

حساسیت دمایی نرخ دی اکسید کربن متصاعدشده از خاک توده جنگلی راش - ممرز (پژوهش موردی: جنگل شست کلاته گرگان)

فاطمه رفیعی^۱، هاشم حبشی^{۲*}، رامین رحمانی^۳ و خسرو ثاقب طالبی^۴

۱- دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۲* - نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

پست الکترونیک: habashi@gau.ac.ir

۳- دانشیار، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۴- دانشیار، بخش تحقیقات جنگل، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷

چکیده

چگونگی اثرات تغییر دما بر تنفس خاک از ناشناخته‌هایی است که موجب عدم قطعیت در پیش‌بینی وضعیت آینده چرخه جهانی کربن می‌شود. حساسیت دمایی تنفس خاک (Q_{10}) مؤلفه‌ای کلیدی به‌منظور تخمین بازخورد تنفس خاک به گرمایش جهانی است. هدف از پژوهش پیش‌رو، بررسی حساسیت دمایی تنفس کل خاک براساس تغییرات سالانه دما و محتوای رطوبتی خاک در یک توده راش - ممرز بود. به‌منظور انجام این پژوهش، ابتدا ۱۲ قطعه‌نمونه به ابعاد 3×3 متر (شش قطعه‌نمونه در زیر تاج‌پوشش و شش قطعه‌نمونه در روشنه) مشخص شد. سپس نمونه‌برداری در سه نقطه تصادفی از هر قطعه‌نمونه انجام شد. تنفس ماهانه خاک با استفاده از چمبر دینامیکی بسته در نقاط تعیین‌شده طی یک سال اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش بیانگر همبستگی معنی‌دار بین حساسیت دمایی تنفس خاک و متغیرهای محیطی شامل دمای خاک، محتوای رطوبتی خاک و دمای هوا در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد بود. همچنین، حساسیت دمایی تنفس خاک در قطعه‌نمونه‌های زیر تاج‌پوشش بیشتر از روشنه بود. در حالی‌که کمترین نرخ تنفس خاک در فصل زمستان مشاهده شد (0.94 میکرومول بر متر مربع در ثانیه)، بیشترین حساسیت دمایی تنفس خاک نیز به همین فصل و قطعه‌نمونه زیر تاج‌پوشش ($4/23$) اختصاص یافت. بر این اساس، افزایش جزئی در دمای خاک به‌ویژه در فصل زمستان منجر به تغییر چشمگیری در نرخ تنفس کل خاک و به‌هم‌خوردن تعادل چرخه کربن در توده‌های جنگلی این منطقه خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حساسیت دمایی تنفس خاک، دما و محتوای رطوبتی خاک، گرمایش جهانی.

مقدمه

شرایط اقلیمی، اهمیت و جایگاهی ویژه در بین زیست‌بوم‌های جنگلی جهان سالانه قادر به جذب ۳۰ درصد (معادل دو پتاگرم) دی‌اکسید کربن انتشاریافته به هواسپهر هستند (Bellassen & Luysaert, 2014). بر این اساس، آن‌ها در تنظیم غلظت گازهای گلخانه‌ای و تعدیل

زیست‌بوم‌های جنگلی جهان سالانه قادر به جذب ۳۰ درصد (معادل دو پتاگرم) دی‌اکسید کربن انتشاریافته به هواسپهر هستند (Bellassen & Luysaert, 2014). بر این اساس، آن‌ها در تنظیم غلظت گازهای گلخانه‌ای و تعدیل

Yu et al.,)، تپ پوشش گیاهی (Janssens, 2006 &)، شرایط دیگر یا فرایندهای سالانه یا فصلی جهشی، حتی الگوهای فنولوژی گیاهان (Curiel Yuste et al., 2004) از جمله عوامل مؤثر بر تغییرات حساسیت دمایی تنفس خاک هستند. شواهد نشان می‌دهد که حساسیت دمایی تنفس خاک ثابت نیست، اما این شاخص همبستگی منفی با دما و همبستگی مثبت با رطوبت خاک در طول هر سال یا بین سال‌ها دارد (Xu & Qi, 2001; Janssens & Pilegaard, 2003; Chen et al., 2010). گزارش شده که مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک از ۱/۳ تا ۳/۳ در نواحی معتدله (Raich & Schlesinger, 1992) و دو تا ۸/۸ در نواحی قطب شمال (Nadelhoffer et al., 1992) متغیر است، در حالی که Mikan و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از انکوباسیون آزمایشگاهی خاک توندرای قطبی، مقادیر بزرگ‌تری را برای حساسیت دمایی تنفس خاک گزارش کردند. براساس نتایج پژوهش مذکور، دامنه میانگین حساسیت دمایی تنفس خاک از ۷/۸ در دمای بیشتر از صفر درجه تا ۱۳۴ در کمتر از صفر درجه سانتیگراد متغیر بود. انحراف کوچکی در مقدار حساسیت دمایی برآورد شده می‌تواند موجب ارزیابی معنی‌دار در تخمین تنفس خاک شود (Xu & Qi, 2001). پژوهشگران معتقدند که شناخت بهتری از تغییرات حساسیت دمایی تنفس خاک می‌تواند موجب افزایش اطلاعات در زمینه مقدار هدررفت دی‌اکسید کربن خاک در آینده (Chen et al., 2010) و چگونگی تعادل کربن در بیوم‌های خشکی شود (Wang et al., 2010). به این منظور، با توجه به سناریوهای مرتبط با پدیده تغییر اقلیم در مقیاس جهانی، تخمین برآورد شاخص حساسیت دمایی تنفس خاک در بسیاری از رویشگاه‌های جهان انجام شده است (Raich & Schlesinger, 1992; Janssens & Pilegaard, 2003; Chen et al., 2010; Yu et al., 2017).

جنگل‌های هیرکانی با قدمت حدود یک میلیون سال جزء جنگل‌های کهن دنیا محسوب می‌شوند که در بخش‌های مختلف، ترکیب گونه‌ای متفاوتی دارند (Marvie-

دی‌اکسید کربنی است که به واسطه فعالیت‌های انسانی از احتراق سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری به اتمسفر وارد می‌شود (Wang et al., 2010)، بنابراین آگاهی از عوامل مؤثر بر تنفس خاک اهمیت ویژه‌ای دارد (Curiel Yuste et al., 2004).

براساس گزارش هیئت بین دولت‌های تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change) تغییرات تنفس خاک وابستگی زیادی به افزایش درجه حرارت دارد که به‌طور چشمگیری در طول سه دهه گذشته شروع شده و با شدت بیشتری نیز ادامه خواهد داشت (IPCC, 2007). به‌طور مسلم واکنش تنفس خاک به گرمایش جهانی وابسته به تغییراتی است که در روابط بین تنفس خاک و دمای خاک وجود دارد، بنابراین آگاهی بیشتر در مورد حساسیت دمایی تنفس خاک به‌منظور رفع ابهامات موجود در زمینه چگونگی تعادل چرخه کربن در مقیاس جهانی و منطقه‌ای و نیز پیش‌بینی بازخوردهای آینده به سیستم به‌هم متصل شده اقلیم-کربن بسیار مهم است (Piao et al., 2008).

دمای خاک به‌طور معمول متغیر مهمی برای پیش‌بینی تنفس خاک است (Davidson & Janssens, 2006). حساسیت دمایی تنفس خاک به‌طور معمول با پارامتر Q_{10} نشان داده می‌شود. حساسیت دمایی تنفس خاک شاخصی است که نشان‌دهنده مقدار افزایش تنفس خاک به‌ازای افزایش ۱۰ درجه سانتیگرادی دمای خاک است (van't Hoff; 1899, Yu et al., 2017). این شاخص مؤلفه مهمی در تشریح حساسیت دمایی تنفس خاک محسوب می‌شود (Yu et al., 2017). در بیشتر پژوهش‌ها، یک رابطه خطی نمایی (Linear exponentially) بین حساسیت دمایی تنفس خاک و دما گزارش شده است (Zheng et al., 2009; Subke, 2010). به‌هرحال، مشخص شده که علاوه بر دما، مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک تحت تأثیر عوامل محیطی دیگری نیز قرار دارد. تغییرات سالانه یا فصلی محتوای رطوبتی خاک (Chen et al., 2010)، زی‌توده ریشه (Yu et al., 2017)، دسترسی به عناصر غذایی (Davidson

راش - ممرز واقع در پارسل ۳۲ طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا که در ارتفاع ۹۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد، انتخاب شد. پس از مشخص کردن ۲۰ روزه سه‌ساله با مساحت تقریبی ۴۰۰ متر مربع که شرایط محیطی یکسان (سنگ بستر، شیب، جهت عمومی منطقه، بافت خاک، مقدار بارش، دما و رطوبت هوا) داشتند، شش روزه به صورت تصادفی از بین آن‌ها انتخاب شد. سپس در کنار هریک از روزه‌های انتخاب‌شده، یک منطقه زیر تاج‌پوشش با فاصله حدود ۲۵ متر از روزه (Muscolo et al., 2007) مشخص شد. در هریک از مناطق واقع در روزه و زیر تاج‌پوشش، یک قطعه‌نمونه به ابعاد ۳ × ۳ متر (Jiang et al., 2013) مستقر شد. در هر قطعه‌نمونه، سه نقطه تصادفی (سه تکرار) در نظر گرفته شد. به منظور اندازه‌گیری نرخ تنفس خاک، یک ماه پیش از شروع اندازه‌گیری‌های ماهانه در هریک از ۳۶ نقطه انتخاب‌شده، حلقه‌هایی از جنس پلی‌اتیلن با قطر داخلی ۱۵/۵ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک قرار داده شد. در هریک از نقاط مذکور، مقدار دی‌اکسید کربن متصاعدشده از سطح خاک با استفاده از دستگاه Q-Box SR1LP و با روش چمبر دینامیکی بسته هر ۶۰ ثانیه یک‌بار و در مدت زمان پنج دقیقه اندازه‌گیری شد و برحسب واحد میکرومول بر متر مربع در ثانیه گزارش شد. همچنین، برای کاهش خطای ناشی از تنفس پوشش گیاهی روزمینی، ۲۴ ساعت پیش از شروع اندازه‌گیری در هر ماه، گیاهان رشدکرده در داخل هریک از حلقه‌های پلی‌اتیلن خارج شدند (Joos et al., 2010). اندازه‌گیری‌ها به صورت ماهانه و طی دوره یک‌ساله (از مهر ۱۳۹۵ تا پایان شهریورماه ۱۳۹۶) انجام شد. همچنین، با قرار دادن میله سنجش‌گر دماسنج دیجیتال (Luster Leaf 1625 Digital Soil Thermometer) دمای خاک در عمق ۱۰ سانتی‌متری ثبت شد. دما و رطوبت هوا نیز با استفاده از رطوبت‌سنج و دماسنج محیطی دیجیتال مدل Testo 608-H1 اندازه‌گیری شد. با استفاده از رینگ‌های نمونه‌برداری با قطر داخلی نه سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر، نمونه‌برداری خاک در عمق ۱۰ سانتی‌متری انجام شد. پس از انتقال نمونه‌های

(Mohadjer, 2011). توده‌های راش آمیخته حدود ۱۷/۶ درصد مساحت، ۲۳/۶ درصد تعداد و ۳۰ درصد حجم این جنگل‌ها را تشکیل می‌دهد (Rasaneh et al., 2001)، بنابراین انتظار می‌رود که مشارکت قابل توجهی در تعدیل چرخه کربن در مقیاس محلی و جهانی ایفا کند. بر این اساس، پژوهش پیش‌رو با هدف برآورد حساسیت دمایی تنفس خاک به تغییرات آب‌وهوایی در فصل‌های مختلف سال در یک توده ناهمسال و آمیخته راش - ممرز طرح‌ریزی شد. انجام این پژوهش می‌تواند گام اولیه و ارزشمندی به منظور پیش‌بینی تغییرات نرخ دی‌اکسید کربن متصاعدشده از سطح خاک در یکی از توده‌های مهم جنگل‌های هیرکانی در شرایط اقلیمی آینده (گرمایش جهانی) باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سری یک طرح جنگلداری دکتر بهرام‌نیا با مساحت ۱۷۱۳/۳ هکتار در محدوده طول جغرافیایی ۲۶' ۲۱" تا ۵۴' ۵۷" ۲۴' ۵۴" شرقی و عرض جغرافیایی ۲۷' ۴۳' ۳۶" تا ۴۸' ۶" ۳۶' شمالی و محدوده ارتفاعی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ متر از سطح دریا در استان گلستان قرار گرفته است. این منطقه، اقلیم مرطوب معتدله دارد. میانگین دمای سالانه ۱۵/۶ درجه سانتیگراد و میانگین بارش سالانه ۶۴۹ میلی‌متر است. سنگ مادر منطقه در بیشتر موارد آهکی و خاک منطقه رسی لومی است. از مهم‌ترین گونه‌های مستقر در منطقه می‌توان به راش (*Fagus orientalis* Lipsky)، ممرز (*Carpinus*)، انجیلی (*betulus L.*)، افرا (*Acer sp.*) اشاره کرد. تیپ پوشش درختی بسته به ارتفاع از سطح دریا در بخش‌های مختلف، متفاوت است (Anonymous, 1995).

روش پژوهش

به منظور انجام پژوهش پیش‌رو، یک توده دست‌نخورده

$$R_s = \alpha e^{\beta T} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن: R_s نرخ تنفس خاک (میکرومول بر متر مربع در ثانیه)، α و β ثابت‌های معادله و T دمای خاک است. Q_{10} شاخص تشریح‌کننده حساسیت دمایی تنفس خاک است و از رابطه ۲ محاسبه شد (van't Hoff, 1899):

$$Q_{10} = e^{10\beta} \quad \text{رابطه (۲)}$$

نتایج

مقایسه میانگین درصد اجزای تشکیل‌دهنده و وزن مخصوص ظاهری خاک در قطعه‌نمونه‌های روشن و زیر تاج‌پوشش نشان داد که تفاوت معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد در این دو بخش وجود نداشت (جدول ۱). در جدول ۱ خلاصه‌ای از مشخصه‌های عمومی خاک رویشگاه مورد مطالعه ارائه شده است.

خاک به آزمایشگاه، محتوای رطوبتی خاک با استفاده از روش تفاوت وزنی در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد (Jafari Haghghi, 2003)، کربن آلی خاک با روش اکسیداسیون تر (Walkley & Black, 1934)، بافت خاک با روش هیدرومتری (Jafari Haghghi, 2003) و وزن مخصوص ظاهری خاک با روش سیلندر (Jafari Haghghi, 2003) تعیین شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

از آزمون‌های کولموگروف-سمیرنوف و لون به ترتیب برای بررسی نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها استفاده شد. همبستگی پیرسون به منظور بررسی همبستگی تنفس خاک و حساسیت دمایی آن با متغیرهای محیطی به کار گرفته شد. حساسیت دمایی به نرخ تنفس خاک با مدل رگرسیون غیرخطی van't Hoff function (رابطه ۱) محاسبه شد.

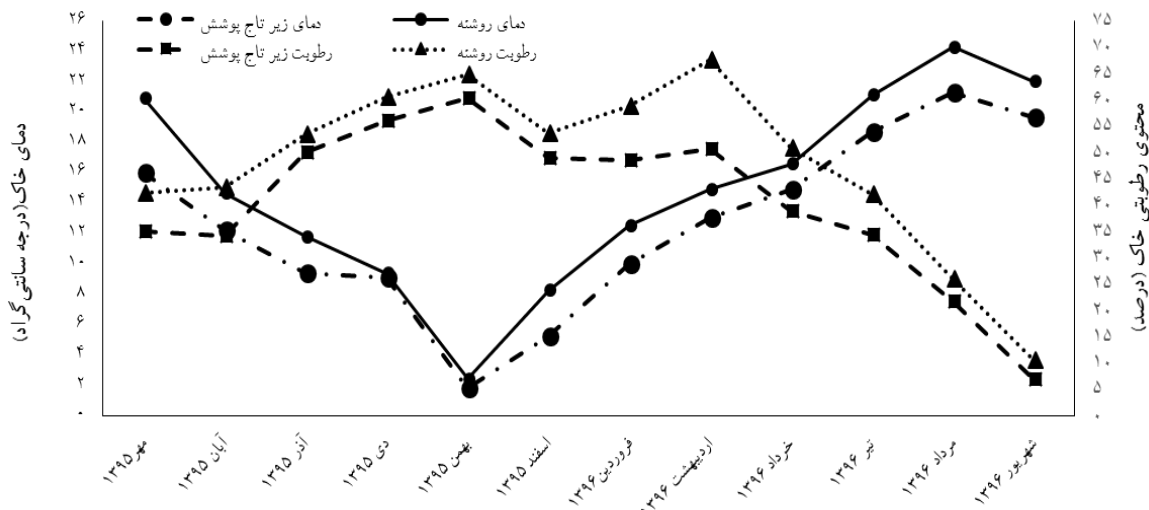
جدول ۱- میانگین (\pm اشتباه معیار) برخی از مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک توده

مشخصه	روشنه	زیر تاج‌پوشش
رس (درصد)	۵۰/۳۰ \pm ۰/۵۸ ^a	۵۲/۱۳ \pm ۰/۳۳ ^a
سیلت (درصد)	۳۰/۱۷ \pm ۲/۱۸ ^a	۲۹/۶۷ \pm ۰/۸۸ ^a
شن (درصد)	۱۹/۵۳ \pm ۰/۶۶ ^a	۱۸/۲۰ \pm ۰/۵۸ ^a
وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱/۰۳ \pm ۰/۰۷ ^a	۱/۱۸ \pm ۰/۰۶ ^a
کربن آلی خاک (درصد)	۴/۱۳ \pm ۰/۱۱ ^a	۴/۰۴ \pm ۰/۰۹ ^a

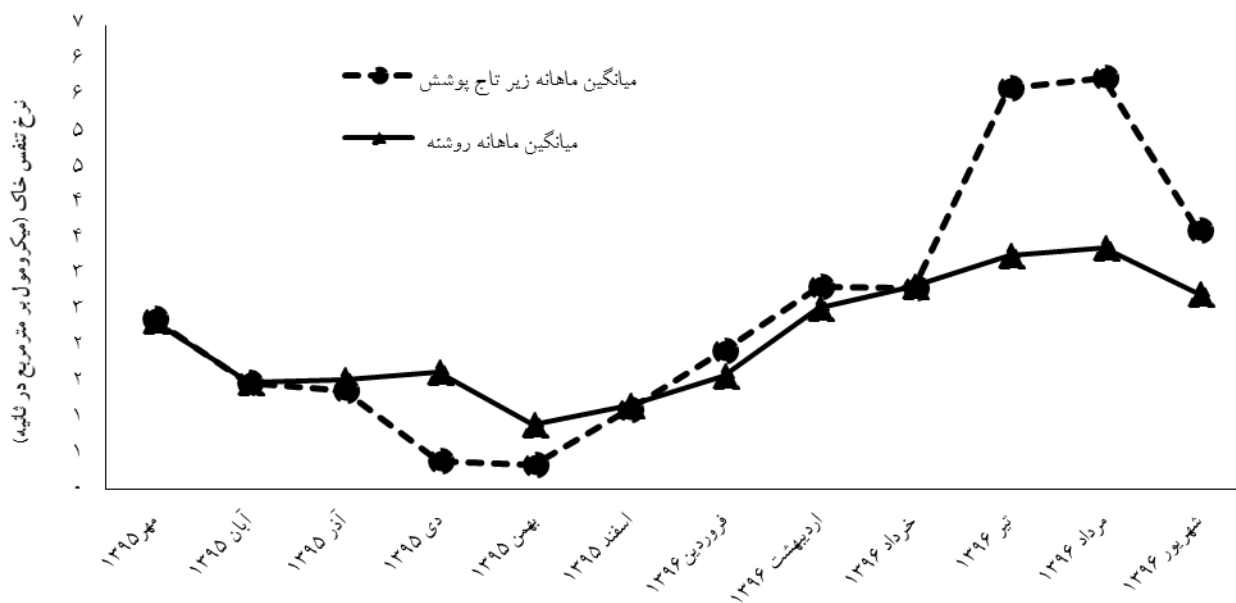
حروف مشابه انگلیسی در هر سطر نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین روشن و زیر تاج‌پوشش در سطح اطمینان ۹۵ درصد است.

دمایی تنفس خاک قطعه‌نمونه‌های روشن و زیر تاج‌پوشش به صورت جداگانه بررسی شد (شکل ۳). طی دوره مورد مطالعه، دامنه تغییرات ماهانه حساسیت دمایی تنفس خاک در قطعه‌نمونه‌های زیر تاج‌پوشش از ۰/۰۶ تا هشت و در قطعه‌نمونه‌های واقع در روشن از صفر تا ۲/۰۶ بود (شکل ۳).

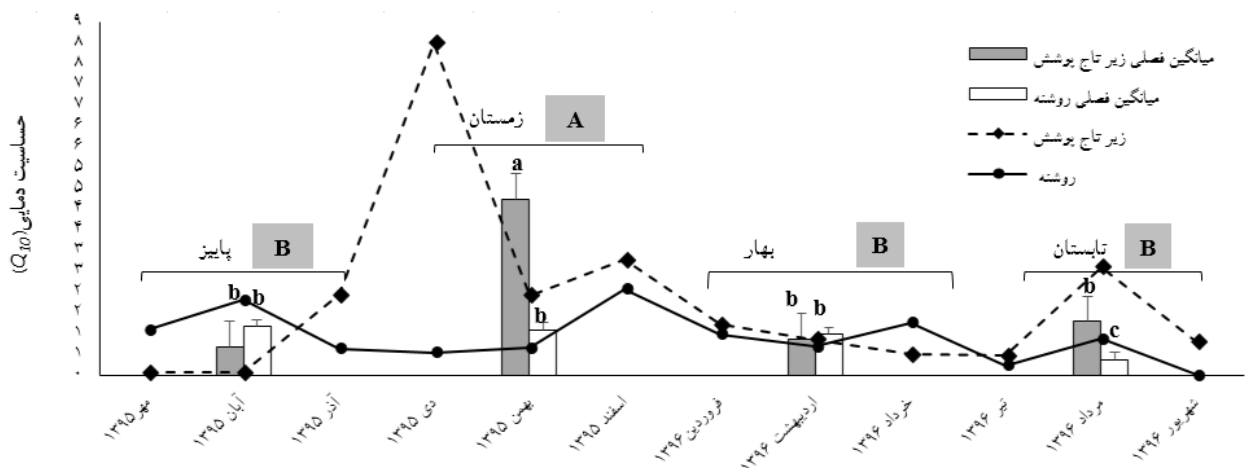
روند تغییرات ماهانه دما و رطوبت هوا و نیز دما و رطوبت خاک در قطعه‌نمونه‌های روشن و زیر تاج‌پوشش نشان می‌دهد که به‌رغم ارتفاع حدود ۱۰۰۰ متری منطقه مورد مطالعه، اما خشکی در تمام ماه‌های فصل تابستان حاکم است (شکل ۱). نرخ تنفس خاک در قطعه‌نمونه‌های واقع در روشن و زیر تاج‌پوشش در فصل‌های مختلف سال، تفاوت معنی‌داری داشتند (شکل ۲). به همین دلیل، حساسیت



شکل ۱- میانگین ماهانه دما و محتوای رطوبتی خاک در قطعه نمونه های روشن و زیر تاج پوشش



شکل ۲- میانگین ماهانه نرخ تنفس ماهانه خاک در قطعه نمونه های روشن و زیر تاج پوشش



شکل ۳- تغییرات ماهانه و فصلی حساسیت دمایی تنفس خاک در قطعه نمونه‌های روشنه و زیر تاج پوشش

معنی دار و با دمای خاک و دمای هوا، همبستگی منفی و معنی دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد نشان داد، درحالی که هیچ یک از پارامترهای تنفس و حساسیت دمایی خاک با عامل محیطی رطوبت هوا ارتباط معنی دار نداشتند.

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، همبستگی قوی و معنی داری (در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد) بین تنفس خاک با دمای خاک، دمای هوا و محتوای رطوبتی خاک وجود دارد. همچنین، Q_{10} با محتوای رطوبتی خاک همبستگی مثبت و

جدول ۲- همبستگی پیرسون تنفس خاک و حساسیت دمایی با مشخصه‌های محیطی

مشخصه خاک	دمای خاک (درجه سانتیگراد)	محتوای رطوبتی خاک (درصد)	دمای هوا (درجه سانتیگراد)	رطوبت هوا (درصد)
تنفس خاک (میکرومول بر متر مربع در ثانیه)	۰/۹** (۰/۰۰)	-۰/۶۶* (۰/۰۱۹)	۰/۹۵** (۰/۰۰)	-۰/۲۷ (۰/۳۹)
حساسیت دمایی تنفس خاک (Q_{10})	-۰/۹** (۰/۰۰)	۰/۶۶* (۰/۰۳)	-۰/۸۲** (۰/۰۰)	۰/۳۵ (۰/۲۹)

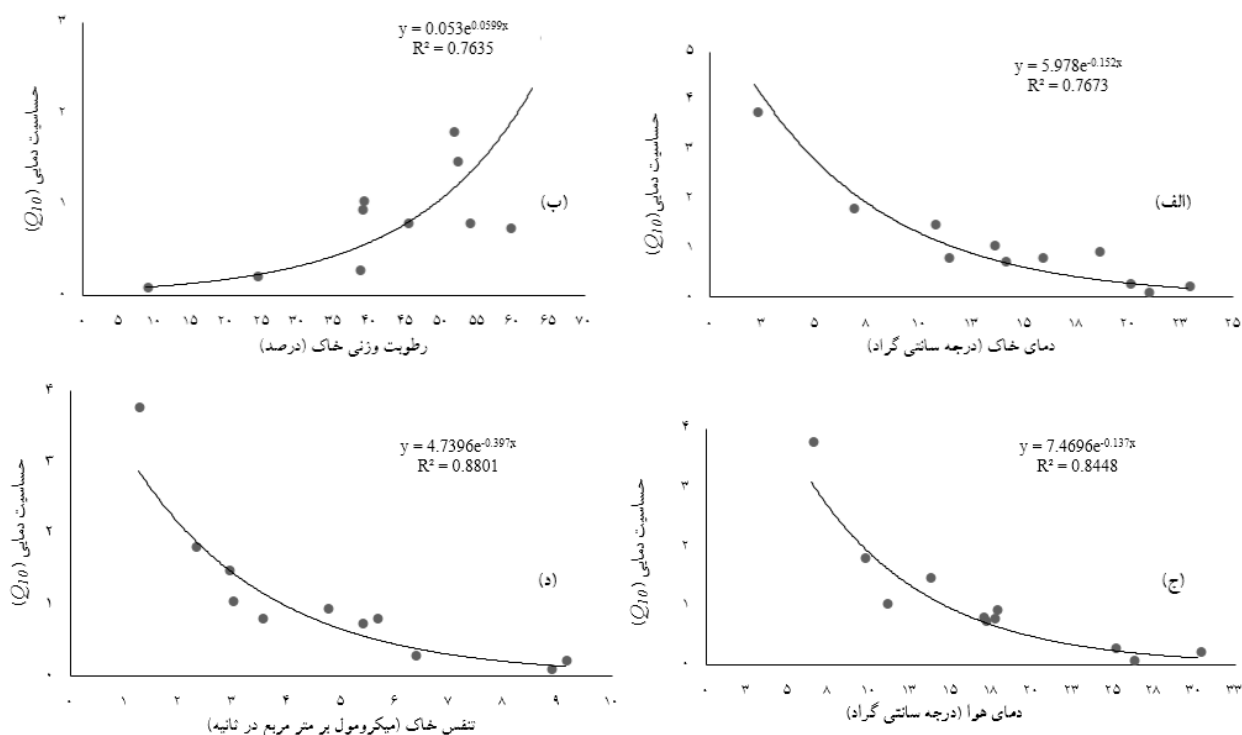
* و ** به ترتیب نشان دهنده همبستگی معنی دار در سطوح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد هستند. (اعداد داخل پرانتز مقدار معنی داری را نشان می‌دهند).

کربن خاک می‌تواند منجر به اشتباه معنی دار در برآورد تعادل چرخه کربن به تغییر اقلیم شود (Fierer et al., 2006). به همین دلیل، ارائه مقادیر حساسیت دمایی تنفس خاک در فصل‌های مختلف سال به‌ویژه در مناطقی مانند منطقه مورد مطالعه که نوسانات آب‌وهوایی در طی سال منجر به ایجاد فصل‌های مختلف خواهد شد، ضروری به نظر می‌رسد. براساس نتایج پژوهش پیش‌رو، بیشترین مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک در فصل زمستان (بی‌برگی کامل) و کمترین مقدار آن در قطعه نمونه‌های زیر تاج پوشش و روشنه به ترتیب در فصل‌های پاییز و تابستان مشاهده شد.

روند کاهشی حساسیت دمایی تنفس خاک با دمای هوا و خاک و روند افزایشی آن با رطوبت خاک در شکل ۴ (الف، ب و ج) قابل مشاهده است. براساس ضریب تبیین مدل‌های رگرسیون نمایی، پارامترهای محیطی شامل محتوای رطوبتی خاک، دمای خاک و دمای هوا به ترتیب ۷۶، ۷۷ و ۸۴ درصد واریانس تغییرات حساسیت دمایی تنفس خاک را شرح داده‌اند.

بحث

دامنه بزرگ تغییرات سالانه حساسیت دمایی تنفس خاک نشان می‌دهد که استفاده از یک مقدار Q_{10} منفرد در مدل‌های



شکل ۴- مدل رگرسیونی حساسیت دمایی تنفس خاک (Q_{10}) با دمای خاک (الف)، رطوبت وزنی خاک (ب)، دمای هوا (ج) و تنفس خاک (د)

جنگل‌های راش هیرکانی در منطقه معتدله‌ای قرار دارند که تغییرات سالانه دما و رطوبت هوا در آن منجر به شکل‌گیری فصل‌های اقلیمی (Anonymous, 1995) می‌شود. بر این اساس، تفاوت محسوسی در فعالیت پوشش گیاهی نیز در طی سال وجود دارد که توجیه‌کننده تفاوت فصلی حساسیت دمایی تنفس خاک است. در صورتی که مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک با صحت و دقت کافی برآورد شود، تغییرپذیری در مقادیر حساسیت دمایی تنفس خاک در مقیاس مکانی کوچک فقط اثر کوچکی بر صحت مدل‌های پویایی ماده آلی خاک در نواحی با وسعت بیشتر خواهد داشت (Fierer *et al.*, 2006). بر اساس یافته‌های پژوهش پیش‌رو، دامنه تغییرات سالانه تنفس خاک در زیرتاج پوشش بیشتر از روشن بود. در روشن‌ها به دلیل عدم حضور یا کاهش حضور ریشه‌های زنده، بیشتر تغییرات تنفس خاک تحت

روند تغییرات فصلی حساسیت دمایی تنفس خاک به‌طور معمول از روند فصلی رطوبت خاک پیروی می‌کند (Xu & Qi, 2001)، به نحوی که مقدار آن با کاهش دما و افزایش رطوبت در مقیاس‌های بزرگ افزایش می‌یابد (Subke & Bahn, 2010). از سویی، اهمیت فعالیت پوشش گیاهی نیز در کنترل واکنش دمایی تنفس خاک در مطالعات مختلف به اثبات رسیده است. چنانچه Sampson و همکاران (۲۰۰۷) گزارش کردند که تغییر در مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک ممکن است به دلیل تفاوت فصلی در مقدار فتوسنتز باشد. همچنین، Curiel Yuste و همکاران (۲۰۰۴) یک جنگل معتدله آمیخته در بلژیک را که تفاوت‌های فصلی در فتوسنتز داشت، بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تغییرات در فنولوژی گیاهی به صورت معنی‌داری در تغییر فصلی حساسیت دمایی تنفس خاک مؤثر است.

Yu و همکاران (۲۰۱۷) همبستگی معنی‌داری بین شاخص حساسیت دمایی تنفس خاک و متغیرهای محیطی مشاهده نشد، اما براساس یافته‌های بیشتر پژوهشگران، حساسیت دمایی تنفس خاک، وابستگی زیادی به تغییرات جزئی دما دارد (Xu & Qi, 2001). همبستگی منفی بین شاخص حساسیت دمایی تنفس خاک و دمای خاک و نیز رابطه مثبت و معنی‌دار شاخص حساسیت دمایی تنفس خاک با محتوای رطوبتی خاک که از نتایج پژوهش پیش‌رو است (جدول ۲)، تأییدکننده پژوهش‌های انجام‌شده توسط Xu و Qi (۲۰۰۱) و Chen و همکاران (۲۰۱۰) است. چنانچه نتیجه پژوهش Xu و Qi (۲۰۰۱) منجر به ارائه دو مدل خطی بین حساسیت دمایی تنفس خاک و رطوبت خاک ($R^2=0/86$) و نیز دمای خاک ($R^2=0/54$) در عمق ۱۰ سانتی متری شد. این مقادیر به ضریب‌های تبیین مدل‌های پیش‌بینی حساسیت دمایی تنفس خاک با استفاده از دمای خاک ($R^2=0/77$) و محتوای رطوبتی خاک ($R^2=0/76$) در پژوهش پیش‌رو نزدیک هستند.

در پژوهش پیش‌رو، میانگین سالانه شاخص حساسیت دمایی تنفس خاک در زیر تاج پوشش ۱/۷۷ و در روضه ۰/۹ بود. همچنین، دامنه تغییرات به‌صورت میانگین در دو بخش روضه و زیر تاج پوشش در دامنه ۰/۳۷ تا ۴/۲۳ جای گرفت که کمتر از دامنه تغییرات گزارش‌شده در پژوهش‌های دیگر است. این نتیجه می‌تواند بیانگر آن باشد که حساسیت دمایی در منطقه مورد مطالعه کمتر از پژوهش‌های پیشین است. همچنین، ممکن است که تغییرات تنفس خاک تحت تأثیر عوامل مهم دیگری مانند محتوای رطوبتی خاک باشد. Janssens و Pilegaard (۲۰۰۳) گزارش کردند که مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک در دامنه بین دو تا ۲۳/۱ با مقدار متوسط سالانه ۴/۲ جای داشت. در پژوهش Chen و همکاران (۲۰۱۰)، دامنه مقادیر حساسیت دمایی تنفس خاک در سال ۲۰۰۴ برابر با ۱/۱۶ تا ۲۰/۶، در سال ۲۰۰۵، ۱/۹۳ تا ۱۸/۲ و در سال ۲۰۰۶، ۱/۲۸ تا ۱۶/۹

تأثیر تغییرات تنفس میکروبی است (Rafiee et al., 2017)، اما در زیر تاج پوشش به دلیل حضور بیشتر زی‌توده ریشه‌ها (Suchewaboripont et al., 2015)، تغییرات سالانه تنفس تحت تأثیر مجموع تغییرات تنفس میکروبی و تنفس ریشه است. حساسیت دمایی تنفس خاک وابسته به سهم مشارکت ریشه‌ها و ریزوسفرهای مرتبط به میکروبیوتا (شامل میکوریزا) به کل دی‌اکسید کربن متصاعدشده از خاک است (Boone et al., 1998). تنفس ریشه و ریزوسفر بخشی از تنفس خاک است که به مقدار زیادی با فتوسنتز روی زمینی مرتبط است (Kuzyakov & Cheng, 2001) و از طریق تخصیص مواد فتوسنتزی به ریشه‌ها و مواد ترشح‌یافته از ریشه کنترل می‌شود (Wang et al., 2010). به این صورت که در طول فصل رویش نسبت به فصل استراحت (غیررویش) مواد بیشتری در اختیار ریشه‌ها قرار می‌گیرد و تنفس خاک به مقدار زیادی افزایش می‌یابد (Wang et al., 2010). تنفس بیشتر ریشه می‌تواند موجب افزایش نرخ تجزیه مواد آلی شود. این امر ممکن است افزایش مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک را به دنبال داشته باشد (Ma et al., 2014). با افزایش دما در فصل تابستان و وجود همبستگی منفی بین شاخص حساسیت دمایی تنفس خاک با دمای خاک و هوا، مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک در این فصل نسبت به دو فصل پاییز و بهار در قطعه نمونه‌های زیر تاج پوشش افزایش می‌یابد که ممکن است به دلیل افزایش معنی‌دار نرخ تنفس ریشه باشد، بنابراین انتظار می‌رود که نوسانات حساسیت دمایی سالانه تنفس خاک در زیر تاج پوشش بیشتر از روضه باشد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش مؤید این مطلب است (شکل ۳).

به‌طور کلی، تنفس خاک به مقدار زیادی توسط دو عامل دما و رطوبت خاک کنترل می‌شود (Chen et al., 2010). وابستگی قوی تنفس خاک با شرایط دمایی و رطوبتی خاک منجر به تغییرات معنی‌دار مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک در طی سال شد. اگرچه در پژوهش

کربن متصاعدشده از سطح خاک ضروری است که امید است در پژوهش‌های بعدی به آن پرداخته شود.

سیاسگزاری

از پروفسور فایز رئیسی گهروی، استاد محترم گروه مهندسی آب و خاک در دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد که در طراحی این پژوهش کمک شایان توجهی داشتند و علم خود را بی‌منت در اختیار تیم پژوهشی گذاشتند، سیاسگزاری می‌شود. از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که حمایت مالی این پژوهش را برعهده داشت، کمال قدردانی به عمل می‌آید.

References

- Ågren, G.I. and Wetterstedt, J.A.M., 2007. What determines the temperature response of soil organic matter decomposition? *Soil Biology and Biochemistry*, 39(7): 1794-1798.
- Bellassen, V. and Luysaert, S., 2014. Carbon sequestration: managing forest in uncertain times. *Nature*, 506(7487): 153-155.
- Boone, R.D., Nadelhoffer, K.J., Canary, J.D. and Kaye, J.P., 1998. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature*, 396: 570-572.
- Chen, B., Liu, S., Ge, J. and Chu, J., 2010. Annual and seasonal variations of Q_{10} soil respiration in the sub-alpine forests of the Eastern Qinghai-Tibet Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(10): 1735-1742.
- Curiel Yuste, J., Janssens, I.A., Carrara, A. and Ceulemans, R., 2004. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 10(2): 161-169.
- Davidson, E.A., Richardson, A.D., Savage, K.E. and Hollinger, D.Y., 2006. A distinct seasonal pattern of the ratio of soil respiration to total ecosystem respiration in a spruce-dominated forest. *Global Change Biology*, 12(2): 230-239.
- Davidson, E.A. and Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081): 165-173.
- Fierer, N., Colman, B.P., Schimel, P.J. and Jackson, R.B., 2006. Predicting the temperature dependence of microbial respiration in soil: A continental-scale

در دو بوم‌سازگان جنگلی نیمه‌آلپی در شرق فلات تبت بود. به این ترتیب، متوسط مقدار شاخص حساسیت دمایی تنفس خاک در پژوهش پیش‌رو بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده در پژوهش‌های پیشین گزارش شد. مقادیر زیاد حساسیت دمایی تنفس خاک در فصل زمستان که نتیجه پژوهش پیش‌رو و پژوهش‌های دیگر است، بیان‌کننده آن است که دمای کم، اهمیت بیشتری در چرخه کربن نسبت به دمای زیادتر دارد (Chen *et al.*, 2010). در واقع، تغییر دما در فصل‌های سردتر، تنفس خاک را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد.

حساسیت دمایی شاخص مهمی برای ارزیابی تعادل چرخه کربن در مقیاس جهانی است. همچنین، از این شاخص زیستی می‌توان برای پیش‌بینی پتانسیل انتشار CO_2 از بیوم‌های جنگلی در بازخورد به سناریوهای گرمایش جهانی استفاده کرد (Ågren & Wetterstedt, 2007). افزایش مقدار حساسیت دمایی تنفس خاک در فصل زمستان بیانگر آن است که تغییرات جزئی دمای خاک در این فصل، اثرات قابل توجهی بر مقدار دی‌اکسید کربن متصاعدشده از سطح خاک خواهد داشت، بنابراین در نتیجه تداوم پدیده تغییر اقلیم که براساس سناریوهای اقلیمی در منطقه مورد پژوهش نیز پیش‌بینی شده است، شاهد تغییرات چشمگیری در نرخ تنفس خاک و تغییر در چرخه کربن این منطقه خواهیم بود. مقدار کم حساسیت دمایی تنفس خاک در فصل‌های بهار، پاییز و تابستان می‌تواند حاکی از تأثیر بیشتر محتوای رطوبتی خاک یا عوامل محیطی دیگر بر نرخ تنفس خاک در این فصل‌ها باشد. روند متفاوت حساسیت دمایی تنفس خاک در قطعه‌نمونه‌های روشن و زیر تاج‌پوشش نشان داد که حساسیت دمایی تنفس کل خاک، واکنشی ترکیبی از تنفس هتروتروفیک و اتوتروفیک به دمای خاک است (Yu *et al.*, 2017)، بنابراین به نظر می‌رسد که بررسی مقدار حساسیت دمایی هریک از اجزای تنفس خاک (تنفس میکروبی و تنفس ریشه) به‌منظور برآورد مناسب‌تر و ارائه بینشی دقیق‌تر از چگونگی تغییرات نرخ دی‌اکسید

- biomass in artificial gaps in silver fire stands. *European Journal of Forest Research*, 126(1): 59-65.
- Nadelhoffer, K.J., Giblin, A.E., Shaver, G.R. and Linkins, A.E., 1992. Microbial processes and plant nutrient availability in arctic soils: 281-300. In: Chapin III, F.S., Jefferies, R.L., Reynolds, J.F., Shaver, G.R. and Svoboda, J. (Eds.). *Arctic Ecosystems in a Changing Climate: An Ecophysiological Perspective*. Academic Press, San Diego, California, 468p.
 - Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Peylin, P., Reichstein, M., Luysaert, S., Margolis, H., Fang, J., Barr, A., Chen, A., Grelle, A., Hollinger, D.Y., Laurila, T., Lindroth, A., Richardson, A.D. and Vesala, T., 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 451: 49-52.
 - Rafiee, F., Habashi, H., Rahmani, R. and Sagheb-Talebi, Kh., 2017. Effect of selection system on variability of some soil microbiological parameters in mixed beech stand of Hyrcanian forests. *Journal of Forest Research and Development*, 3(3): 191-205 (In Persian).
 - Raich, J.W. and Schlesinger, W.H., 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2): 81-99.
 - Rasaneh, Y., Moshtagh Kahnamoie, M.H. and Salehi, P., 2001. Quantitative and qualitative investigation on forests of northern Iran. *Proceedings of the National Conference on Management of Northern Forests and Sustainable Development*. Ramsar, Iran, 6-7 Sep. 2001: 55-79 (In Persian).
 - Sampson, D.A., Janssens, I.A., Curiel Yuste, J. and Ceulemans, R., 2007. Basal rates of soil respiration are correlated with photosynthesis in a mixed temperate forest. *Global Change Biology*, 13(9): 2008-2017.
 - Subke, J.A. and Bahn, M., 2010. On the 'temperature sensitivity' of soil respiration: Can we use the immeasurable to predict the unknown? *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9): 1653-1656.
 - Suchewaboripont, V., Ando, M., Iimura, Y., Yoshitake, S. and Ohtsuka, T., 2015. The effect of canopy structure on soil respiration in an old-growth beech-oak forest in central Japan. *Ecological Research*, 30(5): 867-877.
 - van't Hoff, J.H., 1899. *Lectures on Theoretical and Physical Chemistry*. Edward Arnold Publishers Ltd, London, UK, 156p.
 - Walkley, A. and Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic analysis. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(3): 1-10.
 - Anonymous, 1995. *Forest Management Plan*. District 1 Dr. Bahramnia forest, Watershed 85. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, 252p (In Persian).
 - IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Sciences Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M.M.B. and Miller, H.L. (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996p.
 - Jafari Haghighi, M., 2003. *Methods of Soil Analysis: Sampling and Important Physical & Chemical Analysis*. Nedaye Zoha Press, Sari, 236p (In Persian).
 - Janssens, I.A. and Pilegaard, K., 2003. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 9(6): 911-918.
 - Jiang, H., Deng, Q., Zhou, G., Hang, D., Zhang, D., Liu, S., Chu, G. and Li, J., 2013. Responses of soil respiration and its temperature/moisture sensitivity to precipitation in three subtropical forests in southern China. *Biogeosciences*, 10(2): 3963-3982.
 - Joos, O., Hagedorn, F., Heim, A., Gilgen, A.K., Schmidt, M.W.I., Siegwolf, R.T.W. and Buchmann, N., 2010. Summer drought reduces total and litter-derived soil CO_2 effluxes in temperate grassland - clues from a ^{13}C litter addition experiment. *Biogeosciences*, 7: 1031-1041.
 - Kuzyakov, Y. and Cheng, W., 2001. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(14): 1915-1925.
 - Lal, R., 2005. Forest soil and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220(1-3): 242-258.
 - Marvie-Mohadjer, M.R., 2011. *Silviculture*. University of Tehran Press, Tehran, 418p (In Persian).
 - Ma, Y., Piao, S., Sun, Z., Lin, X., Wang, T., Yue, C. and Yang, Y., 2014. Stand ages regulate the response of soil respiration to temperature in a *Larix principis-rupprechtii* plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184: 179-187.
 - Mikan, C.J., Schimel, J.P. and Doyle, A.P., 2002. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(11): 1785-1795.
 - Muscolo, A., Sidari, M. and Mercurio, R., 2007. Variations in soil chemical properties and microbial

- Zhou, L., 2017. Temperature sensitivity of total soil respiration and its heterotrophic and autotrophic components in six vegetation types of subtropical China. *Science of the Total Environment*, 607-608: 160-167.
- Zheng, Z.M., Yu, G.R., Fu, Y.L., Wang, Y.S., Sun, X.M. and Wang, Y.H., 2009. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(7): 1531-1540.
 - acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29-38.
 - Wang, X., Piao, S., Ciais, P., Janssens, I.A., Reichstein, M., Peng, S. and Wang, T., 2010. Are ecological gradients in seasonal Q_{10} of soil respiration explained by climate or by vegetation seasonality? *Soil Biology and Biochemistry*, 42(10): 1728-1734.
 - Xu, M. and Qi, Y., 2001. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(3): 687-696.
 - Yu, S., Chen, Y., Zhao, J., Fu, S., Li, Z., Xia, H. and

Temperature sensitivity of soil carbon dioxide efflux in beech-hornbeam stand (Case study: Shast-kalateh Forest, Gorgan)

F. Rafiee¹, H. Habashi^{2*}, R. Rahmani³ and Kh. Sagheb-Talebi⁴

1- Ph.D. Student of Silvicultural and Forest Ecology, Faculty of Forest Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2* - Corresponding author, Associate Prof., Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: habashi@gau.ac.ir

3- Associate Prof., Faculty of Forest Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- Associate Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 18.03.2018

Accepted: 28.05.2018

Abstract

The way temperature affects the soil respiration remains still unknown, which causes uncertainties in predictions of future trajectories of the global carbon cycle. Temperature sensitivity of soil respiration (Q_{10}) is a key indicator for estimating soil respiration feedback to global warming. The purpose of this study was to investigate the temperature sensitivity of total soil respiration based on temporal changes in soil temperature and moisture contents in a beech-hornbeam stand. Therefore, we first determined 12 sample plots (six sample plots in the gaps and six under canopy cover) with 3×3-meter dimension. Sampling was conducted in three randomized points of each sample plot. At each sample point, soil respiration was monthly measured using a closed dynamic chamber throughout the year. The results showed a significant correlation between Q_{10} and some environmental variables, including soil temperature and moisture contents and also air temperature ($p < 0.05$ and $p < 0.01$). In addition, the temperature sensitivity of soil respiration was higher under canopy cover plots than that of in gaps. Although the lowest soil respiration rate was observed in winter ($0.94 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), the highest temperature sensitivity of soil respiration in this season (4.23) was observed under canopy cover plots. Thus, a slight increase in soil temperature, especially in winter, would result in a significant change in the rate of respiration of the entire soil and the adoption of a carbon cycle equilibrium in the forest stands of this area.

Keywords: Climate changes, global warming, Q_{10} , soil temperature and moisture contents, temperature sensitivity of soil respiration.