

برآورد میزان ترسیب کربن در بوم‌نظام‌های زراعی ایران با استفاده از مدل‌های تجربی

الهه برومند رضازاده^۱، علیرضا کوچکی^{۲*}، پرویز رضوانی مقدم^۲، مهدی نصیری محلاتی^۲ و امیر لکزیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴

برومند رضازاده، ا، کوچکی، ع، رضوانی مقدم، پ، نصیری محلاتی، م، و لکزیان، ا. ۱۳۹۸. برآورد میزان ترسیب کربن در بوم‌نظام‌های زراعی ایران با استفاده از مدل‌های تجربی. بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۱(۱): ۱۰۳-۱۲۲.

چکیده

ترسیب کربن به معنای افزایش دائمی ذخیره کربن در خاک، ماده گیاهی یا آب بوده و خاک به عنوان بزرگ‌ترین مخزن کربن در بوم‌نظام‌های خشکی دنیا، نقش مهمی در چرخه جهانی کربن دارد. هدف این مطالعه، مدل‌سازی رابطه سرعت تجزیه بقایای گیاهان زراعی با رژیم‌های رطوبتی خاک و نسبت کربن به نیتروژن بقایا و نیز محاسبه میزان کربن قابل ترسیب در کشت آبی پنج محصول زراعی عمده در ایران بود. به همین منظور تجزیه بقایای گیاهی گندم (*Triticum aestivum* L.)، ذرت (*Zea mays* L.)، کلزا (*Brassica napus* L.)، پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) و سویا (*Glycine max* L.) در رژیم‌های مختلف رطوبتی خاک طی ۳۹۰ روز انکوباسیون مورد مطالعه قرار گرفت و از داده‌های حاصله برای مدل‌سازی تجزیه بقایا استفاده گردید. همچنین محاسبه میزان کربن قابل ترسیب در این محصولات در پنج سال زراعی بر اساس عملکرد، شاخص برداشت و نسبت اندام‌های هوایی به ریشه در سه سناریوی بازگشت کامل بقایا، بازگشت ۵۰ درصد بقایا و حذف کامل بقایای اندام‌های هوایی و سه سناریوی رطوبتی ۱۰۰، ۶۰ و ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه انجام شد. مقایسه میزان کربن قابل ترسیب در استان‌های مختلف نشان داد که در کشت گندم: استان‌های کرمانشاه و سیستان و بلوچستان، ذرت: قزوین و خراسان جنوبی، کلزا: اصفهان و بوشهر، پنبه: آذربایجان شرقی و هرمزگان، سویا: اردبیل و آذربایجان شرقی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار کربن قابل ترسیب را دارا بودند. با افزایش میزان رطوبت از ۳۰ به ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه و همچنین با کاهش درصد برگشت بقایا به خاک از ۱۰۰ به ۵۰ درصد و حذف کامل بقایا، میزان کربن قابل ترسیب در خاک همه محصولات مورد مطالعه کاهش یافت. در بین محصولات مورد مطالعه، ذرت و سویا به ترتیب از بالاترین و پایین‌ترین میزان کربن قابل ترسیب برخوردار بودند. همچنین، در بین استان‌های مختلف از نظر مجموع کربن قابل ترسیب محصولات مورد مطالعه، استان اردبیل بیشترین و استان سیستان و بلوچستان کمترین مقدار کربن قابل ترسیب در خاک را دارا بودند.

واژه‌های کلیدی: بازگشت بقایا، درصد تجزیه، رطوبت خاک

مقدمه

۶۰ درصد اثر گلخانه‌ای به این گاز نسبت داده می‌شود. از آنجایی که در شرایط تغییر اقلیم، درجه‌حرارت جو و الگوی بارندگی تغییر یافته و این دو عامل بیشترین تأثیر را در بخش کشاورزی دارند، لذا پتانسیل کشاورزی مناطق مختلف به شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفته و این آثار در مناطق خشک و نیمه خشک جهان نظیر ایران محسوس‌تر است (Nassiri Mahallati & Koocheki, 2006). نتایج بررسی‌های روزنویگ و پاری (Rosenzweig & Parry, 1994) حاکی از کاهش ۲۰ تا ۴۰ درصدی عملکرد غلات دیم در ایران تا سال ۲۰۸۰ میلادی می‌باشد. به دلیل مشکلاتی که در نتیجه تغییرات اقلیمی در نظام‌های کشاورزی بوجود خواهد آمد (Menzel & Fabian, 1999; Nassiri Mahallati & Koocheki, 2006)، لزوم مقابله با شرایط تغییر اقلیم

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای نظیر دی‌اکسیدکربن، متان، اکسیدهای نیتروژن، کلروفلوروکربن‌ها و ازن (Fishman, 2003; Hardy, 2003) سبب افزایش دمای سطح زمین یا به عبارتی پدیده گرمایش جهانی و تغییر اقلیم شده (Scorer, 2002) و در این بین، اهمیت گاز دی‌اکسیدکربن بیش از سایر گازها است، بطوری که حدود

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دکتری زراعت اکولوژی گیاهان زراعی، استاد گروه اگروتکنولوژی و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد (*- نویسنده مسئول: Email: akooch@um.ac.ir)

مواد و روش‌ها

مطالعه آزمایشگاهی

این مطالعه در سال ۱۳۸۷ در دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد بصورت آزمایش کرت‌های خرد شده در زمان در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به اجرا در آمد. فاکتورهای آزمایش عبارت بودند از: ۱- پنج نوع بقایای گیاهی شامل گندم، کلزا، ذرت دانه‌ای، سویا و پنبه و شاهد بدون بقایا، ۲- رژیم رطوبتی خاک شامل سه سطح ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه و ۳- زمان نمونه‌گیری با فواصل ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۹۰، ۱۴۰، ۱۹۰، ۲۴۰، ۲۹۰، ۳۴۰ و ۳۹۰ روز پس از شروع انکوباسیون. بقایای گیاهی و رطوبت خاک بصورت فاکتوریل در کرت اصلی و زمان در کرت فرعی منظور شد.

بقایای گیاهی مورد استفاده در مرحله رسیدگی و پس از برداشت محصول از مزرعه جمع‌آوری گردید. بقایای گندم، ذرت و سویا از مزارع مشهد و بقایای کلزا و پنبه به ترتیب از مزارع نیشابور و جلگه رخ تهیه شد. برای بررسی تجزیه بقایای گیاهی از اندام‌های هوایی و ریشه گیاه به نسبتی که در جدول ۱ آورده شده است، استفاده شد (Li et al., 1994; Yan et al., 2007). محتوی نیتروژن بقایای گیاهی به روش هضم مرطوب با اسید سولفوریک (Bremner, 1970) و میزان کربن بقایای گیاهی به روش والکی و بلک (Walkley & Black, 1934) اندازه‌گیری شد.

روش اجرای آزمایش

به منظور بررسی میزان و روند تجزیه بقایای گیاهی از روش کیسه لاشبرگ^۲ استفاده شد (Hemwong et al., 2008; Vazquez et al., 2003). بدین صورت که بقایای گیاهی به قطعاتی به طول یک سانتی‌متر خرد شده و سپس ۱۲۰۰ میلی‌گرم از آنها (شامل اندام هوایی و ریشه گیاه) در داخل کیسه‌هایی با منافذ ۰/۵ میلی‌متری ریخته شده و درون ظرف‌های پلاستیکی که حاوی ۱۰۰ گرم خاک عبور داده شده از الک دو میلی‌متری بود، قرار داده شدند. برای تیمار شاهد از کیسه بدون بقایا استفاده گردید. به منظور تهویه مناسب و در عین حال جلوگیری از خشک شدن سریع خاک روی در ظروف منافذی ایجاد و در ظرف‌ها بسته شد. سپس ظروف درون انکوباتور با دمای ثابت ۲۵ درجه سانتیگراد و شرایط تاریکی قرار گرفتند.

به منظور اطمینان از مرطوب شدن تمامی خاک داخل ظرف و بقایای گیاهی، در اولین آبیاری تمامی تیمارها به ظرفیت مزرعه رسانده شد و در مراحل بعدی کاهش رطوبت اعمال گردید. برای اعمال تیمارهای رطوبت خاک از روش وزنی استفاده شده و رطوبت مورد نیاز نمونه‌ها هر ۷-۵ روز یک‌بار تأمین شد. نمونه‌برداری طی

و افزایش دی‌اکسیدکربن و نیز سازگاری نظام‌های کشاورزی به این شرایط به شدت احساس می‌شود. راهکارهایی که در این رابطه مطرح می‌باشد، در قالب کاهش تولید دی‌اکسیدکربن و یا حذف آن از اتمسفر است. کاهش تولید دی‌اکسیدکربن از طریق کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی در نتیجه بهبود کارایی مصرف انرژی و نیز استفاده از منابع انرژی جایگزین نظیر سوخت‌های زیستی است. همچنین حذف کربن از اتمسفر از طریق ذخیره آن به شکل زیست‌توده در اندام‌های گیاهی و یا خاک به عنوان بزرگ‌ترین مخزن کربن بوم‌نظام‌های خشکی و وارد کردن کربن آلی به درون خاک در قالب بقایای گیاهی و استفاده از کودهای آلی در نظام‌های کشاورزی است که از آن تحت عنوان ترسیب کربن یاد می‌شود (Chen et al., 2007; Lal, 2002; Parshotam et al., 2001). تخمین زده شده است که سطح زیر کشت گیاهان زراعی در کل دنیا ۱/۷ میلیارد هکتار است که این سطح می‌تواند حدود ۱۷۰ پتا گرم^۱ کربن در خود ذخیره کند (Paustian et al., 2000).

ترسیب کربن که بصورت بالقوه یا پتانسیل، قابل حصول و واقعی قابل بررسی می‌باشد، فرآیند پیچیده‌ای است که تحت تأثیر عوامل مختلف قرار دارد. در ترسیب کربن بالقوه حداکثر مقدار ممکن ذخیره کربن در خاک، در ترسیب کربن قابل حصول یا کربن قابل ترسیب عوامل محدود کننده میزان ورود کربن به خاک و در ترسیب کربن واقعی عوامل کاهش دهنده ذخیره کربن مدنظر است. از آنجایی که تفاوت کربن ورودی ناشی از بقایای گیاهی و شرایط اقلیمی بین مناطق مختلف زیاد است، بنابراین یکی از شیوه‌های منطقی تخمین ترسیب کربن در مقیاس وسیع، استفاده از روش‌های مدل‌سازی است که بتواند با در نظر گرفتن شرایط موجود اقلیمی و نوع گیاهان کشت شده، ترسیب کربن را در سطح منطقه‌ای یا ملی ارزیابی نماید.

هدف این مطالعه بررسی توانایی بقایای پنج محصول زراعی عمده، گندم (*Triticum aestivum* L.)، کلزا (*Brassica napus* L.)، ذرت دانه‌ای (*Zea mays* L.)، سویا (*Glycin max* L.) و پنبه (*Gossypium hirsutum* L.) و بوم‌نظام‌های زراعی کشور در ترسیب کربن در خاک، مطالعه اثر رطوبت خاک بر سرعت تجزیه و مقایسه روند تجزیه بقایای گیاهان زراعی مختلف در طی زمان و یافتن رابطه بین سرعت تجزیه نسبی بقایای گیاهان زراعی با میزان رطوبت خاک و نسبت کربن به نیتروژن بقایا بود.

۱- پتا گرم = ۱۰^{۱۵} گرم

شستن بقایا و خشک کردن در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید.

زمان صورت گرفت. در هر بار نمونه‌برداری کیسه لاشبرگ از خاک خارج شده و پس از خشک شدن در معرض هوا، جداسازی بقایای گیاهی صورت گرفت. مقدار وزن خشک بقایای تجزیه نشده پس از

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی و نسبت ریشه به ساقه در بقایای گیاهی
Table 1- Chemical properties and root: shoot ratio of plant residues

خصوصیات بقایا Parameters	پنبه Cotton	سویا Soybean	ذرت Maize	کلزا Rapeseed	گندم Wheat
کربن کل (گرم بر کیلوگرم) Total carbon (g.kg ⁻¹)	412	405	409	400	393
نیتروژن کل (گرم بر کیلوگرم) Total nitrogen (g.kg ⁻¹)	4.3	7	4.7	5.9	3
نسبت کربن به نیتروژن Carbon to nitrogen ratio	95.9	57.8	87.1	67.9	131
نسبت ریشه به اندام هوایی Root: shoot ratio	0.49	0.39	0.35	0.35	0.43

رطوبت، نسبت کربن به نیتروژن و نیز درجه حرارت بیان می‌گردد (معادله ۲).

$$k = k_{max} F_{C:N} F_m F_{temp} \quad (2)$$

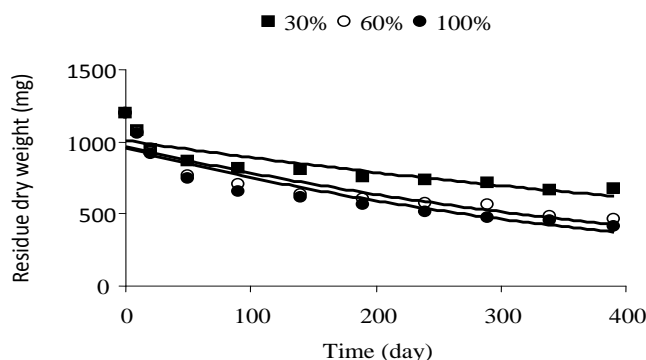
که در آن k_{max} : سرعت تجزیه نسبی حداکثر یا بالقوه و F_m ، $F_{C:N}$ و F_{temp} عواملی هستند که مقدار آنها بین صفر تا یک تغییر نموده و به ترتیب بیانگر محدودیت‌های ناشی از نسبت کربن به نیتروژن بقایا، رطوبت و درجه حرارت در تجزیه بقایای گیاهی می‌باشند.

مدلسازی تجزیه بقایای گیاهی

بقایای گیاهی داخل خاک به عنوان یک منبع همگن از مواد آلی فرض شده و سرعت تجزیه آن در داخل خاک از روند زوال نمایی (معادله ۱) تبعیت می‌نماید.

$$dY/dt = -kY \quad Y_t = Y_0 e^{-kt} \quad (1)$$

و Y_0 و Y_t : میزان بقایای گیاهی بر حسب گرم بر کیلوگرم خاک به ترتیب در زمان صفر و t و k : سرعت تجزیه نسبی بقایای گیاهی با واحد روز^{-۱} است (Thorburn et al., 2001) که به عنوان تابعی از



شکل ۱- روند تجزیه بقایای گیاهی در خاک به عنوان تابعی از میزان رطوبت خاک (درصد از ظرفیت مزرعه)
Fig. 1- Residue decomposition in soil as a function of soil moisture (percentage of field capacity)

خشک) در مقادیر مختلف رطوبت خاک بر اساس معادلات نمایی برازش شده محاسبه گردید (جدول ۲). به منظور تعیین رابطه بین مقدار سرعت نسبی تجزیه بقایا به عنوان تابعی از نسبت کربن به نیتروژن بقایای گیاهی نیز ابتدا نمودار روند تجزیه بقایا طی زمان ترسیم، سپس معادله زوال نمایی برای هر یک برازش داده شد (شکل

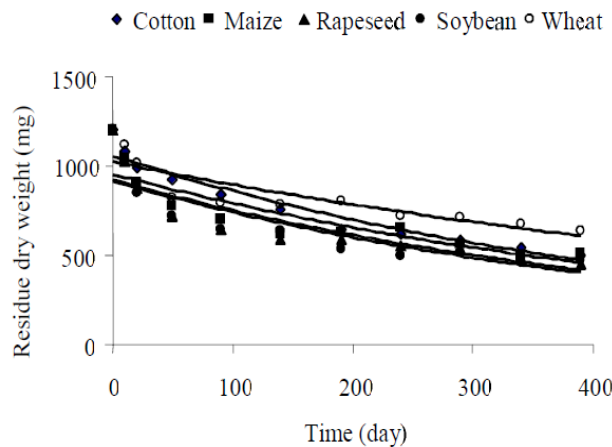
برای تعیین رابطه بین مقدار سرعت نسبی تجزیه بقایا با عامل رطوبت، ابتدا نمودار میزان تجزیه بقایا در طی زمان برای سه سطح رطوبتی ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه ترسیم و معادله زوال نمایی برای هر یک برازش داده شد (شکل ۱). سپس مقادیر سرعت تجزیه نسبی و نیمه عمر بقایا (زمان لازم برای ۵۰ درصد کاهش وزن

۲) پس از آن مقادیر سرعت تجزیه نسبی و نیمه عمر بقایا در نسبت‌های کربن به نیتروژن بقایا بر اساس معادلات نمایی برازش

جدول ۲- مقادیر سرعت تجزیه نسبی و نیمه عمر بقایا (زمان لازم برای ۵۰ درصد کاهش) در مقادیر مختلف رطوبت خاک بر اساس معادلات نمایی برازش شده در شکل ۱

Table 2- Residue relative decomposition rate and half-time (time needed for 50% reduction of residue dry weight) in different soil moisture regimes based on the fitted exponential equations in fig. 1

رطوبت خاک (درصد از ظرفیت مزرعه) Soil moisture (percentage of field capacity)	سرعت تجزیه نسبی (۱/روز) Relative decomposition rate (1/day)	نیمه عمر بقایا (روز) Residue half-time (day)	ضریب تبیین (r ²)
30	0.0012	578	0.82
60	0.0021	330	0.87
100	0.0024	289	0.89



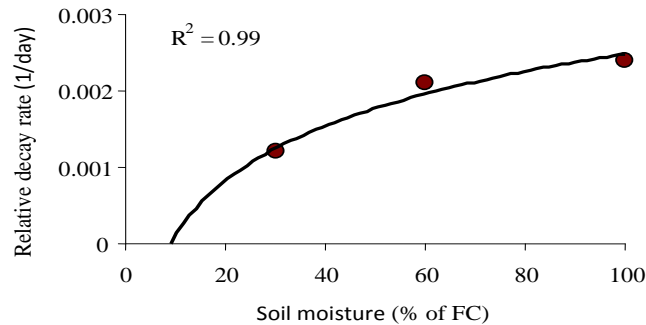
شکل ۲- روند تجزیه بقایای گیاهی در خاک به عنوان تابعی از نوع بقایا (با مقادیر مختلف کربن به نیتروژن)
Fig. 2- Residue decomposition in soil as a function of residue type (with different C:N ratios)

جدول ۳- مقادیر سرعت تجزیه نسبی و نیمه عمر بقایا (زمان لازم برای ۵۰ درصد کاهش) برای انواع مختلف بقایای گیاهی با مقادیر مختلف نسبت کربن به نیتروژن بر اساس معادلات نمایی برازش شده در شکل ۲

Table 3- Residue relative decomposition rate and half-time for different residue types with different C:N ratios based on the fitted exponential equations in fig. 2

نوع بقایا (نسبت کربن به نیتروژن) Residue type (C:N ratio)	سرعت تجزیه نسبی (۱/روز) Relative decomposition rate (1/day)	نیمه عمر بقایا (روز) Residue half-time (day)	ضریب تبیین (r ²)
سویا Soybesn (58)	0.0021	330	0.95
ذرت Maize (87)	0.0019	364	0.82
پنبه Cotton (96)	0.0020	346	0.82
کلزا Rapeseed (68)	0.0021	330	0.81
گندم Wheat (131)	0.0013	533	0.80

در مرحله بعد نمودار سرعت نسبی تجزیه بقایا در برابر مقادیر مختلف رطوبت خاک و نسبت‌های کربن به نیتروژن ترسیم و بهترین معادله رگرسیونی بر اساس ضریب تبیین به آن‌ها برازش داده شد (شکل‌های ۳ و ۴).

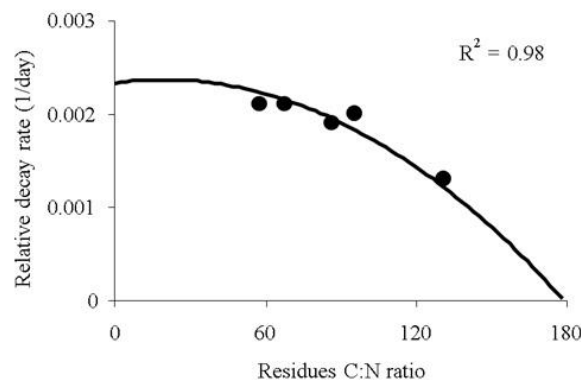


شکل ۳- رابطه سرعت تجزیه نسبی بقایای گیاهی در خاک (k) و رطوبت خاک

با کاهش رطوبت خاک به کمتر از ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه، سرعت تجزیه به شدت کاهش یافته و در رطوبت حدود نه درصد ظرفیت مزرعه، مقدار k صفر خواهد بود.

Fig. 3- Relationship between residue decomposition rate (k) and soil moisture

Decomposition rate sharply decreases as soil moisture falls below 60 percent and it will be equal to zero in soil moisture of nearly nine percent of field capacity.



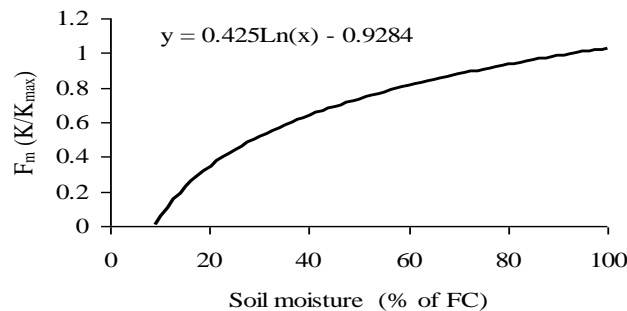
شکل ۴- رابطه سرعت تجزیه نسبی بقایای گیاهی در خاک (k) و نسبت کربن به نیتروژن بقایا

با افزایش نسبت کربن به نیتروژن به بیش از ۶۵، سرعت تجزیه به شدت کاهش یافته و در نسبت کربن به نیتروژنی حدود ۱۸۰، مقدار k صفر خواهد بود.

Fig. 4- Relationship between residue decomposition rate (k) and residue C:N

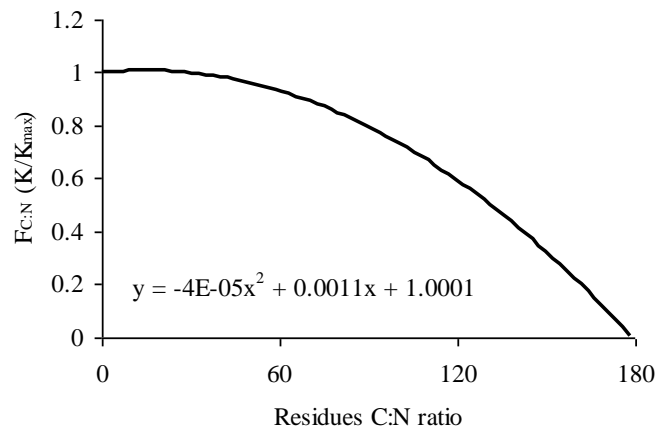
Decomposition rate sharply decreases as C:N increases to more than 65 and it will be equal to zero in C:N ratio of nearly 180.

در مرحله آخر، عامل رطوبت و نسبت کربن به نیتروژن بر اساس نسبت مقادیر سرعت تجزیه نسبی به سرعت تجزیه نسبی حداکثر (k/k_{max}) برای مقادیر مختلف رطوبت خاک و نیز نسبت کربن به نیتروژن محاسبه و نمودار آن ترسیم شد (شکل‌های ۵ و ۶).



شکل ۵- عامل رطوبت (F_m) به عنوان نسبت سرعت تجزیه نسبی به سرعت تجزیه نسبی حداکثر

Fig. 5- Moisture factor (F_m) as the ratio of relative decomposition rate (k) to maximum relative decomposition rate (k_{max})



شکل ۶- عامل نسبت کربن به نیتروژن ($F_{C:N}$) به عنوان نسبت سرعت تجزیه نسبی به سرعت تجزیه نسبی حداکثر
 Fig. 6- C:N factor ($F_{C:N}$) as the ratio of relative decomposition rate (k) to maximum relative decomposition rate (k_{max})

ANPP: تولید خالص اولیه اندام‌های هوایی ($gm^{-2}y^{-1}$), BNPP: تولید خالص اولیه اندام‌های زیرزمینی ($gm^{-2}y^{-1}$), Y_P : عملکرد اقتصادی ($gm^{-2}y^{-1}$), Y_S : وزن اندام‌های هوایی باقیمانده پس از برداشت ($gm^{-2}y^{-1}$), Y_R : وزن ریشه ($gm^{-2}y^{-1}$) و Y_E : وزن بقایای ریشه در خاک ($gm^{-2}y^{-1}$) مقدار Y_S , Y_R و Y_E از طریق معادلات ۷ تا ۹ محاسبه شد (Bolinder et al., 2007).

$$Y_S = Y_P (1-HI) / HI \quad \text{معادله (۷)}$$

$$Y_R = Y_P / (S:R \times HI) \quad \text{معادله (۸)}$$

$$Y_E = Y_R \times 0.65 \quad \text{معادله (۹)}$$

$S:R$ برابر با نسبت اندام‌های هوایی به ریشه و HI : شاخص برداشت است (شاخص برداشت برای گندم، کلزا، ذرت، سویا و پنبه به ترتیب 0.37 ، 0.25 ، 0.44 ، 0.44 و 0.38 در نظر گرفته شد) (Li et al., 1994; Yan et al., 2007).

سپس بر اساس نسبت بقایایی که از طریق اندام‌های مختلف گیاهی اضافه می‌شود، مقدار بقایای گیاهی وارد شده به خاک (Y_i) با استفاده از معادله ۱۰ تعیین شد (Bolinder et al., 2007).

$$Y_i = (Y_P \times S_P) + (Y_S \times S_S) + (Y_R \times S_R) + (Y_E \times S_E) \quad \text{معادله (۱۰)}$$

که در آن، S_P ، S_S ، S_R و S_E : به ترتیب نسبت بقایای اضافه شده از طریق اضافه شدن دانه، سایر اندام‌های هوایی، ریشه و بقایای ریشه به خاک با مقادیر $S_P=0$ ، $S_R=1$ ، $S_E=0.65$ می‌باشد.

سناریوهای میزان برگشت بقایا به خاک و رطوبت خاک

جهت بررسی تأثیر میزان بقایای وارد شده به خاک بر میزان کربن قابل ترسیب در خاک، سه سناریوی بازگشت بقایا در نظر گرفته شد. برای این منظور سه سطح بازگشت کامل، بازگشت ۵۰ درصد و حذف کامل بقایای اندام‌های هوایی در نظر گرفته شد و بر این اساس مقدار

از آنجایی که در این مطالعه اندازه‌گیری تجزیه بقایای گیاهی در دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده بود، برای عامل درجه حرارت از معادله ۳ (Thorburn et al., 2001) استفاده گردید.

$$F_{temp} = (T/T_{opt})^2, \quad T \leq T_{opt} \quad T_{opt} = 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن F_{temp} : عامل درجه حرارت، T : درجه حرارت متوسط ماهیانه و T_{opt} : درجه حرارت بهینه برای تجزیه بقایای گیاهی است.

برای محاسبه نیمه عمر بقایا از معادله (۴) استفاده شد:

$$t_{(1/2)} = -\ln(0.5)/k \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن $t_{(1/2)}$: مدت زمان لازم برای ۵۰ درصد کاهش وزن بقایای گیاهی و k : سرعت تجزیه نسبی بقایا می‌باشد.

ارزیابی میزان کربن قابل ترسیب در بوم‌نظام‌های گندم، کلزا، ذرت، سویا و پنبه در ایران: تعیین میزان تولید و برگشت بقایای گیاهی به خاک

در این بخش میزان کربن قابل ترسیب در بوم‌نظام‌های پنج محصول زراعی عمده در ایران محاسبه شد. محاسبه براساس آمار عملکرد و سطح زیر کشت سازمان جهاد کشاورزی برای تمامی استان‌هایی که کشت گیاهان مذکور در آنها صورت گرفته و آمار آنها برای حداقل سه سال از پنج سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ تا ۸۷-۱۳۸۶ موجود بود انجام شد.

در اولین گام، میزان تولید خالص اولیه اندام‌های هوایی (ANPP) و اندام‌های زیرزمینی (BNPP) برای هر محصول بر اساس معادلات ۵ و ۶ محاسبه گردید (Bolinder et al., 2007).

$$ANPP = Y_P + Y_S \quad \text{معادله (۵)}$$

$$BNPP = Y_R + Y_E \quad \text{معادله (۶)}$$

- 1- Aboveground net primary production
- 2- Belowground net primary production

به عنوان فاکتورهای آزمایش لحاظ شد. مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ صورت گرفت.

نتایج و بحث

کربن قابل ترسیب در کشت گندم

در بین استان‌های مختلف کشور استان‌های کرمانشاه، تهران و اصفهان بیشترین و استان‌های سیستان و بلوچستان، گیلان و بوشهر، کمترین کربن قابل ترسیب در خاک را در کشت گندم داشتند و اختلاف بین استان‌های دارای بیشترین (کرمانشاه) و کمترین (سیستان و بلوچستان) مقدار کربن قابل ترسیب در خاک ۶۱ درصد بود (جدول ۴).

میزان کربن قابل ترسیب در محصولات زراعی، ارتباط مستقیمی با مقدار تولید زیست‌توده گیاه زراعی داشته که مقدار زیست‌توده خود تحت تأثیر عوامل مختلف اقلیمی، به‌زراعی و به‌نژادی قرار دارد. محصولات زراعی در سطح کشور غالباً از نظر به‌نژادی در یک سطح قرار داشته و بیشترین دلیل اختلاف عملکرد و تولید آنها به مسائل به‌زراعی و شرایط اقلیمی محیط برمی‌گردد که در این نوع مطالعات عوامل به‌زراعی برای همه نقاط یکسان در نظر گرفته می‌شود. شرایط اقلیمی که خود از عوامل ایجاد تنش‌های محیطی مانند خشکی، درجه حرارت و غیره می‌باشد، سبب تفاوت عملکرد مناطق مختلف می‌گردد. به نظر می‌رسد اختلاف مقدار کربن قابل ترسیب در استان‌های مختلف کشور به دلیل شرایط متفاوت اقلیمی باشد. شرایط محیطی نامساعد همچون بارندگی کمتر و درجه حرارت بالاتر در استان سیستان و بلوچستان نسبت به استان کرمانشاه، سبب ایجاد زیست‌توده کمتر و در نهایت کربن قابل ترسیب پایین‌تری گردید. این امر برای استان‌های دیگر با وضعیت مشابه اقلیمی نظیر بوشهر نیز مشاهده شد.

از طرف دیگر در شرایطی که میانگین درجه حرارت محیط بالا باشد، شرایط مساعدتری برای تجزیه بقایای گیاهی در خاک ایجاد می‌شود. استان‌های جنوبی کشور نظیر بوشهر و سیستان و بلوچستان با متوسط درجه حرارت به ترتیب ۲۵/۴ و ۲۳/۹ درجه سانتی‌گراد از درصد تجزیه بالاتری (۲۱/۴ و ۲۰/۳ درصد) نسبت به استان‌های غربی نظیر کرمانشاه (۱۳/۸ درصد) با متوسط درجه حرارت ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد برخوردار بودند (جدول ۵). تأثیر درجه حرارت بر تجزیه بقایای گیاهی در مطالعات مختلف نشان داده شده (Hobbie, 1996; Zhou et al., 2007) و اعتقاد بر این است که اثر درجه حرارت بر افزایش تجزیه بقایای گیاهی بیش از اثر آن بر مقدار تولید اولیه محصول می‌باشد (Jenkinson et al., 1991; Kätterer et al., 1998; Kern & Johnson, 1993; Kirschbaum, 1995; Crohn & Valenzuela-Solano, 2003).

ضریب S_s (در معادله ۱۰) برای بازگشت کامل $S_s=1$ و برای بازگشت ۵۰ درصد بقایا $S_s = 0.5$ لحاظ گردید. از آنجایی که در حالت حذف کامل بقایا، بخشی از اندام‌های هوایی به صورت برگ‌های ریخته شده و نیز کلس روی سطح زمین باقی می‌ماند، در این حالت مقدار S_s برای بقایای گندم و کلزا، ۰/۱۵ و برای ذرت، سویا و پنبه، ۰/۱ در نظر گرفته شد (Bolinder et al., 2007). همچنین جهت بررسی تجزیه بقایای گیاهی در رژیم‌های مختلف رطوبت خاک، سه سناریوی رطوبتی شامل ۳۰ و ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه و ظرفیت کامل مزرعه (۱۰۰ درصد) لحاظ گردید.

تعیین درصد تجزیه بقایای گیاهی و مقدار کربن قابل ترسیب در خاک

پس از اینکه میزان بازگشت بقایا (مقدار بقایای وارد شده به خاک) در سه سناریوی ذکر شده برای هر محصول برآورد گردید، مقدار تجزیه بقایای گیاهی در خاک طی یکسال پس از برداشت محصول محاسبه شد. برای این منظور از میانگین درجه حرارت ماهیانه هر استان و سناریوهای رطوبتی ذکر شده برای محاسبه مقدار F_m و F_t از مدل ساخته شده در بخش قبل استفاده گردید و میزان تجزیه برآورد شد. سپس تفاوت بین مقدار بقایای وارد شده به خاک و مقدار تجزیه شده در خاک به عنوان بقایای تجزیه نشده در نظر گرفته شد. از آنجایی که محتوای کربن مواد آلی ۴۵ درصد وزن خشک است (Yan et al., 2007)، لذا این ضریب در وزن خشک باقیمانده ضرب شده و حاصل آن به عنوان کربن قابل ترسیب در خاک در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که جداول داده‌های مربوط به زیست‌توده و نیز میانگین درجه حرارت ماهیانه استان‌های کشور ارائه نشده و فقط در مواردی که جهت بحث و تفسیر نتایج، این داده‌ها مورد نیاز بوده، اعداد مربوطه در متن مقاله آورده شده است.

جمع‌آوری اطلاعات و روش‌های آماری

برای محاسبه میانگین درجه حرارت ماهیانه هر استان، اطلاعات مربوط به درجه حرارت ماهیانه تمامی ایستگاه‌های کشور از سازمان هواشناسی کشور دریافت و سپس میانگین درجه حرارت ایستگاه‌های هر استان به عنوان درجه حرارت متوسط ماهیانه آن استان در بررسی تجزیه بقایای گیاهی منظور شد. اطلاعات مربوط به عملکرد و سطح زیر کشت گیاهان مورد مطالعه (از سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ تا ۸۷-۱۳۸۶) از بانک اطلاعات زراعت سازمان جهاد کشاورزی کشور دریافت شد.

تجزیه و تحلیل داده‌های کربن قابل ترسیب در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی و با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16 انجام و میزان برگشت بقایا، رطوبت خاک و سال زراعی

جدول ۴- میانگین کربن قابل ترسیب در کشت گندم (کیلوگرم در هکتار) در استان‌های مختلف کشور در طی پنج سال زراعی از ۸۳-۱۳۸۲ تا ۸۷-۱۳۸۶

Table 4- Attainable carbon sequestration in wheat ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) in different Iran's provinces in five years from 2002-2003 to 2006-2007

استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)	استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)	استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)
کرمانشاه Kermanshah	19.7 ^{u*}	خراسان شمالی North Khorasan	23.9 ^l	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	16.0 ^t
کهگیلویه و بویراحمد Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	27.8 ^h	خوزستان Khuzestan	35.5 ^e	آذربایجان غربی West Azarbaijan	15.6 ^u
گلستان Golestan	28.0 ^{gh}	زنجان Zanjan	Zanjan	اردبیل Ardebil	13.0 ^v
گیلان Gilan	24.9 ^k	سمنان Semnan	27.2 ⁱ	اصفهان Isfahan	19.3 ^o
لرستان Lorestan	17.4 ^r	سیستان و بلوچستان Sistan and Baluchestan	36.0 ^b	ایلام Ilam	23.6 ^l
مازندران Mazandaran	17.9 ^q	فارس Fars	28.3 ^g	بوشهر Bushehr	28.8 ^f
مرکزی Markazi	18.7 ^p	قزوین Qazvin	16.8 ^s	تهران Tehran	18.6 ^p
هرمزگان Hormozgan	38.2 ^a	قم Qom	27.7 ^h	چهارمحال و بختیاری Chahar mahal and Bakhtiari	15.5 ^u
همدان Hamedan	16.4 st	کردستان Kordestan	19.9 ⁿ	خراسان جنوبی South Khorasan	22.1 ^m
یزد Yazd	29.7 ^o	کرمان Kerman	30.3 ^d	خراسان رضوی Razavi Khorasan	25.6 ^j

میانگین‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.

Means with the same letter are not significantly different at 5% level of probability.

داد که درجه حرارت‌های بالاتر در مناطق جنوبی ایالات متحده، سبب تسریع تجزیه بقایا و مواد آلی مقاوم‌تر شد. نتایج آزمایش‌هایی که در آنها گرمای لایه‌های بقایا بصورت مصنوعی کنترل شد، نشان داد که افزایش دما سبب افزایش دی‌اکسیدکربن متصاعد شده و تجزیه بقایا گردید (Q₁₀>۲) (1996 Hobbie, 1996; PeterJohn, 1993; Winkler, همکاران (Vitousek et al., 1994) گزارش کردند که در طی شیب کاهش ارتفاع در مائونالوآی، هاوائی میزان تجزیه بقایا افزایش یافت. آنها دریافتند که تغییر ده درجه‌ای میانگین درجه حرارت سالانه، با افزایش ۱۱-۴ برابری تجزیه بقایای گیاهی یک گونه غالب در منطقه همراه بود.

پژوهشگران گزارش کردند که اقلیم می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ای در میزان تجزیه در مقیاس جغرافیایی باشد (Meentemeyer, 1978; Berg et al., 1993; Aerts, 1997). گستره دمایی بهینه موجودات تجزیه کننده خاک بسیار متفاوت بوده (Paul & Clark, 1996) و در اغلب موارد تجزیه بقایا با افزایش دما همبستگی مثبتی نشان می‌دهد (Swift et al., 1979). بیلی-تدلا و همکاران (Belay-Tedla et al., 2009) اظهار داشتند که درجه حرارت می‌تواند سبب افزایش فعالیت ریزجانداران خاک و در نتیجه افزایش سرعت و مقدار تجزیه بقایا گردد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2007) نیز اظهار داشتند که درجه حرارت مهمترین عامل محیطی است که می‌تواند بر فعالیت جامعه میکروبی خاک و در نتیجه تجزیه ماده آلی تأثیرگذار باشد. نتایج مطالعه کوتکس و همکاران (Couteaux et al., 1995) نشان

جدول ۵- میانگین درصد تجزیه بقایای گندم در استان‌های مختلف کشور در طی یکسال پس از برداشت محصول
Table 5- Wheat residue decomposition percentage in different provinces during one year after harvest

استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)	استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)	استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)
کرمانشاه Kermanshah	13.8 g*	خراسان شمالی North Khorasan	13.0 ^{gh}	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	11.0 ^{j-1}
کهگیلویه و بویر احمد Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	15.3 ^e	خوزستان Khuzestan	20.0 ^b	آذربایجان غربی West Azarbaijan	10.6 ^{j-1}
گلستان Golestan	15.2 ^e	زنجان Zanjan	11.1 ^{i-k}	اردبیل Ardebil	8.9 ^m
گیلان Gilan	13.3 ^g	سمنان Semnan	14.9 ^{ef}	اصفهان Isfahan	13.5 ^g
لرستان Lorestan	10.2 ^{kl}	سیستان و بلوچستان Sistan and Baluchestan	20.3 ^b	ایلام Ilam	13.0 ^{gh}
مازندران Mazandaran	10.3 ^{kl}	فارس Fars	15.6 ^{de}	بوشهر Bushehr	21.4 ^a
مرکزی Markazi	10.0 ^l	قزوین Qazvin	11.5 ^{ij}	تهران Tehran	10.0 ^l
هرمزگان Hormozgan	21.8 ^a	قم Qom	15.3 ^e	چهار محال و بختیاری Chahar mahal and Bakhtiari	8.2 ^m
همدان Hamedan	8.7 ^m	کردستان Kordestan	10.6 ^{j-1}	خراسان جنوبی South Khorasan	12.0 ^{hi}
یزد Yazd	16.4 ^{cd}	کرمان Kerman	16.9 ^c	خراسان رضوی Razavi Khorasan	13.9 ^{fg}

*میانگین‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.

*Means with the same letter are not significantly different at 5% level of probability.

استان‌های خراسان جنوبی، سمنان و سیستان و بلوچستان، زیست‌توده پایین و درجه حرارت بالا و به دنبال آن درصد تجزیه بیشتر (جدول ۷) در کاهش میزان کربن قابل ترسیب تأثیرگذار بوده است.

کربن قابل ترسیب در کشت کلزا

در کشت کلزا، استان‌های اصفهان، قزوین، اردبیل، همدان و فارس بیشترین و استان‌های بوشهر، سیستان و بلوچستان و یزد، کمترین مقدار کربن قابل ترسیب در خاک را دارا بودند (جدول ۸). مقدار زیست‌توده کلزا در استان اصفهان به عنوان استانی با بیشترین کربن قابل ترسیب در خاک نسبت به استان بوشهر با کمترین کربن قابل ترسیب در خاک، ۴۷۵۱ کیلوگرم در هکتار بیشتر بود (داده‌های مربوط به زیست‌توده ارائه نشده‌اند). از طرف دیگر، متوسط درجه حرارت ماه‌های پس از برداشت کلزا در استان اصفهان، ۹/۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به استان بوشهر کمتر بود و استان بوشهر ۱۵/۱ درصد تجزیه بیشتری نسبت به استان اصفهان داشت (جدول ۹). با توجه به تأثیر درجه حرارت بر میزان تجزیه بقایا و همچنین میزان

کربن قابل ترسیب در کشت ذرت

در بین استان‌های مختلف کشور گروه استان‌های قزوین، کردستان و همدان بیشترین و گروه استان‌های خراسان جنوبی، سمنان، سیستان و بلوچستان و گلستان کمترین مقدار کربن قابل ترسیب در خاک در کشت ذرت را دارا بودند. استان قزوین نسبت به استان خراسان جنوبی حدود ۶۰ درصد کربن قابل ترسیب بیشتری در کشت ذرت داشت (جدول ۶).

در استان‌هایی که از کربن قابل ترسیب بیشتری برخوردار بودند، میزان زیست‌توده بالاتر از سایر استان‌ها بود (۱۲۴۲۱، ۱۰۴۳۵ و ۱۰۲۳۵ کیلوگرم در هکتار به ترتیب در استان‌های قزوین، کردستان و همدان) و (۴۹۲۶، ۵۴۰۷، ۵۲۶۹ و ۶۱۷۹ به ترتیب در استان‌های خراسان جنوبی، سمنان، سیستان و بلوچستان و گلستان). از طرف دیگر بررسی متوسط درجه حرارت طی سال‌های مورد مطالعه نشان داد که میانگین درجه حرارت ماه‌های پس از برداشت در استان‌های قزوین و کردستان نسبت به خراسان جنوبی و سمنان پایین‌تر بود (به ترتیب ۱۲/۸، ۱۲/۱، ۱۸ و ۱۷/۳ درجه سانتی‌گراد). احتمالاً در

زیست‌توده اولیه، بالاتر بودن کربن قابل ترسیب در خاک در استان اصفهان نسبت به بوشهر قابل توجیه است.

جدول ۶- میانگین میزان کربن قابل ترسیب در کشت ذرت (کیلوگرم در هکتار) در استان‌های مختلف کشور در طی پنج سال زراعی از ۸۳-۱۳۸۲ تا ۸۷-۱۳۸۶

Table 6- Attainable carbon sequestration in maize (kg.ha⁻¹) in different Iran's provinces in five years from 2002-2003 to 2006-2007

استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration	استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration	استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration
گلستان Golestan	3311 ^{m-p*}	خوزستان Khouzestan	3571 ^{l-o}	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	4297 ^{h-k}
گیلان Gilan	4154 ^{i-l}	سمنان Semnan	5169 ^{c-e}	آذربایجان غربی West Azarbaijan	4828 ^{d-i}
لرستان Lorestan	4993 ^{d-g}	سیستان و بلوچستان Sistan and Balouchestan	6457 ^a	اردبیل Ardebil	4588 ^{e-j}
مازندران Mazandaran	4466 ^{f-k}	فارس Fars	6009 ^{ab}	اصفهان Isfahan	4936 ^{d-h}
مرکزی Markazi	4360 ^{g-k}	قزوین Qazvin	4968 ^{d-h}	ایلام Ilam	3909 ^{i-m}
هرمزگان Hormozgan	3868 ^{j-m}	کردستان Kordestan	5756 ^{bc}	بوشهر Bushehr	5091 ^{e-f}
همدان Hamedan	5874 ^{ab}	کرمان Kerman	4913 ^{d-h}	چهار محال و بختیاری Chahar mahal and Bakhtiari	3695 ^{k-n}
یزد Yazd	5329 ^{b-d}	کرمانشاه Kermanshah		خراسان جنوبی South Khorasan	2596 ^p
		کهگیلویه و بویر احمد Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad		خراسان رضوی Razavi Khorasan	4283 ^{g-l}

*میانگین‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.

*Means with the same letter are not significantly different at 5% level of probability

کربن قابل ترسیب در کشت پنبه

استان‌های آذربایجان شرقی، اصفهان و تهران بیشترین و استان‌های هرمزگان و گلستان کمترین مقدار کربن قابل ترسیب در خاک را در کشت پنبه نشان دادند (جدول ۱۰) که ناشی از زیست‌توده تولیدی بیشتر در استان‌های گروه اول بود (به ترتیب ۵۵۱۱، ۵۴۸۶ و ۵۳۵۱ کیلوگرم در هکتار در استان‌های گروه اول و ۳۵۶۹ و ۳۴۲۲ کیلوگرم در هکتار در استان‌های گروه دوم).

از طرف دیگر متوسط درجه حرارت ماه‌های پس از برداشت در استان‌هایی که کربن قابل ترسیب در آنها بالا بود، نسبت به استان‌هایی با کربن قابل ترسیب کمتر، بسیار کمتر بود. در استان آذربایجان شرقی متوسط درجه حرارت در ماه‌های پس از برداشت، حدود ۱۲/۴ درجه سانتی‌گراد بود، در صورتی که متوسط درجه حرارت در استان هرمزگان ۲۵/۴ درجه سانتی‌گراد بود. نکته قابل توجه در این محصول میزان پایین کربن قابل ترسیب در استان گلستان بود که احتمالاً ناشی از عملکرد کم پنبه در این استان می‌باشد.

کربن قابل ترسیب در کشت سویا

در ایران کشت آبی سویا در پنج استان اردبیل، گلستان، مازندران، آذربایجان شرقی و لرستان صورت می‌گیرد. در این بین، استان‌های اردبیل و گلستان به ترتیب با ۱۶۳۸ و ۱۶۶۰ کیلوگرم در هکتار بالاترین و استان‌های آذربایجان شرقی و لرستان با حدود ۱۴۵۰ کیلوگرم در هکتار پایین‌ترین میزان کربن قابل ترسیب را به خود اختصاص دادند (جدول ۱۱).

مقایسه میزان زیست‌توده تولیدی در استان‌های اردبیل و آذربایجان شرقی نشان داد که مقدار این ویژگی در کشت سویا در استان اردبیل نسبت به استان آذربایجان شرقی ۱۳۳۷ کیلوگرم در هکتار بیشتر بود. از طرف دیگر درصد تجزیه بقایا در استان آذربایجان شرقی ۳/۶ درصد بیش از استان اردبیل بود (جدول ۱۲). با توجه به زیست‌توده بالاتر استان اردبیل و نیز کمتر بودن درصد تجزیه در این استان نسبت به استان آذربایجان شرقی می‌توان بیشتر بودن کربن قابل ترسیب در استان اردبیل را توجیه کرد.

در تمامی گیاهان مورد مطالعه با کاهش میزان رطوبت خاک از ۱۰۰ به ۳۰ درصد ظرفیت مزرعه، مقدار کربن قابل ترسیب در خاک

اقلیم و کیفیت بقایا عوامل اصلی تعیین‌کننده مقدار اولیه تجزیه بقایای گیاهی هستند (Swift et al., 1979).

افزایش یافت و درصد افزایش در کشت گندم، ذرت، کلزا، پنبه و سویا به ترتیب ۱۱/۴، ۱۹/۳، ۲۶، ۱۷/۲ و ۱۸/۷ درصد بود (جدول ۱۳).

جدول ۷- میانگین درصد تجزیه بقایای ذرت در استان‌های مختلف کشور در طی یکسال پس از برداشت محصول
Table 7- Maize residue decomposition percentage in different provinces during one year after harvest

استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)	استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)	استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)
گلستان Golestan	25.2 ^{f*}	خوزستان Khuzestan	32.1 ^b	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	18.0 ^{jk}
گیلان Gilan	21.7 ^{hi}	سمنان Semnan	24.6 ^f	آذربایجان غربی West Azarbaijan	17.7 ^k
لرستان Lorestan	21.6 ^{g-i}	سیستان و بلوچستان Sistan and Baluchestan	32.6 ^b	اردبیل Ardebil	14.8 ^l
مازندران Mazandaran	21.3 ⁱ	فارس Fars	25.5 ^{ef}	اصفهان Isfahan	22.3 ^{g-i}
مرکزی Markazi	21.2 ⁱ	قزوین Qazvin	19.3 ^j	ایلام Ilam	27.6 ^c
هرمزگان Hormozgan	35.0 ^a	کردستان Kordestan	17.8 ^{jk}	بوشهر Bushehr	25.1 ^f
همدان Hamedan	18.5 ^{jk}	کرمان Kerman	27.1 ^{cd}	چهار محال و بختیاری Chahar mahal and Bakhtiari	12.3 ^m
یزد Yazd	26.8 ^{c-e}	کرمانشاه Kermanshah	22.9 ^{gh}	خراسان جنوبی South Khorasan	25.8 ^{d-f}
		کهگیلویه و بویر احمد Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	24.9 ^f	خراسان رضوی Razavi Khorasan	22.9 ^g

*میانگین‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.
*Means with the same letter are not significantly different at 5% level of probability.

آن از ظرفیت مزرعه پایین‌تر بیاید، میزان و سرعت تجزیه بقایا در طی زمان نیز کاهش یافته و لذا بقایای گیاهی برای مدت بیشتری در خاک باقی مانده و ماندگاری آنها در خاک بالاتر است. بطور کلی مقدار رطوبت کمتر از ۳۰ درصد (بر مبنای وزن خشک بقایا) سبب کاهش سرعت تجزیه می‌شود (Haynes, 1986). در این محدوده در صورت مناسب بودن شرایط دمایی، سرعت تجزیه با افزایش میزان رطوبت افزایش می‌یابد (Bunnell et al., 1977). در مناطقی با شرایط دمایی و ارتفاع یکسان، عموماً میزان تجزیه در مناطق خشک کمتر است (Vitousek, 1994).

درصد افزایش کربن قابل ترسیب در گندم به دنبال کاهش رطوبت خاک، از سایر محصولات زراعی پایین‌تر بود. در واقع بقایای گندم که در بین بقایای مورد بررسی از نسبت کربن به نیتروژن بالاتری برخوردار بودند، حتی در شرایط بهینه رطوبتی (۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) تجزیه کمتری نسبت به سایر بقایای گیاهی داشت.

با وجود اینکه فعالیت ریزجانداران خاک به عنوان یک عامل کنترل‌کننده تجزیه بقایا شناخته شده است (Lavelle et al., 1993; Couteaux et al., 1995)، اما به عقیده برخی پژوهشگران، مقدار فعالیت میکروبی به عنوان مکانیسمی است که تأثیر اقلیم و کیفیت بقایا را منعکس می‌سازد. وجود رطوبت یکی از عوامل محیطی مهم و اساسی برای فعالیت موجودات زنده خاکزی و ریزجانداران است (Kabba & Aulakh, 2004; Lupwayi, 2007). هر چه شرایط رطوبتی خاک برای فعالیت این موجودات مناسب‌تر باشد، فعالیت آنها بالاتر بوده و لذا تجزیه بقایای گیاهی در خاک بیشتر صورت می‌گیرد (Luna-Orea et al., 1996; Dijkstra & Cheng, 2007). نتایج تحقیقات مختلف (Luna-Orea et al., 1996; Hemwong et al., 2008) نشان داده است که بهترین وضعیت رطوبتی خاک در حالت ظرفیت مزرعه اتفاق افتاده (Howard & Howard, 1993; Paul & Clark, 1996) و بنابراین بیشترین میزان تجزیه بقایای گیاهی نیز در این شرایط حاصل می‌شود. هرچه خاک خشک‌تر شده و درصد رطوبت

جدول ۸- میانگین میزان کربن قابل ترسیب در کشت کلزا (کیلوگرم در هکتار) در استان‌های مختلف کشور در طی پنج سال زراعی از ۸۳-۱۳۸۲ تا ۸۷-۱۳۸۶

Table 8- Attainable carbon sequestration in rapeseed ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) in different Iran's provinces in five years from 2002-2003 to 2006-2007

استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration	استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration	استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration
کرمانشاه Kermanshah	2950 ^{d-h}	خراسان شمالی North Khorasan	1765 ^{k-o}	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	2146 ^{j-l}
کهگیلویه و بویر احمد Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	2684 ^{f-i}	خوزستان Khuzestan	1464 ^{n-o}	آذربایجان غربی West Azarbaijan	2942 ^{d-h}
گلستان Golestan	2818 ^{e-i}	زنجان Zanjan	2869 ^{e-h}	اردبیل Ardebil	3594 ^{a-c}
گیلان Gilan	1498 ^{m-o}	سمنان Semnan	2024 ^{j-m}	اصفهان Isfahan	3812 ^a
لرستان Lorestan	2332 ^{i-k}	سیستان و بلوچستان Sistan and Balouchestan	1334 ^{op}	ایلام Ilam	1584 ^{m-o}
مازندران Mazandaran	3024 ^{c-h}	فارس Fars	3306 ^{a-e}	بوشهر Bushehr	925 ^p
مرکزی Markazi	2975 ^{d-g}	قزوین Qazvin	3682 ^{ab}	تهران Tehran	3182 ^{b-f}
هرمزگان Hormozgan	1521 ^{m-o}	قم Qom	2011 ^{j-n}	چهار محال و بختیاری Chahar mahal and Bakhtiari	2545 ^{g-j}
همدان Hamedan	3416 ^{a-d}	کردستان Kordestan	2317 ^{i-k}	خراسان جنوبی South Khorasan	2407 ^{h-j}
یزد Yazd	1349 ^{op}	کرمان Kerman	1729 ^{l-o}	خراسان رضوی Razavi Khorasan	1655 ^{l-o}

خاک نیز بالاتر است. به همین دلیل در سناریوهای مختلف بازگشت بقایا به خاک ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد بازگشت بقایای گیاهی میزان کربن قابل ترسیب نیز افزایش می‌یابد. لال و کیمبل (Lal & Kimble, 1997) اظهار داشتند که بقایای گیاهی منبع اصلی ورود کربن به بوم‌نظام بوده و لذا افزایش تولید بقایا از طریق عملیات مدیریتی می‌تواند میزان کربن آلی خاک را افزایش دهد. دو (Dou, 2005) بیان کرد که در صورت یکسان بودن شرایط، خاک‌هایی که ماده آلی ورودی بیشتری دارند از کربن آلی بالاتری نیز برخوردار خواهند بود. همچنین مطالعه لارسون و همکاران (Larson et al., 1972) نشان داد که میزان کربن آلی خاک در بوم‌نظام‌های زراعی همبستگی مثبتی با میزان کربن وارد شده به خاک داشت.

با کاهش درصد بازگشت بقایا به خاک از ۱۰۰ به ۵۰ درصد و حذف کامل بقایا، میزان کاهش کربن قابل ترسیب در خاک به ترتیب در گندم ۲۰/۴ و ۴۰/۲، ذرت ۲۴/۶ و ۴۱/۹، کلزا ۲۸/۵ و ۴۰/۵، پنبه ۲۱/۸ و ۳۹/۱ و سویا ۲۳/۷ و ۴۲/۶ درصد بود. در حالت حذف کامل بقایا، تنها اندام‌های زیرزمینی و ریشه گیاه و نیز بخشی از ساقه که در زیر سطح برداشت قرار دارد در خاک باقی مانده و سایر اندام‌های گیاهی به طرق مختلف از سطح مزرعه حذف می‌شود. اما در حالت ۱۰۰ درصد بازگشت بقایا به خاک، فرض بر این است که تنها عملکرد اقتصادی (دانه) برداشت شده و سایر اندام‌های هوایی گیاه در مزرعه باقی مانده و با خاک اختلاط می‌یابد. از آنجایی که کربن قابل ترسیب در خاک نزدیک به نیمی از بقایای گیاهی را شامل می‌شود، لذا هرچه میزان بازگشت بقایا به خاک بیشتر باشد، مقدار کربن قابل ترسیب در

جدول ۹- میانگین درصد تجزیه بقایای کلزا در استان‌های مختلف کشور در طی یکسال پس از برداشت محصول
Table 9- Rapeseed residue decomposition percentage in different provinces during one year after harvest

استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)	استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)	استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)
کرمانشاه Kermanshah	19.7 ^{n*}	خراسان شمالی North Khorasan	23.9 ^l	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	16.0 ^t
کهگیلویه و بویر احمد Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	27.8 ^h	خوزستان Khuzestan	35.5 ^c	آذربایجان غربی West Azarbaijan	15.6 ^u
گلستان Golestan	28.0 ^{gh}	زنجان Zanjan	Zanjan	اردبیل Ardebil	13.0 ^v
گیلان Gilan	24.9 ^k	سمنان Semnan	27.2 ⁱ	اصفهان Isfahan	19.3 ^o
لرستان Lorestan	17.4 ^r	سیستان و بلوچستان Sistan and Balouchestan	36.0 ^b	ایلام Ilam	23.6 ^l
مازندران Mazandaran	17.9 ^q	فارس Fars	28.3 ^g	بوشهر Bushehr	28.8 ^f
مرکزی Markazi	18.7 ^p	قزوین Qazvin	16.8 ^s	تهران Tehran	18.6 ^p
هرمزگان Hormozgan	38.2 ^a	قم Qom	27.7 ^h	چهارمحال و بختیاری Chahar mahal and Bakhtiari	15.5 ^u
همدان Hamedan	16.4 st	کردستان Kordestan	19.9 ⁿ	خراسان جنوبی South Khorasan	22.1 ^m
یزد Yazd	29.7 ^e	کرمان Kerman	30.3 ^d	خراسان رضوی Razavi Khorasan	25.6 ^j

میانگین‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.
Means with the same letter are not significantly different at 5% level of probability.

(تفاوت مقدار دی‌اکسیدکربن تثبیت شده در ترکیبات آلی با تنفس بوم‌نظام) در محصول ذرت نسبت به سویا بسیار بالاتر بود. پاستیان و همکاران (Paustian et al., 1997) گزارش کردند که مقدار کربن وارد شده به خاک از طریق ذرت ۱/۵ تا ۱/۸ برابر سویا بود. بویانوفسکی و واگنر (Buyanovsky & Wagner, 1986) نیز گزارش کردند که میزان کربن وارد شده به خاک از طریق ریشه ذرت سه برابر سویا بود. در این مطالعه مقدار کربنی که از طریق ذرت ۲/۸ برابر بیشتر از سویا بود (شکل ۷). دو (Dou, 2005) گزارش کرد که خاک‌های زیر کشت گندم نسبت به خاک‌های دارای کشت سویا کربن بیشتری ترسیب نمودند که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

مقایسه مقدار کربن قابل ترسیب در محصولات زراعی مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در بین محصولات زراعی، ذرت و سویا به ترتیب از بالاترین و پایین‌ترین مقدار کربن قابل ترسیب برخوردار بودند. نوع گونه گیاهی بر میزان ذخیره کربن آلی خاک تأثیر داشته و محصولاتی که زیست‌توده بیشتری تولید می‌کنند، کربن بیشتری نیز به خاک اضافه می‌نمایند. از طرف دیگر، میزان بقایایی که از طریق ریشه به خاک بازگردانده می‌شود در میزان کربن خاک تأثیر زیادی دارد. ورما و همکاران (Verma et al., 2005) گزارش کردند که ذرت و سویا از تولید کربن متفاوتی برخوردار بوده و برآورد نمودند که تولید خالص بوم‌نظام

جدول ۱۰- میانگین میزان کربن قابل ترسیب در کشت پنبه (کیلوگرم در هکتار) در استان‌های مختلف کشور در طی پنج سال زراعی از ۸۳-۱۳۸۲ تا ۸۷-۱۳۸۶

Table 10- Attainable carbon sequestration in cotton (kg.ha⁻¹) in different Iran's provinces in five years from 2002-2003 to 2006-2007

استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration	استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration	استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration
گلستان Golestan	2167 ^{fg*}	خراسان شمالی North Khorasan	2654 ^d	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	3760 ^a
مازندران Mazandaran	2275 ^f	سمنان Semnan	2517 ^{de}	اردبیل Ardebil	3202 ^b
مرکزی Markazi	2681 ^d	فارس Fars	2963 ^c	اصفهان Isfahan	3578 ^a
هرمزگان Hormozgan	1989 ^g	قزوین Qazvin	2944 ^c	تهران Tehran	3556 ^a
یزد Yazd	2650 ^d	قم Qom	2362 ^{ef}	خراسان جنوبی South Khorasan	2248 ^f
		کرمان Kerman	2220 ^f	خراسان رضوی Razavi Khorasan	2560 ^{de}

* میانگین‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد هستند.
* Means with the same letter are not significantly different at 5% level of probability

جدول ۱۱- میانگین میزان کربن قابل ترسیب در کشت سویا در استان‌های مختلف در طی پنج سال زراعی از ۸۳-۱۳۸۲ تا ۸۷-۱۳۸۶

Table 11- Attainable carbon sequestration in soybean (kg.ha⁻¹) in different Iran's provinces in five years from 2002-2003 to 2006-2007

استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration
آذربایجان شرقی East Azarbaijan	1450 ^{b*}
اردبیل Ardebil	1638 ^a
گلستان Golestan	1660 ^a
لرستان Lorestan	1449 ^b
مازندران Mazandaran	1601 ^{ab}

* میانگین‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.
* Means with the same letter are not significantly different at 5% level of probability.

سیستان و بلوچستان تنها سه محصول گندم، ذرت و کلزا کشت می‌گردد. علاوه بر این همانطور که پیشتر گفته شد، در استان سیستان و بلوچستان به دلیل شرایط نامساعد محیطی، میزان عملکرد و زیست‌توده کمتر و درجه حرارت و در نتیجه میزان تجزیه بالاتر است که مجموع این عوامل به کربن قابل ترسیب کم در این استان منتهی می‌شود.

مجموع میزان کربن قابل ترسیب در بوم‌نظام‌های زراعی پنج محصول مورد بررسی در استان‌های مختلف کشور در جدول ۱۴ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در کشور استان‌های اردبیل و سیستان و بلوچستان به ترتیب از بالاترین و پایین‌ترین میزان کربن قابل ترسیب در خاک برخوردار بودند. یک دلیل عمده این تفاوت به تعداد محصولات کشت شده در این استان‌ها برمی‌گردد. در استان اردبیل تمامی پنج محصول ذکر شده کشت می‌شود اما در استان

جدول ۱۲- میانگین درصد تجزیه بقایای سویا در استان‌های مختلف کشور در طی یکسال پس از برداشت محصول

Table 12- Maize residue decomposition percentage in different provinces during one year after harvest

استان Province	درصد تجزیه بقایا Decomposition (%)
آذربایجان شرقی East Azarbaijan	20.8 ^{c*}
اردبیل Ardebil	17.2 ^d
گلستان Golestan	28.9 ^a
لرستان Lorestan	24.8 ^b
مازندران Mazandaran	24.5 ^b

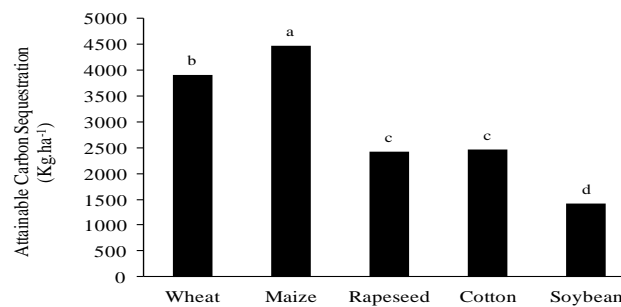
*میانگین‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.
*Means with the same letter are not significantly different at 5% level of probability.

جدول ۱۳- میانگین کربن قابل ترسیب در پنج محصول زراعی در سناریوهای مختلف رطوبتی و بازگشت بقایا

Table 13- Attainable carbon sequestration of five crops in different moisture and residue retention scenarios

تیمار Treatment	پنبه Cotton	کلزا Rapeseed	ذرت Maize	گندم Wheat	سویا Soybean
رطوبت (درصد از ظرفیت مزرعه) Moisture (percentage of Field capacity)					
100	2518 ^c	2127 ^c	4133 ^c	3698 ^{c*}	1441 ^c
60	2707 ^b	2458 ^b	4462 ^b	3907 ^b	1554 ^b
30	2950 ^a	2683 ^a	4934 ^a	4119 ^a	1749 ^a
بازگشت بقایا (درصد) Residue retention (percentage)					
100	3419 ^a	3260 ^a	5795 ^a	4903 ^a	2020 ^a
50	2674 ^b	2329 ^b	4367 ^b	3901 ^b	1520 ^b
0	2082 ^c	1679 ^c	3367 ^c	2920 ^c	1173 ^c

*میانگین‌های دارای حرف مشترک در هر ستون و برای هر گروه از تیمارها بر اساس آزمون LSD فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد هستند.
*Means with the same letter in each column and each treatment are not significantly different at 5% level of probability.



شکل ۷- میزان کربن قابل ترسیب در محصولات زراعی مورد مطالعه

Fig.7- Attainable carbon sequestration in studied crops

جدول ۱۴- مجموع کربن قابل ترسیب در بوم‌نظام‌های پنج محصول گندم، ذرت، کلزا، پنبه و سویا در استان‌های مختلف کشور

Table 14- Total attainable carbon in five major crops of wheat, maize, rapeseed, cotton and soybean in different Iran's provinces

استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration	استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration	استان Province	کربن قابل ترسیب Attainable carbon sequestration
کرمانشاه Kermanshah	13254	خراسان شمالی North Khorasan	8616	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	16226
کهگیلویه و بویر احمد Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	9767	خوزستان Khuzestan	8734	آذربایجان غربی West Azarbaijan	11818
گلستان Golestan	14481	زنجان Zanjan	9941	اردبیل Ardebil	18379
گیلان Gilan	9585	سمنان Semnan	10936	اصفهان Isfahan	15799
لرستان Lorestan	11186	سیستان و بلوچستان Sistan and Baluchestan	6579	ایلام Ilam	9779
مازندران Mazandaran	15844	فارس Fars	15882	بوشهر Bushehr	8437
مرکزی Markazi	11429	قزوین Qazvin	17342	تهران Tehran	10806
هرمزگان Hormozgan	11439	قم Qom	9347	چهار محال و بختیاری Chahar mahal and Bakhtiari	9532
همدان Hamedan	12573	کردستان Kordestan	13454	خراسان جنوبی South Khorasan	10134
یزد Yazd	13377	کرمان Kerman	14185	خراسان رضوی Razavi Khorasan	11615

نتیجه‌گیری

بطور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که در کشت گندم، استان‌های کرمانشاه و سیستان و بلوچستان، ذرت: قزوین و خراسان جنوبی، کلزا: اصفهان و بوشهر، پنبه: آذربایجان شرقی و هرمزگان، سویا: اردبیل و آذربایجان شرقی به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار کربن قابل ترسیب را دارا بودند. با افزایش میزان رطوبت از ۳۰ به ۶۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه و همچنین با کاهش درصد برگشت بقایا به خاک از ۱۰۰ به ۵۰ درصد و حذف کامل بقایا میزان کربن قابل ترسیب در خاک همه محصولات مورد مطالعه کاهش یافت. در بین محصولات مورد مطالعه ذرت و سویا در به ترتیب از بالاترین و

پایین‌ترین میزان کربن قابل ترسیب برخوردار بودند. همچنین در بین استان‌های مختلف از نظر مجموع کربن قابل ترسیب محصولات مورد مطالعه، بیشترین و کمترین مقدار کربن قابل ترسیب در خاک به ترتیب در استان‌های اردبیل و استان سیستان و بلوچستان مشاهده شد.

با توجه به ابهاماتی که ممکن است در بخش برآورد کربن ورودی حاصل از اندام‌های زیرزمینی گیاه به خاک وجود داشته باشد و نیز متفاوت بودن ضرایب مربوط به نسبت بخش‌های مختلف گیاه در هر منطقه اقلیمی، انجام مطالعات آبی به منظور تعیین دقیق‌تر میزان کربن ورودی به خاک مفید خواهد بود.

منابع

- Aerts, R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos* 79: 439-449.
- Belay-Tedla, A., Zhou, X., Su, B., Shiqiang Wan, S., and Luo, Y. 2009. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 110-116.
- Berg, B., Berg, M.P., Bottner, P., Box, E., Breymer, A., Calvan De Anta, R., Couteaux, M.M., Esudero, A., Gallardo, A., Kratz, W., Madeira, M., Malkonen, E., McClaugherty, C.A., Meentemeyer, V., Munoz, F., Piuissi, P., Remacle, J.,

- and Virzo de Santo, A. 1993. Litter mass loss in pine forests of Europe and Eastern United States as compared to actual evapotranspiration on a European scale. *Biogeochemistry* 20: 127–153.
- Bolinder, M.A., Janzen, H.H., Gregorich, E.G., Angers, D.A., and VandenBygaart, A.J. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118: 29–42.
- Bremner, J.M. 1970. Nitrogen total, regular kjeldahl method, In: *Methods of Soil Analysis, Part II: Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Agronomy 9(1). A.S.A. Ins., S.S.S.A. Inc., Madison Publisher, Wisconsin, USA, pp. 610-616.
- Bunnell, F.L., Tait, D.E.N., Flanagan, P.W., and Van Cleve, K. 1977. Microbial respiration and substrate weight loss. I. A general model of the influences of abiotic variables. *Soil Biology and Biochemistry* 9: 33–40.
- Buyanovsky, G.A., and Wagner, G.H. 1986. Post-harvest residue input to cropland. *Plant and Soil* 93: 57-65.
- Chen, H., Billen, N., Stahr, K., and Kuzyakov, Y. 2007. Effects of nitrogen and intensive mixing on decomposition of ¹⁴C-labelled maize (*Zea mays* L.) residue in soils of different land use types. *Soil and Tillage Research* 96: 114–123.
- Couteaux, M., Bottner, P., and Berg, B. 1995. Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology and Evolution* 10: 63-66.
- Crohn, D.M., and Valenzuela-Solano, C. 2003. Modeling temperature effects on decomposition. *Journal of Environmental Engineering* 129: 1149-1156.
- Dijkstra, F.A., and Cheng, W. 2007. Moisture modulates rhizosphere effects on C decomposition in two different soil types. *Soil Biology and Biochemistry* 39: 2264–2274.
- Dou, F. 2005. Long-term tillage, cropping sequence, and nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen dynamics. PhD thesis. Texas A & M University.
- Fishman, J. 2003. Overview: Atmospheric Chemistry. In: Potter, T.D. and Colman, B.R. (Eds.), *Handbook of Weather, Climate and Water, Atmospheric Chemistry, Hydrology and Social Impacts*. A John Wiley and Sons, Inc., Publication. Pp. 966.
- Hansen, E.M., Christensen, B.T., Jensen, L.S., and Kristensen, K. 2004. Carbon sequestration in soil beneath long-term *Miscanthus* plantations as determined by ¹³C abundance. *Biomass and Bioenergy* 26: 97-105.
- Hardy, J.T. 2003. *Climate Change, Causes Effects and Solutions*. John Wiley and Sons Ltd. pp. 247.
- Haynes, R.J. 1986. *Mineral nitrogen in the plant-soil system*. Academic Press, Toronto.
- Hemwong, S., Cadisch, G., Toomsan, B., Limpinuntana, V., Vityakon, P., and Patanothai, A. 2008. Dynamics of residue decomposition and N₂ fixation of grain legumes upon sugarcane residue retention as an alternative to burning. *Soil and Tillage Research* 99: 84–97.
- Hobbie, S.E. 1996. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra. *Ecological Monographs* 66: 503–522.
- Howard, D.M., and Howard, P.J.A. 1993. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types. *Soil Biology and Biochemistry* 25: 1537–1546.
- Jenkinson, D.S., Adams, D.E., and Wild, A. 1991. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature* 351: 304–306.
- Kabba, B.S., and Aulakh, M.S. 2004. Climatic conditions and crop residue quality differentially affect N, P, and S mineralization in soils with contrasting P status. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167: 596–601.
- Kätterer, T., Reichstein, M., André, O., and Lomander, A. 1998. Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils* 27: 258–262.
- Kirschbaum, M.U.F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 753–760.
- Lal, R. 2002. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution* 116: 353–362.
- Lal, R., and Kimble, J.M. 1997. Conservation tillage for carbon sequestration. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 49: 243-253.
- Larson, W.E., Clapp, C.E., Pierre, W.H., and Morachan, Y.B. 1972. Effects of increasing amounts of organic residues on continuous corn: II. Organic carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur. *Agronomy Journal* 64: 204-208.
- Lavelle, P., Blanchart, E., Martin, A., Martin, S., Spain, A., Toutan, F., Barois, I., and Schaefer, R. 1993. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica* 25: 130–150.
- Li, C., Frolking, S., and Harriss, R.C. 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biochemistry Cycles* 8: 237-254.
- Luna-Orea, P., Waggoner, M.G., and Gumpertz, L.M. 1996. Decomposition and nutrient release dynamics of two tropical legume cover crops. *Agronomy Journal* 88: 758–764.
- Lupwayi, N.Z., Clayton, G.W., O'Donovan, J.T., Harker, K.N., Turkington, T.K., and Soon, Y.K. 2007. Phosphorus release during decomposition of crop residues under conventional and zero tillage. *Soil and Tillage Research* 95: 231–239.

- Meentemeyer, V. 1978. Macroclimatic and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology* 59: 465–472.
- Menzel, A. and Fabian, P. 1999. Growing season extended in Europe. *Nature* 397: 659.
- Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2006. Analysis of agroclimatic indices of Iran under future climate change scenarios. *Iranian Journal of Field Crops Research* 4: 169-182. (In Persian with English Summary)
- Parshotam, A., Sagggar, S., Tate, K., and Parfitt, R. 2001. Modelling organic matter dynamics in New Zealand soils. *Environment International* 27: 111–119.
- Paul, E.A., and Clark, F.E. 1996. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, San Diego pp 340..
- Paustian, K., Collins, H.P., and Paul, E.A. 1997. Management controls on soil carbon. In: Paul, E.A., Paustian, K., Elliot, E.T., Cole, C.V. (Eds) *Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems: Long-term Experiments in North America*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T., and Hunt, H.W. 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48(1): 147–163.
- PeterJohn, W.T., Melillo, J.M., Bowles, F.P., and Steudler, P.A. 1993. Soil warming and trace gas fluxes: experimental design and preliminary flux results. *Oecologia* 93: 18–24.
- Rosenzweig, C., and Parry, M.L. 1994. Potential Impacts of climate change on world food supply. *Nature* 367: 133-138.
- Scorer, R.S. 2002. *Air Pollution Meteorology*. Horwood Publishing. pp. 150.
- Swift, M.J., Heal, O.W., and Anderson, J.M. 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Blackwell, Oxford. Pp 372.
- Thorburn, P.J., Probert, M.E., and Robertson, F.A. 2001. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM-Residue. *Field Crops Research* 70: 223-232.
- Vazquez, R.I., Stinner, B.R., and McCartney, D.A. 2003. Corn and weed residue decomposition in northeast Ohio organic and conventional dairy farms. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 95: 559–565.
- Verma, S.B., Dobermann, A., Cassman, K.G., Walters, D.T., Knops, J.M., Arkebauer, T.J., Suyker, A.E., Burba, G.G., Amos, B., Yang, H., Ginting, D., Hubbard, K.G., Gitelson, A.A., and Walter-Shea, E.A. 2005. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed-based agroecosystems. *Agriculture and Forest Meteorology* 131: 77-96.
- Vitousek, P.M., Turner, D.R., Parton, W.J., and Sanford, R.L. 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawai'i: patterns, mechanisms, and models. *Ecology* 75: 418–429.
- Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science* 63: 251-263.
- Winkler, J.P., Cherry, R.S., and Schelsinger, W.H. 1996. The Q₁₀ relationship of microbial respiration in a temperate forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 28: 1067–1072.
- Yan, H., Cao, M., Liu, J., and Tao, B. 2007. Potential and sustainability for carbon sequestration with improved soil management in agricultural soils of China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121: 325-335.
- Yang, L., Pan, J., Shao, Y., Chen, J.M., Ju, W.M., Shi, X., and Yuan, S. 2007. Soil organic carbon decomposition and carbon pools in temperate and sub-tropical forests in China. *Journal of Environmental Management* 85: 690–695.
- Zhou, X., Wan, S., and Luo, Y. 2007. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem. *Global Change Biology* 13: 761–775.



Estimation of Carbon Sequestration in Iran Agroecosystems using Empirical Models

E. Boroumand Rezazadeh^{1*}, A. Koocheki, P. Rezvani Moghaddam, M. Nassiri Mahallati² and A. Lakzian³

Submitted: 05-10-2015

Accepted: 04-02-2016

Boroumand Rezazadeh, E., Koocheki, A., Rezvani Moghaddam, P., Nassiri Mahallati, M., and Lakzian, A. 2019. Estimation of Carbon Sequestration in Iran Agroecosystems using Empirical Models. Journal of Agroecology. 11(1):103-122.

Introduction

Carbon sequestration is defined as the permanent gain of carbon by soil, plant or water. Soil as the largest terrestrial carbon pool plays an important role in the global carbon cycle. Due to the role of agricultural systems in CO₂ emission, attention to the carbon cycle in agricultural systems is of prime importance. So, the interest in agricultural soils and plant biomass as a carbon sink and an operational mechanism for reducing the atmospheric CO₂ level, is increasing. It is estimated that world's crop-based agriculture occupies 1.7 billion hectares, which can store up to 170 Pg carbon. Thus, the aims of this study were to simulate the relationship between crop residue decomposition rate with carbon to nitrogen ration (C:N) (an index of residue quality) as well as soil moisture regimes (the most important factors in residue decomposition) and also estimation of the attainable carbon sequestration in irrigated systems of five major crops in Iran based on the simulated model.

Materials and Methods

Residue decomposition rate of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.), rapeseed (*Brassica napus* L.), cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and soybean (*Glycine max* L.) (with C:N ratios of 131, 69.7, 87.1, 57.8 and 95.9, respectively) in different soil moisture regimes (100, 60 and 30 percentage of field capacity) was studied in a 390-day incubation experiment. Study data was used for simulation of residue decomposition and relative decomposition rate was defined as a function of moisture (f_m), C:N ($f_{C:N}$) and temperature (f_{temp}). The simulated model was used to evaluate attainable carbon sequestration of the studied crops in five years from 2002-2003 to 2006-2007 based on yield, harvest index and shoot to root ratio in three scenarios of residue retention (100, 50 and 0 percentage of total residue produced) as well as three scenarios of soil moisture regimes of 100, 60 and 30 percentage of field capacity for different provinces of Iran. In this step, residue decomposition during one year after harvest was calculated using f_m , $f_{C:N}$ and f_t . The difference between proportions of the residue returned to the soil and decomposed residues were considered as un-decomposed residue which was multiplied by 0.45 to gain attainable carbon sequestration. Data of attainable carbon sequestration was analyzed as factorial experiment based on completely randomized design.

Results and Discussion

Results indicated that higher C:N and therefore lower residue quality caused lower residue decomposition rate. This parameter was also decreased in soils with lower moisture. Effects of soil moisture on residue decomposition was more pronounced than residue quality. Comparison of attainable carbon sequestration in Iran's provinces revealed that in wheat cropping systems: Kermanshah and Sistan and Balouchestan, in maize: Qazvin and Southern Khorasan, in rapeseed: Isfahan and Boushehr, in cotton: Eastern Azarbaijan and Hormozgan and in soybean cropping system: Ardebil and Eastern Azarbaijan provinces had the highest and lowest attainable carbon sequestration, respectively. Attainable carbon sequestration in all crops was decreased with increasing soil moisture from 30 to 60 and 100% of FC and decreasing residue retention from 100 to 50 and 0 % of total crop residue production. Maize and soybean showed the highest and lowest capability of carbon sequestration, respectively.

Conclusion

1, 2 and 3- Ph.D in Crop Ecology and Professor, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture and Professor, Department of Soil Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: akooch@um.ac.ir)

DOI:10.22067/jag.v11i1.50344

Results of the present study highlight the effects of environmental factors such as soil moisture as well as inherent properties of plant residues on residue decomposition. Climate and residue quality are the main determining factors of soil microorganisms activity and residue decomposition and therefore soil attainable carbon sequestration. Better soil moisture condition and temperature, also higher residue quality increases microorganisms activity resulting in more residue decomposition. Furthermore, plant biomass and residue management affects attainable carbon sequestration. Resultant of the mentioned factors determines attainable carbon sequestration in soils of agroecosystems. Regarding to the total carbon sequestration of afore-mentioned crops, Ardebil and Sistan and Balouchestan provinces showed the highest and lowest carbon sequestration, respectively.

Keywords: Air temperature, Residue decomposition, Residue retention, Soil moisture