



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
موسسه تحقیقات خاک و آب



ماده آلی خاک و جایگاه آن در کشاورزی ایران

بررسی وضع موجود، تحلیل مسائل و محدودیت‌ها، ارائه راهکارها

نگارندگان

فرهاد مشیری¹، حسین صفاری¹، پیمان کشاورز² و ندا زاهدی فرد³

¹اعضای هیئت علمی موسسه تحقیقات خاک و آب

²عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

³محقق موسسه تحقیقات خاک و آب

نشریه فنی: 608

1400

مشخصات اثر

عنوان: ماده آلی خاک و جایگاه آن در کشاورزی ایران بررسی وضع موجود، تحلیل مسائل و محدودیت‌ها، ارائه راهکارها

نگارندگان: فرهاد مشیری، حسین صفاری، پیمان کشاورز و ندا زاهدی فرد

ناشر: موسسه تحقیقات خاک و آب

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: انتشارات سنا

کارشناس انتشارات: زهرا محمدی

ویراستار: زهرا محمدی

صفحه آرا: سمانه پورمنصور

طراح جلد: راضیه محمدی

سال انتشار: 1400

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

این اثر با شماره 61000 در تاریخ 1400/11/2 در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسیده است.

نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: کرج، میدان استاندارد، جاده مشکین‌دشت، بلوار امام خمینی (ره)، موسسه تحقیقات خاک و آب

صندوق پستی: 311-31785

کد پستی: 3177993545

تلفن: 026-36201900

نمابر: 02636210121

پست الکترونیکی: info@swri.ir

وبسایت: <http://www.swri.ir>

مسئولیت صحت مطالب به عهده نگارندگان است.

فهرست مطالب

1- مقدمه	1
2- مفهوم ماده آلی و کربن آلی خاک	3
3- نقش ماده آلی در کیفیت خاک	8
4- تاثیر کربن آلی خاک در تولید محصول	13
5- نقش کربن آلی خاک در تغییرات اقلیمی	16
6- وضعیت کربن آلی خاک‌های زراعی کشور	18
7- عوامل موثر بر میزان کربن آلی خاک‌ها	21
1-7- شرایط اقلیمی	22
2-7- نوع خاک	25
3-7- فرسایش خاک	25
4-7- تغییر کاربری اراضی	26
5-7- مدیریت‌های زراعی حفظ و ارتقاء کربن آلی خاک‌های کشاورزی	27
8- قوانین و آیین نامه‌ها مرتبط با مدیریت کربن آلی خاک	51
9- برنامه‌های تحقیقاتی آینده	53
10- جمع‌بندی و پیشنهاد	56
منابع	58

1- مقدمه

کربن آلی خاک به عنوان عامل کلیدی در پایداری حاصلخیزی، باروری و خدمات رسانی زیست بوم خاک¹ محسوب می‌شود (Lal و همکاران، 2013). کربن آلی خاک، به عنوان یکی از موضوعات و چالش‌های مهم محیط‌زیستی در مقیاس جهانی در برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد نیز گنجانده شده است. در مفهوم جدید، ماده آلی خاک در «کشاورزی پایدار مبتنی بر علم»² به عنوان مخزن پویای زیستی تنظیم‌کننده انرژی، کربن، و عناصر غذایی است که با مفهوم حاصلخیزی تعریف شده برای کشاورزی آلی³ به عنوان «ظرفیت خاک برای دریافت، ذخیره و انتقال انرژی» هم‌گرائی دارد (Victoria و همکاران، 2012).

ماده آلی خاک بر تولید غذا، چرخه عناصر غذایی، ذخیره آب در خاک، بهبود شرایط فیزیکی و کنترل فرسایش خاک، حفاظت و تنظیم اقلیم، چرخه انرژی، تراکم و فعالیت موجودات خاکی، تنوع زیستی، تغییر، تحول و پویایی خاک تأثیرگذار است. کربن آلی خاک از راه تغییر و تبدیل مواد و جریان انرژی سبب بهبود کارکردهای ضروری خاک در خدمات‌رسانی زیست بوم می‌شود (Banwart و همکاران، 2015). کمبود ماده آلی در خاک افزون‌بر کاهش حاصلخیزی خاک و کاهش محصول مشکلات دیگری از قبیل کاهش کارایی کاربرد کودهای شیمیایی (Vanlauwe، 2011) و کاهش مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های محیطی و عوامل بیماری‌زا را به همراه دارد (Garratt، 2018).

تحقیقات نشان داده است عملیات کشاورزی بر مقدار کربن خاک موثر است (Lal و Lorenz، 2018). روش‌های خاک‌ورزی، تناوب زراعی و نیز کودپاشی همگی می‌توانند اثرات عمیقی بر مقدار ماده آلی خاک داشته باشند. برای اینکه خاک بتواند به طور پیوسته کالا و خدمات خود را عرضه نماید باید تولید زیست توده گیاهی در اندازه‌ای باشد که به افزایش مواد آلی در خاک منجر شود از این رو می‌بایست به سه مولفه میزان مواد معدنی مصرفی مانند کودهای شیمیایی، میزان کودهای آلی مصرفی و میزان ذخیره مواد آلی در خاک توجه شود (شکل 1). اگر هر سه مولفه یاد شده در تعادل با هم باشند

¹ Soil ecological services² Science-based sustainable agriculture³ Organic Agriculture

خاک خدمات خوبی به ما می‌دهد بدین معنا که میزان مواد آلی خاک حفظ شده و یا افزایش خواهد یافت. مقدار افزایش توده زنده بستگی به رعایت تعادل بین مولفه‌های یاد شده دارد (سماوات، 1394). از این‌رو مدیریت بهینه منابع خاک برای تأمین خدمات و کالا نیازمند مدیریت بهینه منابع آلی، نهاده‌های معدنی و ذخیره مواد آلی خاک است.



شکل 1- خدمات رسانی خاک منتج از مدیریت هم زمان منابع آلی، نهاده‌های معدنی و ذخیره ماده آلی خاک (سماوات، 1394)

در سال‌های اخیر به کربن آلی خاک در مجامع علمی و در بین کارشناسان و مدیران اجرایی، به دلیل اهمیت آن در کیفیت خاک و تولید محصول و همچنین اثرات آن در کاهش تغییرات اقلیمی، بسیار توجه شده است. در سال 2017 همایش جهانی کربن آلی خاک با حضور بیش از 500 اندیشمند و کارشناس از کشورهای مختلف در ستاد اصلی سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد در رم ایتالیا با هدف جمع‌بندی یافته‌های جهانی در زمینه شناخت و مدیریت کربن آلی خاک، میزان ترسیب کربن آلی خاک‌ها و اثرات کربن آلی در تعدیل تغییرات اقلیمی برگزار شد (شکل 2). نتایج نشست‌های تخصصی در گزارش همایش در سه محور: الف- اندازه‌گیری، تولید نقشه، پایش و گزارش‌دهی ذخیره کربن آلی خاک و تغییرات آن، ب- نگهداری و یا افزایش ذخیره کربن آلی خاک (تسریع و تشدید فرایند ترسیب کربن) و ج- مدیریت کربن آلی خاک در خاک‌ها از جمله خاک‌های مناطق خشک جمع‌بندی شده و در دسترس بهره‌برداران قرار گرفت (FAO، 2017).



شکل 2- همایش جهانی کربن آلی خاک، سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO، 2017)

همگام با توجه جهانی به موضوع کربن آلی خاک و با آگاهی از وضعیت آن در خاک‌های کشور، حفظ و افزایش تدریجی میزان کربن آلی خاک‌های ایران برای دستیابی به تولید پایدار و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی بیش از پیش ضرورت دارد. از این‌رو، وزارت جهاد کشاورزی در برنامه‌های توسعه چهارم تا ششم دنبال افزایش ماده آلی خاک‌ها با استفاده از همه منابع ماده آلی و همچنین بهبود مدیریت کشت و کار است تا تولیدات کشاورزی پایدار شود و خاک قدرت باروری خود را حفظ نماید. در این مجموعه نتایج کارهای انجام شده در زمینه اثر مواد آلی خاک بر کیفیت خاک و تولید محصول، وضعیت کربن آلی خاک‌های ایران جمع‌بندی و راهکارهای حفظ و یا افزایش کربن آلی خاک ارائه شده است. افزون بر این، قوانین و آیین‌نامه‌های مرتبط با موضوع ماده آلی خاک و استانداردهای موجود در زمینه کیفیت کودهای آلی در ایران اشاره و در انتها، برنامه پژوهش‌های آینده معرفی شده است.

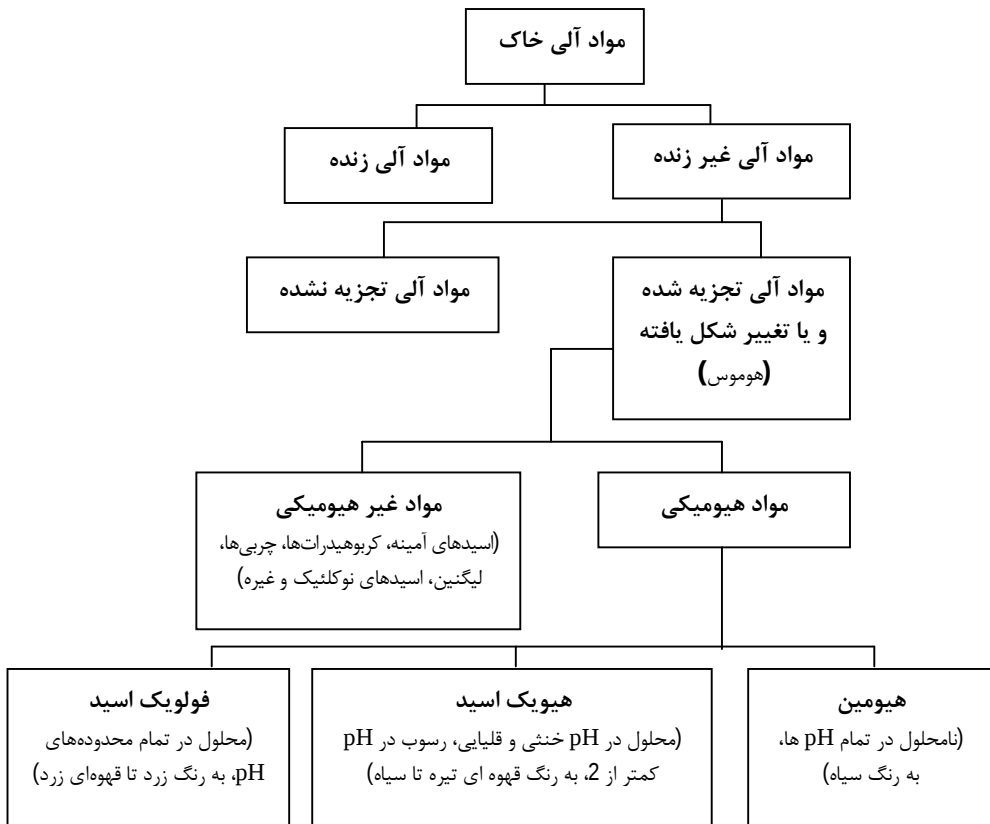
2- مفهوم ماده آلی و کربن آلی خاک

خاک از چهار بخش مواد معدنی، مواد آلی، آب و هوا تشکیل شده است. ماده آلی خاک شامل بقایای گیاهی و جانوری، سلول و بافت‌های جانداران خاک و مواد حاصل از فعالیت‌های ریشه و ریزجانداران خاک است. ماده آلی خاک ترکیبی پیچیده از مواد آلی نیمه

تجزیه شده حاصل از باقیمانده گیاهان و زیست توده جانوری و میکروبی است (Totsche و همکاران، 2010). در برخی منابع توده زنده خاک از جمله ریزجانداران خاک و ریشه‌های زنده جزو کربن آلی خاک محسوب نشده و ماده آلی خاک به بخش تازه جدا شده از گیاهان و یا ریزجانداران خاک که در حال تجزیه بوده (غیر هیومیکی) و یا کاملاً تجزیه شده باشند (هیومیکی) اطلاق می‌شود (Totsche و همکاران، 2010؛ Ismail-Meyer و همکاران، 2010). در واژه‌نامه انجمن علوم خاک آمریکا ماده آلی خاک به صورت بخش آلی خاک به استثنای بقایای گیاهی و حیوانی تجزیه نشده تعریف می‌شود. یعنی ماده آلی خاک معادل هوموس در نظر گرفته شده است (SSSA، 2019). البته، در برخی دیگر از منابع بخش زنده خاک نیز جزو ماده آلی خاک دانسته می‌شود (Cerri و Izaurrealde، 2006). ماده آلی خاک شامل مخلوطی از بقایای گیاهی و جانوری در مراحل مختلف تجزیه، مواد سنتز شده زیستی و یا شیمیایی حاصل از فرایند تجزیه ترکیبات آلی و اندام‌ها و بافت‌های زنده و یا مرده ریزجانداران و مواد حاصل از تجزیه آن‌ها است (Schnitzer، 2000). این اختلاف در تعریف به دیدگاه متفاوت متخصصین شیمی خاک و بیولوژی خاک بر می‌گردد اما در مفهوم کلی آنچه که مسلم است ماده آلی خاک می‌تواند شامل اجزای زنده و یا مرده در حال تجزیه باشد. مواد آلی خاک به مجموعه تمام مواد آلی طبیعی موجود در خاک اطلاق می‌شود (Baldock و Broos، 2011). به طوری که، بقایای گیاهی و جانوری 95 درصد مواد آلی خاک و جمعیت زنده میکروبی 5 درصد آنرا تشکیل می‌دهد. در خاک‌های کشاورزی مقدار ماده آلی خاک بین 1 تا 5 درصد متغیر است (Schnitzer، 2004). در شکل‌های (3) و (4) اجزای مختلف مواد آلی غیر زنده خاک شامل مواد آلی محلول، مواد آلی خرد شده (ذره‌ای) با قطر بیشتر از 53 میکرون، مواد آلی خنثی و هوموسی نشان داده شده است. هوموس از دو بخش مواد هیومیکی و غیر هیومیکی تشکیل شده است. مواد هیومیکی و مواد غیر هیومیکی به ترتیب حدود 60 تا 80 درصد و 20 تا 30 درصد هوموس خاک را تشکیل می‌دهد. بخش غیر هیومیکی دارای ساختار مشخص فیزیکی و شیمیائی بوده و نسبت به تجزیه میکروبی حساس‌تر است. پلی ساکاریدها، سلولز، لیگنین، لیپیدها و پروتئین‌ها در این دسته قرار می‌گیرند. مواد هیومیکی بخش مقاوم هوموس از نظر شیمیایی بوده و ترکیب پیچیده و بی شکل (آمورف) دارند. مواد هیومیکی و غیر هیومیکی در خاک از هم مجزا نبوده و متاثر از یکدیگر هستند (Lal، 2002).



شکل 3- اجزاء مواد آلی غیر زنده خاک (Nelson و Baldock, 1999)



شکل 4- نمایش شماتیک اجزای مواد آلی و هوموس خاک (Bendi و Nieder, 2008)

ترکیب شیمیایی ماده آلی تقریباً 50 درصد کربن، 5 درصد نیتروژن، 0/5 درصد فسفر، 0/5 درصد گوگرد، 39 درصد اکسیژن و 5 درصد هیدروژن است. ترکیب ماده آلی خاک بیشتر شامل کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، فنل‌ها، سلولز، همی‌سلولز و لیگنین است. ماده آلی خاک با توجه به اندازه و سرعت تجزیه به چهار بخش قابل تقسیم است (جدول 1) (Stockmann و همکاران، 2013).

جدول 1- اندازه، سرعت تجزیه و ترکیب چهار شکل ماده آلی خاک

مقدار	ترکیب	سرعت تجزیه	اندازه	شکل ماده آلی
کمتر از 5 درصد کل مواد آلی خاک	ترشحات ریشه گیاهان، قندهای ساده و مواد حاصل از تجزیه	چند دقیقه تا چند روز	کمتر از 45 میکرومتر	مواد آلی محلول
2 تا 25 درصد مواد آلی خاک	مواد تازه و یا در حال تجزیه گیاهی و جانوری با ساختمان سلولی قابل تشخیص	چند ماه تا چند دهه	53 میکرومتر تا 2 میلی‌متر	مواد آلی خرد شده
بیش از 50 درصد مواد آلی خاک	مواد آلی تجزیه شده و قدیمی با ترکیب مقاوم به تجزیه	چند دهه تا چند صد سال	کمتر از 53 میکرومتر	هوموس
تا 10 درصد مواد آلی خاک	مواد آلی به نسبت خنثی مانند مواد مقاوم شیمیایی و یا نهشته‌های آلی (زغال سنگ)	صدها تا هزاران سال	کمتر از 53 میکرومتر تا 2 میلی‌متر	مواد آلی مقاوم

کربن آلی خاک تنها به مقدار کربن موجود در مواد آلی خاک اشاره دارد. اندازه‌گیری مستقیم مواد آلی خاک دشوار است از این‌رو در تجزیه شیمیایی خاک، مقدار کربن آلی خاک اندازه‌گیری و گزارش می‌شود. کربن آلی 55-60 درصد ماده آلی خاک را تشکیل می‌دهد. مخزن کربن آلی خاک بر اساس پایداری بیوشیمیایی (شکل به آسانی قابل تجزیه

و ناپایدار¹، شکل مقاوم در مقابل تجزیه و پایدار²، شکل خنثی و بی اثر³، سرعت تجزیه (شکل فعال و به سرعت قابل تجزیه⁴، با سرعت تجزیه کم⁵ و شکل با سرعت تجزیه خیلی کم و غیر فعال⁶) و زمان بازگشت (کوتاه، طولانی و خیلی طولانی) متفاوت هستند (Stockmann و همکاران، 2013).

بخش سریع و فعال کربن آلی خاک، کربن آلی تازه وارد شده به خاک بوده که به مدت یک تا دو سال در حال تجزیه است. این بخش در تأمین عناصر غذایی برای گیاه و ریزجانداران خاک و نیز کاهش بیماری‌ها و خاکدانه سازی نقش دارد. بخشی از ترکیبات موجود در این قسمت قندهای ساده و اسیدهای آمینه هستند. بخش نیمه فعال و حد واسط کربن آلی خاک، بخش تجزیه شده ماده آلی خاک تجزیه شده توسط ریزجانداران در سطح رس‌ها تثبیت شده و یا در میان خاکدانه‌ها محافظت می‌شود. سرعت تجزیه آن بین 10 تا 100 سال است. این بخش شامل پلی‌ساکاریدها، پروتئین‌ها و چربی‌ها هستند. بخش پایدار و مقاوم کربن آلی خاک بسیار مقاوم در برابر تجزیه میکروبی است. این بخش 60 تا 80 درصد کربن آلی خاک را تشکیل می‌دهد. فرآیند تشکیل آن بیش از 10 سال زمان می‌برد. این بخش به‌طور عمده در ظرفیت تبادل کاتیونی و رنگ خاک دخالت دارد. این بخش از ماده آلی به نام هوموس نیز شناخته می‌شود که شامل هیومین‌ها، اسیدهای هیومیک و فولویک هستند (Lefevre و همکاران، 2017).

ویژگی‌های کلوئیدی مواد آلی با بخش هوموس آن مرتبط است. هوموس دارای سطح ویژه 900 مترمربع بر گرم و ظرفیت تبادل کاتیونی (150cmolc/kg تا 300) بسیار بالا بوده به همین علت بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک تاثیر قابل توجهی دارد. سطح ذرات هوموس دارای بار الکتریکی منفی وابسته به pH بوده که منشا آن اغلب گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و گروه‌های فنلی است. هوموس منبع عناصر ضروری کربن، نیتروژن، گوگرد و فسفر در خاک بوده و ساختمان خاک را بهبود می‌بخشد (Bohn و همکاران، 2001).

¹ Labile² Recalcitrant³ Inert⁴ Fast-active⁵ Slow-intermediate⁶ Very slow-passive

3- نقش ماده آلی در کیفیت خاک

کیفیت خاک بنابه تعریف، توانایی خاک در انجام کارکردها و ارائه خدمات از جمله تولید محصول، ذخیره آب، ترسیب کربن، دفن زباله و رفع آلودگی‌ها از خاک است. در سامانه‌های کشاورزی، تولید پایدار محصول مهمترین کارکرد خاک محسوب می‌شود. برای ارزیابی کیفیت خاک از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک استفاده می‌شود. برای تولید پایدار محصولات کشاورزی، خاک باید عناصر غذایی را برای گیاه تامین نموده، قابلیت نفوذ و ظرفیت نگهداشت آب مناسبی داشته باشد. از طرف دیگر محیط فیزیکی مناسب برای رشد ریشه‌ها را فراهم نماید. کربن آلی خاک با افزایش کیفیت خاک از راه بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک شرایط را برای رشد بهتر گیاه فراهم می‌نماید. بر مبنای مستندات بیش از 90 درصد مطالعات، ماده آلی خاک شاخص اصلی بررسی کیفیت خاک است (Bunemann و همکاران، 2018)، زیرا توانایی خاک در کارکردهای حیات‌بخش خود، مانند فراهم نمودن عناصر غذایی برای گیاهان، ظرفیت تبادل کاتیونی و آنیونی خاک، ذخیره آب، ترسیب گازهای گلخانه‌ای جو، تصفیه آلاینده‌ها، مقاومت در برابر تخریب فیزیکی و تولید محصول، به‌شدت متأثر از ماده آلی خاک است (Lal، 2013؛ Maia و همکاران، 2010) شکل‌های فعال و غیر فعال ماده آلی در خاک نقش‌های متعددی در ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک دارند (Kwiatkowska-Malina، 2018). حفظ تعادل دو بخش فعال و غیر فعال منجر به بهبود توانان سه ویژگی شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک می‌شود.

ماده آلی همچنین در آزادسازی، بازگشت و قابلیت فراهمی عناصر غذایی گیاه نقش دارد؛ بدین ترتیب که عناصر غذایی در ترکیب‌های آلی خاک، در فرآیند معدنی شدن به اشکال قابل دسترس برای گیاهان تبدیل می‌شوند. از این‌رو، ارزیابی کربن آلی از شاخص‌های کلیدی تعیین کیفیت خاک محسوب می‌شود (Lal و Lorenz، 2014). به‌عبارت دیگر، ماده آلی مخزن عناصر غذایی نیازمند گیاه است؛ از طرفی، پویایی کربن آلی خاک، خود به چرخه عناصر غذایی بستگی دارد (Schiettecatte، 2008). ماده آلی ذخیره‌کننده و تأمین‌کننده عناصر غذایی نیازمند گیاه و جانداران خاک مانند نیتروژن، فسفر و گوگرد در خاک است. حدود 95 درصد نیتروژن، 75 درصد فسفر و 90 درصد

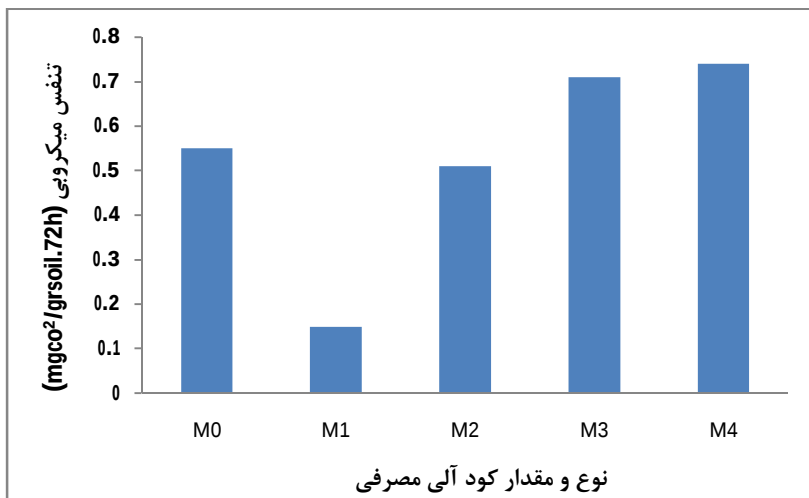
گوگرد (در خاک‌های غیر آهکی) در ترکیب با ماده آلی خاک وجود دارد (Schnitzer, 2004). در دسترس بودن عناصر غذایی تاثیر زیادی بر تجزیه مواد آلی دارد. به عنوان نمونه، باکتری‌های خاک برای تجزیه لاشبرگ‌ها و مواد آلی به نیتروژن، که به طور عمده در قالب ترکیبات آلی خاک یافت می شود، نیاز دارند (Lal و Lorenz, 2005 و 2014).

ماده آلی سبب تعادل در زیست بوم خاک از راه افزایش تنوع زیستی و زیست توده میکروبی خاک شده و نیروی محرکه لازم برای به گردش در آوردن چرخه‌های حیاتی خاک را فراهم می‌آورد. در خاک، تغییرات زیاد و سریعی بین تولید و مصرف مواد آلی وجود دارد. بیشترین اعضای جامعه زنده خاک را مصرف‌کننده‌ها و تجزیه‌کننده‌ها (هتروتروف‌ها) تشکیل می‌دهند و تولیدکننده‌ها (اتوتروف‌ها) در کمترین قرار دارند. از این رو برقراری توازن بین تولید و مصرف مواد آلی خاک، با تأمین پیوسته و متعادل مواد آلی از شرایط اصلی پایداری در حیات خاک به حساب می‌آید (Weil و Magdoff, 2004).

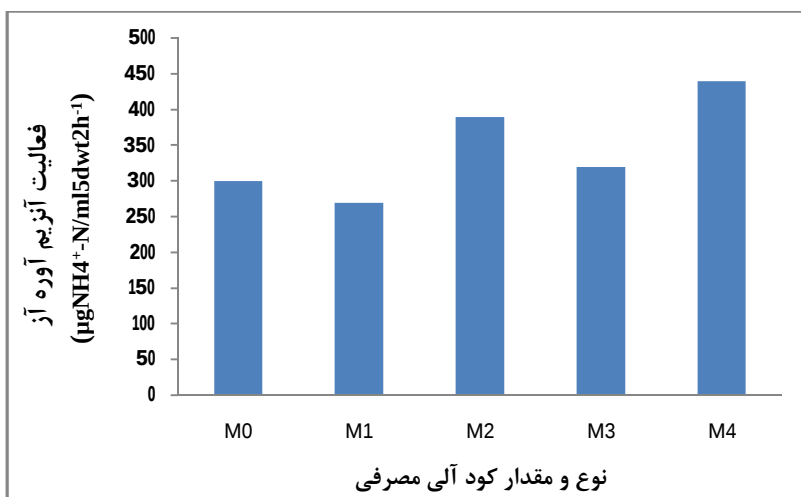
از سویی، ماده آلی به آفت‌کش‌ها و مواد آلی شیمیایی متصل می‌شود و بر فعالیت بیولوژیکی و سمیت آن‌ها اثر می‌گذارد. همچنین، به دلیل تأثیر مثبت ماده آلی بر پایداری خاکدانه‌ها، مانع از فرسایش شدید خاک می‌شود (Lal, 2013; Celik, 2005).

مطالعات انجام شده در 10 منطقه زراعی-زیستگاهی کشور نشان داد که با مصرف کودهای دامی و انواع کمپوست زباله شهری و پسماندهای آلی صنعتی (کمپوست باگاس نیشکر، کمپوست چوب و کاغذ مازندران) فعالیت‌های زیستی خاک از جمله تنفس میکروبی به میزان 40-100 درصد (شکل 5)، فعالیت آنزیم اوره‌آز به میزان 30-50 درصد (شکل 6)، جمعیت باکتری‌های حل‌کننده فسفات به میزان 100 برابر و فعالیت آنزیم فسفاتاز به میزان 40-80 درصد افزایش می‌یابد (سماوات، 1396). این عوامل می‌توانند در حلالیت عناصر غذایی در خاک و به دنبال آن افزایش راندمان جذب عناصر غذایی توسط گیاه به ویژه فسفر موثر باشند.

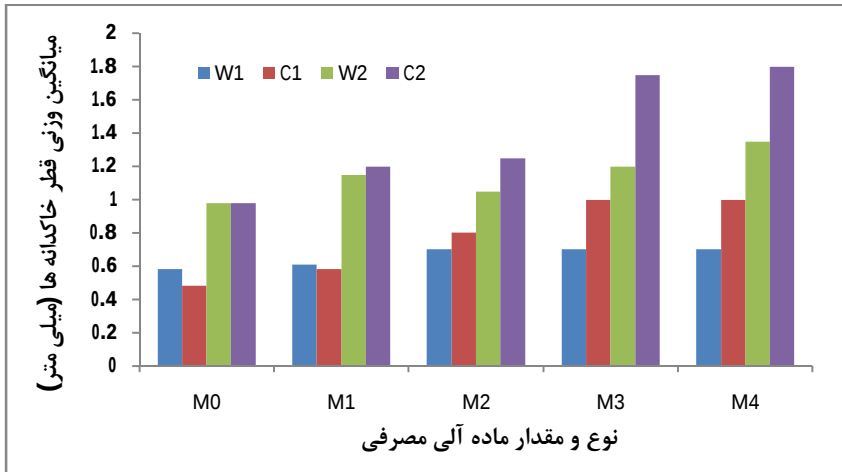
با مصرف انواع کودهای آلی، خاکدانه‌سازی و ذخیره آب در خاک افزایش می‌یابد. افزایش 20 تا 70 درصدی میانگین قطر خاکدانه‌ها (شکل‌های 7 و 8) و 5 تا 10 درصدی آب قابل استفاده (شکل 9) تنها با یک بار مصرف کودهای آلی در طول دو سال کشت تناوبی گندم- ذرت گزارش شده است (سماوات، 1396).



شکل 5- اثر کاربرد کود دامی و کمپوست باگاس نیشکر (تن در هکتار) بر میزان تنفس میکروبی خاک (M0، عدم مصرف کود آلی، M1 و M2 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن کود گاوی در هکتار، M3 و M4 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن ورمی کمپوست کود گاوی در هکتار)



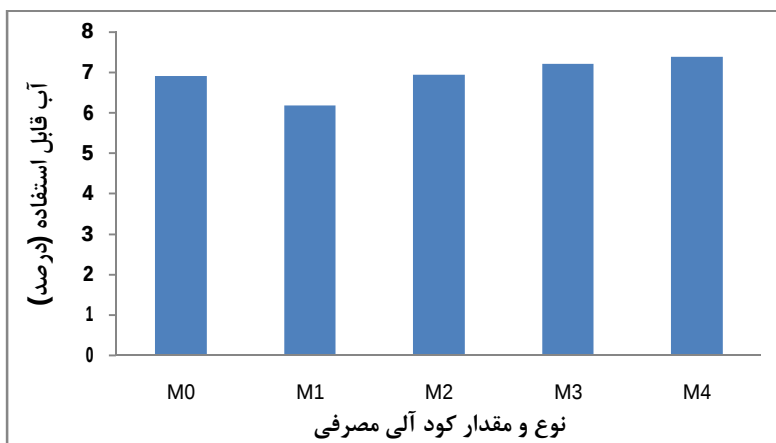
شکل 6- میانگین اثر سطوح مواد آلی (تن در هکتار) بر فعالیت آنزیم آموره آز خاک (M0، عدم مصرف کود آلی، M1 و M2 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن کود گاوی در هکتار، M3 و M4 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن ورمی کمپوست کود گاوی در هکتار)



شکل 7- اثر مصرف کود آلی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در دو سال کشت تناوبی گندم- ذرت علوفه‌ای در لرستان (M0، عدم مصرف کود آلی، M1 و M2 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن کود گاوی در هکتار، M3 و M4 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن ورمی کمپوست کود گاوی در هکتار، W1 و W2 به ترتیب کشت گندم و C1 و C2 به ترتیب کشت ذرت در سال اول و دوم آزمایش)



شکل 8- اثر مصرف کود آلی بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در دو سال کشت تناوبی گندم- ذرت علوفه‌ای در قزوین (M0، عدم مصرف کود آلی، M1 و M2 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن کود گوسفندی در هکتار، M3 و M4 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن کمپوست زباله شهری در هکتار، W2 کشت گندم و C1 و C2 به ترتیب کشت ذرت در سال اول و دوم آزمایش)



شکل 9- اثر مصرف کود آلی بر میزان آب قابل استفاده خاک پس از دو سال کشت تناوبی گندم- ذرت علوفه‌ای در کرج (M0، عدم مصرف کود آلی، M1 و M2 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن کود گاوی در هکتار، M3 و M4 به ترتیب کاربرد 10 و 20 تن کمپوست زباله شهری در هکتار)

بررسی انجام شده در استان‌های مختلف ایران با اقلیم‌های معتدل مرطوب، معتدل سرد، گرم و خشک نشان می‌دهد که مصرف مواد آلی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از جمله افزایش رطوبت قابل استفاده، افزایش ضریب آب‌گذری خاک، کاهش واکنش خاک‌های آهکی، کاهش شوری، کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش میزان فسفر و پتاسیم قابل استفاده خاک موثر است (سعادت، 1384). با یک بار مصرف انواع مواد آلی در تناوب دو ساله گندم- ذرت افزایش 20-50 درصدی فسفر قابل استفاده و 30-100 درصدی پتاسیم قابل استفاده خاک گزارش شد (سماوات، 1396). لطفی و همکاران (1386)، گزارش نمود که افزودن کودهای آلی باعث رهاسازی تدریجی نیتروژن به خاک شده و پتانسیل معدنی شدن نیتروژن خاک را افزایش می‌دهد که این افزایش، متناسب با میزان کود مصرفی و سهم بخش فعال نیتروژن در کل نیتروژن موجود در کود است. از این‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که افزودن کودهای آلی در اکوسیستم‌های کشاورزی خشک و نیمه خشک باعث افزایش کیفیت خاک و حاصلخیزی آن از نظر نیتروژن می‌شود. خادم و رمودی (1392) نیز نشان دادند که کاربرد کودهای دامی منجر به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های زراعی از جمله افزایش عناصر غذایی فسفر، آهن، روی، منگنز، بر و مس می‌شود.

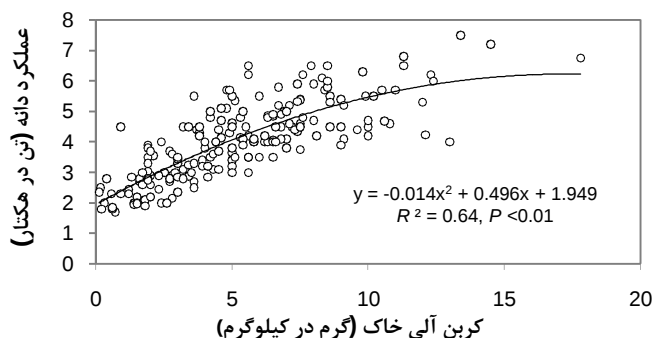
4- تاثیر کربن آلی خاک در تولید محصول

افزایش جمعیت باعث افزایش تقاضا از سامانه‌های کشاورزی شده و این تقاضا، بدلیل بهره‌کشی و استفاده غیر اصولی از منابع خاک، باعث تخریب منابع خاک می‌شود. برآوردها نشانگر آن است که در طول قرن گذشته، به واسطه فعالیت‌های مختلف بشری همچون کشت و کار، حدود 42 تا 78 گیگا تن کربن از خاک به اتمسفر آزاد شده است (Paustian و همکاران، 2000). در نتیجه کشت و کار و شخم در خاک‌های بکر، 10 تا 55 درصد از مقادیر کربن آلی خاک از دست می‌رود؛ البته این مقدار بسته به نوع اقلیم و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک متفاوت است (Balesdent و همکاران، 2000). تحقیقات پژوهشگران در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، هدر رفت کربن آلی خاک پس از گذشت سه تا پنج سال را بین 35 تا 56 درصد نشان می‌دهد (Zech و همکاران، 2006) این میزان هدر رفت کربن (بالغ بر 50 درصد) در خاک‌های مناطق دیگر پس از گذشت 30 تا 50 سال ممکن است روی دهد (Wang و همکاران، 2012). براساس برآوردها، کاهش سالانه کربن آلی خاک‌های جهان، کمترین 2/5 و بیشترین 7/4 پتاگرم است که بر این اساس، مقدار 4/6 پتاگرم، تخمین حقیقی‌تری به نظر می‌رسد. این مقدار (به‌طور میانگین)، 0/3 درصد کل کربن آلی ذخیره (1477 پتاگرم) در خاک‌های جهان است. (Stockmann و همکاران، 2013). براساس گزارش Sparling و همکاران (2006)، مدیریت بهبود و ترسیب کربن آلی خاک، مزایایی برای حفاظت از محیط زیست دارد؛ که گاهی 40 تا 70 مرتبه بیشتر از تولید محصول است. از آنجا که امنیت غذایی و شرایط زیست محیطی ارتباطی تنگاتنگ با کشاورزی دارد، روشن است که بقاء و حیات جامعه درگرو بخش کشاورزی بوده و پایداری آن، به پایداری کشاورزی و منابع طبیعی وابسته است. توسعه پایدار، گونه‌ای از مدیریت بهره برداری است که در آن نیازهای نسل امروز، بدون به مخاطره افتادن توانایی‌های نسل آینده برای برطرف کردن نیازهایشان، تامین می‌شود (وراوی‌پور، 1385). در این راستا، کربن آلی خاک مهمترین شاخص تعیین پایداری در سیستم‌های کشاورزی بوده که مقدار آن در توازن با مقدار مواد آلی اضافه شده و سرعت تجزیه آن است و نتیجه مشخص این تغییر نسبت، در تولید محصول آشکار می‌شود (Jat و همکاران، 2019).

امروزه، یکی از نشانه‌های تخریب اراضی، سیر افت‌کننده حاصلخیزی خاک است که عامل اصلی آن را کمبود مواد آلی در این اراضی می‌دانند. در ایران بیش از 50 درصد خاک‌ها دچار کمبود یک یا چند عنصر غذایی هستند (بلالی و همکاران، 1393). بالا بردن میزان ماده آلی خاک می‌تواند منجر به بهبود عملکرد گیاه شود، به طوری که با افزایش هر یک درصد کربن آلی خاک، میزان افزایش تولید در کشورهای در حال توسعه می‌تواند 30-50 میلیون تن در سال افزایش یابد (Lal، 2006).

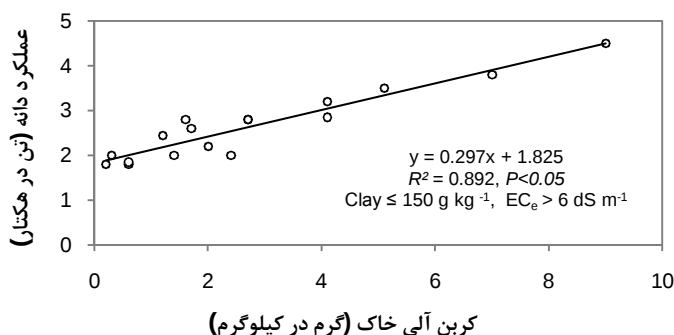
Oldfield و همکاران (2019) با انجام یک فرا تحلیل جهانی¹ و بررسی گسترده مطالعات صورت گرفته در دورترین نقاط دنیا، همبستگی مثبتی بین میزان ماده آلی خاک و عملکرد گندم و ذرت را مشاهده کردند. عملکرد این دو محصول به طور میانگین با افزایش ماده آلی خاک افزایش می‌یابد، اما این روند افزایش در سطح 2 درصد کربن آلی خاک، کاهش می‌یابد. این در حالی است که قریب به دو سوم اراضی زیر کشت گندم و ذرت در جهان، در حال حاضر کمتر از 2 درصد کربن آلی دارند. بر اساس محاسبات انجام شده در چین، به طور میانگین 3 درصد عملکرد غلات شامل گندم، برنج و ذرت به دلیل کمبود کربن آلی خاک‌ها از دست می‌رود (Ye و همکاران، 2008). برآوردها نشان می‌دهد در کشورهای در حال توسعه، افزایش یک تن کربن آلی در هر هکتار خاک در سال منجر به افزایش تولید غلات و بقولات به میزان 32 میلیون تن در سال و گیاهان ریشه‌ای و غده‌ای به میزان نه میلیون تن در سال خواهد شد (Lal، 2006؛ Lal و Stewart، 2010). دیگر پژوهش‌ها نیز نشان می‌دهند که به ازای افزایش هر تن کربن آلی خاک در هکتار عملکرد دانه گندم بین 20 تا 70 کیلوگرم در هکتار (Lal، 2006)، 19 تا 39 کیلوگرم در هکتار (Larney و همکاران، 2000)، 64 کیلوگرم در هکتار (Diaz-Zorita و همکاران، 1999) و 38 کیلوگرم در هکتار (Kanchikerimath و Singh، 2001) افزایش می‌یابد. بررسی‌های مشابه در ایران (استان خراسان رضوی)، نشان می‌دهد به طور میانگین به ازای افزایش هر گرم کربن آلی در کیلوگرم خاک عملکرد دانه گندم به طور میانگین 286 کیلوگرم در هکتار (بین 121 تا 305 کیلوگرم در هکتار) افزایش می‌یابد (شکل 10).

¹ Global meta-analysis



شکل 10- رابطه بین کربن آلی خاک و عملکرد دانه گندم در 202 مزرعه در استان خراسان رضوی (کشاورز و همکاران، 1392)

به عبارت دیگر هر تن کربن آلی خاک در هکتار منجر به افزایش حدود 95 کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه گندم شده است. به طور میانگین به ازای یک گرم در کیلوگرم (0/1 درصد یا 3 تن در هکتار)، افزایش کربن آلی خاک در حدود 715 هزار تن به تولید گندم افزوده خواهد شد که معادل 7/8 درصد کل تولید گندم آبی کشور خواهد بود. افزون بر این، اثر کربن آلی در عملکرد محصول در خاک‌های شور و سبک بسیار بیشتر است (شکل 11)، به طوری که با افزایش کربن آلی از اثرات محدودیت‌کننده خاک‌های شور (حداکثر تا 10/5 دسی زیمنس بر متر) و سبک (میزان رس کمتر از 150 گرم در کیلوگرم یا 15 درصد)، بر عملکرد دانه گندم کاسته خواهد شد (کشاورز و همکاران، 1392).



شکل 11- رابطه بین کربن آلی خاک و عملکرد دانه گندم در خاک‌هایی با رس کمتر از 150 گرم در کیلوگرم و شوری بیشتر از 6 دسی زیمنس بر متر (کشاورز و همکاران، 1392)

از طرف دیگر در شرایط مصرف اندک کودهای شیمیایی و همچنین کشت دیم، نقش کربن آلی خاک در افزایش تولید محصول بسیار چشمگیر است (Lal, 2006). از این رو به نظر می‌رسد افزایش کربن آلی در خاک‌های کشور به ویژه خاک‌های با بافت سبک و شور کلید افزایش عملکرد محصولات زراعی است که بایستی در اولویت برنامه‌های کشاورزی قرار گیرد. افزون بر این با توجه به کمبود آب به دلیل حاکمیت شرایط خشکسالی در کشور و نقش غیر قابل انکار مواد آلی خاک در افزایش ذخیره رطوبتی خاک می‌توان با افزایش کربن آلی خاک قدم موثری در افزایش و پایداری تولید محصولات کشاورزی بویژه در شرایط دیم برداشت.

تحقیقات نشان داده است که کاربرد انواع کودهای آلی به تنهایی و یا همراه با کودهای شیمیایی از راه افزایش کربن آلی و بهبود شرایط فیزیکی خاک و تامین عناصر غذایی اثر قابل ملاحظه‌ای در افزایش تولید محصولات مختلف از جمله گندم و ذرت (دلاوری و کشاورز، 1385؛ میرزاشاهی و همکاران، 1395؛ مشیری، 1396)، کلزا (میرزاشاهی و سعادت، 1389؛ بای‌وردی، 1393) و سیب‌زمینی (محمدزاده، 1386؛ میرزاشاهی و سعادت، 1389) دارد.

5- نقش کربن آلی خاک در تغییرات اقلیمی

در شرایط تغییرات اقلیمی و کاهش تنوع زیستی در جهان، امروزه خاک‌ها به یکی از منابع طبیعی آسیب پذیر تبدیل شده‌اند (FAO و ITPS، 2015). با وجود پیشرفت‌های علمی صورت گرفته، حفاظت و پایش منابع خاکی در مقیاس ملی و جهانی هنوز با چالش‌هایی همراه است که مانع طراحی و اجرای سیاست‌های موثر منطقه‌ای و جهانی در این خصوص شده است. افزون بر اثرات قابل ملاحظه کربن آلی خاک در کیفیت خاک و تولید محصول در سالیان اخیر به دلیل تغییرات جهانی اقلیم و نیاز به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای حفظ کربن آلی خاک از اهمیت دو چندان برخوردار شده است (McBratney و همکاران، 2014).

خاک‌ها بزرگترین منبع ذخیره کربن در خشکی هستند (Scharlemann و همکاران، 2014). خاک از راه تنظیم فرایندهای پویای بیوشیمیایی در اکوسیستم و تبادل گازهای

گلخانه‌ای (GHG^1) با اتمسفر نقشی اساسی در تعادل کربن بازی می‌کند (Lal, 2013). مقدار ذخیره کربن آلی در یک متر اول خاک 1500 ± 230 گیگاتن است که این مقدار حدود دو برابر مقدار کربن در اتمسفر (828 گیگاتن به صورت CO_2) است (Le Quere, 2016). مقدار کربن موجود در عمق یک متری خاک بیش از 1500 پتا گرم بوده و تا عمق سه متری به حدود 2456 گیگا تن می‌رسد که این رقم نزدیک به چهار برابر مقدار کربن موجود در گیاهان (650 گیگا تن) و بیش از سه برابر مقدار آن در جو (750 گیگا تن) است (Stockmann و همکاران، 2013). پس از سوخت‌های فسیلی، استفاده اراضی و تغییر پوشش اراضی (شامل فعالیت کشاورزی) بزرگترین منبع ورود کربن به اتمسفر حاصل از فعالیت‌های بشری است (IPCC^2 , 2014). سهم سوخت‌های فسیلی (75 درصد) و تغییر کاربری اراضی (25 درصد) است (IPCC, 2007) این فرایندها و انتشار گازها، به شدت تحت تاثیر استفاده از اراضی، تغییر کاربری اراضی، پوشش گیاهی و مدیریت خاک قرار می‌گیرند. مقدار ذخیره کربن آلی خاک در لایه‌های بالایی خاک (800 گیگاتن در لایه 0-40 سانتی‌متری) است. به طور کلی، بیشترین مقدار کربن آلی خاک در افق‌های سطحی خاک وجود دارد که بیشترین دلیل دلایل آن، حضور و فراوانی ریزجانداران خاک‌زی در این افق‌ها، به عنوان تولیدکننده و مصرف‌کننده آن است؛ به‌طوری که تخمین زده می‌شود، بین 40 تا 60 درصد کربن آلی خاک در محدوده 25 سانتی‌متر (حدود 615 گیگا تن تا عمق 20 سانتی‌متری) (Cresser و همکاران، 2007)، و نزدیک به 64 درصد کربن آلی خاک در محدوده 50 سانتی‌متری خاک وجود دارد (Conant و همکاران، 2001)، که البته مقدار آن نسبت به مدیریت اراضی بسیار حساس است به طوری که، مدیریت اراضی به‌عنوان مهمترین عامل انسانی موثر بر تغییرات کربن آلی خاک شناخته می‌شود. در نتیجه کشت و کار، کربن آلی محبوس شده درون خاکدانه‌ها که به‌طور فیزیکی از دسترس ریزجانداران و اکسیژن هوا محافظت می‌شود در معرض تجزیه بیولوژیکی و اکسیداسیون قرار گرفته که این امر افزون‌بر کاهش کیفیت خاک، منجر به افزایش میزان دی اکسید کربن اتمسفری می‌شود (Kennedy و Papendick, 1995).

¹ Greenhouse Gas² IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

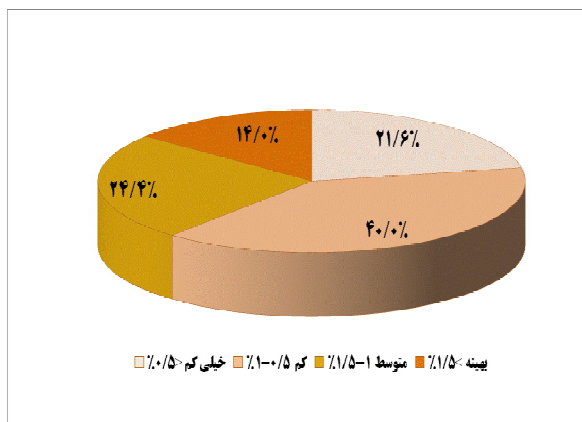
بر اساس منحنی‌های سنجش، سطح فعلی این گاز در اتمسفر به بیشترین مقدار خود در 800 هزار سال گذشته و یا احتمالاً 20 میلیون سال گذشته رسیده است. غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفری از 250 ppm در سال 1850 به 414 ppm در سال 2019 افزایش پیدا کرده است. مقدار دی‌اکسید کربن اتمسفر با حفظ ذخیره کربن آلی در خاک (به ویژه در خاک‌هایی با کربن آلی زیاد)، و یا از راه ترسیب کربن در خاک قابل مدیریت است. نقش کربن آلی خاک در سازگاری و تقلیل تغییرات اقلیمی به طور گسترده‌ای از راه انجام آزمایش‌ها و مدل سازی داده‌ها شناخته شده است (Lal, 2013; Frelih-Larsen و همکاران, 2014; Scharlemann و همکاران, 2014; UNCCD-SPI, 2015). برآوردها نشان از آن دارد که خاک توان نهفته‌ای برای جبران بخشی از انتشار سوخت‌های فسیلی دارد. از راه ترسیب کربن خاک، سالانه 0/4 تا 1/2 گیگا تن کربن که هم‌ارز با 5 تا 15 درصد از انتشار جهانی است، خنثی می‌شود (Stockmann و همکاران, 2013). با این حال، روش‌های ارزیابی روند و تعیین ذخیره کربن آلی در مقیاس بزرگ هنوز دقیق نیست و بسیاری از عوامل موثر در تعیین کیفیت و کمیت کربن آلی خاک در قسمت‌های مختلف جهان به اندازه کافی بررسی نشده است (Scharlemann و همکاران, 2014). راهنمای ارزیابی تغییرات ذخیره کربن آلی خاک توسط کارگروه بین‌المللی تغییرات اقلیمی (IPCC) ارائه شده است (IPCC, 2006). هر چند که، گزارش شرایط و روند تغییرات کربن آلی خاک بر اساس اندازه‌گیری‌ها با چالش‌هایی مواجه است، رفع این مشکلات نیازمند معرفی روش‌های اندازه‌گیری یکسان، نمونه‌برداری استاندارد و روش‌های مدل‌سازی، راه‌حل‌های نوآورانه برای جمع‌آوری و به اشتراک‌گذاری داده‌ها و توجه به عملیات متفاوت مزرعه است که توسط زارعین مختلف اجرا می‌شوند.

6- وضعیت کربن آلی خاک‌های زراعی کشور

حد بحرانی کربن آلی در بیشتر تحقیقات انجام شده در ایران کمتر از یک درصد در نظر گرفته شده است. جلال فاموری در کتاب خاک‌های ایران نیز حد بحرانی کربن آلی خاک را یک درصد در نظر گرفته است (Dewan و Famouri, 1964). در برخی منابع

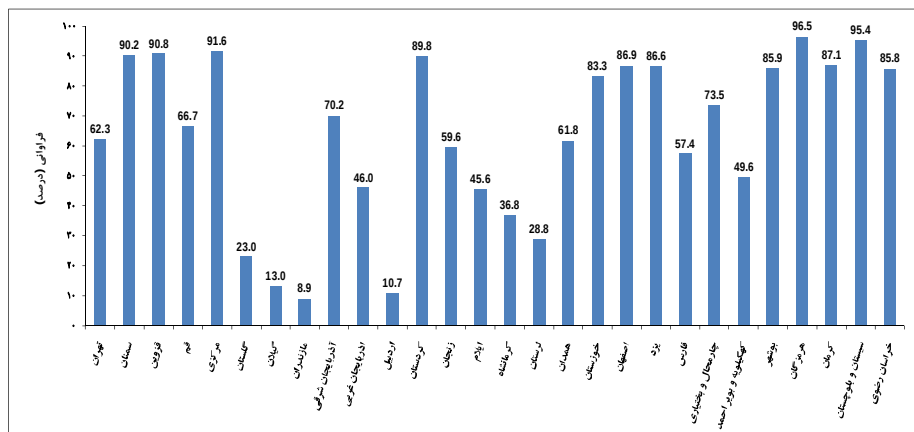
خاک‌هایی با کربن آلی کمتر از 2 درصد را بی ثبات از جنبه فیزیکی و خاکدانه معرفی کرده‌اند (Angers و kay، 1999).

میزان کربن آلی در 61/6 درصد از اراضی کشاورزی ایران کمتر از یک درصد بوده که حکایت از ناپایداری حاصلخیزی خاک‌ها دارد (بلالی و همکاران، 1393). دسته‌بندی داده‌های مقدار کربن آلی در 23700 نمونه خاک در فاصله سال‌های 1380 تا 1394 نشان داد که مقدار کربن آلی در 21/6 درصد از خاک‌ها کمتر از 0/5 درصد، 40/0 درصد بین 0/5 تا 1 درصد، 24/4 درصد خاک‌ها بین 1 تا 1/5 درصد و در 14/0 درصد خاک‌ها بیش از 1/5 درصد و در حد بهینه است (شکل 12).



شکل 12- دامنه کربن آلی خاک‌های زراعی کشور (بلالی و همکاران، 1393)

در بیش از 80 درصد اراضی کشاورزی- در برخی از استان‌ها مانند سمنان، قزوین، مرکزی، زنجان، خوزستان، اصفهان، یزد، بوشهر و خراسان- مقدار کربن آلی کمتر از یک درصد است (شکل 13).



شکل 13- درصد فراوانی اراضی با مقادیر کربن آلی کمتر از یک درصد

بررسی تغییرات کربن آلی خاک‌ها در سری‌های زمانی مختلف در منطقه دزفول بیانگر روند کاهشی مقدار کربن آلی خاک‌ها است به گونه‌ای که در دهه 40، کربن آلی در 79/5 درصد از نمونه‌های خاک کمتر از یک درصد بوده است در حالی که این میزان در دهه 90 به 100 درصد نمونه‌ها گسترش یافته است (جدول 2).

جدول 2- تغییرات کربن آلی خاک در منطقه دزفول استان خوزستان در فاصله سال‌های 1340-1393

دوره زمانی	تعداد نمونه	درصد فراوانی خاک‌های با کربن آلی کمتر از یک درصد
دهه 1340	150	79/5
دهه 1370	100	68/3
دهه 1380	200	88/0
1389-1393	120	100/0

منبع: (میرزاشاهی، 1396)

کاهش مقدار کربن آلی خاک در دیگر مناطق ایران نیز وجود دارد. کاهش کربن آلی خاک در ناحیه شمالی ایران بیشتر است. مقایسه میزان کربن آلی در نمونه‌های خاک در دو سال 1345 و 1397 نشان از کاهش مقدار کربن آلی خاک در استان‌های گیلان، مازندران، گلستان، فارس، اصفهان و خراسان دارد (جدول 3).

جدول 3- تغییرات کربن آلی خاک در دو مقطع زمانی 1345 و 1397

درصد تغییرات	1397**		1345*		استان
	کربن آلی خاک (%)	تعداد نمونه	کربن آلی خاک (%)	تعداد نمونه	
-42	2/10	1162	3/63	231	گیلان
-17	1/90	1904	2/29	188	مازندران
-34	1/30	2730	1/97	55	گلستان
-18	0/90	540	1/06	570	فارس
-50	0/50	1056	1/01	111	اصفهان
+24	1/20	1953	0/97	171	آذربایجان غربی
+21	0/70	184	0/58	122	قزوین
-29	0/70	325	0/98	387	خراسان بزرگ

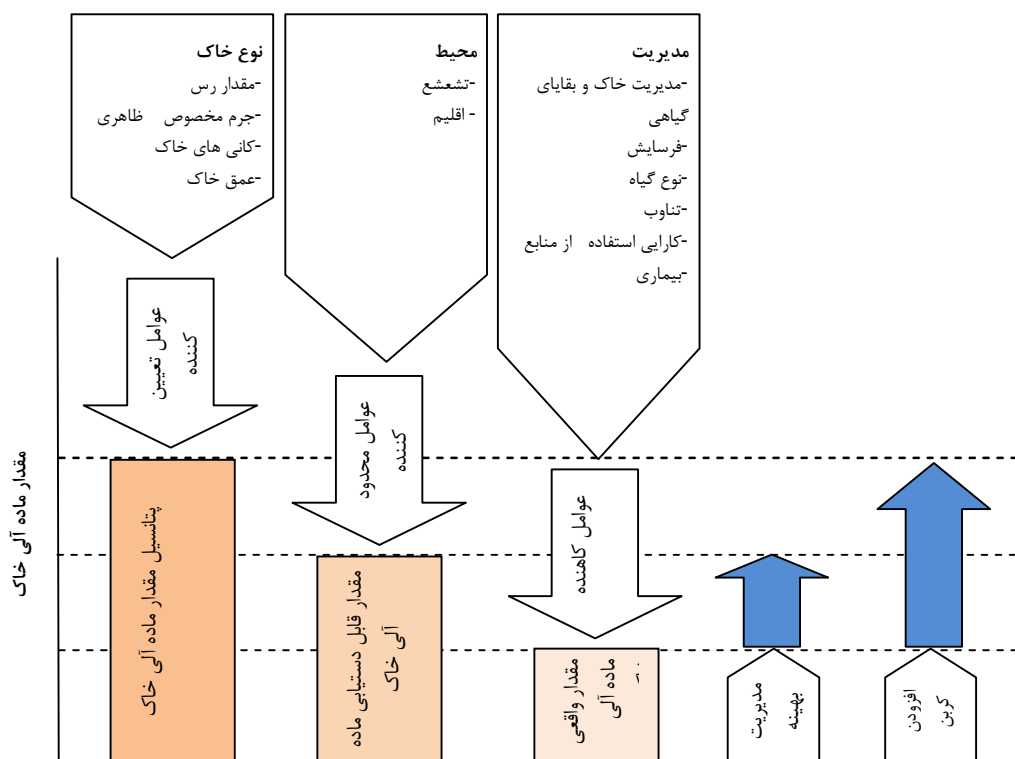
منبع: *Famouri و Dewan (1964)، **بلالی و همکاران (1393)

متوسط کاهش کربن آلی خاک در این استان‌ها 31/7 درصد است. تنها در آذربایجان غربی و قزوین مقدار کربن آلی خاک به ترتیب به میزان 24 و 21 درصد افزایش نشان می‌دهد. بیشترین کاهش در مقدار کربن آلی خاک در اصفهان و پس از آن در مناطق شمالی ایران مشاهده می‌شود. در سال 1343 مقدار متوسط کربن آلی خاک‌ها در ناحیه خزری در شمال ایران برابر با 3/2 درصد گزارش شده در حالی که این میزان در حال حاضر به 1/7 درصد کاهش یافته است (مشیری و سماوات، 1396).

7- عوامل موثر بر میزان کربن آلی خاک‌ها

مقدار کربن آلی خاک برآیند تعادل ورود و خروج کربن از سیستم خاک است که متأثر از دامنه وسیعی از عوامل اقلیمی، شرایط خاکی و مدیریت کشاورزی قرار دارند (شکل 14). در اکوسیستم‌های بالغ قابلیت افزایش کربن آلی خاک تا سطح پتانسیل بسته به نوع اقلیم، پستی بلندی، خاک و گیاه است. ترسیب کربن آلی در خاک به صورت خروج خالص دی اکسید کربن از اتمسفر و تبدیل آن به ذخایر با ماندگاری طولانی مانند مواد آلی خاک است که منجر به کاهش مقدار و یا نرخ تجمع کربن در اتمسفر می‌شود. پتانسیل ترسیب کربن به نوع خاک (عوامل تعیین‌کننده)، شرایط آب و

هوایی (بارندگی، دما و طول مدت فصل خشک) به عنوان عامل محدودکننده بستگی دارد. با وجود این مقدار ترسیب کربن به نوع مدیریت اعمال شده بر خاک (آماده‌سازی بستر، روش کاشت) به عنوان عامل کاهنده یا فزاینده نیز وابسته است (Batino و همکاران، 2007).



شکل 14- عوامل تعیین کننده، محدودکننده و کاهنده مقدار ماده آلی خاک

1-7- شرایط اقلیمی

شرایط اقلیمی تاثیر زیادی در تغییرات کربن آلی خاک دارد. تولید مواد آلی و سرعت تجزیه آن در اقلیم‌های مختلف متفاوت است که براینکه این دو فرایند مقدار ماده آلی خاک را تعیین می‌نماید. دما و بارندگی مهمترین عوامل اقلیمی کنترل‌کننده پویایی کربن آلی خاک هستند. افزایش دما از یک طرف موجب افزایش تولیدات گیاهی و افزایش ورودی کربن به

خاک شده و از طرف دیگر تجزیه میکروبی مواد آلی خاک افزایش می‌دهد. برآیند تاثیر دما بر تعادل ورود و خروج کربن آلی خاک به گونه‌ای است در بیشتر موارد باعث از بین رفتن خالص کربن آلی از خاک و ورود آن به اتمسفر شده که خود می‌تواند عاملی برای تسریع تغییرات اقلیمی باشد (FAO، 2017؛ Yan، 2017). تجزیه مواد آلی در اقلیم‌های گرم بیشتر انجام می‌شود و هرچه به سمت اقلیم سرد می‌رویم تجزیه مواد آلی کمتر می‌شود. شکل (15) تاثیر چهار سناریوی اقلیمی بر چرخه کربن را نشان می‌دهد. ترکیب درجه حرارت بالا و رطوبت و بارندگی بر تولید بیومس، فعالیت ریزجاندارها و در نتیجه تجزیه و تخریب مواد آلی خاک تاثیرگذار است (Várallyay، 2010). در درجه حرارت بالا نسبت به اقلیم سرد، تاثیر رطوبت بر تجزیه و تجمع مواد آلی خاک بیشتر بوده است.



خاک‌های مناطق خشک، معمولاً دارای مقادیر کمتری از ماده آلی هستند. توزیع کربن آلی در مناطق مختلف زراعی-زیستگاهی¹ ایران و انطباق همانندی آن با توزیع بارش در این مناطق به خوبی تاثیر شرایط اقلیمی را بر میزان کربن آلی خاک‌ها نشان می‌دهد (جدول 4). همبستگی مثبت و معنی داری ($r=0/91$) بین میزان بارندگی و مقدار متوسط کربن آلی خاک در مناطق زراعی-زیست گیاهی ایران مشاهده می‌شود. بارندگی بیشتر در مناطق شمالی و غربی ایران سبب شده که مقدار کربن آلی خاک بیشتر از دیگر مناطق با بارش کمتر باشد. در مناطق خشک و گرم ایران شامل مناطق مرکزی، خوزستان، سواحل جنوبی و خراسان بیش از 83 درصد خاک‌ها دارای کربن آلی کمتر از یک درصد هستند. در حالی که در مناطق معتدلی چون شمال غرب و زاگرس مرکزی میزان خاک‌های دارای کربن آلی کمتر از یک درصد به طور میانگین 50 درصد است.

جدول 4- دامنه کربن آلی در لایه سطحی خاک‌های ایران در مناطق زراعی-زیستگاهی

منطقه زراعی - زیستگاهی	متوسط بارندگی (میلی متر)	میانگین کربن آلی (درصد)	<0/5	0/5 – 1	1-1/5	>1/5
درصد						
مرکزی	243/3	0/55	31/1	52/9	10/8	5/2
سواحل خزر	893/5	1/68	2/1	14/0	31/6	52/4
شمال غرب	313/9	1/0	15/4	41/5	29/1	14/0
زاگرس مرکزی	464/9	1/16	4/8	37/4	40/7	17/0
خوزستان	243	0/76	21/0	62/3	14/1	2/6
خشک شمالی	98/3	0/53	58/5	28/4	9/7	3/5
زاگرس جنوبی	522/9	0/79	15/6	46/4	30/8	7/2
سواحل جنوبی	240/3	0/51	69/4	24/6	3/6	2/4
خشک جنوبی	110/3	0/50	64/2	25/1	7/8	2/9
خراسان	213/2	0/61	35/4	48/9	12/3	3/4

¹Agroecological zones

7-2- نوع خاک

میزان کربن آلی خاک‌های شنی ممکن است کمتر از یک درصد، لومی 2 تا 3 درصد و رسی 4 تا بیش از 5 درصد باشد. به‌طور کلی، میانگین مقدار کربن آلی خاک با افزایش میزان رس خاک افزایش می‌یابد. البته این رابطه جهانی نیست و گاهی میزان کربن آلی خاک همبستگی بهتری با عوامل دیگری، مانند آلومینیم قابل عصاره‌گیری، میزان آلوفان‌ها و یا سطح ویژه خاک دارد (Krull و همکاران، 2003). کانی‌های رسی دارای سطح ویژه زیاد و بار الکتریکی هستند که آن‌ها را توانا به محصور کردن و به موجب آن، تثبیت ماده آلی می‌کند. همچنین، خاکدانه‌های رسی منافذ ریزی را برای محافظت فیزیکی از ماده آلی ایجاد می‌کنند که جایگاه‌های مهمی برای اتصال ماده آلی به سطح کانی‌ها نیز به شمار می‌آیند. درون این منافذ مولکول‌های آلی می‌توانند بدون اینکه پیچیده یا کشیده شوند، از راه چندین لیگاند به سطوح متصل شوند. ضمن اینکه درون این منافذ از دسترس ریزجانداران به دور می‌مانند (Kaiser و Guggengerger، 2007). پیوندهای شیمیایی قوی که میان ماده آلی، رس و سیلت ریزدانه ایجاد می‌شود، از مولکول‌های آلی در برابر حملات و تجزیه ریزجانداران و آنزیم‌های آن‌ها محافظت می‌نماید. در ایران جوان بودن خاک‌ها (عدم تکامل پروفیلی و عمق کم)، و کیفیت نامناسب آن‌ها از جمله شوری و قلیائیت بالا و کمبود بنیه غذایی و حاصلخیزی خاک‌ها بر رشد و نمو گیاهان تاثیر گذاشته و مقدار ذخیره کربن آلی خاک‌ها را کاهش داده است (Moshiri و همکاران، 2017).

7-3- فرسایش خاک

ماده آلی خاک ارتباط تنگاتنگی با فرسایش خاک دارد (Conforti و همکاران، 2013). ماده آلی خاک نگهدارنده و ثبات‌دهنده ذرات خاک به یکدیگر بوده و با بهبود ساختمان خاک سبب کاهش فرسایش خاک می‌شود (Karlen و همکاران، 1997؛ Mueller و همکاران، 2010). ماده آلی در تعامل با میزان رس خاک پایداری خاکدانه‌ها را رقم می‌زند به گونه‌ای که با افزایش میزان رس خاک، مواد آلی می‌تواند خاکدانه‌های قوی‌تری تشکیل دهد. خاک‌های با مواد آلی کمتر از 3/5 درصد، خاکدانه‌های ناپایداری دارند و تشکیل سله در این خاک‌ها بیشتر است (Guerra، 1994). مصرف مواد آلی در خاک با

افزایش نفوذپذیری خاک، رواناب را کاهش داده و به طور قابل ملاحظه‌ای از دست رفتن خاک را کاهش می‌دهد (Faucette و همکاران، 2005؛ Kadlec و همکاران، 2012). مدل سازی فرسایش خاک با استفاده از مدل USLE 1 به خوبی نقش تعیین‌کننده ماده آلی خاک را در کاهش فرسایش‌پذیری خاک نشان می‌دهد (Auerswald و همکاران، 2003؛ Obalum و همکاران، 2017).

خاک سطحی سرشار از ماده آلی در اثر فرسایش ماده آلی خود را از دست می‌دهد و عملکرد محصول به همین علت در آن‌ها کاهش می‌یابد (Paige، 2018).

در لنداسکیپ‌های زراعی، فرسایش تسریع یافته ناشی از دخالت انسان می‌تواند موجب از دست رفت 22 درصد کربن آلی در طی 50 سال شود (Doetterl و همکاران، 2012). از طرف دیگر کربن فرسایش یافته در جائی دیگر ته نشین شده و تولید زراعی آن منطقه را می‌تواند افزایش دهد (Berhe و همکاران، 2012).

کربن آلی خاک با فرسایش و شخم تغییرات نشان می‌دهد. در آزمایشی تاثیر فرسایش خاک بر تغییرات کربن آلی خاک بررسی شد. کربن آلی خاک که با فرسایش جدا شده بود بیشتر ویژگی‌های آروماتیک داشت و کمتر پلیمری شده بود. کربن فعال و قابل دسترس در فرآیند فرسایش دستخوش تغییرات شیمیائی می‌شود. نتایج نشان داد که از دست رفت کربن آلی خاک در تمام اندازه خاکدانه‌ها وجود داشته، اما بیشترین از دست رفت کربن آلی خاک (200 درصد) در خاکدانه با اندازه ریز بوده است (Jakab و همکاران، 2016). در تحقیقی در خاک‌های سیاه شمال شرقی چین، نتایج نشان داد که فرسایش خاک، کربن آلی خاک سطحی را $22/4 - 5/3$ درصد کاهش داد (Cheng و همکاران، 2010). فرسایش در اراضی زراعی شیب‌دار بسته به خصوصیات شیمیائی و فیزیکی خاک، فرایند غالب از دست رفت کربن و نیتروژن است (Gregorich و همکاران، 1998).

7-4- تغییر کاربری اراضی

تغییر کاربری اراضی از مرتع و جنگل به زراعت و برداشت پیاپی محصول و بقایای گیاهی موجب هدر رفتن زیست توده گیاهی و کاهش ذخیره کربن آلی خاک ها می‌شود.

¹ The Universal Soil Loss Equation

برای بررسی اثرات مدیریت اراضی بر میزان کربن آلی خاک توجه به سازوکارهای پایداری کربن آلی خاک (کربن پایدار با سرعت تجزیه خیلی کم، غیر فعال و بی اثر) و ناپایداری آن (کربن در شکل‌های فعال با سرعت تجزیه زیاد و به سهولت تجزیه شونده) ضروری است (Czimeczik و Trumbore، 2008). در اراضی زراعی، مواد آلی خاک، میانگین قطر خاکدانه و نسبت خاکدانه‌های درشت کمتر از اراضی با پوشش بومی است (Liu و همکاران، 2019). کاهش 23 تا 58 درصدی ذخیره کربن آلی خاک در اثر تبدیل اراضی مرتعی به دیم زار در مناطق غربی ایران گزارش شده است (جنیدی و همکاران، 1393). مختاری کرچگانی و همکاران (1390) نشان دادند که حفظ جنگل‌های طبیعی منجر به حفظ ذخیره کربن آلی خاک و کاهش هدررفت آن، کاهش فرسایش خاک به ویژه در اراضی کوهستانی با بارندگی زیاد در غرب ایران می‌شود. در خاک‌های مناطق خشک با پوشش گیاهی ضعیف کشت و کار می‌تواند از راه رشد گیاهان زراعی و ترسیب کربن در خاک به افزایش کربن آلی خاک کمک نماید (کریمی و همکاران، 1391). ذوالفقاری و حاج عباسی (1387) در مراتع فریدون شهر و جنگل‌های لردگان نشان دادند که پس از 25 سال تغییر کاربری از جنگل و مرتع به کشاورزی به ترتیب سبب کاهش 23 و 22 درصدی کربن آلی خاک شده است. در منطقه گنبد در استان همدان تغییر کاربری اراضی از مرتع به کشاورزی کربن آلی خاک را از $3/14$ درصد به $1/68$ درصد کاهش داد (اخضری و احمدی، 1398). با تغییر کاربری اراضی باتلاقی به زراعت یونجه و گندم کربن آلی پیوند یافته به ذرات سیلت و رس، شاخص اندوخته کربن آلی خاک و شاخص مدیریت کربن آلی خاک کاهش قابل ملاحظه ای یافت (محمودزاده و همکاران، 1393). برومند و همکاران (1393) نشان دادند که تغییر کاربری اراضی از جنگل به باغ مرکبات، کشت دیم کلزا و کشت آبی برنج به ترتیب سبب کاهش 51، 64 و 44 درصد مقدار کربن آلی خاک شد.

7-5- مدیریت‌های زراعی حفظ و ارتقاء کربن آلی خاک‌های کشاورزی

میزان کربن آلی خاک به شدت تحت تأثیر فعالیت کشاورزی قرار می‌گیرد. عوامل کاهنده کربن آلی خاک را می‌توان به دو دسته کلی، افزایش‌دهنده سرعت هدر رفت کربن

آلی خاک و کاهش‌دهنده ورود مواد آلی به خاک تقسیم نمود (جدول 5). مداخلات انسانی مانند جایگزینی گیاهان زراعی به جای پوشش طبیعی متنوع، کشت گیاهان با شاخص برداشت بالا، آیش بدون پوشش و سامانه‌های تک‌کشتی موجب شده است تا کربن آلی خاک‌ها حتی از سطح واقعی خود (با توجه به نوع خاک و شرایط اقلیمی) کمتر شوند.

جدول 5- عوامل مؤثر در کاهش کربن آلی در خاک (کشاورز و همکاران، 1393)

افزایش‌دهنده هدر رفت کربن آلی	کاهش‌دهنده ورود کربن آلی
سوزاندن بقایای گیاهی	چرای شدید دام
مدیریت نامناسب خاک و شخم	جمع‌آوری بقایای گیاهی پس از برداشت
	انتخاب نامناسب گیاه و یا گونه گیاهی
	فرسایش خاک‌های زراعی
	عدم کارایی آب و عناصر غذایی

با توجه به شرایط اقلیمی و خاکی کشور به نظر می‌رسد در مرحله نخست می‌بایست عملیاتی که موجب هدر رفت کربن آلی موجود در خاک می‌شوند کنترل شده و پس از آن نسبت به افزایش مواد آلی خاک پرداخت. بر این اساس جلوگیری از سوزاندن بقایای گیاهی و اصلاح روش‌های شخم در سامانه‌های کشاورزی در اولویت هستند. اگرچه در مناطق اقلیمی و شرایط خاکی متفاوت روش‌های مدیریتی برای افزایش ماده آلی خاک متفاوت خواهد بود. مطالعات Lal (2008)، نشان داد که زمین‌های کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک، با اعمال روش‌های مدیریتی مناسب همچون کاهش شدت خاک ورزی (کم‌خاک‌ورزی، بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی پشته‌ای)، توان ترسیب سالانه حدود 0/25 تا 0/5 تن در هکتار، کشت گیاهان پوششی 0/1 تا 0/2 تن در هکتار و استفاده از کودها 0/2 تا 0/4 تن در هکتار کربن را دارند. گزارش کارگروه بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC، 2014) دلالت بر این موضوع دارد که خاک‌های اراضی کشاورزی، سالانه پتانسیل ترسیب 1/4 تا 2/9 گیگا تن کربن را دارند. اگرچه، برخی مطالعات این میزان را بیش از 6 گیگا تن تا سال 2030 برآورد نموده اند (Chatterjee و همکاران، 2009).

افزایش ماده آلی خاک دشوار بوده و با دو سوال اساسی چگونگی افزایش و نگهداری مواد آلی خاک مواجه است و پاسخ به این دو سوال در اعمال مدیریت صحیح مواد آلی در اراضی و رسیدن به تولید پایدار محصولات کشاورزی کمک شایانی می‌نماید. با همسانی راهبردهای مدیریت خاک بر مبنای چرخه طبیعی کربن آلی خاک می‌توان بیلان کربن آلی را به سمت تجمع آن در خاک سوق داد. اعمال مدیریت‌هایی چون کاهش به هم خوردن خاک، افزایش پوشش سبز بر روی خاک، افزایش تولید و مدیریت بهینه آبیاری و کوددهی سبب افزایش تجمع کربن آلی در خاک خواهند شد. بهبود مدیریت کربن آلی خاک فرصت ارزشمندی برای مدیریت بهینه و پایدار اراضی فراهم خواهد نمود تا از این راه رشد تقاضا برای منابع محدود پاسخ داده شود و از طرف دیگر کارکردهای خاک که در اثر استفاده حداکثری از منابع خاک و تغییر اقلیم دچار نوسان شده‌اند پایدار شوند (Banwart و همکاران، 2015).

برای حفظ و یا افزایش کربن آلی در خاک راهکارهای مختلفی از جمله اعمال روش‌های مناسب خاک‌ورزی، مدیریت بقایای گیاهی، رعایت تناوب زراعی صحیح و کاربرد کودها و مواد آلی در خاک به تنهایی یا توأمان می‌بایست به کار گرفته شود. شیوه مدیریت زراعی شامل عملیات خاک‌ورزی، کوددهی، آبیاری و تناوب زراعی بر میزان کربن آلی خاک تاثیر گذار است. خاک‌ورزی شدید از عوامل اصلی کاهش کربن آلی خاک ناشی از فعالیت‌های کشاورزی است. تراکم خاک در اثر حرکت ماشین آلات سنگین نیز اثرات زیانباری در بخش زیستی خاک‌ها در پی خواهد داشت. مصرف ناصحیح و بیش از اندازه کودهای نیتروژنی در خاک‌ها به ریز جانداران کمک می‌کند تا بقایای گیاهی را سریع‌تر تجزیه نموده و ماده آلی خاک کاهش یابد (Mahal، 2019). در مقابل استفاده از کودهای حیوانی یا دیگر بقایای آلی در زمین‌های زراعی به حفظ یا افزایش ماده آلی خاک کمک می‌نماید. با وجود این انواع کودهای دامی با بسترهای مختلف اثرات بسیار متفاوتی بر فراهمی عناصر غذایی و میزان ماده آلی خاک دارند. افزون بر این، شیوه نگهداری، فرآوری، حمل و مصرف آن‌ها در خاک‌های کشاورزی (به عنوان نمونه کاربرد سطحی یا اختلاط با خاک) بر میزان باقیمانده مواد آلی و عناصر غذایی خاک مؤثر است. رعایت نکردن تناوب زراعی صحیح باعث می‌شود تا تجزیه مواد آلی افزایش یافته و جمعیت ریزجانداران خاک کاهش یابد.

کاهش ماده آلی خاک زمانی اتفاق خواهد افتاد که میزان هدر رفت بیش از ورودی آن به خاک باشد. هدر رفت بیشتر در نتیجه تنفس (هدررفت CO_2)، برداشت محصول و فرسایش است. چنانچه به طور سالانه مقدار 5000 کیلوگرم در هکتار بقایای آلی تازه به خاک اضافه شود که 20 درصد از آن بسیار کند تجزیه شونده بوده و نرخ هدررفت آن نیز 3 درصد باشد 1/5 درصد ماده آلی در عمق 15 سانتی متری خاک در انتهای سال باقی خواهد ماند (جدول 6). افزایش ماده آلی برای خاکی با تخلیه شدید (0/5 درصد ماده آلی) نسبت به خاکی با یک درصد ماده آلی، سریع تر است، چون ماده آلی بسیار بیشتری می تواند در کمپلکس های آلی - معدنی در سطوح کانی ها و نیز در درون خاکدانه های با اندازه ریز تا متوسط ذخیره شود. حفظ مواد آلی به سادگی امکان پذیر نبوده و نیازمند تلاش پیایی است (کشاورز و همکاران، 1393).

جدول 6- مقدار تقریبی ماده آلی خاک پس از یک سال افزودن بقایا در شرایط معدنی شدن مختلف در عمق 15 سانتی متری خاک (کشاورز و همکاران، 1393)

شدت تجزیه مواد آلی (درصد)					مقدار اضافه شده به خاک به شرط باقی ماندن 20 درصد آن پس از یک سال	ماده آلی اضافه شده سالانه
5	4	3	2	1		
بافت ریز با زهشکی ضعیف						
بافت درشت با زهشکی خوب						
درصد ماده آلی نهایی خاک					کیلوگرم در هکتار در سال	
0/4	0/5	0/7	1/1	2/2	500	2500
0/8	1/1	1/5	2/2	4/4	1000	5000
1/2	1/6	2/2	3/3	6/6	1500	7500
1/6	2/2	3	4/4	8/8	2000	10000

7-5-1- کاربرد کودها و مواد آلی در خاک

ورود منابع آلی و معدنی به عنوان کود بایستی به گونه ای باشد که تعادل دو بخش فعال و غیرفعال کربن آلی خاک را حفظ نموده و منجر به بهبود همزمان ویژگی های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک شود تا حاصلخیزی پایدار خاک حاصل شده و خاک بتواند کالا و خدمات خود را به طور پیوسته عرضه نماید. کاربرد کودها با بهبود رشد گیاه می تواند به

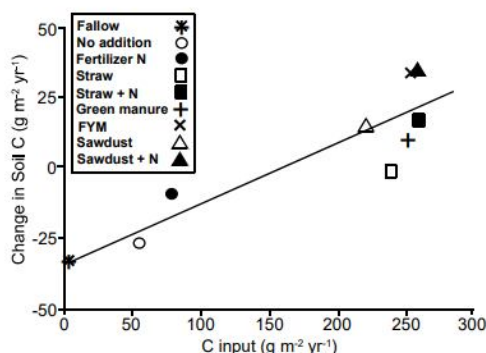
افزایش کربن آلی خاک منجر شود. کاربرد کودهای آلی افزون بر رشد گیاه به دلیل داشتن ماده آلی فراوان می‌تواند افزایش کربن آلی خاک را تسریع نماید. تحقیقات انجام شده در ایران نشان می‌دهد که کاربرد سالانه کودهای آلی می‌تواند حتی سبب افزایش 100 درصدی در مقدار کربن آلی خاک شود (جدول 7).

جدول 7- اثر مصرف کودهای آلی بر میزان کربن آلی در لایه سطحی خاک

مرجع	محل اجرا	منبع کودی	مقدار مصرف (تن در هکتار)	سیستم زراعی	کربن آلی اولیه خاک (درصد)	کربن آلی خاک در کرت تیمار شده (درصد)	میزان افزایش (درصد)
گلچین (1378)	زنجان	کود حیوانی	40	گندم (نک کشت)	0/56	0/59	5/0
	کهرکیلویه	کود گاوی	10	گندم (نک کشت)	0/64	0/82	28/5
سعادت (1384)	سمنان	کود مرغی	10*	زمینی (4 سال)	0/2	0/41	105/0
	خوزستان	باگاس نیشکر	15*	تنابوب گندم - زمینی - گندم - کلزا - ذرت	0/46	0/93	102/1
زلفی باوربانی (1385)	بوشهر	کود گوسفندی	30*	تنابوب پیاز - کلزا - باقلا - اسفناج	0/35	0/72	105/7
میرزا شاهی (1386)	دزفول	کود حیوانی	20	ذرت	0/73	0/76	4/1
خوگر و همکاران (1389)	فارس	کود سبز	-	گندم	0/71	0/99	39/4
فیض اله زاده اردبیلی و همکاران (1389)	خراسان	کود گاوی	60	گندم	0/31	0/6	93/5
مشیری (1396)	6 ایستگاه تحقیقاتی کشور	کود حیوانی	20 ^E	گندم - ذرت (2 سال)	0/3 تا 1/3	0/5 تا 1/5	4/7 تا 50
مشیری (1396)	6 ایستگاه تحقیقاتی کشور	کمپوست (پسماند گیاهی و زباله شهری)	20 ^E	گندم - ذرت (2 سال)	0/3 تا 1/3	0/35 تا 1/2	7/7 - تا 50/8

* کاربرد هر ساله کود آلی، ^E کاربرد کود آلی تنها یکبار در شروع آزمایش

نوع مواد و کودهای آلی اضافه شده به خاک تاثیر قابل ملاحظه‌ای در ماندگاری مواد آلی در خاک دارد (شکل 16). مصرف کودهای آلی دارای لیگنین بیشتر مانند کود دامی و خاک اره نسبت به کاه و کلش و مواد گیاهی خرده شده تازه، کربن آلی خاک را بیشتر افزایش می‌دهد (Krull و همکاران 2004). Courtier-Muriasa و همکاران (2017) در مطالعه‌ای بخش‌های مواد آلی خاک در مزارعی که در مدت 44 سال دو نوع ماده آلی (بقایای گیاهی و کود دامی) دریافت کرده‌اند (در مقایسه با آن‌هایی که کودی دریافت نکردند) بررسی کردند. کاربرد کود گاوی و بقایای گیاهی در مقایسه با خاک‌های بدون کود دامی، کربن کل آلی خاک را به ترتیب 35 و 10 درصد افزایش داده است.



شکل 16- تاثیر منابع مختلف کودها و مواد آلی در تغییر کربن آلی خاک سطحی در 30 سال آزمایش در خاک‌های سوئد (Paustian و همکاران، 1992)

بیشتر پژوهش‌های انجام شده در زمینه مدیریت بهینه کاربرد کودهای شیمیایی است، با این حال با توجه به تأثیر مثبت کاربرد کودها و مواد آلی در بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک و تأمین بخشی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان، مطالعاتی برای مدیریت کاربرد کودهای آلی به ویژه در زمینه مقدار مناسب کاربرد آن‌ها صورت گرفته است. در گزارش شاملو (1351) به اثرات مثبت کاربرد انواع مختلف کودهای آلی در بهبود حاصلخیزی خاک اشاره و با توجه به نتایج حاصل از کاربرد این کودها در تغذیه محصولات کشاورزی مصرف آن‌ها در کشاورزی ایران توصیه شده است.

در بررسی‌های انجام شده توسط محمدزاده بصیر (1359) در مراغه طی سال‌های 1342-1348، کاربرد کود حیوانی در کنار کودهای شیمیایی برای دستیابی به حداکثر تولید سیب‌زمینی پیشنهاد شده است. تأثیر مثبت کاربرد کودها و مواد آلی بر کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی از جمله گندم دیم توسط مجیدی و همکاران (1378) و کاظمینی و همکاران (1387)، گندم آبی توسط گلچین و همکاران (1378)، ذرت توسط میرزاشاهی (1386)، کلزا (بای بوردی، 1393)، گندم- چغندر قند (خوگر و همکاران، 1389) سبزیجات (زلفی باوریانی، 1385) و زعفران (رضائیان باجگیران، 1388) گزارش شده است. میزان مصرف کودهای آلی به درجه پوسیدگی، نسبت کربن به نیتروژن، شوری، غلظت عناصر غذایی به ویژه سه عنصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم بستگی دارد. مروری بر تحقیقات کاربرد کودهای دامی در اراضی کشاورزی کشور نشان می‌دهد اگرچه کودهای دامی تأثیرات مثبتی بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک داشته اما یکی از چالش‌های پیش‌رو ضرورت توجه به افزایش کارایی استفاده از کودهای آلی و توجه به جمع‌آوری، انتقال و فرآوری و مصرف بهینه این منابع به منظور تامین بخشی از عناصر غذایی گیاه و جلوگیری از آلودگی خاک و آب و محیط‌زیست است (رضایی، 1392).

7-5-1- میزان تولید کودهای آلی در ایران

منابع تأمین کودهای آلی در ایران دارای تنوع زیادی بوده و شامل کودهای حیوانی، کمپوست حاصل از بقایای شاخه و برگ گیاهان، کمپوست حاصل از تخمیر سبوس برنج و کلش گندم، کمپوست حاصل از ضایعات کشت و صنعت‌های تولید قارچ خوراکی، کمپوست حاصل از ضایعات کارخانه‌های دخانیات و چای خشک کنی، کمپوست حاصل از ضایعات کارخانه‌های قند، کمپوست حاصل از تخمیر زباله‌های شهری، شاخه‌های هرس شده چای و خرما، کمپوست حاصل از تخمیر فاضلاب شهری، کمپوست حاصل از ضایعات نیشکر، کودهای آلی حاصل از ضایعات پسته و پودر استخوان و سایر مواد مشابه است که افزون‌بر اصلاح نسبت کربن به نیتروژن، غلظت عناصر غذایی استفاده شده گیاهان زراعی را افزایش می‌دهد. کودهای آلی با داشتن عناصر غذایی نیازمند گیاه توانایی کاهش بخشی از نیاز زارعین به کودهای شیمیایی را دارند. در کشور سالانه بیش از 150 میلیون تن بقایای کشاورزی تولید می‌شود که بخش بزرگ آن به تعلیف دام رسیده و بخشی سوزانده

شده و نیز بخشی از آن قابل برداشت نیست. آن بخشی از مواد آلی که قابل دسترس بوده و می‌تواند در صنعت تولید کمپوست استفاده شود به شرح زیر است (جدول 8).

کود مرغی: براساس آمار منتشر شده در سال 1396، ظرفیت مرغداری‌های کشور برابر با 455655 هزار قطعه مرغ گوشتی، 87524 هزار قطعه مرغ تخم‌گذار، 25861 هزار قطعه مرغ مادر گوشتی و 1162 هزار مرغ مادر تخم‌گذار است. از این‌رو، کل تعداد مرغ کشور در سال 1396 برابر با 570 میلیون قطعه برآورد شده است (عبادزاده و همکاران، 1397). میزان تولید کود مرغی برای مرغ‌های گوشتی بسته به سن مرغ بین 4 تا 6 کیلوگرم است (Bolan و همکاران، 2010). به طور میانگین با احتساب تولید 5 کیلوگرم کود مرغی به ازای هر مرغ گوشتی میزان تولید کود برابر با 2/28 میلیون تن برآورد می‌شود. بر اساس گزارش سرویس مهندسی، کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه کرنل آمریکا (NRAES، 1999)، میزان تولید کود مرغی تخم‌گذار به ازای هر واحد تولید مرغ (450 کیلوگرم مرغ زنده)، برابر با 5 تن است. از این‌رو میزان تولید کود مرغی واحدهای تخم‌گذار و واحدهای نگهداری مرغ مادر در سال 1396 برابر با 2/50 میلیون تن برآورد می‌شود.

کودهای دامی: بر اساس آمارنامه کشاورزی در سال 1396، تعداد 46/6 میلیون رأس گوسفند، 18/5 میلیون رأس بز و 8/2 میلیون رأس گاو در کشور وجود دارد (عبادزاده و همکاران، 1397). با بررسی آمار تولید کودهای دامی در سال‌های 1389 تا 1391 میزان تولید کود برای هر راس دام سبک 0/103 تن و برای دام سنگین 1/70 تن در سال است. با در نظر گرفتن این ضرایب میزان تولید کود دامی در سال 1396 برای دام‌های سبک 6/7 میلیون تن و برای دام‌های سنگین 13/94 میلیون تن برآورد می‌شود. اگر ضریب تبدیل کود گاوی به کمپوست گاوی پنجاه درصد باشد در این صورت سالانه می‌توان به 7/5 میلیون تن کود کمپوست گاوی دست یافت.

پسماند شهری: روزانه هر ایرانی شهر نشین حدود 800 گرم زباله تولید می‌نماید که حدود 70 درصد آن را زباله‌های تر تشکیل می‌دهد (فرزادکیا و همکاران، 1394). جمعیت شهری در آخرین سرشماری مرکز آمار ایران در سال 1395 برابر با 79 میلیون نفر است. از این‌رو تولید روزانه زباله تر در شهرهای کشور حدود 33 هزار تن و در سال 12 میلیون

تن برآورد می‌شود. اگر تمامی این پسماندهای آلی به درستی بازیافت شوند می‌توانند سهم مؤثری در افزایش ماده آلی خاک و افزایش تولید محصولات کشاورزی داشته باشند.

باگاس نیشکر: بر اساس آمارنامه کشاورزی سال زراعی 1395-1396، میزان ساقه نیشکر تولیدی در کشور برابر با $\frac{7}{8}$ میلیون تن است. با توجه به اینکه بیش از 34% وزن ساقه نیشکر را باگاس تشکیل می‌دهد. از این رو مقدار باگاس تولیدی در این سال به میزان $\frac{2}{7}$ میلیون تن برآورد می‌شود. از این مقدار تنها بخش ناچیزی در کارخانه پارس به 80 هزار تن کاغذ چاپ و تحریر تبدیل شده و بقیه در بیابان‌ها رها می‌شود.

ضایعات نخل: بر اساس آمارنامه کشاورزی در سال 1396، نزدیک به 215 هزار هکتار از اراضی کشور زیر کشت خرما می‌باشد. از یک درخت نخل در طول سال بین 10 برگ خشک و نیمه خشک هرس می‌شود (عبادزاده و همکاران، 1397) وزن متوسط هر برگ خرما $\frac{1}{5}$ کیلوگرم است (سالمی و همکاران، 1379). حسین خانی (1393)، مقدار کل ضایعات هر نخل در سال را به طور میانگین 10-20 کیلوگرم برآورد کرده است. در هر هکتار بین 150 تا 160 نفر درخت خرما با احتساب تراکم 8×8 کشت می‌شود. با احتساب $\frac{33}{5}$ میلیون نفر درخت خرما بارده در کشور بیش از 503 هزار تن مواد آلی قابل استفاده تولید می‌شود. در حال حاضر بخش اندکی از این ضایعات در صنایع دستی و صنعتی مختلف شامل تولید حصیر، سبد، کلاه، طناب، جارو، MDF و همچنین به عنوان مالچ در پای درخت استفاده می‌شود. مازاد ضایعات سوزانده شده و یا دور ریخته می‌شود (سالمی و همکاران، 1379).

پوست سبز پسته: در حال حاضر سالانه 250 هزار تن پوست سبز پسته پس از جداسازی در مرحله فرآوری در محوطه کارگاه‌های فرآوری، مزارع کشاورزی و باغات رها می‌شود. از آنجایی که این بقایا بستر مناسبی برای قارچ‌های تولیدکننده افلاتوکسین (زهرايه) هستند، مشکلات شدید زیست‌محیطی را به دنبال دارد.

ضایعات چای: 200 هزار تن.

ضایعات سلولزی: ضایعات سلولزی حاصل از چوب‌بری‌ها، صنایع چوب و کاغذ بالغ بر 300 هزار تن در سال برآورد می‌شود.

بستر قارچ خوراکی: بیش از 100 هزار تن در سال

جدول 8- نوع و میزان مواد آلی قابل دسترس در کشور

نام منبع	کل مقدار ناخالص (هزار تن)	مقدار خالص قابل کمپوست (هزار تن)	ضریب تبدیل	مقدار قابل عرضه به صورت کمپوست (هزار تن)
کود مرغی	4780	4110	80	3288
کود دامی گاوی	13940	11625	50	5813
پسماند شهری	12000	8400	50	4200
باگاس نیشکر	2700	2241	80	1793
ضایعات نخل	503	453	80	362
پوست سبز پسته	250	100	15	15
ضایعات چای	200	150	50	75
ضایعات سلولزی	300	200	80	160
بستر قارچ خوراکی	150	100	75	75
جمع	34823	27379		15758

با توجه به آمار یاد شده و احتساب 14 میلیون هکتار سطح زیر کشت اراضی کشاورزی سهم مصرف هر هکتار از اراضی کشاورزی کشور حدود تن کود آلی است که مقدار ناچیزی است. از این رو بایستی به دنبال راهکارهای دیگری مانند رعایت تناوب زراعی صحیح، حفظ بقایای گیاهی در خاک و کاهش خاکورزی بود که بتواند سطح بیشتری از اراضی کشاورزی را در برگیرد.

7-5-1-2- کیفیت کودهای آلی

میزان تولید محصول، سلامت محصول (دربرگیرنده عناصر و ترکیبات مضر)، و نیز ارزش غذایی (دربرگیرنده عناصر و ترکیبات مفید)، آن به کیفیت کود مصرف شده وابسته است. همچنین، مصرف کود می‌تواند کیفیت خاک، آب و هوا و محیط زیست را تحت تأثیر قرار دهد. کود به عنوان یک نهاده مؤثر برای بهبود تغذیه گیاهی بخشی از هزینه تولید را به خود اختصاص می‌دهد و بایستی متناسب با این هزینه، فایده‌ای برای کشاورز داشته باشد. از این رو عرضه و مصرف کودهای بی کیفیت افزون بر کاهش کمیت و کیفیت محصولات، منابع خاک و آب را آلوده نموده، با هدر دادن سرمایه کشاورزان اعتماد آن‌ها

را به تأثیر تغذیه گیاهی کاهش داده و راه را بر توسعه مصرف علمی کودها می‌بندد. در بسیاری از کشورهای دنیا از سال‌ها پیش قوانین و دستورالعمل‌های معینی در رابطه با مدیریت کودها از جمله کنترل کیفی اجرا شده است. شرایط ثبت کود، اقدام به فروش و توزیع کود، شرایط نام‌گذاری و برچسب، تمدید ثبت، تغییر شرایط کود، تخلفات و جریمه‌ها و حتی هزینه سالیانه ثبت کود در قوانین یاد شده به‌طور مشخص بیان شده و عرضه کود ثبت نشده و یا تغییر شرایط کود بر خلاف شرایط ثبت شده خلاف مقررات است.

به دنبال ابلاغ آیین نامه ثبت و کنترل کیفی انواع مواد کودی در سال 1393، موسسه تحقیقات خاک و آب مأموریت یافت تا شیوه‌نامه ثبت مواد کودی را تدوین نموده و با تشکیل ساختاری جدید آیین نامه مربوطه را اجرایی نماید (شکل 17). با اجرای فرایند ثبت مواد کودی از سال 1394 تا 1397، 8384 برند - فرمول مواد کودی موفق به اخذ شماره ثبت شده‌اند (جدول 9). تعداد 1576 برند فرمول مربوط به کودهای آلی بوده که این میزان برابر با 19 درصد کل کودهای ثبت شده است.



شکل 17- ابلاغ آیین نامه و تدوین شیوه نامه ثبت و کنترل کیفی انواع مواد کودی

جدول 9- تعداد کود (برند - فرمول) ثبت شده در دفتر ثبت و کنترل کیفی مواد کودی

سال	کودهای شیمیایی	کودهای آلی	کودهای زیستی	جمع
1394	2018	444	12	2474
1395	2014	475	25	2514
1396	1404	352	20	1776
1397	1263	305	11	1579
جمع کل	6699	1576	68	8384

کیفیت کودهای آلی بسته به شرایط تولید کود متغیر است. کیفیت کودهای دامی متأثر از نوع تغذیه دام، نوع بستر نگهداری دام، زمان برداشت کود از دامداری است. کمپوست زباله شهری نیز تحت تاثیر ترکیب زباله، فصل تولید کود، روش فرآوری کود قرار می گیرد. کیفیت کود آلی و کمپوست نقش مهمی در تغذیه گیاه، ذخیره کربن و حفظ محیط زیست دارد. با توجه به اینکه نقش تغذیه‌ای و ذخیره کربن در مواد آلی همگام با هم انجام می شود در نتیجه برای دستیابی به اهداف مدیریتی بایستی خصوصیات شیمیایی مواد آلی متناسب با نوع خاک، اقلیم و نیاز تغذیه‌ای گیاه باشد. مصرف زیاد کودهای آلی همانند کودهای شیمیایی می تواند تعادل خاک را بر هم زده و مشکلات تغذیه‌ای برای گیاه ایجاد نماید. یک اصل مهم در استفاده از کودهای آلی سالم بودن آن از دید زیست محیط است. در نتیجه اگر کودهای آلی برابر با استانداردهای لازم تهیه شوند قابل مصرف بوده و در غیر این صورت از مصرف آن بایستی اجتناب شود. در جدول (10) ترکیب شیمیایی برخی از کودهای آلی مصرف شده در ایران نشان داده شده است. آنچه که در کاربرد کودها و ترکیبات آلی مهم بوده مقدار کربن آلی موجود در ترکیب و نسبت کربن به نیتروژن آن است. داوودی (1396) با تجزیه 100 نمونه از ترکیبات آلی مختلف نشان داد که ضریب تبدیل کربن آلی به مواد آلی در نمونه‌های کمپوست، ورمی کمپوست، مواد آلی تازه، بستر کشت و کودهای آلی به ترتیب 1/91، 2/06، 1/82، 1/72 و 1/96 است. از این رو ضرورت دارد ضمن توجه به عوامل مهمی مانند شوری و pH ماده آلی استفاده شده، بجای به کارگیری ضریب ثابت تبدیل کربن آلی به ماده آلی (فاکتور Van Bemmelen معادل 1/724)، متناسب با هر نوع ماده آلی از فاکتور تبدیل ویژه آن ماده استفاده کرد. در هنگام استفاده از ترکیبات با نسبت کربن به نیتروژن بیش از 20 ضروری است در هنگام با مصرف کود نیتروژنی این نسبت اصلاح شود.

جدول 10- خصوصیات شیمیایی برخی از کودهای آلی پر مصرف در کشور

نوع کود آلی	pH*	EC*	کربن آلی	نیتروژن کل	C:N	فسفر کل	پتاسیم کل	ماده آلی	نیترات	آمونیم	آهن کل	منگنز کل	روی کل	مس کل
		ds m ⁻¹				%					mg kg ⁻¹			
کود گاوی	8/41	14	31/8	1/9	17/25	0/67	2/26	53/74	2974	324	8157	347	182	35
کمپوست زباله شهری	7/63	11/6	19/2	1/47	9/7	0/51	0/96	29/7	2013	541	11029	344	694	268
کود گوسفندی	7/8	8/7	43/8	2/4	18/25	0/42	1/5	73/2	45	230	4828	266	76	19
ورمی کمپوست کود گاوی	6/8	5/9	34/5	2/2	15/7	0/66	0/31	76/3	16986	150	4542	281	216	52
کمپوست باگاس نیشکر	6/9	1/6	51/0	0/38	134	0/06	0/32	82/1	-	200	3743	103	21	16
کمپوست چوب و کاغذ	7/6	1/6	39/9	1/5	26/6	0/17	0/12	75/6	-	110	3624	449	72	16

منبع: مشیری (1396)

انواع ترکیبات آلی که با هدف بالا بردن کیفیت حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه بکار می‌روند به سه دسته کلی زیر تقسیم می‌شوند (سماوات و همکاران، 1393)

- ترکیبات آلی بهساز خاک

ترکیبات آلی بهساز خاک به ترکیباتی گفته می‌شود که ویژگی یک ترکیب آلی را داشته و با هدف بهسازی شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک به کار می‌روند. از مهمترین انواع ترکیبات آلی بهساز خاک، بقایای گیاهی با درجات مختلف پوسیدگی، انواع کمپوست‌ها و ورمی کمپوست‌ها را می‌توان نام برد. این ترکیبات باید شرایط زیر را داشته باشند (سماوات و همکاران، 1393):

- از نظر مواد اولیه و محتوای کربن آلی، ویژگی آلی بودن (کربن آلی بیش از 10 درصد و ماده آلی بیش از 25 درصد) را دارا باشند.
- عناصر غذایی اصلی (N، P₂O₅ و K₂O) در آن‌ها معمولاً از 5 درصد کمتر است.
- از نظر درجه رسیدگی براساس توصیه ارائه شده در برچسب کود قابلیت کاربرد مستقیم در خاک و یا گیاه را داشته باشند.
- از نظر شوری و غلظت یون‌های سدیم و کلراید با توجه به توصیه برچسب محدودیتی برای گیاه ایجاد ننماید.
- خطر آلودگی عوامل بیماری‌زای انسانی، دامی و گیاهی، آفات گیاهی ترکیبات مضر و بذر علف‌های هرز نداشته باشند.
- مقادیر عناصر سنگین و مواد خارجی مخلوط در آن‌ها کمتر از حد مجاز تعریف شده باشد (جدول 11).

- کودهای آلی

کودهای آلی ترکیبات آلی حاصل از فضولات دامی و پسماندهای گیاهی است که با هدف تامین عناصر غذایی محصولات به کار می‌رود. مهمترین انواع کودهای آلی شامل فضولات پوسیده دام و طیور، کمپوست‌ها و کرم پوسال‌ها، فیلتر کیک، ضایعات نیشکر و چغندر قند هستند.

- از نظر مواد اولیه و محتوای کربن آلی، ویژگی آلی بودن (کربن آلی بیش از 10 درصد و ماده آلی بیش از 25 درصد) را دارا باشند.
- عناصر غذایی اصلی (K_2O و P_2O_5 , N) در آن‌ها به صورت مجموع یا منفرد بیشتر از 5 درصد در ماده خشک است.
- از نظر درجه رسیدگی بر اساس توصیه ارائه شده در بروشور قابلیت کاربرد مستقیم در خاک و یا گیاه را داشته باشند.
- از نظر شوری و غلظت یون‌های سدیم و کلراید با توجه به توصیه برچسب محدودیتی برای گیاه ایجاد ننماید.
- خطر آلودگی عوامل بیماری‌زای انسانی، دامی و گیاهی، آفات گیاهی ترکیبات مضر و بذر علف‌های هرز نداشته باشند.
- مقادیر عناصر سنگین و مواد خارجی مخلوط در آن‌ها کمتر از حد مجاز تعریف شده باشد (جدول 11).
- نسبت C/N در آن‌ها کمتر از 20 باشد.
- نسبت نیتروژن آمونیومی به نیتروژن نیتراتی در آن کمتر از 3 باشد.

- محرک‌های رشد آلی

- محرک‌های رشد آلی به ترکیبات آلی اطلاق می‌شود که با هدف تحریک رشد گیاهان به خاک افزوده شده یا بر روی گیاه پاشیده می‌شوند از انواع محرک‌های رشد آلی می‌توان اسید هیومیک، اسید فولویک، اسیدهای آمینه و عصاره جلبک دریایی را نام برد. برای اطلاق عبارت محرک رشد به هر ماده آلی میزان ماده مؤثره آن ملاک عمل است (سماوات و همکاران، 1393). دارا بودن شرایط عمومی زیر نیز برای محرک‌های رشد آلی ضروری است:
- خطر آلودگی عوامل بیماری‌زای انسانی، دامی و گیاهی، آفات گیاهی و بذر علف‌های هرز نداشته باشند.
 - از نظر شوری و مواد خارجی با توجه به توصیه برچسب محدودیتی برای گیاه ایجاد ننماید.
 - میزان عناصر سنگین و ترکیبات آلاینده در آن‌ها از حد مجاز تعریف شده کمتر باشد (جدول 11).

جدول 11- حد مجاز غلظت فلزات سنگین در کودهای آلی (سماوات و همکاران، 1393)

ردیف	نام فلز	حد مجاز (میلی گرم در کیلوگرم)
1	آرسنیک (As)	10
2	جیوه (Hg)	5
4	سرب (Pb)	200
5	کادمیم (Cd)	5
6	کبالت (Co)	25
7	کروم (Cr)	150
10	نیکل (Ni)	120

2-5-7- خاکورزی

خاکورزی یا شخم به تلاش‌های مکانیکی برای به هم زدن خاک به منظور آماده سازی آن برای رشد محصولات کشاورزی اطلاق و به روش مرسوم و حفاظتی¹ انجام می‌شود. در روش‌های مرسوم خاکورزی، لایه‌ای از خاک برگردانده شده که با این روش علف‌های هرز کنترل، خاک نرم و شرایط برای رشد ریشه گیاهچه‌های جوان فراهم می‌شود. از طرف دیگر می‌توان آب باران را در خاک نفوذ داد. در این روش مواد آلی خاک در معرض تجزیه قرار گرفته و از دست می‌رود. خاکورزی حفاظتی روشی برای جلوگیری از بهم خوردن خاک بوده و کمترین خاکورزی اعمال می‌شود. خاکورزی حفاظتی به روش‌های مختلفی اعمال می‌شود:

بی‌خاکورزی²: در این روش هرگز زمین شخم زده نمی‌شود.

کم خاکورزی³: در این روش تمام عملیات خاکورزی به کمترین خود می‌رسد.

خاکورزی نواری - خطی⁴: در این روش تنها نوار کشت خاکورزی می‌شود.

خاکورزی پشته‌ای⁵: خاکورزی روی پشته‌های ثابت انجام می‌شود.

با افزایش عملیات خاکورزی ماده آلی خاک سریعتر تجزیه می‌شود (جدول 12).

¹ Conservative tillage

² No till

³ Minimum till

⁴ Strip till

⁵ Ridge till

جدول 12- اثر نوع شخم بر اتلاف ماده آلی خاک طی 19 روز (FAO, 2005)

نوع شخم	مقدار اتلاف ماده آلی (کیلوگرم در هکتار)
گاواهن برگردان‌دار + دیسک + دو نوبت ماله	4300
گاواهن برگردان‌دار	2230
دیسک + ماله	1840
گاواهن قلمی	1720
بی‌خاکورزی	860

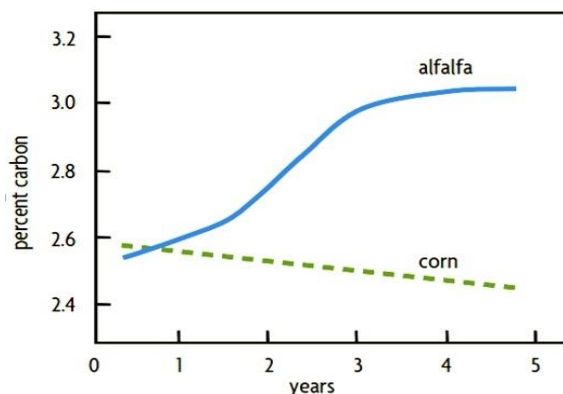
تجربیات نشان داده که در مناطق نیمه خشک مراکش کاربرد اصول خاکورزی حفاظتی در افزایش کربن آلی خاک امیدوارکننده و ثمربخش بوده است (Mrabet و همکاران، 2001). بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییر خاکورزی از شیوه رایج به بی‌خاک‌ورزی موجب خواهد شد تا در مدت 5 تا 10 سال میزان ترسیب کربن به بیشترین مقدار رسیده و طی 15 تا 20 سال کربن آلی در خاک به تعادل جدید برسد (West و Post، 2002).

7-5-3- تناوب زراعی و کود سبز

ذخیره کربن آلی به علت نبود مدیریت جامع بقایای گیاهی بویژه کاهش تنوع گیاهان و کشت تک محصولی کاهش می‌یابد. برای موفقیت در عملیات افزایش ذخیره کربن آلی در خاک لازم است گیاهان زراعی و علوفه‌ای که میزان زیادی زیست توده تولید می‌کنند، در تناوب گنجانده شود. با قراردادن گیاهان خانواده بقولات در چرخه تناوب زراعی می‌توان مقدار بیشتری از مواد آلی را در خاک ذخیره نمود. با اضافه نمودن کربن به خاک، گیاهان لگومینوز (بقولات) مقادیر قابل توجهی از نیتروژن را به خاک اضافه می‌کنند، که موجب افزایش زیست توده در کشت بعدی می‌شود. از آنجا که عملکرد گیاهان زراعی ناشی از برآیند اثرات فیزیکی، بیولوژیکی و مدیریتی سامانه‌های زراعی است، انتخاب یک تناوب مناسب با تأکید بر جنبه‌های حفظ محیط زیست برای هر منطقه شرط اصلی افزایش بهره‌وری در دراز مدت خواهد بود (Brady و Weil، 2002). در همین راستا

استفاده از نظام‌های مناسب کشت و تناوب مطلوب منجر به استفاده بیشتر و مناسب‌تر از منابع خواهد شد. مطالعات صورت گرفته در جلگه مرودشت استان فارس با استفاده از نتایج سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، نشان داد که کشت پیای گندم بدون آیش و تناوب، نه تنها سبب تخریب شیمیایی خاک از لحاظ حاصلخیزی و تهی شدن خاک از مواد آلی و عناصر غذایی شده، بلکه مواد آلی در 46 درصد اراضی شدیداً و در 26 درصد نیز تا حدودی در حال کاهش هستند که نخستین اثر سوء آن، فشردگی خاک است (Momeni, 2000).

نوع گیاهانی که در خاک رشد می‌کنند نیز عامل مهمی در میزان ماده آلی خاک به شمار می‌روند. بسیاری از ریشه‌های گیاهان زراعی دارای مقادیر بالاتری از مواد لیگنینی بوده که به کندی تجزیه می‌شود. برای نمونه در گیاه جو پس از یک سال تنها یک سوم بقایای اندام هوایی در خاک باقی می‌ماند در صورتیکه 42 درصد ماده آلی ریشه در خاک وجود داشته و مشارکت‌کننده اصلی در تشکیل ذرات ریز ماده آلی است. سطح مواد آلی خاک در تناوب‌های زراعی متفاوت نیز نوسانات زیادی داشته به طوری که ممکن است گاهی کاهش یافته سپس افزایش و دوباره کاهش یابد. اثر افزایش کربن آلی در هنگام رشد یونجه در مقایسه با ذرت علوفه‌ای در شکل (18) نشان داده شده است (کشاورز و همکاران، 1393).



شکل 18- تغییرات کربن آلی در اراضی تحت کشت یونجه و ذرت علوفه‌ای در طول زمان (کشاورز و همکاران، 1393)

افزون‌براین، مقادیر بقایای گیاهی برگردانده شده به خاک به نوع گیاهان زراعی کشت شده بستگی دارد. معمولاً ذرت دانه‌ای بقایای گیاهی بیشتری نسبت به گندم، لوبیا و سیب زمینی یا کاهو باقی می‌گذارد (شکل 19).



شکل 19- سطح خاک پس از برداشت ذرت دانه‌ای (تصویر سمت راست) و ذرت علوفه‌ای (تصویر سمت چپ) (کشاورز و همکاران، 1393)

در مطالعه‌ای کشت پنج ساله گندم زمستانه و علف پایا، کربن آلی خاک را افزایش داد. نتایج نشان داد ریشه‌های علف پایا و گندم تاثیر بیشتری از بقایای سطحی گیاهان زراعی در سیستم کشت بی‌خاکورزی (حفاظتی) در شرایط نیمه خشک دارد. در بیشتر مطالعات بر مدیریت بقایای گیاهی و افزودن مواد آلی به سطح خاک تمرکز دارند زیرا اندازه‌گیری‌های مربوط به ریشه بسیار مشکل است. هرچند که ریشه مقدار بسیار زیادی ترکیبات ناشناخته کربن آلی به خاک می‌افزاید (Wuest, 2012). در آزمایشی نشان داده شد که می‌توان 30 تا 40 درصد کربن نشان‌دار ریشه گندم را بعد از 20 ماه از خاک استخراج کرد (Sanaullah و همکاران، 2010)

تناوب‌های مختلف زراعی بر میزان کربن خاک در اعماق مختلف در پلاتیو چین در یک مطالعه 30 ساله بررسی شد. گیاهان این تناوب‌ها شامل گندم، ذرت، نخود، یونجه، سیب‌زمینی و آیش (برای مقایسه) بود. مقدار مواد آلی خاک با افزایش طول تناوب افزایش یافت درصد همه اجزاء مواد آلی با مقدار عملکرد گیاهان زراعی دانه‌ای همبستگی نشان دادند. تناوب‌های متنوع در مقایسه با سیستم تک کشتی باعث افزایش ترسیب

کربن، زیست توده و فعالیت میکروبی و همینطور میزان محصول زراعی شد (Wang و همکاران، 2017).

نسبت کربن به نیتروژن (C:N) خاک تأثیر قابل توجهی در تجزیه بقایای محصول در هنگام برنامه‌ریزی تناوب زراعی و استفاده از محصولات پوششی در سیستم‌های کشاورزی دارد. ریزجانداران خاک نسبت کربن به نیتروژن نزدیک 8:1 دارند. ریزجانداران خاک کربن را به عنوان منبع انرژی استفاده کرده و مقداری کربن هنگام تنفس به شکل دی اکسید کربن از بین می‌رود. ریزجانداران خاک برای زنده ماندن (نگهداری توده میکروبی + انرژی) به رژیم غذایی با کربن به نیتروژن 24:1 نیاز دارد. اگر کاه و کلش گندم با نسبت کربن به نیتروژن بالای 80:1 به خاک اضافه شود ریزجانداران از نیتروژن خاک برای حفظ نسبت 24:1 استفاده کرده و گیاه دچار نشانه‌های کمبود نیتروژن می‌شود. و اگر بقایای ماش و گیاهانی با نسبت کربن به نیتروژن کمتر به خاک وارد شود ریزجانداران نیتروژن را مصرف کرده و مقدار اضافی نیتروژن برای مصرف گیاه باقی می‌ماند. براساس نسبت کربن به نیتروژن بقایای گیاهی مدیریت می‌شود. در بحث تناوب نیز نسبت کربن به نیتروژن می‌تواند نوع گیاهان در تناوب را مشخص نماید. گیاهان با بقایای کربن با نیتروژن بالا مانند گندم و ذرت می‌بایست در تناوب با گیاهان با نسبت کربن به نیتروژن پائین مانند لگوم‌ها، ماش، عدس و خلر و یا گیاهان رده کلم مانند خردل، شلغم، تربچه و کلزا قرار بگیرند تا بقایای آن‌ها تجزیه شده و در اختیار گیاه قرار بگیرد (Brady و Weil، 2002).

یکی از راه‌های افزایش ماده آلی خاک استفاده از کود سبز در تناوب زراعی است. اثر کود سبز بر ویژگی‌های فیزیکی خاک همانند کود حیوانی است. در صورتی که از گیاهان تیره بقولات به عنوان کود سبز استفاده شود، تمام نیتروژن تثبیت شده به خاک بر می‌گردد. از سوی دیگر کود سبز با جذب و ذخیره مواد غذایی در خود از شسته شدن آنها جلوگیری می‌نماید. که کشت شبدر شیرین به عنوان کود سبز به دلیل ریشه‌های توسعه یافته و عمیق خود سبب انتقال فسفر از اعماق خاک به سطح خاک شده و در افزایش حاصلخیزی خاک سطحی مؤثر است. گیاه استفاده شده به عنوان کود سبز می‌بایستی اثرات منفی (آلوپاتی، یعنی ...) بر رشد محصول بعدی نداشته باشد، فصل رشد کوتاهی داشته (فصل رشد آن کوتاه)، تراکم بوته بالا و رشد سبزینه‌ای زیادی داشته باشد تا افزون بر این که مقدار زیادی

ماده آلی به خاک اضافه می‌کند، پوشش کامل خاک را نیز تأمین نماید. پوشش کامل خاک برای جلوگیری از فرسایش خاک و بازداری از رشد علف‌های هرز ضرورت دارد. از این‌رو اهداف کود سبز را می‌توان در افزایش ماده آلی خاک، حفظ مواد غذایی خاک (و در صورت استفاده از گیاهان تیره بقولات افزایش نیتروژن خاک)، جلوگیری از فرسایش خاک، افزایش فعالیت‌های زیستی و مبارزه با علف‌های هرز خلاصه نمود.

کود سبز در دوره تناوبی فقط می‌تواند جایگزین آیش فصلی شود. چنانچه طول آیش فصلی موجود برای تولید یک محصول کفایت می‌نماید، استفاده از کود سبز طی آن آیش فصلی مجاز نیست. نوع آیش فصلی (زمستانه یا تابستانه) که در شرایط کشت آبی توسط کود سبز جایگزین می‌شود به شرایط اقلیمی بستگی دارد. در نواحی اقلیمی که با زمستان سرد مشخص می‌شوند، گیاهان وجینی (مانند چغندرقد، پنبه، ذرت و سیب‌زمینی)، در بهار کاشته می‌شوند و آیش زمستانه می‌تواند توسط کود سبز اشغال شود. در نواحی اقلیمی با زمستان ملایم، گیاهان وجینی ممکن است در پائیز (مانند چغندرقد و سیب‌زمینی)، یا در بهار (مانند ذرت، پنبه و آفتابگردان)، کاشته شوند و کود سبز می‌تواند محصولی تابستانه یا پائیزه (عکس دوران رشد محصول اصلی) باشد.

کودهای سبز در بیشتر مواقع از گیاهان خانواده بقولات هستند. گیاهانی از جمله خلر، لوبیا روغنی، انواع لوبیا، چاودار، شبدر، جو و گندم سیاه به عنوان کود سبز در کشت آبی استفاده می‌شوند. یونجه به عنوان کود سبز کاشته نمی‌شود، اما در صورتی که پس از حصول رشد کافی سبزینه‌ای به خاک برگردانده شود، بعضی از هدف‌های کود سبز را تأمین می‌کند. گیاهانی مثل گندم سیاه، چاودار و شبدر ایرانی به خوبی در خاک‌های فقیر رشد می‌کنند و در بهبود باروری و ساختمان خاک‌ها مؤثر هستند.

کود سبز را حداقل دو هفته پیش از کاشت گندم به خاک بر می‌گردانند. هرچه درصد مواد خشبی کود سبز بیشتر و نیتروژن آن کمتر باشد، می‌بایستی با فاصله زمانی طولانی‌تری از کاشت گندم به خاک برگردانده شود. در صورتی که از گیاهانی مثل یونجه یا شبدر به عنوان کود سبز استفاده می‌شود می‌بایستی نخست آن‌ها را با ماشین‌آلاتی مانند کولتیواتور پنجه‌غازی از پائین طوقه قطع نمود تا خشک گردند و یا آن‌ها را با علف‌کش مناسب خشک کرد و 3 تا 4 هفته بعد در وضعیت گاو رو بودن خاک، شخم زده شوند. در

غیر این صورت این گیاهان دوباره رشد کرده و به صورت علف هرز در خواهند آمد. هیچ‌گاه نبایستی کود سبز را به عنوان علوفه برداشت و یا در چرای دام استفاده کرد. این عمل باعث خروج مواد غذایی از خاک شده و ممکن است رشد و عملکرد محصول بعدی را کاهش دهد. چرای دام یا یک برداشت مختصر علوفه از کود سبز هنگامی امکان‌پذیر است که کود شیمیائی کافی به خاک داده شود و آیش فصلی موجود اجازه رشد دوباره و کافی را به کود سبز بدهد.

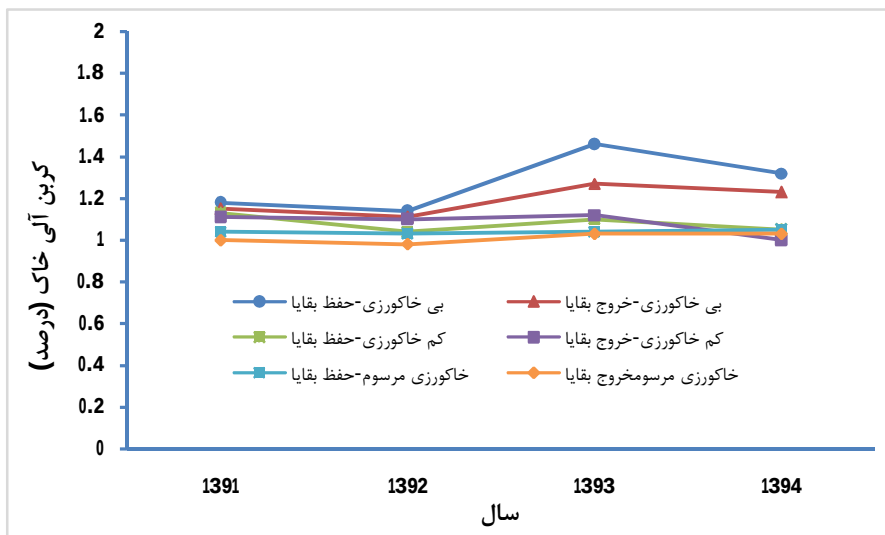
ماش نیز می‌تواند به عنوان کود سبز استفاده شود. این گیاه، گرمسیری و تابستانه بوده و دارای نیاز حرارتی زیادی است. ماش پس از سبز شدن به خشکی مقاوم بوده و در اراضی سبک و سرشار از مواد آلی یا خاک‌های شنی رسی تولید بیشتری دارد. از آنجایی که ماش حاصلخیزی خاک را بهبود می‌بخشد از جایگاه ویژه‌ای در تناوب زراعی با گندم برخوردار است. در مواردی که از بقولات به عنوان کود سبز استفاده شود به دلیل تثبیت زیستی نیتروژن توسط این گیاهان می‌توان تا 100 کیلوگرم در هکتار از میزان کود نیتروژنی مصرفی کاست.

7-5-4- کشاورزی حفاظتی

کشاورزی حفاظتی یک بسته مدیریت زراعی است که بر پایه چهار اصل حداقل خاک‌ورزی، رعایت تناوب زراعی صحیح، حفظ بقایای گیاهی و مدیریت تلفیقی تغذیه و حاصلخیزی خاک استوار است (Lal, 2015). امروزه استفاده از سامانه‌های کشاورزی حفاظتی با توجه به فواید زیاد آن مانند افزایش مواد آلی خاک، افزایش ذخیره رطوبتی خاک و بهبود حاصلخیزی زیستی خاک، جلوگیری از فرسایش خاک، کاهش شدت یا فراوانی تنش خشکی، صرفه‌جویی در مصرف آب، عملکرد پایدار محصولات زراعی، کاهش نیروی کارگر و تراکتور برای آماده‌سازی زمین، صرفه‌جویی در مصرف سوخت و کاهش هزینه‌های تولید مورد توجه بسیار قرار گرفته است. در این روش به کشاورزان پیشنهاد می‌شود دستکم 30 درصد از بقایای کشت پیشین را به خاک برگردانند. کاهش بهم خوردگی خاک (خاک‌ورزی حفاظتی) و استفاده از گیاهان پوششی و نیز نگهداری بقایای گیاهی در سطح خاک موجب افزایش فعالیت میکروبی در خاک شده و در نتیجه سبب

انباشت مواد آلی به ویژه در سطح خاک می‌شود. سوزاندن بقایای گیاهی قبل از کشت اثر بسیار زیانباری بر مواد آلی خاک دارد. سوزاندن بقایای گیاهی موجب افزایش دی‌اکسید کربن در اتمسفر می‌شود. سوزاندن بقایای گیاهی میزان ذخیره کربن آلی خاک سطحی را تا 16 درصد نسبت به عدم سوزاندن بقایا کاهش می‌دهد (Davidson و Ackerman, 1993). Izaurralde و Cerri (2002) گزارش کردند که در سامانه‌های کشت با تولید بقایای گیاهی زیاد و در سامانه‌های بی‌خاکورزی قابلیت ذخیره کربن بیشتری نسبت به خروج آن از خاک وجود دارد. لامعی هروانی و همکاران (1384) نیز با استفاده از گیاه پوششی میزان ماده آلی خاک را 0/31 درصد افزایش داد.

رضایی و همکاران (1389) نشان دادند که با کاهش شدت خاکورزی همراه با نگهداری بقایای گیاهی جو در کشت ذرت افزایش ماده آلی خاک و پایداری خاکدانه‌ها اتفاق می‌افتد. میرزاوند (1394) با اجرای عملیات بی‌خاکورزی در کنار حفظ بقایای گیاهی در مدت 4 سال افزایش کربن آلی خاک را تا 0/4 درصد گزارش نموده است (شکل 20).



شکل 20- تغییرات کربن آلی خاک پس از چهار سال اجرای تناوب گندم - ذرت در سیستم کشاورزی حفاظتی (میرزاوند، 1394)

تحقیقات نشان می‌دهد عملیات کشاورزی حفاظتی با کاهش شخم خاک، تجمع مواد آلی خاک را بهبود بخشیده و از آن محافظت می‌نماید. Plaza و همکاران (2013) برای شناخت بیشتر این سازوکارها تحقیقی انجام داد. مواد آلی نمونه‌های خاک کشت جو (25 سال)، بی خاکورزی¹ و خاکورزی² را به چهار گروه مواد آلی محلول، مواد آلی ذره‌ای آزاد³ بیرون خاکدانه‌ها، مواد آلی حبس شده (در منافذ درشت و ریز) و مواد آلی کمپلکس شده با کانی‌ها گروه‌بندی کردند. خاک بدون خاکورزی کربن آلی 16 درصد و نیتروژن 5 درصد بیش از تیمار خاکورزی شده، ذخیره کرده بود. در خاک یاد شده کربن آلی آزاد 7 درصد، کربن آلی در خاکدانه‌های درشت 20 درصد، کربن در خاکدانه‌های ریز 63 درصد، کمپلکس‌های ارگانو - مینرال 16 درصد افزایش یافته است. مواد آلی محلول 11 درصد کاهش یافته است. وی نشان داد که سیستم خاکورزی حفاظتی نه تنها تشکیل منافذ ریز برای محافظت فیزیکی مواد آلی ذره‌ای را افزایش، بلکه برهمکنش کانی‌ها و مواد میکروبی که منجر به پایداری مواد آلی می‌شود را نیز افزایش داده است. Salahin و همکاران (2017) در بنگلادش تأثیر کشاورزی حفاظتی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک، کربن آلی خاک و میزان محصول در سیستم تناوب ماش - گندم را بررسی کرده و نشان دادند که کمترین خاک ورزی به همراه نگهداشتن بقایا در سطح خاک سبب افزایش مواد آلی در سطح خاک به میزان 200 درصد بیشتر از سیستم شخم عمیق بدون بقایای گیاهی خاک شد.

در مطالعه‌ای که توسط Paudel و همکاران (2014) انجام شد تأثیر کشاورزی حفاظتی و سنتی در تناوب کشت برنج و گندم و حفظ بقایای ماش در تجمع کربن خاک را مورد بررسی قرار دادند. داده‌های کربن آلی خاک بعد از پنج کشت نشان داد که تجمع کربن آلی خاک بوسیله نوع خاکورزی و بقایای گیاه در سطح خاک تحت تأثیر قرار گرفت. ولی در میزان کربن آلی در عمق خاک تأثیری نداشت. مقدار زیادی مواد آلی خاک، حدود 19/44 گرم در کیلوگرم در سیستم بی‌خاک‌ورزی تجمع یافت. در صورتیکه کمترین میزان کربن آلی خاک، 15/86 گرم در کیلوگرم مربوط به سیستم

¹ no-tillage² chisel tillage³ particulate

تناوب گندم - برنج و کشت سنتی بود، در نتیجه سیستم خاکورزی حفاظتی در سیستم تناوب ذکر شده کمک به تجمع کربن خاک و بهبود حاصلخیزی خاک کرده است.

8- قوانین و آیین نامه‌ها مرتبط با مدیریت کربن آلی خاک

امروزه مدیریت بهینه و تلفیقی عناصر غذایی از جمله الزامات موجود در یک برنامه عملیات مناسب کشاورزی است تا هدف امنیت غذایی با تولید محصول کافی و سالم محقق شود. عزم ملی برای رفع چالش‌های پیش گفته سبب شده است که در بین متخصصین و کارشناسان، اجماع نظر برای تغییر در استراتژی مدیریت حاصلخیزی خاک به سمت مدیریت تلفیقی شکل گیرد. در طول یک دهه اخیر انعکاس این موضوع در بین سیاستگذاران سبب شده است که کاربرد کودهای آلی، کودهای زیستی و کشاورزی ارگانیک در برنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی گنجانده شود. در برنامه‌های پنج ساله توسعه کشور نیز به این موضوع پرداخته شده است. برخی از قوانین و آیین نامه‌های مصوب در این زمینه به شرح زیر است.

- سند چشم‌انداز 20 ساله، افزایش میزان کربن آلی خاک تا 1 درصد.
- بند ب ماده 61 قانون برنامه چهارم توسعه، دولت مکلف است به منظور جلوگیری از افزایش بی‌رویه مصرف سموم دفع آفات نباتی و کودهای شیمیایی، اتخاذ روشی نماید که موجبات استفاده بیشتر از کود کمپوست و مبارزه بیولوژیک به تدریج فراهم شود.
- آیین‌نامه اجرایی بند ب ماده 61 قانون برنامه چهارم توسعه.
- ماده 34- وزارت جهاد کشاورزی موظف است راساً یا در صورت لزوم با همکاری دستگاه‌های ذی‌ربط و در صورت نیاز پس از تصویب مراجع ذی صلاح سیاست‌های تشویقی، ترجیحی و برنامه‌های عملیاتی زمان‌بندی شده را به ترتیبی تدوین و به مرحله اجرا درآورد که مصرف کودهای آلی و زیستی در هر سال حداقل به میزان یک درصد افزایش یابد.

ماده 35- وزارت جهاد کشاورزی موظف است از طریق فعالیتهای آموزشی و ترویجی زمینه بهبود مشارکت کشاورزان برای جلوگیری از مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و توسعه مصرف کودهای آلی و زیستی، کمپوست و ورمی کمپوست را فراهم نماید.

ماده 36- در راستای بهینه‌سازی مصرف انواع سموم و کودهای شیمیایی و توسعه تولید محصول سالم، وزارت جهاد کشاورزی موظف است سیاست‌های حمایتی و تشویقی خود را به نحوی تنظیم نماید که تولید محصولات سالم در اولویت قرار گیرد.

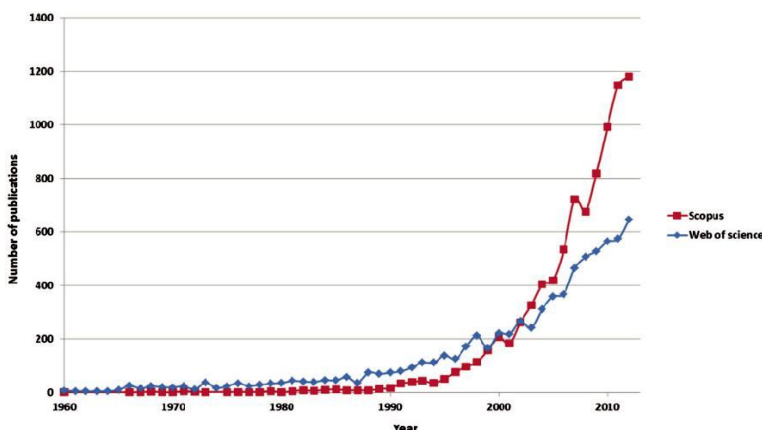
- بند الف ماده 14 قانون بهره‌وری کشاورزی، به منظور حفظ و توسعه پایدار زیست محیطی (اکولوژیکی) عرصه‌های طبیعی دولت مکلف است با انجام مطالعه، ارتقاء علمی و تقویت تسهیلات، به گونه‌ای اقدام نماید که با استفاده از نیروی انسانی متخصص، توان و سرمایه‌های بخش‌های غیردولتی، ظرف ده سال به طور متوسط سالانه تا دو درصد (2%) تثبیت خاک و ترسیب کربن افزایش یابد.
- بند ز ماده 143 قانون برنامه برنامه پنجم توسعه، ترویج استفاده از کودهای آلی و زیستی (ارگانیک) در سطح مزارع و باغ‌های کشور حداقل در سقف یارانه سال آخر برنامه چهارم و افزایش میزان مصرف اینگونه کودها به سی و پنج درصد (35%) کل کودهای مصرفی در پایان برنامه.
- ماده 31 بند ت قانون برنامه ششم توسعه - "فراهم نمودن امکانات مصرف بهینه سموم، دفع آفات نباتی و کودهای شیمیایی و استفاده بیشتر از کود آلی (کمپوست) و مبارزه زیستی و تدوین ضوابط ورود، ساخت و ترکیب ساخت (فرمولاسیون) کود و سم".
- ماده 32 بند ب/2 قانون برنامه ششم توسعه - "اصلاح و بهبود خاک کشاورزی و افزایش کربن (ماده آلی) خاک به میزان سالانه پانصد هزار هکتار".

در عرصه اجرایی و در بیشتر موارد قوانین و آیین‌نامه‌های مربوطه به اجرا در نیامده است. البته در حوزه تحقیق، آموزش و ترویج فعالیتهایی برای تحقق برنامه‌های مدیریت ماده آلی خاک صورت گرفته است (مشیری، 1397). عدم اجرای کامل این

قوانین و سیاست‌ها از چند منظر قابل بررسی می‌باشد. نخستین مساله نداشتن همخوانی موارد مندرج در قوانین با یافته‌های علمی است. به عنوان نمونه امکان افزایش کربن آلی خاک تا سطح یک درصد در تمام خاک‌ها با تنوع اقلیمی حاکم بر کشور وجود ندارد. در این زمینه در بند "7" همین نشریه مطالبی ذکر شده است. به علاوه عواملی چون "بطئی بودن تغییرات کربن آلی خاک و طولانی بودن اثرات آن بر شاخص عملکرد و درآمد کشاورزان"، "عدم توجه کافی در سطح بهره‌برداران، کارشناسان و مدیران به شاخص کربن آلی خاک به عنوان عامل کلیدی در پایداری کیفیت و حاصلخیزی خاک"، "عدم وجود سیاست‌های موثر و پایدار در حفظ و ارتقای کربن آلی خاک علی‌رغم وجود قوانین و آیین‌نامه‌های فراوان"، نداشتن همخوانی راهکارهای توصیه شده با ویژگی‌های خاکی، اقلیمی و شرایط اقتصادی و اجتماعی منطقه"، "ناکافی بودن مواد آلی (کودهای آلی، انواع کمپوست) در دسترس قابل استفاده در خاک"، "وجود رقابت بین انواع استفاده از ترکیبات آلی (صنایع سلولزی، صنایع دستی، صنایع ساختمانی، تغذیه دام و ...) با کاربرد این ترکیبات در خاک" و "اولویت نداشتن مدیریت کربن آلی خاک به عنوان یک هدف در عملیات به زراعی، به باغی و حفاظت و احیای جنگل‌ها و مراتع" از جمله موارد فنی و یا سیاست‌گذاری است که در عدم تحقق کامل قوانین و آیین‌نامه‌های مرتبط به موضوع مدیریت ماده آلی خاک موثر بوده که ضروری است با آسیب‌شناسی دقیق برای برداشتن موانع گام برداشته شود.

9- برنامه‌های تحقیقاتی آینده

اهمیت کربن آلی خاک سبب شده است که در دو دهه اخیر پژوهش‌های انجام شده در زمینه شکل‌های مختلف کربن آلی خاک، نقش آن در بهبود شرایط فیزیکی خاک، چرخه عناصر غذایی، حاصلخیزی خاک، پتانسیل تولید خاک، تغییرات اقلیمی و همچنین بهینه‌سازی مدیریت مواد آلی و مدل‌سازی روند تغییرات کربن آلی با سرعت زیادی افزایش یابد (شکل 21).



شکل 21- تعداد مقالات چاپ شده در زمینه کربن آلی خاک در بازه زمانی 1960 تا 2012 برگرفته از دو پایگاه انتشارات علمی "Scopus" و "web of science"
منبع: (McBratney و همکاران، 2014).

افزایش قابل توجه میزان مواد آلی خاک‌ها یا حفظ سطوح بالای ماده آلی ساده نیست. این کار به تلاش پایدار نیاز دارند که شامل دو رویکرد کلی افزودن مواد آلی به خاک‌ها و کاهش اتلاف کربن است. با توجه به شرایط اقلیمی و خاکی کشور به نظر می‌رسد در مرحله نخست می‌بایست عملیاتی که موجب اتلاف کربن آلی موجود در خاک می‌شوند کنترل شده و پس از آن نسبت به افزایش مواد آلی خاک پرداخت. بر این اساس هدف اصلی در قدم اول یافتن راهکارهای مناسب حفظ کربن آلی خاک در اقلیم‌های مختلف کشور و در قدم دوم ارائه راهکارهای افزایش کربن آلی خاک است. برای نیل به اهداف یاد شده نخست می‌بایست شناخت ما از وضعیت کربن آلی خاک‌ها و چگونگی تغییرات آن افزایش یابد و سرانجام راهکارهای لازم برای حفظ و ارتقای کربن آلی خاک پیشنهاد شود. در این زمینه سوالات اساسی زیر مطرح است:

- ❖ ملاک‌های ارزیابی وضعیت کربن آلی خاک چیست؟
- ❖ مقدار کربن آلی در پروفیل خاک در کاربری‌ها و اقلیم‌های مختلف چقدر است؟
- ❖ روند تغییرات کربن آلی خاک در مناطق و اقلیم‌های مختلف چگونه بوده و در آینده از چه روندی تبعیت خواهد کرد؟

- ❖ ظرفیت ذخیره کربن در خاک‌های ایران به چه میزان است؟
 - ❖ تاثیر ویژگی‌های خاک (فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی) بر میزان و ظرفیت ذخیره کربن آلی در خاک چقدر است؟
 - ❖ تاثیر بلند مدت مدیریت‌های زراعی مختلف بر ذخیره و ترسیب کربن آلی در خاک تا چه میزان است؟
 - ❖ تاثیر کاربرد بلند مدت کودها و مواد آلی به‌ساز خاک در افزایش ذخیره کربن آلی و ترسیب کربن خاک چگونه است؟
 - ❖ با هدف پایداری حاصلخیزی خاک و بهبود خدمات‌رسانی زیست بوم، در اقلیم‌های مختلف، حد مطلوب میزان کربن آلی در خاک‌های زراعی کشور چقدر است؟
- در پاسخ به سوالات مطرح شده اولویت‌های پژوهشی در دو محور: 1- شناخت وضعیت و بررسی دینامیک کربن آلی خاک و 2- بهبود راهکارهای حفظ و افزایش کربن آلی خاک به شرح جدول (13) پیشنهاد می‌شود.

جدول 13- برنامه پژوهشی شناخت و مدیریت کربن آلی خاک

محور	اولویت های پژوهشی
شناخت وضعیت و بررسی دینامیک کربن آلی خاک	تعیین ملاک و روش مناسب برای شناخت وضعیت کربن آلی خاک
	شناخت مقادیر ذخیره کربن آلی خاک ها در شرایط اقلیمی مختلف
	شناخت روند تغییرات مقدار کربن آلی خاک های کشور
	کمی‌سازی تغییرات کیفیت و توان تولید خاک ناشی از تغییرات کربن آلی خاک
بهبود راهکارهای حفظ و افزایش کربن آلی خاک	ارزیابی تغییرات اقلیمی بر ذخیره کربن آلی خاک
	تعیین سطح بهینه کربن آلی در خاک ناحیه گسترش ریشه گیاهان مختلف
	مدیریت کاربرد توام کودهای آلی، زیستی و شیمیایی با هدف افزایش کربن آلی در خاک
	ارزیابی اثرات بلند مدت تناوب زراعی بر مقدار مواد آلی خاک و کربن‌گیری در اقلیم‌ها و سیستم های زراعی مختلف
بررسی تاثیر کاربرد بلند مدت مواد آلی به‌ساز خاک بر ذخیره کربن آلی، حاصلخیزی و کیفیت خاک	
بررسی تغییرات کربن آلی خاک ناشی از تغییر سامانه کشاورزی رایج به کشاورزی حفاظتی	

10- جمع‌بندی و پیشنهاد

در برنامه پایداری تولید محصول، پایداری کیفیت خاک از جمله حاصلخیزی خاک از جمله ارکان اصلی است. تا سال‌های زیادی استفاده از کودهای شیمیایی برای حفظ حاصلخیزی خاک تنها رویکرد مهم در مدیریت حاصلخیزی خاک به شمار می‌رفت. با وجود این، در دو دهه اخیر با بروز مسائل زیست‌محیطی، توجه بیشتر به جنبه‌های فیزیکی و بیولوژیکی حاصلخیزی خاک در کنار جنبه شیمیایی آن افزایش یافته است. برای دستیابی به اهداف پایداری حاصلخیزی خاک، لزوم حفظ و افزایش کربن آلی و تنوع زیستی خاک سبب تغییر در الگوواره‌های (پارادایم‌های) مدیریت حاصلخیزی خاک شده است. توجه به کربن آلی خاک در این تغییر رویکرد به دلیل نقش بی‌بدیل آن در بهبود همه فرایندها و عملکردهای خاک چون بهبود تنفس میکروبی، افزایش قطر خاکدانه‌ها، ارتقای ظرفیت نگهداری آب در خاک و افزایش قابلیت استفاده عناصر غذایی به ویژه نیتروژن، فسفر و پتاسیم، منجر به افزایش تولید محصول و پایداری آن می‌شود. خوشبختانه انتشار این نتایج سبب انعکاس موضوع افزایش ماده آلی خاک‌های ایران در برنامه‌های توسعه کشور در بخش کشاورزی گردیده است.

مطالعات نشان داده است که در 61/6 درصد خاک‌های ایران، کربن آلی در محدوده کم (0/1-5/0 درصد) و خیلی کم (کمتر از 0/5 درصد) قرار دارد. افزون‌بر این، بررسی‌های اجمالی جدید نشان از روند کاهشی مقدار کربن آلی در بیشتر مناطق کشور به ویژه نوار ساحلی دریای خزر در طول 50 سال گذشته دارد. این مساله لزوم مدیریت ماده آلی خاک را دو چندان می‌نماید. از سوی دیگر آنچه که از نظر دور مانده است رابطه مستقیم بین بهره‌وری آب در بخش کشاورزی با ذخیره مواد آلی خاک است. در حال حاضر با توجه به بحران آب در کشور حفظ و ارتقاء مواد آلی خاک از ابزارهای موثر در افزایش بهره‌وری آب به شمار می‌رود.

به دلیل اثر پذیری زیاد ماده آلی خاک از شرایط اقلیمی، خاکی و مدیریتی حفظ و افزایش کربن آلی در خاک کاری سخت و زمان‌بر است. نتایج پژوهش‌های انجام شده در کشور نشان داده است که کاربرد کودهای آلی (کمپوست پسماند شهری، کود حیوانی، کود مرغی)، به عنوان نهاده بیرونی اثر قابل ملاحظه‌ای در افزایش کربن آلی خاک دارد. با

این حال منابع آلی قابل دسترس (15/8 میلیون تن)، محدود بوده و برای افزایش کربن آلی خاک تا حد مطلوب و دست یافتنی در کل اراضی کشاورزی ایران کفایت نمی‌نماید. از این‌رو تغییر در نحوه عملیات زراعی به کشاورزی حفاظتی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. در کشاورزی حفاظتی، انجام عملیات بی‌خاکورزی، رعایت تناوب زراعی صحیح با کشت محصولات پوششی با تولید بالا، نگهداشت سطح اقتصادی از بقایای محصول در سطح خاک و همچنین اعمال مدیریت تلفیقی حاصلخیزی خاک جزو ارکان اصلی محسوب می‌شود. از سویی، با وجود پیشرفت در دانش مدیریت کربن آلی خاک، سوالات بسیاری در زمینه حد بحرانی کربن آلی در خاک، حد مطلوب و قابل دستیابی کربن آلی در خاک در اقلیم‌های مختلف کشور و پیش‌بینی روند تغییرات کربن آلی خاک و چگونگی بهبود روش‌های مدیریت کربن آلی خاک باقی مانده است که پاسخ به آن‌ها مستلزم تلاشی هماهنگ و سازمان‌یافته، مبتنی بر تقسیم کار ملی، بین موسسات تحقیقاتی و نیز دانشگاه‌های کشور است.

حفظ و افزایش کربن آلی خاک به عنوان مولفه اساسی در کیفیت منابع خاک کشور یک وظیفه حاکمیتی بوده و مستلزم به کارگیری توصیه‌های زیر است:

- 1- آموزش مستمر ذینفعان در سطوح مختلف مدیران، کارشناسان و بهره‌برداران
- 2- ترویج مدیریت بهینه منطقه‌ای کربن آلی خاک در قالب ایجاد مزارع نمایشی و سایت‌های الگویی
- 3- انجام آزمایش‌های بلند مدت با استقرار پایلوت‌های دایمی مدیریت ماده آلی خاک
- 4- حمایت از بخش خصوصی برای پیاده‌سازی و توسعه فن‌آوری‌های مرتبط با مدیریت ماده آلی خاک به ویژه فن‌آوری‌های فرآوری مواد آلی قابل استفاده در خاک
- 5- اتخاذ سیاست‌های صحیح منطبق با شرایط خاکی، اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی هر منطقه به منظور توسعه مدیریت بهینه کربن آلی خاک

منابع

- اخضری، د. و احمدی، س. 1398. اثر تبدیل اراضی مرتعی به اراضی کشاورزی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک (مطالعه موردی: روستای گنبد شهرستان همدان). علوم و تکنولوژی محیط زیست، 21: 135-146.
- بای‌پوردی، ا. 1393. تاثیر مصرف تلفیقی کودهای آلی و شیمیایی بر عملکرد اجزا عملکرد و درصد روغن و پروتئین دو رقم کلزا. گزارش نهایی، موسسه تحقیقات خاک و آب برومند، م.، قاجار سپانلو، م. و بهمنیار، م.ع. 1393. اثر تغییر کاربری اراضی بر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (مطالعه موردی: سمسکنده ساری). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، 5 (9): 78-94.
- بلالی، م.ر.، رضایی، ح. و مشیری، ف. 1393. وضعیت حاصلخیزی خاک‌های کشور و ضرورت ارتقای توان آن برای خدمات‌رسانی به تولیدات کشاورزی. ص. 17-48. در کتاب: خوازی، ک. و همکاران (نویسندگان). برنامه جامع حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه در راستای افزایش خود ا تکایی محصولات زراعی راهبردی 1393-1404. جلد اول، موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.
- جنیدی جعفری، ح.، نظری، ز.، کرمی، پ. و قلی‌نژاد، ب. 1393. تاثیر تبدیل مرتع به دیمزار بر هدر رفت کربن آلی و ازت خاک در مراتع حومه سنندج. پژوهش‌های فرسایش محیطی، جلد 15، 19-32.
- حسین‌خانی، ح. 1393. ضایعات هرس نخل در تولید تخته فیبر با دانسیته متوسط (MDF) در مقیاس نیمه صنعتی. تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، 29، 591-604.
- خادم، س.، رمرودی، م.، گلوی، م. و روستا، م. 1390. تاثیر تنش خشکی و کاربرد نسبت‌های مختلف کود دامی و پلیمر سوپر جاذب بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت دانه‌ای (*Zea mays L.*). مجله علوم گیاهان زراعی ایران (علوم کشاورزی ایران). 42: 115-123.
- خوگر، ز.، محمدزاده، ا.، جواهری، ا. و سماوات، س. 1389. بررسی افزایش ماده آلی خاک (از طریق کود سبز) در کاهش مصرف کود نیتروژنه در تناوب گندم - چغندر قند در پلات ثابت. نشریه شماره 1545. موسسه تحقیقات خاک و آب.

- خوگر، ز، ضیائی، ع، دهقانیان، م، ساریخانی، ش، جوکار، ل، فتح اله زاده، ع، و دزفولی، ا. 1394. تعیین مقادیر مناسب نیتروژن در سیستم کم خاکورزی تحت شرایط مختلف رطوبتی برای زراعت گندم. نشریه شماره 48574. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.
- داودی، ح، 1396. ارتباط بین کربن آلی و مواد آلی کل در کودهای آلی. نشریه شماره 2103. موسسه تحقیقات خاک و آب.
- دلاوری، م، و کشاورز، پ. 1385. بررسی اثر منابع و سطوح مختلف کود آلی بر عملکرد و ترکیب شیمیایی ذرت علوفه‌ای در سه نوع بافت خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد واحد مشهد.
- دولفقاری، ع، ا، و حاج عباسی، م، ع. 1387. تاثیر تغییر کاربری اراضی بر خصوصیات فیزیکی و آبریزی خاک در مراتع فریدون شهر و جنگل‌های لردگان. 22، 251-262.
- رضایی، ح. 1392. مروری بر تحقیقات کاربرد کودهای دامی در اراضی کشاورزی ایران. مدیریت اراضی. 1، 55-68.
- رضائی، م، اسدی، ا، مجدنصیری، ا، و حقیقت، ب. 1389. بررسی اثرات خاکورزی و مدیریت بقایای گیاهی بر میزان پایداری خاکدانه‌ها و مواد آلی خاک، اولین همایش ملی کشاورزی پایدار و تولید محصول سالم، اصفهان.
- رضائیان باجگیران، س. 1388. بررسی تأثیر کودهای شیمیایی محتوی عناصر آهن، روی و کود حیوانی و اثر متقابل آنها بر عملکرد کمی و کیفی زعفران. گزارش نهایی. موسسه تحقیقات خاک و آب.
- زلفی باوریانی، م. 1385. بررسی اثر کود حیوانی بر قابلیت استفاده و بازیابی فسفر باقیمانده. نشریه شماره 1291. موسسه تحقیقات خاک و آب.
- سالمی، ح، میرهادی، س، ا، نوروزیان، ح، و خورشیدیان، ک. 1379. تاثیر استفاده از سرشاخه غنی شده درت خرما در جیره‌های غذایی بزغاله‌های پرواری استان بوشهر. پژوهش و سازندگی، 47، 87-89.
- سعادت، س. 1384. بررسی تاثیر مواد آلی از منابع مختلف بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد محصول. نشریه شماره 1207. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.

سماوات، س. 1396. بررسی اثر کاربرد کودهای آلی مختلف بر خواص شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک تحت کشت تناوب گندم- ذرت. گزارش نهایی، موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.

سماوات، س. 1394. برنامه پژوهشی ارتقای و بهبود مواد آلی خاک‌های کشور. گزارش نهایی پروژه. نشریه شماره 1993. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.

سماوات، س.، طهرانی، م.م.، بازرگان، ک. و بصیرت، م. 1393. دستورالعمل نحوه بررسی مواد آلی. شماره نشریه 46316. موسسه تحقیقات خاک و آب، کرج، ایران.

شاملو، م. 1351. کودهای آلی. نشریه شماره 321. موسسه تحقیقات خاک و آب.

عبادزاده، ح.، احمدی، ک.، محمدنیا افروزی، ش.، عباس طاقانی، ر.، مریم عباسی، م. و یاری، ش. 1397. آمارنامه کشاورزی. جلد دوم. مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران.

فرزاد کیا، م.، فلاح جوکندان، س. و یگانه بادی، م.، 1394. مدیریت کمپوست در ایران: فرصت‌ها و چالش‌ها. مجله مهندسی بهداشت محیط، 3، 223-211.

کاظمینی، س.ع.، غدیری، ر.ح.، کریمیان، ن.ع.، کامگار حقیقی، ع.ا. و خردنام، م. 1387.

اثر برهمکنش نیتروژن و مواد آلی بر رشد و عملکرد گندم دیم (aestivum Triticum).

مجله علوم آب و خاک - علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. 12:45. 461-472.

کریمی، ر.، صالحی، م.ح. و رئیسی، ف. 1391. تاثیر کاربری اراضی بر برخی از ویژگی‌های

فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه صفاشهر استان فارس. اولین همایش ملی بیابان.

مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشگاه تهران، ایران.

کشاورز، پ.، زنگی آبادی، م. و عباس‌زاده، م. 1392. تاثیر میزان رس و شوری خاک بر

رابطه کربن آلی خاک با عملکرد گندم. مجله پژوهش‌های خاک، 27:3، 259-271.

کشاورز، پ.، داودی، م.ح.، رجب‌پور، ب.، خوازی، ک. 1393. مواد آلی، اهمیت و راهکارهای

حفظ و ارتقاء آن در خاک‌های زراعی کشور. 50-69 در کتاب: خوازی، ک. و همکاران

(نویسندگان). برنامه جامع حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه در راستای افزایش خود

اتکایی محصولات زراعی راهبردی 1393-1404. جلد اول، موسسه تحقیقات خاک و

آب، کرج، ایران.

گلچین، ا، اسماعیلی، م. و ملکوتی، م. ج. 1378. تاثیر مواد آلی، منگنز و مس و عملکرد و کیفیت گندم آبی در استان‌های سردسیر. نشریه شماره 1074. موسسه تحقیقات خاک و آب.

لطفی، ی، نوربخش، ف. و افیونی، م. 1386. پتانسیل معدنی شدن نیتروژن در یک خاک آهکی تیمار شده با دونوع کود آلی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. 19:42

مجیدی، ع، ثرابی، ع. و ملکوتی، م. ج. 1378. اثر مقادیر و منابع کودی روی و کمپوست بر عملکرد و جذب روی در گندم آبی. نشریه شماره 1073. موسسه تحقیقات خاک و آب. محمدزاده، ا. 1386. اثرات کودهای سبز و آلی بر خصوصیات خاک و عملکرد سیب‌زمینی، دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج.

محمدزاده بصیر، ع. 1359. نتایج آزمایش‌های کودهای شیمیایی بر روی سیب‌زمینی در منطقه عجب‌شیر مراغه (1342-1348). نشریه شماره 570. موسسه تحقیقات خاک و آب.

محمودزاده، ح. شکل آبادی، م. و محبوبی، ع. ا. 1393. اثر تغییر کاربری زمین بر اندوخته-های کربن آلی خاک در زمین‌های حاشیه دریاچه زریبار مریوان. نشریه علوم آب و خاک. 18: 55-68.

مختاری کرچگانی، پ، ایوبی، ش، مصدقی، م. و ملکیان، م. 1390. اثر شیب و تغییر کاربری اراضی بر ذخایر مواد آلی خاک در اجزا اندازه‌ای ذرات و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در اراضی تپه ماهوری لردگان. مجله الکترونیک مدیریت خاک و تولید پایدار. 1(1). 23-41.

مشیری، ف. 1396. بررسی تاثیر مقادیر و منابع مختلف کودهای آلی در تامین فسفر مورد نیاز در تناوب گندم- ذرت. گزارش نهایی. نشریه شماره 2072. موسسه تحقیقات خاک و آب.

مشیری، ف. 1397. گزارش فعالیت‌های موسسه تحقیقات خاک و آب در اجرای بند "ز" ماده 143 قانون برنامه پنجم توسعه کشور. نشریه شماره 2179. موسسه تحقیقات خاک و آب.

مشیری، ف. و سماوات، س. 1396. مدیریت کربن آلی خاک در اراضی کشاورزی ایران، چالشها و راهکارها. مجموعه مقالات پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

میرزاشاهی، ک. 1386. تاثیر استفاده توام مواد آلی (کود حیوانی) و کودهای شیمیایی بر عملکرد ذرت رقم سینگل کراس 704 و مواد آلی خاک. نشریه شماره 1540. موسسه تحقیقات خاک و آب.

میرزاشاهی، ک. 1396. بررسی ادواری کربن آلی خاک در دشت خوزستان و ارایه راهکارهای ترویجی. نشریه علمی ترویجی مدیریت اراضی، جلد 5، شماره 1-12.

میرزاشاهی، ک.، پاک‌نژاد ع. و امیدواری ش. 1395. تأثیر تناوب زراعی و مدیریت مصرف نیتروژن و پسماند گیاهی بر عملکرد ذرت رقم سینگل کراس 704 و برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). 30:2. 115-124.

میرزاشاهی، ک. و سعادت، س. 1389. تأثیر نوع و مقادیر کودهای آلی توام با کودهای شیمیایی بر عملکرد محصول و کربن آلی خاک در یک تناوب زراعی رایج در شمال خوزستان. مجله پژوهش و سازندگی، جلد 23، شماره 4.

میرزاشاهی، ک. و سعادت، س. 1389. تأثیر مواد آلی مختلف بر عملکرد کلزا و برخی خصوصیات شیمیایی خاک در شمال خوزستان. پژوهش‌های خاک. 24 (1): 21-29.

میرزاوند، ج. 1394. ارزیابی برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، هیدرولیکی و ضرایب معادلات نفوذ آب به خاک تحت تأثیر روش‌های شخم، مدیریت بقایا و نوع کشت. رساله دکتری، دانشگاه شیراز.

وراوی پور، م. (ترجمه). 1385. مدیریت پایدار ماده آلی خاک. ریس، آر. ام.، بال، بی. سی. کمپیل، سی. دی.، واتسون، سی. ای. انتشارات دانشگاه تهران.

Auerswald, K., Kainz, M. and Fiener, P. 2003. Soil erosion potential of organic versus conventional farming evaluated by USLE modelling of cropping statistics for agricultural districts in Bavaria. Soil Use and Management. 19. 305 - 311.

Baldock, J.A. and Nelson, P.N. 1999. Soil Organic Matter. Handbook of soil science. Summer, M.E. pp. 25-84. CRC Press.

Baldock, J.A. and Broos, K. 2011. Soil organic matter. Handbook of Soil Sciences: Resource Management and Environmental Impacts, second ed. CRC Press, Boca Raton, Fl, pp. 1-52 (Chapter 11).

- Balesdent, J., Chenu, C. and Balabane, M. 2000. Relationships of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53: 215-230.
- Banwart, S.A., Black, H., Cai, Z., Gicheru, P.T., Joosten, H., Victoria, R.L., Milne, E., Noellemeyer, E. and Pascual, U. 2015. The global challenge for soil carbon. In: Banwart, S.A. and Noellemeyer, E. (eds.). *Soil carbon: science, management and policy for multiple benefits*. CABI Int.
- Batino, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B. and Kimetu, J. 2007. Soil organic carbon dynamics, functions and management in west African agro-ecosystems. *Agricultural systems*, 97, 13-25.
- Berhe, A. 2012. Persistence of soil organic matter in eroding versus depositional landform positions. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Bohn, H.L., McNeal, B.L. and O'Connor, G.A. 2001. *Soil Chemistry* (3rd ed., p. 307). New York. John Wiley & Sons.
- Bolan, N.S., Szogi, A.A., Chuasavathi, T., Seshadri, B., Rothrock, M. J. and Panneerselvam, P. 2010. Uses and management of poultry litter. *World's Poultry Science Journal*, 66, 673-698.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. 2002. *The Nature and Properties of Soils*, 13th edition, Prentice Hall.
- Bunemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., Deyn, G.D., Goede, R.D., Flesskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mader, P., Pulleman, M., Sukkel, W., Groenigen, J. and Brussaard, L. 2018. Soil quality- A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 105-125.
- Celik, I. 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83: 270-277.
- Chatterjee, A., Lal, R., Wielopolski, L., Martin, M.Z. and Ebinger, M.H., 2009. Evaluation of different soil carbon determination methods. *Critical Reviews in Plant Science*. 28:164-178.
- Cheng, Sh., Huajun, F., Tianhong, Z., Jiaojiao, Z., Xueming, Y., Xiaoping, Z. and Guirui, Y. 2010. Effects of soil erosion and deposition on soil organic carbon dynamics at a sloping field in Black Soil region, Northeast China. *Soil Science and Plant Nutrition*, 56(4), pp.521 to 529.
- Conant, R.T., Cerri, C.E.P., Osborne, B.B. and Paustian, K. 2001. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*. 11(2): 343-355.
- Conforti, M., Buttafuoco, G., Leone, A., Aucelli, P., Robustelli, G. and Scarciglia, F. 2013. Studying the relationship between water-induced soil erosion and soil organic matter using Vis-NIR spectroscopy and geomorphological analysis: A case study in southern Italy. *Catena*. 110. 44-58.

- Courtier-Muriasa, D., Simpsona, A.J., Marzadorib, C., Baldonib, G., Ciavattab, C., Fernándezc, J.M., López-de-Sác, Er. G. and Plaza, C. 2013. Unraveling the long-term stabilization mechanisms of organic materials in soils by physical fractionation and NMR spectroscopy. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 171: 9–18.
- Cresser, M.S., Gonzalez, R.L. and Leon, A. 2007. Evaluation of the soil depth and parent material data when predicting soil organic carbon concentration from LOI values. *Geoderma*, 140: 132-139.
- Davidson, E.A. and Ackerman, I.L. 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soil. *Biogeochemistry*, 20: 161–193.
- Dewan, M.L. and Famouri, J. 1964. The Soils of Iran. FAO.
- Diaz-Zorita, M., Buschiazzo, D.E. and Peinemann, N. 1999. Soil organic matter and wheat productivity in the semi-arid Argentina Pampas. *Agronomy Journal*, 91:276–279.
- Doetterl, S., Van Oost, K. and Six, J. .2012. Towards constraining the magnitude of global agricultural sediment and soil organic carbon fluxes. *Earth Surface Processes And Landforms* 37, 642–655.
- FAO and ITPS. 2015. Status of the world's soil resources. Technical Summary. Food and agricultural Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- FAO. 2017. Unlocking the potestial of soil organic carbon. Outcome document of the global symposium on soil organic carbon. FAO Headquarter, Rome. Italy.
- FAO. 2005. The importance of soil organic matter FAO soil bulletin 80.
- Faucette, L.B., Jordan, C., Risse, L.M., Cabrera, M., Coleman, D. and West, L. 2005. Evaluation of stormwater from compost and conventional erosion control practices in construction activities. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60, 288-297.
- Frelih-Larsen, J. 2014. Soil carbon management for climate change mitigation and adaptation: framing and integrating the issue in the evolving policy environment. IFA.
- Gregorich, E., Greer, K., Anderson, D. and Liang, B. 1998. Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects. *Soil Till Res* 47, 291–302.
- Guerra, A. 2007. The effect of organic matter content on soil erosion in simulated rainfall experiments in W. Sussex, UK. *Soil Use and Management*. 10. 60 - 64.
- Handbook (NRAES-132). Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service, Cooperative Extension, 152 Riley-Robb Hall, Ithaca, NY 14853-5701.

- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- IPCC. 2007. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Ismail-Meyer, K., Stolt, M.H. and Lindbo, D.L. 2018. Soil organic matter. pp. 471-512. In: Stoops, G., et al. (Eds.). Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Izaurrealde, R.C. and Cerri, C.C. 2006. Organic matter management. pp. 1189-1195. In: R. Lal (Ed.). Encyclopedia of soil science, 2nd edition, Vol. 2. Taylor and Francis, CRC Press, Boca Raton, FL., USA
- Izaurrealde, R.C. and Cerri, C.C. 2002. Organic matter management. In: Encyclopedia of soil science, pp. 910-916. New York, USA, Marcel Dekker Inc.
- Jat, H.S., Datta, A., Choudhary, M., Yadav, A.K., Choudhary, V., Sharma, P.G., Gathala, M.K., Jat, M.L and McDonald, A. 2019. Effects of tillage, crop establishment and diversification on soil organic carbon, aggregation, aggregate associated carbon and productivity in cereal systems of semi-arid Northwest India. Soil and Tillage Research, 190: 128-138.
- Jakab, G., Szabó, J. and Szalai, Z. 2016. Changes in organic carbon concentration and organic matter compound of erosion-delivered soil aggregates. Environ Earth Sci 75, 144.
- Kadlec, V., Holubík, O., Procházková E., Urbanová J. and Tipl, M. 2012: Soil organic carbon dynamics and its influence on the soil erodibility factor. Soil & Water Res., 7: 97-108.
- Kaiser, K. and Guggenberger, G. 2007. Sorptive stabilization of organic matter by microporous goethite: sorption into small pores vs surface complexation. European Journal of Soil science, 58: 45-59.
- Kanchikerimath, M. and Singh, D. 2001. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semi-arid region of India. Agriculture, Ecosystems and Environment, 86:155-162.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F. and Schuman, G.E. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:4-10

- Kay, B.D. and Angers, D.A. 1999. Soil Structure. In: Handbook of Soil Science. Sumner, M.E. pp. 229-276. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Kennedy, A.C. and Papendick, R.I. 1995. Microbial characteristics of soil quality. Soil and Water Conservation Journal, 50: 243-248.
- Krull, E.S., Baldock, J.A. and Skjemstad, J.O. 2003. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for modeling carbon turnover. Functional Plant Biology. 30: 207-222.
- Krull, E.S. Skjemstad, J.O. and Baldock, J. 2004. Functions of soil organic matter and the effect on soil properties. Report for GRDC, Project CSO00029.
- Kwiatkowska-Malina, J. 2018. Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. Applied Soil Ecology. Volume 123. PP, 542-569
- Lal, R. 2002. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. Environmental Pollution. 116: 353-362.
- Lal, R. 2006. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. Land Degradation & Development, 17:197-209.
- Lal, R. 2008. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. Nutrient. Cycle. Agroecosystems. 81: 113-127.
- Lal, R. and Stewart, B.A. 2010. Food security and soil quality. CRC press. London.
- Lal, R., Lorenz, K., Huttl, K., Schneider, R.F. and von Braun, B.U. 2013. Ecosystem services and carbon sequestration in the biosphere. Springer, the Netherland.
- Lal, R. 2013. Soil carbon management and climate change. Carbon Management, 4: 439-462.
- Lal, R. 2015. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. Sustainability. 7: 5875-5895.
- Larney, F.J., Janzen, H.H, Olson, B.M. and Lindwall, C.W. 2000. Soil quality and productivity response to simulated erosion and restorative amendments. Canadian Journal of Soil Science, 80: 515-522.
- Le Quere, C. 2016. Global carbon budget 2016. Earth System Science Data, 8: 605-649.
- Lefevre, C., Rekik, F., Alcantara, V. and Wiese, L. 2017. Soil organic carbon: the hidden potential. FAO, Rome. Italy.
- Liu, M., Han, G. and Zhang, Q. 2019. Effects of Soil Aggregate Stability on Soil Organic Carbon and Nitrogen under Land Use Change in an Erodible Region in Southwest China. International journal of environmental .

- Lorenz, K. and Lal, R. 2018. Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems. Springer.
- Lorenz, K., Lal, R. 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34:443-454.
- Magdoff, F. and Weil, R.R. 2004. Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC press.
- Mahal, N.K. 2019. Nitrogen fertilizer suppresses mineralization of soil organic matter in maize agroecosystems. *Front. Ecol. Evol.* 7, 59.
- Maia S.M.F., Ogle S.M., Carlos C.C. and Carlos, E.P.C. 2010. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 106: 177-184.
- McBratney, A.B., Stockmann, U., Angers, D.A., Minasny, B. and Field, D.J. 2014. Challenges for Soil Organic Carbon Research. In: Hartemink, A. E. and McSweeney, K. (eds.). *Soil carbon*. Springer Int. Pub., Switzerland.
- Momeni, A. 2000. Production capacity of land resources of Iran. *Soil and Water Research Institute of Iran. Pub. No. 1110*, Tehran, Iran.
- Moshiri, F., Samavat, S. and Balali, M.R. 2017. Soil Organic Carbon: A Key Factor of Sustainable Agriculture in Iran. *Global symposium on soil organic carbon*. 21-23, FAO, Rome, Italy.
- Mrabet, R., Saber, N., El Brahli, A., Lahlou, S. and Bessam, F. 2001. Total, particulate organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotation and tillage systems in semiarid areas of Morocco. *Soil Till. Res.*, 57: 225-235.
- Müller-Nedebock, D, Chivenge, p. and Chaplot, V. 2016. Selective organic carbon losses from soils by sheet erosion and main controls. *Earth Surface Processes and Landforms*. 41(10): 1399-1408.
- Nieder, R. and Bendi, D.K. 2008. Carbon and nitrogen in the terrestrial environment. Springer, Berlin, Germany.
- Obalum, S.E., Chibuike, G.U. Peth, S. and Ouyang, Y. 2017. Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 189. 10.1007/s10661-017-5881-y.
- Oldfield, E.E., Bradford, M.A. and Wood, S.A. 2019. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields. *Soil*, 5: 15-32.
- Paige, L.S., Jason, E.R., David, K.B., Marcia, S.D. and Michael, W.H. 2018. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in Midwestern USA beef finishing systems. *Agricultural Systems*. Volume 162. Pages 249-258.

- Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T and Hunt, H.W. 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 48: 147-163.
- Paustian, K., Parton, W.J. and Persson, J. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil Science Society of America Journal* 56, 476-488
- Plaza, C., Courtier-Murias, D., Fernández, J.M. Polo A. and Simpson, A. J. 2013. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*. 57 -124-134.
- Salahin, N. and Alam K.h. 2017. Effect of Tillage and Residue Retention on Soil Properties and Crop Yields in Wheat-Mungbean-Rice Crop Rotation under Subtropical Humid Climate. *Open Journal of Soil Science*, 7, 1-17
- Sanaullah, M., Chabbi, A., Leifeld, J., Bardoux, G., Billou, D. and Rumpel, C. 2010. Decomposition and stabilization of root litter in top- and subsoil horizons: what is the difference? *Plant Soil* 338, 127–141.
- 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.
- Schietecatte, W., Gabriels, D., Cornelis, A. and Hofman, G. 2008. Impact of deposition on the enrichment of organic carbon in eroded sediment. *Catena*, 72: 340-347.
- Schnitzer, M. 2004. Organic matter, principles and processes. pp. 85-93. *In*: Hillel, D.,. *Encyclopedia of soils in the environment*, vol. 3, Academic press, Elsevier, Germany.
- Schnitzer, M. 2000. A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. pp. 3-58. *In*: D. L. Sparks (Ed.). *Advances in agronomy*, Vol. 68. Academic Press, San Diego, USA.
- Sparling, G.P., Wheeler, D., Vesely, E.T. and Schipper, L.A. 2006. What is soil organic matter worth? *Journal of Environment Quality*, 35: 548–557.
- SSSA (Soil Science Society of America). 2020. *Glossary of soil science terms*. Madison WI, USA.
- Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A.B., de Courcelles, V.R., Singh, K., Wheeler, I., Abbott, L., Angers, D.A., Baldock, J., Bird, M., Brookes, P.C., Chenu, C., Jastrow, J.D., Lal, R., Lehmann, J., O'Donnell, A.G., Parton, W.J., Whitehead, D. and Zimmermann, M. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 164: 80– 99.

- Totsche, K.U., Renner, T., Gerzabek, M.H., Kogel-knaber, I., Smalla, K., Spiteller, M. and Vogel, H.. 2010. Biogeochemical interfaces in soil: the interdisciplinary challenge for soil science. *J. Plant Nutri. Soil Sci.* 173: 88-99.
- Trumbore, S.E. and Czimczik, C.I. 2008. An uncertain future for soil carbon. *Science*, 321, 1455-1456.
- UNCCD-SPI. 2015. Pivotal Soil Carbon. Science-Policy Brief 01.
- Vanlauwe, B., Kihara, J., Chivenge, P., Pypers, P., Coe, R. and Six, J. 2011. Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of Integrated Soil Fertility Management. *Plant and Soil*, 339, 35-50.
- Várallyay, G. 2010. The impact of climate change on soils and on their water management. *Agronomy Research* 8 (Special Issue II), 385–396
- Victoria, R., Banwart, S.A., Black, H., Ingram, J., Joosten, H., Milne, E. and Noellemeyer, E. 2012. The benefit of soil carbon. *UNEP Year Book, United Nations Environmental programme*.
- Wang, Z., Liu, G., Xu, M., Zhang, j., Wang, Y. and Tang, L. 2012. Temporal and spatial variation in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly loess plateau, China. *Catena*, 99: 26-33.
- Wang, X.F.J., Sainju, U.M. and Liu, W. 2017. Soil Carbon Fractions in Response to Long-Term Crop Rotations in the Loess Plateau of China. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81(3): 503-513.
- West, T.O. and Post, W.M. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 66:1930-1946.
- Wuest, S.B. and Gollany, H.T. 2012. Soil Organic Carbon and Nitrogen After Application of Nine Organic Amendments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:237–245.
- Yan, D., Li, J. and Pei, J. 2017. The temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition is greater in subsoil than in topsoil during laboratory incubation. *Sci Rep* 7, 5181
- Ye, L., Tang, H., Zhu, J. and Verdoodt, A. 2008. Spatial patterns and effects of soil organic carbon on grain productivity assessment in China. *Soil Use and Management* 24(1):80-91.
- Zech, A., Noellemeyer, E. and Tiesseen, H. 2006. Carbon turnover and ^{13}C natural abundance under land use change in semi-arid La Pampa, Argentina *Soil Science Society of America Journal*, 70: 1541-1546.



Islamic Republic of Iran



Ministry of Agriculture - Jihad
Agricultural Research, Education & Extension Organization
Soil & Water Research Institute (SWRI)



Soil Organic Matter and Its Role in Agriculture in Iran Explaining the Status, Analyzing Problems and Challenges, Providing Solutions

Authors

**Farhad Moshiri¹, Hossein Saffari¹, Payman Keshavarz²,
Neda Zahedifard³**

¹Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj

²Associate Professor, Razavi Khorasan Agricultural and Natural Resources Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Mashhad

³Senior Research Instructor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj

Register No: 608

2021