و کاهش: فراوانی: F کم، C متوسط، M زیاد و درجه وضوح پدیده‌ها: P خیلی مشخص، D مشخص، Fa نامشخص.

جدول ۳- برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد مطالعه در اقلیم‌های متفاوت بر حسب درصد

	Sand	Silt	Clay	OC	CCE	pH _{sp}	EC (dS/m)	CEC
Humid								
میانگین	۱۸/۱۱	۳۱/۵۶	۴۹/۸۷	۱/۶۳	۵/۹۴	۷/۶۲	۰/۵۹	۲۴/۶۰
حداکثر	۵۸/۴۰	۴۸/۰۰	۷۵/۰۰	۸/۸۰	۹۰/۰۰	۸/۲۹	۱/۲۶	۵۰/۴۱
حداقل	۵/۰۰	۲/۰۰	۱۵/۶۰	۰/۱۷	۰/۰۰	۵/۵۹	۱/۲۰	۸/۴۰
Semi-Humid								
میانگین	۱۹/۷۹	۲۶/۷۶	۵۳/۴۱	۱/۵۰	۱۰/۱۱	۸/۰۱	۰/۷۱	۳۲/۷۹
حداکثر	۵۶/۰۰	۴۲/۰۰	۷۶/۰۰	۶/۳۷	۶۳/۴۰	۸/۶۰	۳/۵۸	۶۶/۷۶
حداقل	۲/۰۰	۸/۰۰	۱۵/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰	۷/۱۰	۰/۲۳	۲۳/۱۰
Semi-Arid								
میانگین	۳۶/۸۷	۲۹/۲۶	۳۴/۸۸	۰/۸۹	۵/۸۶	۸/۱۰	۱/۱۸	*N.D
حداکثر	۷۸/۰۰	۴۴/۰۰	۵۸/۰۰	۲/۳۰	۴۸/۰۰	۸/۶۰	۵/۰۰	N.D
حداقل	۱۷/۰۰	۳/۰۰	۶/۰۰	۰/۱۸	۰/۰۰	۶/۹۲	۰/۲۷	N.D
Arid								
میانگین	۵۱/۳۴	۲۴/۱۰	۲۴/۳۶	۰/۲۹	۹/۷۳	۸/۱۳	۳/۰۳	۱۹/۴۳
حداکثر	۷۷/۰۰	۴۴/۰۰	۴۸/۰۰	۰/۹۰	۲۱/۶۰	۸/۵۰	۴/۱۲۰	۲۸/۶۰
حداقل	۱۷/۰۰	۸/۰۰	۷/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۶/۹۰	۰/۳۵	۱۰/۲۰

*N.D: برآورد نشده

اقلیمی بودند بیشتر تجمع یافته بود.



شکل ۳- میانگین مقدار کربن آلی در اقلیم‌های مورد مطالعه

تغییرات کربن آلی و تحول خاک

به طور کلی میزان کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه، توسط پوشش گیاهی و عوامل اقلیمی تعیین می‌شود. نتایج نشان داد که میانگین مقدار کربن آلی در خاک‌های مالی سول (۱/۵۹ درصد) $<$ آلفی سول (۱/۳۳ درصد) = اینسپتی سول (۱/۳۳) $<$ انتی سول (۰/۵۳ درصد) $<$ اریدی سول (۰/۲۸) می‌باشد به طوریکه با افزایش تکامل خاک و پیشرفت فرآیندهای خاکساخت، افزایش تجمع ماده آلی در افق‌های سطحی خاک‌های با رده مالی سول با رژیم حرارتی مزیک رخ داده است (جدول ۴- شکل ۴). در بین مناطق مورد مطالعه، مناطق دارای خاک‌های مالی سول به واسطه نوع پوشش گیاهی، توان حفظ رطوبت خاک و پویایی اکوسیستم، بیشترین میزان کربن آلی ورودی به خاک را داشته است. از سوی

در منطقه خشک با متوسط دمایی سالانه ۱۵/۶۵ درجه سانتیگراد و متوسط بارندگی ۱۹۴/۵ میلی‌متر، میزان متوسط کربن آلی ۰/۲۹ درصد و در منطقه نیمه‌خشک با متوسط دمایی ۱۲/۳ درجه سانتیگراد و متوسط بارندگی ۳۳۲/۶ میلی‌متر، میزان متوسط کربن آلی ۰/۸۹ درصد بدست آمد که مهمترین دلیل آن افزایش سرعت تجزیه کربن آلی خاک در اثر افزایش دما می‌باشد. با افزایش دما، فعالیت میکروبی و در نتیجه سرعت تجزیه بقایای گیاهی تازه و هوموس موجود در خاک افزایش می‌یابد. در حالیکه در منطقه نیمه‌مرطوب و مرطوب به ترتیب با میانگین دمای سالیانه ۱۱ و ۱۵/۸۵ درجه سانتیگراد و میانگین بارندگی سالیانه ۴۷۸/۳ و حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر، میزان متوسط کربن آلی به ترتیب ۱/۵ و ۱/۶۳ درصد به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد که در منطقه خشک و نیمه‌خشک تاثیر پارامتر دما بیشتر از بارندگی بوده در صورتی که در مناطق مرطوب‌تر از بین خصوصیات اقلیمی میزان بارش بسیار موثر است.

Evans et al. (2011) گزارش دادند که مقدار کربن آلی در

منطقه مطالعاتی مغولستان با افزایش مقدار بارندگی و کاهش دما افزایش یافته است. به عبارت دیگر با افزایش بارندگی سرعت تولید کربن آلی خاک بیشتر از تجزیه و تخریب آن بوده و با افزایش دما سرعت تجزیه بیشتر از سرعت تولید می‌باشد. به طور کلی با افزایش دما، کاهش بارندگی و درشتتر شدن بافت خاک میزان ماده آلی خاک کاهش می‌یابد. مطالعات Franzluebbers (2002) نشان داد که کربن آلی خاک برای خاک‌های تحت اقلیم مرطوب و سرد نسبت به خاک‌های تحت اقلیم خشک‌تر که در یک توالی

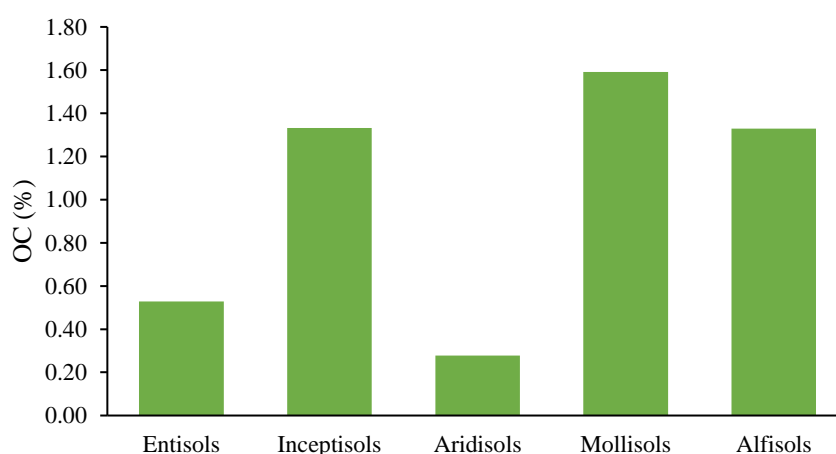
و در نتیجه نسبت کربن ورودی به کربن خروجی افزایش یافته است.

دیگر، به دلیل وجود ساختمان مناسب خاک (ساختمان دانه‌ای لیگنوپروتینی مالی‌سول‌ها) و مصون ماندن پوشش گیاهی از چرای دام، قابلیت فرسایش پذیری کمتری نسبت به سایر مناطق داشته

جدول ۴- برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی اندازه‌گیری شده خاک‌های مورد مطالعه در رده‌های متفاوت

	Sand	Silt	Clay	OC	CCE	pH _{sp}	EC	CCE
Entisols								
میانگین	۴۹/۳۰	۲۶/۷۰	۲۴/۰۰	۰/۵۳	۱۲/۰۰	۷/۹۰	۱/۸۸	*N.D
حداکثر	۷۱/۰۰	۴۴/۰۰	۳۸/۰۰	۱/۴۷	۱۹/۹۰	۸/۵۰	۵/۰۰	N.D
حداقل	۳۴/۰۰	۱۹/۰۰	۱۰/۰۰	۰/۰۲	۵/۶۰	۶/۹۲	۰/۴۵	N.D
Inceptisols								
میانگین	۳۱/۳۳	۲۳/۴۸	۳۶/۲۴	۱/۳۳	۷/۴۴	۸/۰۹	۰/۷۸	۲۱/۰۳
حداکثر	۷۸/۰۰	۴۸/۰۰	۶۲/۵۰	۵/۳۳	۲۴/۶۰	۸/۵۰	۲/۵۰	۳۴/۰۱
حداقل	۸/۴۰	۳/۰۰	۶/۰۰	۰/۱۸	۰/۰۰	۷/۱۸	۰/۳۶	۹/۶۵
Aridisols								
میانگین	۵۱/۴۵	۲۴/۲۳	۲۴/۰۹	۰/۲۸	۹/۴۲	۸/۱۳	۳/۳۲	۱۸/۲۸
حداکثر	۷۷/۰۰	۴۴/۰۰	۴۸/۰۰	۰/۸۱	۲۱/۶۰	۸/۵۰	۴۱/۲۰	۲۳/۱۰
حداقل	۱۷/۰۰	۸/۰۰	۷/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۶/۹۰	۰/۳۵	۱۰/۲۰
Mollisols								
میانگین	۲۲/۸۶	۲۷/۷۵	۴۹/۳۷	۱/۵۹	۱۵/۳۵	۷/۹۸	۰/۸۳	۳۱/۹۹
حداکثر	۵۶/۰۰	۴۲/۰۰	۷۱/۰۰	۸/۸۰	۹۰/۰۰	۸/۶۰	۳/۵۸	۵۱/۴۰
حداقل	۳/۰۰	۱۱/۰۰	۱۵/۰۰	۰/۲۱	۰/۰۰	۷/۱۰	۰/۲۳	۸/۴۰
Alfisols								
میانگین	۱۳/۰۷	۲۶/۲۹	۶۰/۰۶	۱/۳۳	۰/۶۶	۷/۶۵	۰/۵۰	۲۹/۶۸
حداکثر	۳۸/۰۰	۴۸/۰۰	۷۶/۰۰	۶/۱۲	۱۷/۵۰	۸/۶۰	۱/۴۵	۶۶/۷۶
حداقل	۲/۰۰	۲/۰۰	۳۰/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰	۵/۵۹	۰/۲۰	۱۸/۴۰

*N.D: برآورد نشده



شکل ۴- میانگین مقدار کربن آلی در رده‌های خاک مورد مطالعه

بازتولید میکروبی آنها است. محصول این تغییرات، ترکیبات پیچیده‌تر و مقاوم‌تری در مقابل تجزیه و تخریب می‌باشد. دو پدیده عمده در توالی یکدیگر، در این تغییر ماهیت مواد موثر شناخته شده‌اند که اول معدنی شدن^۱ و دوم هوموسی شدن^۲ است. در مناطق مرطوب با سنگ مادر آهکی و آبرفتی ریز بافت،

لازم به ذکر است که مواد مادری و سنگ مادر نیز در تحول خاک‌های مورد مطالعه نقش بسزایی داشته است. در این پژوهش در خاک‌های مشتق شده از سنگ مادر بازالت، با در نظر گرفتن عدم وجود منبع کربن در این سنگ، سرچشمه کربن آلی خاک، تخریب زیستی و شیمیائی بقایای حیوانی و بازمانده‌های گیاهی و

^۲ Humification

^۱ Mineralization



ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شاخص خوبی برای تعیین کیفیت و تولید خاک بوده و مقدار آن بسته به میزان رس متغیر است. رس خاک به علت دارا بودن سطح ویژه زیاد و باردار بودن نقش مهمی در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارند و با افزایش مقدار رس مقدار این شاخص افزایش می‌یابد و به تبع آن میزان کربن آلی خاک نیز افزایش نشان می‌دهد.

علاوه بر اقلیم، اجزای اندازه‌ای ذرات خاک که از خصوصیات پایدار خاک بوده و تحت تاثیر مواد مادری و برخی فاکتورهای خاکساز قرار دارند، از عوامل تاثیرگذار در ذخیره کربن آلی خاک می‌باشند (Wang *et al.*, 2010). اجزای اندازه‌ای تشکیل دهنده بافت خاک از پارامترهایی هستند که به صورت غیرمستقیم بر روی میزان کربن موجود در خاک موثرند (Six *et al.*, 2002). Wang *et al.* (2010) بیان کردند که بافت خاک با تأثیر بر پوشش گیاهی، رطوبت قابل استفاده و حاصلخیزی خاک تأثیر مستقیم بر میزان کربن آلی خاک دارد. بالابودن میزان ذرات ریز خاک نظیر رس و سیلت که در اکثر خاک‌های تکامل یافته اتفاق می‌افتد در حفظ و تثبیت کربن آلی نقش و اهمیت دارد (Muller and Hoper, 2004). Amato and Ladd (1992) بیان نمودند که در خاک‌های غنی از رس و سیلت شرایط برای خاکدانه‌سازی مناسب است که این امر سبب چسبیدن ذرات مواد آلی کربندار به ذرات رس می‌شود و کربن آلی به صورت بلندمدت تثبیت و از خطر تجزیه حفظ می‌گردد. مواد آلی مرتبط با اجزای سیلت و رس به تغییرات مدیریتی خاک دیرتر واکنش نشان می‌دهند (Lorenz *et al.*, 2008). نتایج Christensen (2001)، Liao *et al.* (2006) و Meng *et al.* (2014) مطابق با نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که کربن آلی خاک معمولاً در ابعاد سیلت و رس ذخیره می‌شوند. Jimenez *et al.* (2008) در چهار جنگل شمال شرقی کاستاریکا، غلظت و مخزن کربن آلی خاک را در اجزای ذرات خاک تا عمق ۵۰ سانتیمتر از سطح زمین بررسی کرده و گزارش دادند که جزء سیلت ریز و رس بیشترین مقدار کربن آلی خاک را در همه جنگل‌ها دارا بود.

بر طبق نتایج حاصله در اقلیم نیمه‌خشک، خصوصیات خاک مطالعه شده اثر معنی‌داری بر مقادیر کربن آلی نشان نداد. در حالیکه در منطقه نیمه‌مرطوب، پارامتر ظرفیت تبادل کاتیونی با ضریب همبستگی 0.602^{**} در سطح یک درصد دارای اثر مستقیم و معنی‌دار و پارامترهای شوری، pH و کربنات کلسیم معادل به ترتیب با ضرایب همبستگی 0.471^{**} ، 0.450^{**} و 0.251^{**} در سطح یک درصد دارای اثر معکوس و معنی‌دار بر میزان کربن آلی خاک هستند (جدول ۵).

وجود بارندگی زیاد و رطوبت بالا، نقش اساسی در هوازدگی سنگ مادر و در نتیجه تحول بیشتر خاک داشته است و به تبع آن فرآیندهای خاکساخت بیشتری از جمله آبشویی، تجمع و هوموسی شدن در این مناطق صورت پذیرفته است که می‌تواند از دلایل بیشتر بودن مقدار کربن آلی در این مناطق در کنار نقش اقلیم باشد.

در کنار اثر اقلیم و مواد مادری می‌توان به نقش پوشش گیاهی و کاربری اراضی هم اشاره نمود که آن هم تحت تاثیر خصوصیات اقلیمی قرار دارد. به طور کلی خاک‌های دارای کاربری‌های مختلف، وضعیت متفاوتی از نظر کربن دارند (Stevens and Wesemael, 2008). به طوریکه مقدار کربن کل بین کاربری‌های مختلف تا بیش از ۱۵ برابر متفاوت است (Sharma and Ray, 2007). نتایج گویای مقادیر حداکثر کربن آلی در اقلیم مرطوب بوده است که بیشتر خاک‌های بررسی شده دارای کاربری جنگل بوده است. مقادیر بالای ذخیره کربن آلی در لایه‌های سطحی خاک را می‌توان به دلیل پوشش و تولید در سطح و تهویه تا حدودی کمتر در اثر وجود ریشه‌های در هم تنیده و ضخیم که باعث کاهش میزان تجزیه ماده آلی می‌گردد، نسبت داد. به عبارت دیگر علت اصلی بالا بودن ذخیره کربن آلی در اقلیم مرطوب دارای کاربری جنگل در این پژوهش افزایش ورودی‌های کربن از طریق افزایش لاشبرگ ورودی به کف جنگل و بهبود وضعیت پوشش کف زمین می‌باشد.

ارتباط و همبستگی بین کربن آلی خاک و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

علاوه بر عوامل پنج‌گانه خاکساز، خود خصوصیات خاک نیز کنترل کننده سایر ویژگی‌های خاک هستند. مطالعات زیادی بر روی پارامترهایی مثل شن، سیلت، رس و کربنات کلسیم صورت پذیرفته که تاثیر آنها بر مقدار کربن آلی خاک را اثبات نموده و نشان داده است که تغییر در کربن آلی خاکها با تغییرات ساختار خاک و یا ثبات آن در ارتباط است (Pandey *et al.*, 2010; Schimel *et al.*, 1994).

به همین منظور جهت بررسی تاثیر برخی خصوصیات خاک بر مقادیر کربن آلی خاک، آنالیز همبستگی داده‌ها به روش پیرسون انجام گردید. نتایج نشان داد که در اقلیم خشک پارامترهای ظرفیت تبادل کاتیونی و سیلت به ترتیب با ضرایب همبستگی 0.447^{**} و 0.340^{**} در سطح یک درصد و پنج درصد دارای اثر مستقیم و معنی‌دار و پارامتر درصد رس با ضریب همبستگی 0.374^{**} در سطح یک درصد دارای اثر معکوس و معنی‌دار بر میزان کربن آلی خاک هستند (جدول ۵). ویژگی

جدول ۵- ارتباط بین کربن آلی خاک و برخی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی در مناطق مورد مطالعه

Humid								
	Sand	Silt	Clay	OC*	CCE	pHsp	EC	CEC
Sand	۱							
Silt	۰/۰۷	۱						
Clay	** -۰/۸۰۲	** -۰/۶۳۰	۱					
OC	۰/۰۶۳	۰/۲۶۳	-۰/۱۹۸	۱				
CCE	** -۰/۵۴۸	-۰/۰۱۴	** -۰/۴۰۴	۰/۰۸۴	۱			
pHsp	۰/۲۴۱	۰/۱۱۲	-۰/۲۴۸	-۰/۱۰۸	-۰/۰۱۹	۱		
EC	** -۰/۳۴۶	۰/۰۹	* -۰/۲۹۷	** -۰/۴۳۰	-۰/۰۶۵	* -۰/۳۳۳	۱	
CEC	** -۰/۴۶۳	** -۰/۳۶۱	** -۰/۵۹۶	** -۰/۳۸۸	-۰/۱۷۷	* -۰/۲۹۲	-۰/۱۲۷	۱
Semi-Humid								
	Sand	Silt	Clay	OC	CCE	pHsp	EC	CEC
Sand	۱							
Silt	۰/۰۶	۱						
Clay	** -۰/۹۰۷	** -۰/۴۷۴	۱					
OC	-۰/۱۹۱	-۰/۰۸۴	۰/۲۰۵	۱				
CCE	* -۰/۲۵۲	۰/۱۳۹	* -۰/۲۷۹	* -۰/۲۵۱	۱			
pHsp	** -۰/۳۶۳	۰/۲۰۶	** -۰/۴۱۲	** -۰/۴۵۰	* -۰/۲۹۰	۱		
EC	-۰/۰۴۶	-۰/۰۷۲	۰/۰۷۳	** -۰/۴۷۱	-۰/۱۶-	-۰/۰۸۳	۱	
CEC	** -۰/۵۷۲	** -۰/۴۴۰	** -۰/۶۹۴	** -۰/۶۰۲	* -۰/۲۸۷	** -۰/۷۳۶	۰/۲۰۷	۱
Semi-Arid								
	Sand	Silt	Clay	OC	CCE	pHsp	EC	CEC
Sand	۱							
Silt	* -۰/۴۱۰	۱						
Clay	** -۰/۸۸۲	-۰/۰۶۷	۱					
OC	-۰/۰۷	۰/۲۰۸	-۰/۰۲۹	۱				
CCE	-۰/۰۷۱	-۰/۰۰۸	۰/۰۸۳	-۰/۳۱	۱			
pHsp	** -۰/۵۷۲	-۰/۰۵	** -۰/۶۵۲	۰/۱۳	۰/۲۶۴	۱		
EC	۰/۱۵۲	۰/۱۸۷	-۰/۲۶۴	-۰/۱۰۲	-۰/۱۶۴	** -۰/۶۳۵	۱	
CEC	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	۱
Arid								
	Sand	Silt	Clay	OC	CCE	pHsp	EC	CEC
Sand	۱							
Silt	** -۰/۶۸۸	۱						
Clay	** -۰/۸۰۵	۰/۱۳۳	۱					
OC	۰/۰۴۵	* -۰/۳۴۰	** -۰/۳۷۴	۱				
CCE	** -۰/۴۴۳	۰/۲۲۷	** -۰/۴۳۸	-۰/۲۴۱	۱			
pHsp	** -۰/۴۳۸	** -۰/۴۳۷	-۰/۲۳۷	-۰/۰۸۱	** -۰/۵۰۶	۱		
EC	** -۰/۵۴۳	* -۰/۳۴۲	** -۰/۴۸۲	-۰/۱۰۸	** -۰/۴۹۴	** -۰/۷۶۵	۱	
CEC	-۰/۱۷۴	** -۰/۵۱۵	-۰/۱۹۷	** -۰/۴۴۷	* -۰/۲۹۳	** -۰/۷۴۱	* -۰/۳۴۷	۱

** معنی دار بودن در سطح ۰/۰۱ * معنی دار بودن در سطح ۰/۰۵
 OC: کربن آلی خاک، CCE: کربنات کلسیم معادل، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی

خاک را به دنبال خواهد داشت که در نهایت سبب کمبود کاهش ماده آلی خاک می‌شود. املاح محلول موجود در خاک به دلیل ایجاد محدودیت در استقرار و رشد و توسعه پوشش گیاهی شوری نقش بسیار تعیین کننده‌ای بر روی درصد پوشش گیاهی دارد

در توجیه اثر معکوس شوری می‌توان بیان نمود که یکی از اثرات شوری در گیاهان کاهش فعالیت فتوسنتزی است که موجب کاهش مقدار کلروفیل و کاهش جذب دی‌اکسید کربن و ظرفیت فتوسنتز می‌شود که در نهایت کاهش حجم ورودی لاشبرگ به



خاک سبب تشدید معدنی شدن شده و در نتیجه آن کربن آلی خاک کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن شرایط یکسان، خاکهای مناطق گرمتر در مقایسه با خاکهای مناطق معتدل و سردتر دارای کربن آلی کمتری هستند. از جمله فرآیندهای مهم خاکساز رخ داده در خاک‌های ۸ منطقه مورد مطالعه انتقال و تجمع رس، تجمع ماده آلی در افق‌های سطحی و انتقال کربنات‌ها از سطح خاک و تجمع در افق‌های زیرین می‌باشد. عامل اقلیم (بارندگی و دما) به طور مستقیم و پوشش گیاهی به طور غیرمستقیم نقش اصلی را در تکامل خاک‌های مورد مطالعه داشته به طوری که با افزایش بارندگی و کاهش دما تنوع افق‌ها، میزان تجمع ماده آلی، تجمع مواد در افق‌های زیرین افزایش یافته است. نتایج نشان داد که مقدار کربن آلی در خاک مناطق مورد مطالعه با افزایش عمق کاهش می‌یابد و میانگین مقدار کربن آلی در خاک‌های مالی‌سول بیشتر از آلفی‌سول‌ها، اینسپتی-سولها، انتی‌سولها و اریدی‌سولها بوده است. تغییر در پارامترهای اقلیمی سبب ایجاد تغییر تنوع گونه‌ها در اکوسیستم شده و در نهایت بر روی اشکال مختلف کربن به ویژه کربن آلی خاک موثر است. از مهمترین عوامل اقلیمی در این مطالعه می‌توان به دما اشاره نمود که افزایش دمای خاک سبب تشدید معدنی شدن شده و در نتیجه آن کربن آلی خاک کاهش می‌یابد. نتایج کلی این مطالعه نشان می‌دهد افزایش پارامترهای هدایت الکتریکی خاک (شوری)، اسیدیته خاک و مقدار رس اثر منفی، ولی افزایش پارامترهای ظرفیت تبادل کاتیونی و مقدار سیلت خاک اثرات مثبت بر میزان کربن آلی خاک دارند. در مناطق چهارگانه مورد مطالعه در یک ردیف اقلیمی، سیلت نقش مهمی در تعادل بین خاک و گیاه از نظر تغذیه‌ای با تاثیرگذاری بر اشکال کربن و سایر خصوصیات فیزیکوشیمیایی ایفا می‌کند. به طور کلی خاک‌های با ذرات ریزتر (در ابعاد رس و سیلت) به علت وجود سطح ویژه بالاتر، توانایی بیشتری برای ذخیره کربن خاک دارند. همچنین خاک‌های با غالبیت کانی اسمکتایت در خاک‌های مناطق نیمه‌مرطوب و مرطوب به علت وجود سطح ویژه بالاتر و محافظت در برابر تجزیه زیستی، توانایی بیشتری برای ذخیره کربن آلی خاک دارند. بنابراین می‌توان عنوان نمود که در مدیریت خاکهای مناطق مورد مطالعه بایستی با اعمال مدیریت‌های اصولی و استراتژیک، از شورشیدن خاک‌ها، هدررفت و فرسایش ذرات ریز خاک جلوگیری شود تا شاهد افزایش قابلیت ذخیره کربن آلی خاک در این اقلیم و اکوسیستم‌ها شد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

چنانچه مطالعات گسترده‌ای این موضوع را تأیید می‌نمایند (Sheidai *et al.*, 2017). از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد میزان pH با کربن آلی خاک رابطه معکوس دارد. در این خصوص؛ مطالعات مختلفی نشان می‌دهد اسیدیته خاک توسط عمل تنظیم فعالیت میکروبی خاک میزان کربن آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مقادیر بالای اسیدیته احتمالاً به دلیل تسریع شدن تجزیه کربن خاک یک اثر منفی بر میزان کربن خاک دارد (Motavalli *et al.*, 1995).

با افزایش میزان بارندگی در اقلیم مرطوب، پارامتر ظرفیت تبادل کاتیونی با ضریب همبستگی 0.388^{**} در سطح یک درصد دارای اثر مستقیم و معنی‌دار و پارامتر شوری با ضریب همبستگی 0.430^{**} در سطح یک درصد دارای اثر معکوس و معنی‌دار بر میزان کربن آلی خاک هستند (جدول ۵). Raheb (2012) و (2017) گزارش نمود که در بررسی تاثیر نوع رس در شرایط اقلیمی متفاوت، با افزایش رطوبت، خاک‌های با غالبیت کانی اسمکتایت به علت وجود سطح ویژه بالاتر و محافظت در برابر تجزیه زیستی، توانایی بیشتری برای ذخیره کربن آلی خاک دارند. علاوه بر تاثیر اقلیم و پوشش گیاهی یکی دیگر از مهمترین دلایل بیشتر بودن مقادیر کربن آلی در دو منطقه نیمه‌مرطوب و مرطوب، غالبیت بارز کانی رسی اسمکتایت در خاک این مناطق است. چرا که سطح ویژه بالا و وجود فضاهای بین لایه‌ای زیاد، سبب حفاظت در برابر عوامل زیستی تجزیه کننده و در نهایت افزایش نگهداری کربن آلی شده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه حدود ۸۲ درصد سطح کشور در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است، متأسفانه کربن آلی در خاک‌ها (به جز در موارد محدود) در بیشتر عرصه‌های تولید اعم از زراعت، مرتع و حتی اکثر مناطق جنگلی بسیار کم است. این واقعیت بیانگر آن است که اولاً تغییر جزئی در مقدار کربن آلی می‌تواند تاثیر عمیق و قوی بر کارکردهای خاک و در نتیجه کیفیت آن در شرایط خشک و نیمه‌خشک کشور داشته باشد. ثانياً، چون کربن آلی ماهیتاً سریع‌تر و بیشتر از هر صفت کیفی خاک، متأثر از اقدامات مدیریتی است، لذا، هرگونه تغییر مدیریت و کاربری می‌تواند تاثیر چشم‌گیری بر کیفیت خاک بویژه در باروری و تولید آن در کاربری‌های مختلف داشته باشد. تغییرات اقلیمی با تاثیر بر رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک سبب ایجاد تغییر میزان پوشش گیاهی و در نهایت بر روی اشکال مختلف کربن به ویژه کربن آلی خاک اثر گذاشته است. افزایش دمای

REFERENCES

- Adhikari, G. and Bhattacharyya, K. G. (2015). Correlation of soil organic carbon and nutrients (NPK) to soil mineralogy, texture, aggregation, and land use pattern. *Environmental monitoring and assessment*, 187(735), 1-18.
- Ajami, M., Heidari, A., Khormali, F., Gorji, M., and Ayoubi, S. (2016). Environmental factors controlling soil organic carbon storage in loess soils of a subhumid region, northern Iran. *Geoderma*, 281, 1-10.
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I. (2017). The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change*, 140, 33-45.
- Alvarez, R. and Lavado, R. S. (1998). Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83(1-2), 127- 141.
- Amato, M. and Ladd, J.N. (1992). Decomposition of C14 labeled glucose and legume material in soils: properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 24, 455-464.
- Barré, P., Fernandez-Ugalde, O., Virto, I., Velde, B. and Chenu, C. (2014). Impact of phyllosilicate mineralogy on organic carbon stabilization in soils: incomplete knowledge and exciting prospects. *Geoderma*, 235, 382-395.
- Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. 47, 151-164.
- Bradford, M. A., Wieder, W. R., Bonan, G. B., Fierer, N., Raymond, P. A. and Crowther, T. W. (2016). Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change*, 6, 751–758.
- Buol, S. W., Southard, R. J., Graham, R. C. and McDaniel, P. A. (2011) *Soil Genesis and Classification* (6th ed.). John Wiley and Sons Inc.
- Carter, M. R., and Gregorich, E. G. (2008) *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2nd ed.). Canadian Society of Soil Science.
- Christensen, B. T. (2001). Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*, 52, 345-353.
- Crow S. E., Swantson C., and Lajtha K. (2007). Density fraction of forest soils: Methodological question and interpretation of incubation result and turnover time in an ecosystem context. *Biogeochemistry*, 85, 69-90.
- Evans, S. E., Burke, I. C. and Lauenroth, W. K. (2011). Controls on soil organic carbon and nitrogen in Inner Mongolia, China: a cross-continental comparison of temperate grasslands. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(3).
- Faghih, A. (2010). Carbon sequestration under different physiographic and climatic condition in north Karaj river using RS and GIS. MSc. Thesis, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran. (In Farsi)
- Franzluebbers, A. J. (2002). Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research*, 66, 95-106.
- Iqbal, J., Ronggui, H., Lijun, D., Lan, L., Shan, L., Tao, C. and Leilei, R. (2008). Differences in soil CO₂ flux between different land use types in mid-subtropical China. *Soil Biology and Biochemistry*. 40(9), 2324-2333.
- Jackson, R. B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G., and Piñeiro, G. (2017). The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, 419-445.
- Jimenez, J. J., Lal, R., Russo, R. O. and Leblanc, H. A. (2008). The soil organic carbon in particle-size separates under different regrowth forest stands of north eastern Costa Rica. *Ecological Engineering*, 34, 300-310.
- Jobbágy, E. G., and Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10(2), 423-436.
- Kalbitz, K., Schwesig, D., Rethemeyer, J. and Matzner, E. (2005). Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(7), 1319-1331.
- Koven, C. D., Hugelius, G., Lawrence, D. M., and Wieder, W. R. (2017). Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. *Nature Climate Change*, 7(11), 817-822.
- Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 363, 815-830.
- Li, H., Wu, Y., Chen, J., Zhao, F., Wang, F., Sun, Y., and Qiu, L. (2021). Responses of soil organic carbon to climate change in the Qilian Mountains and its future projection. *Journal of Hydrology*, 596, 126110.
- Liao, J. D., Boutton, T. W. and Jastrow, J. D. (2006). Organic matter turnover in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland: evidence from natural 13C and 15N. *Soil biology and biochemistry*, 38(11), 3197-3210.
- Lorenz, K., Lal, R. and Shipitalo, M. J. (2008). Chemical stabilization of organic carbon pools in particlesize fractions in no-till and meadow soils. *Biology and Fertility of Soils*, 44, 1043-1051.
- Meng, F., Lal, R., Kuang, X., Ding, G. and Wu, W. (2014). Soil organic carbon dynamics within density and particle-size fractions of aquatic cambisols under different land use in northern China. *Geoderma Regional*, 1, 1–9.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86.
- Minasny, B., and McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water



- capacity. *European Journal of Soil Science*, 69, 39-47.
- Moghiseh, E. (2013). Assessing the Effects of Changes in Forest Land-Use on Soil Carbon Dynamics and Isotopic Changes (Kelardasht, Mazandaran Province, Ph.D. Thesis, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran. (In Farsi)
- Motavalli, P. P., Palm, C. A. Parton, W. J., Elliott, E. T., and Frey, S. D. (1995). Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils: evidence from laboratory and simulation studies. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(12), 1589-1559.
- Muller, T., and Hoper, H. (2004). Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications. *Soil Biology and Biochemistry*, 36, 877-888.
- Osat, M. (2010). *Change of soil organic carbon due to land-use change in central region of Karaj city*. MSc. Thesis, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran. (In Farsi)
- Pandey, C. B., Chaudhari, S. K., Dagar, J. C., Singh, G. B., and Singh, R. K. (2010). Soil N mineralization and microbial biomass carbon affected by different tillage levels in a hot humid tropic, *Soil and Tillage Research*, 11, 33-41.
- Parvizi, Y. and Gorji, M. (2013). Effect of dry land management factors on soil organic carbon in the Merck basin of Kermanshah. *Land Management Journal*, 1 (1), 81-89. (In Farsi)
- Rabbi, S. M. F., Tighe, M. K., Flavel, R. J., Kaiser, B. N., Guppy, C. N., Zhang, X., et al., (2018). Plant roots redesign the rhizosphere to alter the three-dimensional physical architecture and water dynamics. *New Phytol*, 219, 542-550.
- Raheb, A. R. (2012). Image Analysis and investigation of micromorphological and mineralogical properties of paddy and non paddy soils. MSc. Thesis, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran. (In Farsi)
- Raheb, A., and Heidari, A. (2012). Effects of clay mineralogy and physico-chemical properties on potassium availability under soil aquatic conditions. *Journal of soil science and plant nutrition*, 12(4), 747-761.
- Raheb, A. R. (2017). The effects of bioclimatological factors on soil organic and inorganic carbon contents in basaltic geological formations. Ph.D. Thesis, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran. (In Farsi)
- Raheb, A., Heidari, A., and Mahmoodi, S. (2017). Organic and inorganic carbon storage in soils along an arid to dry sub-humid climosequence in northwest of Iran. *Catena*, 153, 66-74.
- Rahman, M. M., Aravindakshan, S., Hoque, M. A., Rahman, M. A., Gulandaz, M. A., Rahman, J., and Islam, M. T. (2021). Conservation tillage (CT) for climate-smart sustainable intensification: Assessing the impact of CT on soil organic carbon accumulation, greenhouse gas emission and water footprint of wheat cultivation in Bangladesh. *Environmental and Sustainability Indicators*, 10, 100106.
- Ren, W., Banger, K., Tao, B., Yang, J., Huang, Y., and Tian, H. (2020). Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901-2010: roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management. *Geography and Sustainability*, 1(1), 59-69.
- Rice, C.W. (2005). *Carbon Cycle in Soils; Dynamics and Management*. Elsevier Ltd.
- Rossel, R. A. V., Lee, J., Behrens, T., Luo, Z., Baldock, J. and Richards, A. (2019). Continental scale soil carbon composition and vulnerability modulated by regional environmental controls. *Nature geoscience*, 12, 547-552.
- Scharlemann, J. P. W., Tanner, E. V. J., Hiederer, R. and Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5, 81-91.
- Schimel, D. S., Braswell, B. H., Holland, E. A., McKeown, R., Ojima, D. S., Painter, T. H., Parton, W. J., and Townsend, A. R. (1994). Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochemistry Cycle*, 8, 279-293.
- Shakiba, A. and Rahnama, M., (2003). The impact of climate change on soil carbon variations. *Third Regional Conference on Climate Change, Meteorological Organization, Isfahan*. (In Farsi)
- Shahbazi K, and Besharati, H. (2013). Overview of Agricultural Soil Fertility Status of Iran, *Iranian Journal of Land Management*, 1 (1), 1-15. (In Farsi)
- Sharma, P. and Ray, S. C. (2007). Carbon sequestration with land-use cover change in a Himalayan watershed. *Geoderma*, 139, 371-378.
- Sheidai Karkaj E, Sepehry A, Barani H, and Motamedi J. (2017). Soil organic carbon reserve relationship with some soil properties in East Azerbaijan rangelands, *Journal of rangelands*, 11(2): 125-138.
- Shi, Y., Baumann, F., Ma, Y., Song, C., Kuhn, P., Scholten, T. and He, J. S. (2012). Organic and inorganic carbon in the topsoil of the Mongolian and Tibetan grasslands: pattern, control and implications. *Biogeosciences*, 9, 2287-2299.
- Singh, S. K., pandey, C. B., Sidhu, G. S., Dipak, Sarkar, R. S. (2011). Concentration and stock of carbon in the soils affected by land uses and climates in the western Himalaya, India. *Catena*, 87, 78-89.
- Six, J., Conant, R. T. and Paul, E. A. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, 241, 155-176.
- Six, J., and Paustian, K. (2014). Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, A4-A9.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy* (12nd ed.). United States Department of Agriculture. NRCS.
- Somaratne, S., Seneviratne, G., and Coomaraswamy, U.

- (2005). Prediction of soil organic carbon across different land-use patterns: A neural network approach. *Soil Science Society of American Journal*, 69, 1580-1589.
- Sollins, P., Kramer, M. G., Swanston, C., Lajtha, K., Filley, T., Aufdenkampe, A. K., Wagai, R. and Bowden, R. D. (2009). Sequential density fractionation across soils of contrasted mineralogy: evidence for both microbial- and mineral-controlled soil organic matter stabilization. *Biogeochemistry*, 96, 209-231.
- Soussana, J. F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., et al., (2019). Matching policy and science: rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. *Soil and Tillage Research*, 188, 3-15.
- Sparks, D. L. (1996) *Method of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. American Society of Agronomy.
- Stevens, A. and Wesemael, B. (2008). Soil organic carbon dynamics at the regional scale as influenced by land use history: a case study in forest soils from southern Belgium. *Soil Use and Management*, 24, 69-79.
- USDA-NRCS. (2012a) *Field Book for Describing and Sampling Soils*. Version 3.0, National Soil Survey Center.
- USDA-NRCS. (2012b) *jNSM: Java Newhall Simulation Model*. Version 1.6.0. User guide-part 1. National Soil Survey Center.
- Von Lützow, M., Kogel-Knabner, I., Aksenit, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. and Flessa, H. (2006). Stabilization of soil organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. *European Journal of Soil Science*, 57, 426-445.
- Wang, D., Shi, X., Wang, H., Weindorf, D. C., Yu, D., Sun, W., Ren, H. and Zhao, Y. (2010). Scale effect of climate and soil texture on soil organic carbon in the uplands of Northeast China. *Pedosphere*, 20, 525-535.
- Wang, Z. P., Han, X. G., Chang, S. X., Wang, B., Yu, Q., Hou, L. Y. and Li, L. H. (2013). Soil organic and inorganic carbon contents under various land uses across a transect of continental steppes in Inner Mongolia. *Catena*, 109, 110-117.
- Wattel-Koekkoek, E., Van Genuchten, P., Buurman, P. and Van Lagen, B. (2001). Amount and composition of clay-associated soil organic matter in a range of kaolinitic and smectitic soils. *Geoderma*, 99(1), 27-49.
- Wiseman, C. and Püttmann, W. (2005). Soil organic carbon and its sorptive preservation in central Germany. *European Journal of Soil Science*, 56(1), 65-76.
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Liess, M., Garcia-Franco, N., Wollschlager, U., Vogel, H.J., and Kogel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162.
- Zhou, Y., Hartemink, A. E., Shi, Z., Liang, Z., and Lu, Y. (2019). Land use and climate change effects on soil organic carbon in North and Northeast China. *Science of the Total Environment*, 647, 1230-1238.