بررسی ارتباط بین حساسیت دمایی تجزیه کربن آلی خاک با برخی از ویژگی‌های خاک و شاخص‌های توپوگرافی در باغ‌های چای استان گیلان

شیرین صیقلانی: *دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت*
حسن رمضانپور*: *دانشیار گروه علوم خاک، دانشکدهٔ علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت*
نفیسه یغمائیان‌مهابادی: *دانشیار گروه علوم خاک، دانشکدهٔ علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت*
محمود فاضلی‌سنگانی: *استادیار گروه علوم خاک، دانشکدهٔ علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت*

مقاله پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۶)

چکیده

حساسیت دمایی تنفس خاک (Q_{10})، مؤلفه‌ای کلیدی برای تخمین بازخورد تنفس خاک به گرمایش جهانی است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی پاسخ تنفس خاک به تغییرات دما با Q_{10} در خاک زیر کشت چای است. به همین منظور از دویست نقطهٔ باغ‌های چای در شرق و غرب استان گیلان در عمق صفر تا چهل سانتی‌متری نمونه‌برداری شد و آزمایش‌های تعیین کربن آلی، کربن فعال، pH، جرم مخصوص ظاهری، ظرفیت تبادل کاتیونی، زیست‌تودهٔ میکروبی و تنفس میکروبی خاک انجام شد. همچنین برخی شاخص‌های توپوگرافی مانند ارتفاع، شیب و جهت شیب با استفاده از نقشهٔ DEM در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 به دست آمد و سایر شاخص‌ها مانند شاخص خیسی، طول شیب، موقعیت نسبی شیب، سطح ویژهٔ حوضه، شبکه آبراههٔ اصلی، فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه، شاخص همگرایی، انحنای نیمرخ و انحنای سطح، از نقشهٔ DEM در محیط نرم‌افزار Saga GIS 2.1.0 استخراج شد. برای اندازه‌گیری Q_{10} نیز از دو تیمار دمایی ۲۵ و ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد استفاده شد. نتایج نشان داد که Q_{10} با کربن بیوماس میکروبی، کربن آلی و کربن فعال خاک بیشترین همبستگی منفی را دارد؛ به عبارتی، هر چه کربن آلی خاک و بیوماس میکروبی آن بیشتر باشد، مقدار Q_{10} کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از اجرای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، شش مؤلفه را با مقادیر ویژهٔ ۳/۹۳، ۲/۲۰، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۶ و ۱/۴ نشان داد که به ترتیب ۲۳/۱، ۱۲/۹، ۱۲/۲، ۱۰/۴، ۹/۴۱ و ۷/۹۹ درصد از تغییرات همبستگی بین مقادیر را توجیه می‌کند. تأثیرگذارترین مؤلفه با بار عاملی ۰/۹۸۱ و واریانس ۲۳/۱۲۵ مربوط به کربن آلی خاک است؛ به عبارتی، می‌توان انتظار داشت در مناطقی که خاک زیر کشت چای، کربن آلی و فعالیت میکروبی بیشتری دارد، در زمان افزایش دما به دلیل داشتن حساسیت دمایی (Q_{10}) کمتر، نسبت به افزایش دما آسیب‌پذیری کمتری دارد.

واژگان کلیدی: تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، تنفس میکروبی (هتروتروفیک)، شاخص‌های توپوگرافی، کربن آلی خاک.

* نویسندهٔ مسئول: Hasramezanpour@yahoo.com

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

۱ـ مقدمه

دی‌اکسید کربن، یکی از اصلی‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که بر دمای هوای جهان تـأثیر دارد (Friedlingstein et al, 2014). تغییرات اندک در میزان انتشار دی‌اکسید کربن از خاک، بر غلظت این گاز در اتمسفر اثر قابل تـوجهی دارد (Schlesinger and Andrews, 2000). به طور عمده، تغییر اقلیم به وسیلهٔ افـزایش غلظـت دی‌اکسـید کـربن در اتمسفر ایجاد می‌شود (IPCC, 2013). چرخهٔ کربن نیز ارتباط تنگاتنگی با تغییر اقلیم دارد؛ به طوری که سالانه ۱۲۰-۷۵ پنتاگرم کربن از خاک بـه اتمسـفر وارد مـی‌شـود (Hibbard and Reichstrin, 2005) کـه اهمیـت قابـل ملاحظـهٔ اکوسیستم‌های خشکی بر چرخهٔ کربن و انتشار دی‌اکسید کربن را نشان می‌دهد (Wang et al, 2018).

تنفس خاک، فرایندی است که دی‌اکسید کربن را از خاک به اتمسفر متصاعد می‌کند، یکی از مهم‌ترین جریان‌های کربن در اکوسیسـتم اسـت (Raich et al, 2002) و دو مؤلفـه تـنفس هتروتروفیـک (تـنفس میکروبـی) و تـنفس اتوتروفیک (تنفس ریشه) را دربرمی‌گیرد (Kuzyakov, 2006). تـنفس هتروتروفیـک خـاک ـ کـه پیامـد تجزیـهٔ میکروبی لاشبرگ، ماده آلی خاک و تراوش‌های ریشه‌ای گیاهان است ـ یکی از اجزای مهم تنفس خـاک بـه شـمار می‌رود (Foti et al, 2016). میکروارگانیزم‌های خاک با فعالیت میکروبی خود و آزاد کردن کربن به شـکل CO_2 بـه اتمسفر (از طریق تنفس)، بر پویایی کربن خاک تأثیر می‌گذارد، در تنفس خاک نقش مهمی ایفا می‌کند و مسـئول ۸۰ تا ۹۵ درصد از معدنی شدن کربن است (Hassink et al, 1994).

مطالعات نشان می‌دهد که تنفس خاک، بازخوردی مثبت نسبت به گرمایش جهانی دارد؛ چون هم مدل‌هـای شـبیه-سازی و هم اندازه‌گیری‌های در مزرعه نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر، تنفس خاک به خصوص مؤلفه هتروتروفیک آن با افزایش دما افزایش یافته‌اسـت (Bond-Lamberty and Thomson, 2010 & Bond-Lamberty et al, 2018 & Capek et al, 2019 & Davidson and Janssens, 2006a).

محققان سرعت تغییر تنفس خاک به ازای هر ده درجهٔ سانتی‌گراد تغییر دما را با شاخصی به نـام حساسـیت دمـایی تنفس خاک[1] (Q_{10}) اندازه می‌گیرند (Jia et al, 2020). از آنجایی که تجزیهٔ مواد آلی خاک به طور مثبت با تغییـرات دمایی در ارتباط است، از شاخص حساسیت دمایی (Q_{10}) برای نشان دادن پاسخ تجزیهٔ ماده آلی خاک به تغییرات دمای روزانه یا فصلی به طور گسترده استفاده می‌شود. در بیشتر پژوهش‌ها، بین Q_{10} و دما رابطه‌ای خطـی ـ نمـایی گـزارش شده‌است (Subke, 2010 & Zheng et al, 2009). علاوه بر دما، مقدار Q_{10} تحت‌تأثیر عوامل محیطی دیگری قرار دارد. حساسیت دمایی تنفس خاک ممکن است به دلیل تغییرات در فراهمی مواد (سوبسترا)، چرخهٔ عناصر، تغییرات سالانه یا فصلی محتوای رطوبتی خاک (Chen et al, 2010) و تجزیهٔ جمعیت میکروبی تغییر کند (Jia et al, 2019 &Zhang et al, 2021).

شواهد نشان می‌دهد که مقدار Q_{10} خاک ثابت نیست؛ این شاخص در طول هر سال با دمـا همبسـتگی منفـی و بـا رطوبت خاک همبستگی مثبت دارد (Chen et al, 2010). براساس گزارش‌ها، مقدار حساسیت دمایی تـنفس خـاک از ۱/۳ تا ۳/۳ در نواحی معتدل (Raich and Schlesinger, 1992) و ۲ تا ۸/۸ در نواحی قطب شمال (Nadelhoffer et al, 1992) متغیر است.

[1] Tempreture Sensitivity Of Soil Respiration

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

Behtari و همکاران (2019)، تغییرات حساسیت دمایی تجزیهٔ ماده آلی خاک را در اکوسیستم مرتع و سطوح مختلف عمق خاک ارزیابی کردند. آنها دریافتند که نوع مدیریت مرتع و عمق بر مقدار Q_{10} تأثیر معنی‌داری دارد؛ به طوری که مقدار Q_{10} در مرتع چرا شده، ۱۰/۲۱ و در مرتع حفاظت شده، ۰/۹۷ است و با افزایش عمق، روند افزایشی می‌یابد. طبق یافته‌های این محققان، دلیل کاهش Q_{10} در مرتع حفاظت شده می‌تواند بالا بودن کیفیت کربن خاک باشد. در پژوهشی دیگر، Rafiee و همکاران (2019) تغییرات مقدار شاخص Q_{10} را بر اساس تغییرات سالانهٔ دما و محتوای رطوبتی خاک در یک تودهٔ جنگلی راش ـ ممرز در جنگل شصت کلاتهٔ گرگان بررسی کردند. 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. در این مطالعه، کمترین میزان تنفس (۰/۹۴ میکرومول بر متر مربع در ثانیه) و بیشترین مقدار Q_{10} (۴/۲۳) در فصل زمستان دیده شد. Yu و همکاران (2022) اثر دما بر تجزیهٔ کربن آلی خاک را در سطوح متفاوت کربنی در شمال شرقی چین در طی یک دورهٔ انکوباسیون ۷۳ روزه بررسی کردند. آنها دریافتند که میزان کربن آلی خاک، دمای انکوباسیون و اثر متقابل این دو، بر تجزیهٔ کربن آلی خاک اثر معنی‌داری دارد؛ هر چه میزان کربن و دمای انکوباسیون بیشتر باشد، به تجزیهٔ بیشتر کربن آلی خاک منجر می‌شود؛ به عبارت دیگر، حساسیت دمایی تجزیهٔ کربن آلی خاک تحت‌تأثیر کیفیت سوبسترا است. Zhu و همکاران (2017) برای درک حساسیت دمایی تجزیهٔ کربن آلی خاک در زمین زیر کشت چای، خاک را به مدت ۲۸ روز در دماهای ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد تحت انکوباسیون قرار دادند تا سرعت تنفس خاک و مقدار Q_{10} آن را اندازه بگیرند. این محققان دریافتند که دما بر سرعت تجزیهٔ کربن آلی خاک اثر می‌گذارد و میزان تجمعی معدنی شدن کربن آلی خاک در دمای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد بیشترین مقدار بوده‌است. آنها همچنین مقدار Q_{10} را در دامنهٔ ۱/۱۵ تا ۱/۴۰ برآورد کردند. بنابر یافته‌های این پژوهشگران، مقدار (Q_{10}) در فاصلهٔ دمایی ۲۵-۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد، بیش از مقدار آن در فاصلهٔ دمایی ۳۵-۲۵ بود. این امر، حساسیت دمایی ضعیف تجزیهٔ کربن آلی خاک را در خاک زیر کشت چای نشان می‌دهد؛ به عبارتی، مخزن کربن آلی خاک در خاک‌های زیر کشت چای در برابر گرمایش آسیب‌پذیری کمتری دارد؛ به همین منظور، یافتن (Q_{10}) در اکوسیستم‌های مختلف می‌تواند به درک بهتر فرایندهای پاسخ خاک به افزایش درجه حرارت در محیط‌هایی که متأثر از گرم شدن کرهٔ زمین است، کمک شایانی کند. با توجه به اینکه چای از محصولات اساسی، استراتژیک و مصرفی تمام گروه‌های جامعه است، کشت آن تنها در مناطق دارای آب و هوای خزری امکان‌پذیر است و باغ‌های چای یکی از کاربری‌های عمده در استان گیلان به شمار می‌رود. همچنین این استان اکوسیستم حساسی دارد و تاکنون حساسیت دمایی کربن در کاربری چای آن بررسی نشده‌است. پس با شناخت این عامل مدیریتی، می‌توان به نوع استفاده از زمین نگرشی سیستمی داشت و در نهایت، به توسعهٔ پایدار محیط زیستی دست یافت؛ به همین دلیل، اهداف عمدهٔ این پژوهش اندازه‌گیری حساسیت دمایی (Q_{10}) در خاک زیر کشت چای و بررسی ارتباط آن با برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک و توپوگرافی منطقه است.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

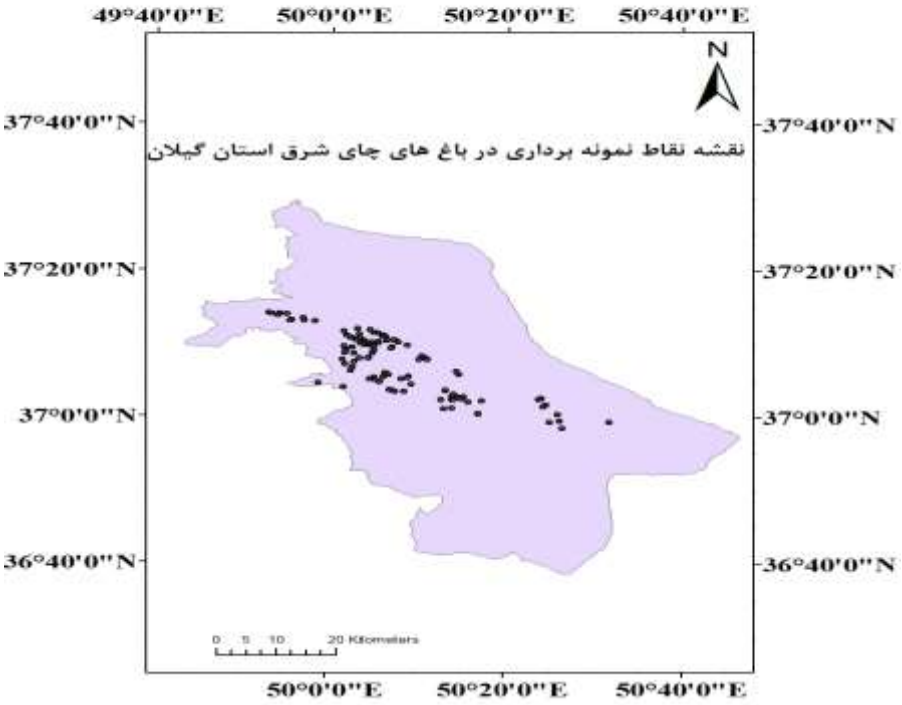
این مطالعه در باغ‌های چای در بخش‌های شرق و غرب استان گیلان انجام شد. چای، گیاهی یک پایه از شاخهٔ نهاندانگان، از ردهٔ دولپه‌ای‌ها، خزان‌ناپذیر و همیشه سبز از خانوادهٔ *Theaceae* و با نام علمی *Camellia sinensis*، محصول چند ساله‌ای است که حدود بیست هزار هکتار از زمین‌های کشاورزی استان گیلان به کشت آن اختصاص دارد و بیش از ۸۷ درصد باغ‌های چای ایران نیز در این استان واقع است (Ghasemi, 2004).

استان گیلان با مساحت ۱۴۰۴۱ کیلومتر مربع، در ´۴۸°۳۴ تا ´۳۶ °۵۰ طول شرقی (E) و ´۳۶°۳۴ تا ´۲۷ °۳۸ عرض شمالی (N) در شمال کشور و در مجاورت دریای خزر واقع شده‌است. میانگین بارندگی سالانهٔ آن، ۸۵۰/۷ میلی‌متر و میانگین دمای سالانهٔ آن، ۱۸/۵ درجهٔ سانتی‌گراد است (Statistical yearbook, 2020). استان گیلان بر اساس روش‌های نوین آماری مانند تحلیل عاملی و تحلیل خوشه‌ای، به سه اقلیم معتدل و مرطوب (بندرانزلی، رضوانشهر، ماسال، صومعه‌سرا و آستانه اشرفیه)، کوهستانی (رشت، فومن، شفت، لنگرود، لاهیجان، سیاهکل، رودسر، رودبار و املش) و نیمه مرطوب و سرد (طوالش و آستارا) طبقه‌بندی می‌شود (Fallah et al, 2014).

همچنین طبق نقشهٔ رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران (Banaei, 2005)، خاک‌های منطقه دارای رژیم‌های رطوبتی یودیک و رژیم حرارتی مزیک و بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمریکایی، در رده‌های انتی‌سول، اینسپتی‌سول و آلفی‌سول طبقه‌بندی می‌شود. مواد مادری نواحی مورد مطالعه نیز بر اساس مشاهدهٔ مقاطع نازک خاک به غیر از مناطق دشت و آبرفتی، شامل بازالت، شیل و توف آتشفشانی است؛ البته از اثر مواد مادری در این تحقیق صرف نظر شده‌است. بافت خاک نیز بر اساس اندازه‌گیری در آزمایشگاه (به روش هیدرومتری) در مناطق مورد نظر، لوم، لوم شنی، لوم رسی، لوم رسی شنی و رسی است. پس از بازدید و بررسی منطقهٔ مورد نظر (باغ‌های شرق و غرب استان گیلان)، در هر باغ چای مربعی فرضی به ابعاد ۲ در ۲ متر در نظر گرفته شد، سپس از محل تلاقی قطرهای این مربع از عمق صفر تا چهل سانتی‌متری (عمق رشد ریشه‌های غذارسان[1] چای) نمونه‌برداری شد. در کل، دویست نمونه خاک به همراه کلوخه (برای تعیین جرم مخصوص ظاهری) از باغ‌های چای برداشت شد. موقعیت منطقه همراه با نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده‌است.

[1] Feeder roots

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]



شکل ۱: پراکنش نقاط نمونه‌برداری در باغ‌های چای شرق استان گیلان



شکل ۲: پراکنش نقاط نمونه‌برداری در باغ‌های چای غرب استان گیلان

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

۳ـ مواد و روش‌ها

۳ـ۱ـ آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی، نمونه خاک‌ها کاملاً هوا خشک و باقیماندهٔ ریشهٔ گیاهان خارج شد. برای اجـرای آزمـایش‌هـای شیمیایی و فیزیکی نیز نمونه‌های خاک هواخشک، الک (۲mm) و برای نگهداری در ظرف‌های پلاستیکی ریخته شـد. همچنین برای آنالیزهای بیولوژی (به ویژه اندازه‌گیری Q_{10})، نمونه‌های مرطوب خاک در یخچال با دمای چهار درجـهٔ سانتی‌گراد نگهداری شد.

۳ـ۲ـ تهیهٔ نقشه‌های پایه

نقشهٔ پراکنش نقاط نمونه‌برداری در شرق و غرب استان گیلان، در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد (شـکل ۱ و ۲). نقشهٔ DEM (مدل ارتفاع رقومی استان گیلان) نیز با استفاده از رقومی کـردن نقشـهٔ توپـوگرافی بـا مقیـاس ۱:۲۵۰۰۰ و میان‌یابی خطوط تراز با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد. ارتفاع، درجهٔ شیب و جهت شـیب، بـا استفاده از نقشهٔ DEM در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.5 به دست آمد و سایر شاخص‌های توپوگرافی ماننـد شـاخص خیسی، طول شیب، موقعیت نسبی شیب، سطح ویژهٔ حوضه، شبکه آبراههٔ اصلی، فاصلهٔ عمودی تا شبکهٔ آبراهه، شاخص همگرایی، انحنای نیمرخ و انحنای سطح نیز از نقشهٔ DEM در محیط نرم‌افزار Saga GIS 2.1.0 استخراج شد.

۳ـ۳ـ آزمایش‌های شیمیایی و بیولوژی

آزمایش‌های شیمیایی انجام شده، شامل کربن آلی به روش والکلـی بلـک (Walkley and Black, 1934)، کـربن فعال خاک به روش پرمنگنات پتاسیم (عصاره‌گیری نمونه‌ها با پرمنگنات پتاسیم ۰/۲ مولار، تکـان دادن بـه مـدت دو دقیقه با سرعت ۲۴۰ دور در دقیقه، رقیق کردن نمونه‌ها و قرائت با اسپکتروفتومتر) (Weil et al, 2003)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور و pH خاک در نسبت ۱:۱ خاک به آب (Sparks, 1996) است. آزمایش‌های فیزیکی انجام شده نیز عبارتند از: جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه با پارافین (Klute, 1986) و بافت خاک بـه روش هیـدرومتری (Gee and Bauder, 1986). آزمایش‌های بیولوژی شامل زیست‌تودهٔ میکروبـی بـه روش تـدخین اسـتخراج (تـدخین نمونه‌ها با کلروفرم به مدت ۲۴ ساعت، عصاره‌گیری نمونه‌های تدخین شده و فاقد تدخین با سولفات پتاسیم نـیم مـولار، افزودن دو میلی‌لیتر دی‌کرومات پتاسیم و پانزده میلی‌لیتر مخلوط اسید سولفوریک و اسیدفسفریک یا مخلوط هضـم بـه عصاره‌ها، حرارت دادن نمونه‌ها به مدت سی دقیقه، رقیق کردن بعد از خنک شدن و تیتـر بـا سـولفات آمونیـوم فـرو (Page et al, 1982))، تنفس میکروبی به روش تیتراسیون در دو تیمار دمایی ۲۵ و ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد (براساس اقلـیم استان و شرایط مناسب رشد بوتهٔ چای) با نگهداری در انکوباسیون به مدت یک هفته (Page et al, 1982) تعیین شد.

ضریب حساسیت دمایی (Q_{10})، طبق رابطهٔ ۱ (Kirschbaum, 1995) محاسبه شد. در این رابطـه، R_1 و R_2 بـه ترتیب سرعت مینرالیزاسیون کربن آلی خاک یا میزان CO_2 اندازه‌گیری شده ($mg\ Co_2\ g^{-1}dry\ soil\ day^{-1}$) و T دمای انکوباسیونْ (C) است.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

$$Q_{10} = \frac{R_2}{R_1}^{\frac{10}{T_2 - T_1}}$$

رابطهٔ ۱

۳ـ۴ـ تجزیه و تحلیل آماری

برای بررسی همبستگی تنفس خاک و حساسیت دمایی آن با سایر ویژگی‌های خاک، از همبستگی پیرسون استفاده شد و برای تعیین حداقل مجموعه داده، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)[1] صورت گرفت. این روش با کاهش داده‌ها، شاخص‌های کمتر اما با دقت بالا را انتخاب کرد. کاهش شاخص‌ها برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه بسیار مناسب بود (Sheidai et al, 2019). پیش از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، کفایت نمونه‌برداری با استفاده از ضریب KMO (Keiser, 1974) و برقراری رابطهٔ قوی بین متغیرها (معناداری اطلاعات موجود در ماتریس همبستگی) با استفاده از آزمون کرویت بارتلت (Bartlett, 1954) بررسی شد. محدودهٔ ضریب KMO از صفر تا یک بود. چنانچه این ضریب بیش از نیم باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب خواهد بود (Hair et al, 2006). مؤلفه‌هایی که ارزش ویژهٔ بزرگ‌تر از یک داشتند نیز به عنوان مؤلفه‌های مؤثر انتخاب شدند (Brejda et al, 2000). تمام آنالیزهای آماری و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، با نرم‌افزار SPSS 24 انجام شد. رسم نمودارهای رگرسیونی نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel صورت گرفت.

۴ـ نتایج و بحث

آمار مربوط به ویژگی‌های مختلف اندازه‌گیری شدهٔ خاک و برخی از شاخص‌های توپوگرافی، در جدول ۱ آورده شده‌است. همان گونه که در این جدول ذکر شده، میانگین کربن موجود در مناطق نمونه‌برداری، ۲/۳۵ درصد و کمترین مقدار آن ۰/۵ درصد و بیشترین مقدار آن ۴/۲ درصد است. pH خاک با میانگین ۴/۴۹ دارای کمترین مقدار ۳/۲۰ و بیشترین مقدار ۶/۳۹ است. بیشترین و کمترین مقدار کربن فعال خاک نیز به ترتیب ۸۵۲/۴۸ و ۲۲۴/۰۸ با مقدار میانگین ۵۶۸/۷۸ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک است.

[1] Principal Component Analysis

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

جدول ۱: آمار توصیفی ویژگی‌های اندازه‌گیری شدهٔ خاک و برخی از شاخص‌های توپوگرافی در مناطق مورد مطالعه

پارامتر	واحد	میانگین	واریانس	انحراف معیار	بیشترین مقدار	کمترین مقدار	دامنهٔ تغییرات	ضریب تغییرات (CV)
OC	درصد	۲/۳۵	۰/۶۳۵	۰/۷۹۶	۴/۲	۰/۵	۳/۷	۳۴
PH	بدون واحد	۴/۴۹	۰/۲۸۷	۰/۵۳۵	۶/۳۹	۳/۲۰	۳/۱۹	۱۲
C_Labile	mg/kg	۵۶۸/۷۸	۲۳۷۷۷/۴۶	۱۵۴/۱۹	۸۵۲/۴۸	۲۴۴/۰۸	۶۰۸/۴۰	۲۷
Biomass C	µg/g	۳۹۳/۹۸	۲۹۶۸۶/۰۲	۱۷۲/۲۹	۸۴۳/۲۱	۴۱/۳۵	۸۰۱/۸۶	۴۴
Q_{10}	بدون واحد	۱/۳۵	۰/۰۰۶	۰/۰۷۶۵	۱/۵۸	۱/۱۹	۰/۳۹	۵.۷
ρb	g/cm^3	۱/۳۱	۰/۰۱۵	۰/۱۲۴	۱/۸۵	۱/۰۰	۰/۸۵	۹.۳
Clay	درصد	۲۰/۸۵	۹۹/۶۱	۹/۹۸	۵۱	۴/۰۰	۴۷/۰۰	۴۷
CEC	meq/100g	۲۵/۰۳	۴۸/۷۱	۶/۹۷	۴۵/۵۰	۱۰	۳۵/۵۰	۲۸
Res35°C	mg/g day	۰/۰۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱۱۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۵۴	۳۱
Res25°C	mg/g day	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۸۵۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۵۳	۰/۰۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۴۴	۴۱
Wetness index	بدون بعد	۷/۲۶	۵/۳۳	۲/۳۱	۱۵/۷۷	۴/۴۰	۱۱/۳۶	۳۲
Elevation	متر	۱۵۰/۶۳	۱۴۲۷۱/۴۸	۱۱۹/۴۶	۶۲۵	۱	۶۲۴	۷۹
Slope	درجه	۲۱/۱۰	۱۶۶/۹۲	۱۲/۹۲	۳۷	صفر	۳۷	۶۱
Aspect	درجه	۱۶۵/۲۴	۱۳۸۰۲/۹۶	۱۱۷/۴۸	۳۵۸/۸	۱	۳۵۷/۸	۷۱
Slope Length	متر	۲۶۵۶/۵	۶۰۷۷۰۱۹	۲۴۶۵/۱۶	۱۰۹۱۱/۴۰	صفر	۱۰۹۱۱/۴۰	۹۲
RSP	[۰-۱]	۰/۹۳	۰/۰۱۷	۰/۱۳۲	۱/۰۰	۰/۱	۰/۹	۱۴
SCA	m^2m^{-1}	۳۳۲۷۰	۲۷۸۹۲۷۸۳۳/۷	۱۶۷۰۱/۱۳	۵۲۴۵۳	۲۰۶۷	۵۰۳۸۶	۵۰
CNBL	متر	۱/۷۹	۰/۱۹۵	۰/۴۴۱	۲/۷۲	۱/۰۲	۱/۷	۲۵
VDCN	متر	۱۶/۲۳	۵۰/۶۴	۱۲/۷	۳۳/۶	۱/۹۶	۳۱/۶۴	۷۸
CI	درصد	-۰/۳۶۷	۲۰۲/۱	۱۴/۲۲	۲۵	-۲۵	۵۰	-
Profile C	۱/m	۰/۰۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۸	-
Plan C	۱/m	۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۰۰۰۰۰۰۱۸۶	۰/۰۰۰۴۳۲	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	-

OC:کربن آلی، C-Labile: کربن فعال خاک، C biomass: کربن زیست‌تودهٔ میکروبی، Q_{10}: ضریب حساسیت دمایی، ρb:جرم مخصوص ظاهری، Clay: رس، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، Res35°C: تنفس میکروبی خاک در دمای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد، Wetness index: شاخص خیسی، Elevation: ارتفاع، Slope: شیب، Aspect: جهت شیب، Slope Length: طول شیب، RSP: موقعیت نسبی شیب، SCA: Specific Catchment areaسطح ویژهٔ حوضه، CNBL channel network base level: شبکه آبراههٔ اصلی، VDCN: Vertical Distance to ChannelN فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه، CI: Convergence Index نمایهٔ همگرایی، Profile Curvature: انحنای نیم‌رخ، Plan curvature: انحنای سطح.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

کربن بیوماس یا کربن زیست‌تودهٔ میکروبی با میانگین ۳۹۳/۹۸ میکروگرم در هر گرم خاک، دارای بیشترین مقدار ۸۴۳/۲۱ و کمترین مقدار ۴۱/۳۵ میکروگرم در هر گرم خاک است. مقادیر Q_{10} به دست آمده نیز (مطابق جدول ۱) از ۱/۱۹ تا ۱/۵۸ متغیر است. تنفس میکروبی با میزان (۰/۰۰۰۰۳۲) میکروگرم، در دمای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد بیشتر است. درصد رس خاک و وزن مخصوص ظاهری آن نیز به ترتیب از ۴ تا ۵۱ درصد (با میانگین ۲۰/۸۵) و ۱ تا ۱/۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب (با میانگین ۱/۳۱) است. میزان ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نیز با میانگین ۲۵/۰۳ میلی اکی والان در صد گرم خاک، دارای کمترین مقدار (۱۰) و بیشترین مقدار (۴۵/۵۰) است.

شاخص خیسی با میانگین ۷/۲۶، دارای کمترین مقدار ۴/۴۰ و بیشترین مقدار ۱۵/۷۷ است. ارتفاع نقاط منطقه از یک متر تا ۶۲۵ متر با میانگین ۱۵۰/۶۳ متر است. شیب منطقه از صفر تا ۳۷ درجه با میانگین ۲۱/۱۰ درجه و جهت شیب نیز از یک درجه تا ۳۵۸/۸ درجه است. میانگین جهت شیب نیز ۱۶۵/۲۴ درجه است؛ به این معنی که اکثر شیب‌ها به سمت جنوب شرقی می‌باشد. طول شیب با میانگین ۲۶۵۶/۵ از صفر تا ۱۰۹۱۱/۴۰ متر متغیر است. مقادیر انحنای نیم‌رخ و سطح نشان می‌دهد که به طور میانگین، وضعیت توپوگرافی اراضی به واگرایی جریان و تضعیف جریان عرضی آب در داخل خاک منجر می‌شود. شبکه آبراههٔ اصلی با میانگین ۱/۷۹ متر نیز دارای کمترین (۱/۰۲) متر و بیشترین مقدار (۲/۷۲) متر است. ضریب تغییرات برای مشخصه‌های نمایهٔ همگرایی و انحنا بیش از یک است که تغییرپذیری زیاد این خصوصیات را نشان می‌دهد. در مقابل، مشخصه‌های موقعیت نسبی شیب، فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه، سطح ویژهٔ حوضه و شاخص خیسی نیز ضریب تغییرات کم دارد.

برای مطالعهٔ روابط موجود بین عوامل مورد بررسی، با توجه به مقیاس داده‌ها از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. بر این اساس، چنان که در جدول ۲ مشاهده می‌شود تنفس خاک در دمای ۳۵ درجه، بیشترین ضریب همبستگی مثبت پیرسون را در سطح یک درصد به ترتیب با کربن بیوماس میکروبی (۰/۹۳۸)، کربن آلی خاک (۰/۹۳۷)، کربن فعال خاک (۰/۸۸۴) و ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۳۹۴) دارد. همین طور با جرم مخصوص ظاهری و درصد رس، هیچ گونه همبستگی ندارد. با مقدار pH خاک نیز ضریب همبستگی منفی (۰/۱۴۷-) در سطح پنج درصد و با ضریب حساسیت دمایی با مقدار (۰/۸-) همبستگی منفی دارد. همچنین با طول شیب در سطح پنج درصد (۰/۱۴۰-)، با شبکه آبراههٔ اصلی در سطح یک درصد (۰/۲۳۹-) و فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه در سطح پنج درصد (۰/۱۶۶-) همبستگی دارد. تنفس میکروبی خاک در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد نیز مشابه با تنفس خاک در دمای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد، بیشترین ضریب همبستگی مثبت را به ترتیب با کربن بیوماس میکروبی (۰/۹۳۵)، کربن آلی خاک (۰/۹۳۴)، کربن فعال خاک (۰/۸۷۹) و ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۳۹۰) دارد. همچنین با جرم مخصوص ظاهری و درصد رس، هیچ گونه همبستگی ندارد. با pH خاک نیز ضریب همبستگی منفی (۰/۱۴۷-) در سطح پنج درصد و با ضریب حساسیت دمایی با مقدار (۰/۸۳۱-) همبستگی منفی دارد. با شبکه آبراههٔ اصلی نیز در سطح یک درصد (۰/۲۴۳-) و با فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه در سطح پنج درصد (۰/۱۶۷-) همبستگی دارد.

کربن آلی خاک بیشترین همبستگی مثبت را با کربن بیوماس میکروبی (۰/۹۸۵)، کربن فعال (۰/۹۶۹) و ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۴۳۰) در سطح یک درصد دارد. با جرم مخصوص ظاهری، درصد رس و pH خاک نیز هیچ گونه همبستگی ندارد. همچنین با طول شیب و فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه در سطح پنج درصد به ترتیب (۰/۱۴۶-) و

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

(۰/۱۷۰) و در سطح یک درصد با شبکه آبراههٔ اصلی (۰/۲۴۰-) همبستگی دارد. این همبستگی‌ها اگرچه معنی‌دار است، ولی میزان آن شدید نیست که علت آن را می‌توان به تأثیر شاخص‌های دیگر به جز شاخص‌های مربوط به توپوگرافی نسبت داد. کربن فعال خاک نیز بیشترین همبستگی مثبت را با کربن آلی خاک (۰/۹۶۹)، بیوماس میکروبی (۰/۹۴۱) و ظرفیت تبادل کاتیونی (۰/۴۳۴) در سطح یک درصد دارد. همچنین با جرم مخصوص ظاهری، درصد رس و pH خاک هیچ گونه همبستگی ندارد. جرم مخصوص ظاهری (ρb)، بیشترین همبستگی مثبت را با درصد رس خاک (۰/۴۸۴) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (۰/۳۴۲) در سطح یک درصد دارد. علاوه بر این، در بین تمام ویژگی‌های خاکی مطالعه شده در این تحقیق، کربن آلی خاک بیشترین یا نزدیک‌ترین ضریب همبستگی را با تنفس میکروبی خاک داشته‌است. Peng و همکاران نیز در تحقیقات خود، افزایش تنفس میکروبی خاک را با کربن آلی خاک، بیوماس ریشه یا فعالیت میکروبی نشان داده‌اند (Peng et al, 2020).

ارتفاع نقاط، با ضریب حساسیت دمایی به مقدار (۰/۱۵۹-) در سطح پنج درصد همبستگی منفی، در سطح یک درصد با شیب (۰/۴۵) همبستگی مثبت، با شاخص خیسی در سطح یک درصد (۰/۲-) همبستگی منفی و در سطح پنج درصد با جهت شیب (۰/۱۷) همبستگی مثبت دارد.

ضریب حساسیت دمایی (Q_{10}) نیز به ترتیب با کربن آلی (۰/۸۶۳-)، کربن فعال (۰/۸۶۳-)، بیوماس میکروبی (۰/۸۳۷-)، تنفس در دمای ۲۵ درجه (۰/۸۳۱-) و تنفس در دمای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد (۰/۸-) در سطح یک درصد بیشترین همبستگی منفی، و با ارتفاع نقاط در سطح پنج درصد به مقدار (۰/۱۵۹-) همبستگی منفی دارد. این ضریب با جرم مخصوص ظاهری و درصد رس خاک هیچ‌گونه همبستگی ندارد. در این مطالعه، مقدار pH با تنفس میکروبی در سطح پنج درصد، همبستگی منفی و معنی‌دار دارد. pH کمتر می‌تواند متابولیسم میکروبی خاک و فعالیت آنزیمی آن را ارتقا دهد و به افزایش تنفس میکروبی منجر شود. نتایج مشاهده شده با نتایج Tian و همکاران (2022) سازگار است. Ding و همکاران (2016)، بین حساسیت دمایی تنفس هتروتروفی و pH خاک در اکوسیستم کوه‌های آلپ، ارتباط معنی‌داری دریافتند؛ چون با بالا رفتن pH، فعالیت‌های آنزیمی کاهش می‌یابد و این امر به کاهش سرعت معدنی شدن یا مینرالیزاسیون منجر می‌شود (Min et al, 2014). همچنین اثرات معنی‌داری از pH بر روی Q_{10} خاک نشان داده نشده‌است؛ زیرا در مقایسه با تنفس هتروتروفی، ریشه‌ها ممکن است اثرات pH را بر روی Q_{10} پیچیده‌تر کنند که این نتایج با نتایج Chen و همکاران (2020) سازگار است.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

جدول ۲: ضریب همبستگی پیرسون بین Q_{10} و سایر ویژگی‌های خاک و شاخص‌های توپوگرافی

	Res35	Res25	OC	C labile	C biomass	pH	BD	Clay	Q_{10}	CEC
Res 35	۱									
Res25	۰/۹۹۷**	۱								
OC	۰/۹۳۷**	۰/۹۳۴**	۱							
C_labile	۰/۸۸۴**	۰/۸۷۹**	۰/۹۶۹**	۱						
Biomass C	۰/۹۳۸**	۰/۹۳۵**	۰/۹۸۵**	۰/۹۴۱**	۱					
pH	−۰/۱۴۷*	−۰/۱۴۷*	−۰/۰۸۴	−۰/۰۳۱	−۰/۰۹۶	۱				
BD	۰/۰۵۲	۰/۰۵۴	۰/۰۶۴	۰/۰۴۶	۰/۰۴۸	−۰/۰۵۷	۱			
Clay	۰/۰۸۵	۰/۰۸۱	۰/۰۹۸	۰/۰۹۵	۰/۰۹۴	−۰/۱۲۳	۰/۴۸۴**	۱		
Q_{10}	−۰/۸**	−۰/۸۳۱**	−۰/۸۶۳**	−۰/۸۶۳**	−۰/۸۳۷**	۰/۰۳۴	−۰/۰۷۳	−۰/۰۶۴	۱	
CEC	۰/۳۹۴**	۰/۳۹۰**	۰/۴۳۰**	۰/۴۳۴**	۰/۴۱۲**	−۰/۰۳۸	۰/۳۴۲**	۰/۶۵۹**	−۰/۳۵۹**	۱
E	۰/۰۸۲	۰/۰۹۴	۰/۱۰۲	۰/۱۱۴	۰/۰۸۹	۰/۱۱۸	−۰/۰۰۱	−۰/۰۴۹	−۰/۱۵۹*	۰/۱۳۶
Slope	−۰/۰۸۵	−۰/۰۷۷	−۰/۰۶۱	−۰/۰۲۰	−۰/۰۸۳	۰/۱۰۴	۰/۰۰۳	−۰/۰۳۹	−۰/۰۳۵	۰/۱۹۹**
aspect	۰/۱۰۱	۰/۰۹۷	۰/۰۸۶	۰/۱۰۳	۰/۰۷۷	۰/۱۱۲	−۰/۰۳۳	۰/۰۱۳	−۰/۰۵۶	۰/۰۵۴
RSP	−۰/۱۰۶	−۰/۱۰۵	−۰/۰۹۶	−۰/۰۷۸	−۰/۱۰۹	−۰/۰۹۲	−۰/۰۲۳	۰/۱۱۸	۰/۰۸۳	۰/۰۹۴
SL	−۰/۱۴۰*	−۰/۱۳۸	−۰/۱۴۶*	−۰/۱۳۳	−۰/۱۶۳*	−۰/۱۷۵*	−۰/۱۶۱*	−۰/۱۵۱*	۰/۱۲۱	−۰/۱۷۸*
TWI	−۰/۰۵۴	−۰/۰۶۱	−۰/۱۲۰	−۰/۱۳۴	−۰/۰۹۹	−۰/۰۴۲	−۰/۱۹۸**	−۰/۱۶۲*	۰/۱۳۵	−۰/۲۱۵**
CNBL	−۰/۲۳۹**	−۰/۲۴۳**	−۰/۲۴۰**	−۰/۲۲۲**	−۰/۲۵۹**	−۰/۱۰۵	۰/۱۴۶*	۰/۳۸۴**	۰/۲۴۸**	۰/۲۸۳**
VDNC	−۰/۱۶۶*	−۰/۱۶۷*	−۰/۱۷۰*	−۰/۱۴۸*	−۰/۱۹۰**	−۰/۰۴۲	۰/۱۳۰	۰/۳۱۳**	۰/۱۶۶*	۰/۲۳۹**
CI	۰/۰۳۶	۰/۰۲۵	۰/۰۴۰	۰/۰۲۴	۰/۰۵۴	۰/۰۷۸	۰/۰۶۷	۰/۰۴۲	۰/۰۰۱	−۰/۰۵۸
Profile cu	−۰/۰۵۳	−۰/۰۵۷	−۰/۰۳۱	−۰/۰۲۷	−۰/۰۳۳	۰/۰۳۷	−۰/۰۸۶	−۰/۰۰۸	۰/۰۳۳	−۰/۰۴۶
Plan cu	۰/۰۰۴	−۰/۰۰۶	۰/۰۲۶	۰/۰۲۳	۰/۰۳۱	۰/۰۰۶	−۰/۰۳۳	−۰/۰۱۷	۰/۰۲۰	−۰/۰۱۲
SCA	−۰/۰۷۹	−۰/۰۷۵	−۰/۰۸۳	−۰/۰۸۱	−۰/۰۹۳	−۰/۰۵۱	−۰/۰۴۷	−۰/۰۲۷	۰/۰۴۱	−۰/۰۷۸

** و * به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد، Soil respiration (35 °) : تنفس میکروبی خاک در دمای ۳۵ درجهٔ سانتی‌گراد، Soil respiration (25 °): تنفس میکروبی خاک در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد، OC: کربن آلی، C_labile: کربن فعال، Biomass C: کربن بیوماس، BD: جرم مخصوص ظاهری، Clay: درصد رس، Q_{10}(35-25): ضریب حساسیت دمایی خاک در دمای (۳۵-۲۵).

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

ادامهٔ جدول ۲: ضریب همبستگی پیرسون بین Q_{10} و سایر ویژگی‌های خاک و شاخص‌های توپوگرافی

	E	slope	Aspect	RSP	SL	TWI	CNBL	VDNC	CI	Profile cu	Plan cu	CA
E	۱											
slope	۰/۴۵**	۱										
aspect	۰/۱۷*	۰/۱۳	۱									
RSP	۰/۰۷	۰/۲۲**	۰/۰۵	۱								
SL	-۰/۲*	-۰/۰۴	-۰/۰۷	۰/۰۶	۱							
TWI	-۰/۲**	-۰/۲۲**	-۰/۰۷	-۰/۱۴	۰/۰۴	۱						
CNBL	-۰/۱۷*	۰/۰۳	-۰/۱۳	۰/۳**	۰/۲۴**	-۰/۳**	۱					
VDNC	۰/۰۹	۰/۳۱**	۰/۰۰	۰/۵**	۰/۰۴۳	-۰/۳**	۰/۷۸**	۱				
CI	-۰/۰۲	-۰/۰۵	-۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۲۴**	-۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۵	۱			
Profile cu	۰/۰۳	۰/۰۲	-۰/۰۵	۰/۰۴	-۰/۰۸	۰/۰۴	-۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴	۱		
Plan cu	۰/۰۳	۰/۰۹	-۰/۰۱	۰/۰۸	-۰/۲۷**	-۰/۱۶*	۰/۰۷	۰/۲۱**	۰/۳۸**	۰/۳۳**	۱	
SCA	-۰/۰۶	۰/۰۰۵	۰/۰۲	-۰/۰۴	۰/۴۲**	۰/۰۲۳	۰/۰۷۳	-۰/۰۲	-۰/۳**	-۰/۰۲	-۰/۱۷*	۱

Elevation: ارتفاع، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی، Elevation (E): ارتفاع، Slope: شیب، Aspect: جهت شیب، Relative slope position (RSP): موقعیت نسبی شیب، Topographic wetness index (TWI): شاخص خیسی، Channel Network based Level (CNBL) : شبکه آبراههٔ اصلی، Vertical Distance Network Channel (VDNC): فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه، Convergence Index (CI): نمایهٔ همگرایی، Profile Curvature: انحنای نیم‌رخ، Plan Curvature: انحنای سطح، Specific Catchment area(SCA): سطح ویژهٔ حوضه.

۴ـ۱ـ نتایج آزمون تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

نتایج دو آزمون KMO [1] و کرویت بارتلت[2] در جدول ۳ نشان داد که بر پایهٔ KMO، حجم نمونه برای تحلیل عاملی کافی است (مقدار KMO ۰/۶۸۰ و نزدیک به یک است) و بر پایهٔ آزمون کرویت بارتلت، فرض مستقل بودن متغیرها از یکدیگر رد شد ($p<0.05$). این نتایج نشان داد که تجزیه به مؤلفه‌های اصلی می‌تواند برای کاهش تعداد داده‌ها و متغیرهای مورد مطالعه سودمند باشد. از سوی دیگر، ماتریس ضریب همبستگی خطی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (جدول ۲) نشان داد که ۷۸ جفت مقایسه از ۲۵۳ جفت، در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار بودند؛ از این رو، نتایج تحلیل مؤلفه اصلی برای کاهش داده‌ها توجیه‌پذیر است؛ زیرا از همبستگی موازی بین داده‌ها جلوگیری می‌شود.

[1] Kaiser-Meyer-Olkin Measure
[2] Bartlett's Test Of Sphericity

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

جدول ۳: نتایج آزمون کیسر میرالکین (KMO) و کرویت بارتلت برای ویژگی‌های منطقهٔ مطالعه شده

مقدار KMO برای کفایت نمونه‌گیری		۰/۶۸۰
آزمون کرویت بارتلت	**تقریب کای ـ دو**	۲۴۴۵/۳۱۴
	درجه آزادی	۱۳۶
	معنی‌دار بودن	۰/۰۰۰

جدول ۴، به ترتیب اشتراک اولیه و اشتراک استخراجی را نشان می‌دهد. اشتراک یک متغیر، برابر مربع همبستگی چندگانه (R^2) برای متغیرهای مربوطه با استفاده از عامل‌ها (به عنوان پیش‌بینی‌کننده) است؛ چون ستون اشتراک اولیه، اشتراک‌ها را قبل از استخراج عامل (یا عامل‌ها) بیان می‌کند. تمامی اشتراک‌های اولیه برابر با یک است.

جدول ۴: اشتراک‌های متغیرها

متغیرها	اشتراک اولیه	اشتراک استخراجی
کربن آلی	۱	۰/۹۷۷
کربن فعال خاک	۱	۰/۹۵۴
بیوماس میکروبی خاک	۱	۰/۹۵۵
جرم مخصوص ظاهری خاک	۱	۰/۶۰۵
رس خاک	۱	۰/۷۹۶
ضریب حساسیت دمایی	۱	۰/۸۴۱
ظرفیت تبادل کاتیونی	۱	۰/۷۶۹
ارتفاع	۱	۰/۷۱۳
تندی شیب	۱	۰/۷۲۲
موقعیت نسبی شیب	۱	۰/۵۶۷
طول شیب	۱	۰/۶۶۱
شبکه آبراههٔ اصلی	۱	۰/۸۱۵
فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه	۱	۰/۸۶۹
شاخص همگرایی	۱	۰/۵۷۷
انحنای نیمرخ	۱	۰/۷۸۵
انحنای سطح	۱	۰/۷۰۰
سطح ویژهٔ حوضه	۱	۰/۶۷۶

هرچه مقادیر اشتراک استخراجی بزرگ‌تر باشد، عوامل استخراج شده، متغیرها را بهتر نشان می‌دهند. اگر هر یک از مقادیر اشتراک استخراجی بسیار کوچک باشد، ممکن است به استخراج عامل دیگری نیاز شود (Momeni and Ghayoumi, 2018). در اینجا متغیرهای pH خاک، جهت شیب و شاخص خیسی به دلیل پایین بودن مقدار اشتراک استخراجی‌شان (کوچک‌تر از ۰/۵) حذف شدند. با توجه به جدول ۵، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که شش مؤلفه

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

اول (PC1, PC2, PC3,PC4,PC5 and PC6)، مقادیر ویژهٔ بیش از یک دارند و توانستند ۷۳ درصد واریانس کل را شرح دهند.

جدول ۵: مقادیر ویژه، سهم هر مؤلفه و واریانس تجمعی

مؤلفه	واریانس	مقدار ویژه	واریانس تجمعی
PC1	۲۳/۱۲	۳/۹۳	۲۳/۱۲۵
PC2	۱۲/۹۹	۲/۲	۳۶/۱۱۷
PC3	۱۲/۲۲	۲/۱	۴۸/۳۴۳
PC4	۱۰/۴۳	۱/۸	۵۸/۷۸۱
PC5	۹/۴۱	۱/۶	۶۸/۱۹۸
PC6	۷/۹۹	۱/۴	۷۶/۱۹۵

استفاده از روش PCA، روابط موجود بین متغیرهای محیطی و تغییرات کربن آلی را به خوبی نشان می‌دهد. مطابق با جدول ۵، مؤلفه‌های اول، دوم، سوم، چهارم، پنجم و ششم با مقادیر ویژهٔ ۳/۹۳، ۲/۲، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۶ و ۱/۴، به ترتیب ۲۳/۱۲، ۱۲/۹۹، ۱۲/۲، ۱۰/۴، ۹/۴۱ و ۷/۹۹ درصد از واریانس تغییرات همبستگی را بین مقادیر کربن آلی و سایر داده‌ها توجیه کردند. این نتایج، ارتباط قوی بین کربن آلی خاک و سایر متغیرهای به کار گرفته شده را در تجزیهٔ PCA نشان می‌دهد.

جدول ۶: آنالیز مربوط به مؤلفه‌های حاصل از روش PCA

بار عاملی	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
کربن آلی خاک	۰/۹۸۱	-۰/۰۸۴	۰/۰۷۲	۰/۰۵۱	-۰/۰۰۷	-۰/۰۰۱
کربن فعال خاک	۰/۹۷۲	-۰/۰۵۷	۰/۰۶۲	-۰/۰۳۶	۰/۰۲۴	-۰/۰۰۳
بیوماس میکروبی	۰/۹۶۷	-۰/۱۰۵	۰/۰۶۲	-۰/۰۷۱	-۰/۰۲۴	۰/۰۰۰
جرم مخصوص ظاهری	-۰/۰۲۶	-۰/۰۶۴	۰/۷۶۵	-۰/۰۹۱	-۰/۰۰۲	-۰/۰۸۲
رس	۰/۰۷۰	۰/۲۲۸	۰/۸۵۴	-۰/۰۱۲	-۰/۰۹۳	۰/۰۱۹
ضریب حساسیت دمایی	-۰/۹۰۵	۰/۰۹۶	-۰/۰۴۸	-۰/۰۰۴	-۰/۰۹۶	۰/۰۲۱
ظرفیت تبادل کاتیونی	۰/۴۳۱	۰/۲۲۹	۰/۷۰۷	۰/۰۲۶	۰/۱۷۵	-۰/۰۲۹
ارتفاع	۰/۰۹۵	-۰/۰۵۲	۰/۰۰۳	-۰/۰۳۹	۰/۸۳۶	۰/۰۲۹
تندی شیب	-۰/۰۳۴	۰/۲۵۶	-۰/۰۰۲	۰/۰۳۷	۰/۸۰۸	۰/۰۱۷
موقعیت نسبی شیب	-۰/۰۲۳	۰/۷۱۶	-۰/۱۰	-۰/۰۵۶	۰/۲	-۰/۰۳۳
طول شیب	-۰/۰۷۳	۰/۲۷۳	-۰/۲۸۶	۰/۶۳۳	-۰/۲۳۹	-۰/۲۰۳
شبکه آبراههٔ اصلی	-۰/۲۰۲	۰/۷۷۶	۰/۳۲۴	۰/۱۲۷	-۰/۲۱۹	۰/۰۵۳
فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه	-۰/۱۲۸	۰/۸۸۰	۰/۲۱۱	-۰/۰۳۶	۰/۱۳۶	۰/۱۱۸
نمایهٔ همگرایی	۰/۰۱۷	۰/۰۹۳	-۰/۰۴۵	-۰/۷۱۵	-۰/۱۷۵	۰/۱۵۳
سطح ویژهٔ حوضه	-۰/۰۴۶	-۰/۰۱۱	-۰/۰۲۲	۰/۷۹۲	-۰/۰۶۰	۰/۱۱۲
انحنای نیم‌رخ	-۰/۰۴۰	-۰/۰۲	-۰/۰۴۰	۰/۰۶۸	۰/۰۲۷	۰/۸۸۱
انحنای سطحی	۰/۰۳۱	۰/۱۶۸	-۰/۰۵۷	-۰/۴۳۴	۰/۰۲۶	۰/۶۹۲

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

مؤلفه اصلی: PC

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۶، هر چه قدر مطلق این ضرایب بیشتر باشد، عامل مربوطه در کل تغییرات (واریانس) متغیر مورد نظر نقش بیشتری دارد. اولین مؤلفه اصلی (PC1)، حدود ۲۳/۱۲۵ درصد از کل واریانس را شرح می‌دهد و چهار ویژگی کربن آلی، کربن فعال خاک، بیوماس میکروبی و ضریب حساسیت دمایی خاک در این مؤلفه، بالاترین بار عاملی را دارد. بیشترین بار عاملی مثبت، مربوط به کربن آلی خاک (۰/۹۸۱) است؛ بنابراین، اولین مؤلفه اصلی را می‌توان «جزء نقش کربن آلی در بیوماس میکروبی، کربن فعال خاک و ضریب حساسیت دمایی» دانست.

مؤلفه دوم (PC2) که حدود ۱۲/۹۹ درصد از کل واریانس را شرح می‌دهد، دارای بیشترین بار عاملی با فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه (۰/۸۸۰) است. بعد از آن، شبکه آبراههٔ اصلی با بار عاملی (۰/۷۷۶) و موقعیت نسبی شیب با بار عاملی (۰/۷۱۶) قرار دارد. بنابراین، دومین مؤلفه اصلی را می‌توان به شاخص‌های توپوگرافی و به شبکهٔ آبراهه مربوط دانست. مطابق با جدول ۲، موقعیت نسبی شیب در سطح یک درصد با شبکه آبراههٔ اصلی به مقدار (۰/۳) و با فاصلهٔ عمودی تا شبکه آبراهه به مقدار (۰/۵) همبستگی مثبت دارد. Guo و همکاران (2019) بیان کردند که به طور خیلی قوی می‌توان از شاخص‌های سرزمین برای مدل‌سازی ذخیرهٔ کربن آلی خاک استفاده کرد، ولی انتخاب پارامترهای ثابت برای تعمیم به همهٔ مناطق با استفاده از شاخص‌های سرزمین وجود ندارد. بنابراین، باید مدل‌سازی برای هر یک از مناطق انجام شود تا درک درستی از اثر ویژگی‌های سرزمین بر روی مقدار ذخیرهٔ کربن آلی خاک در مناطق مختلف به دست آید. آنها در تحقیقی که انجام دادند، اثر ۲۳ شاخص سرزمین را بر مقدار ذخیرهٔ کربن آلی خاک بررسی کردند. نتایج کلی تحقیق نشان داد که از بین شاخص‌های مورد مطالعه، مدل رقومی ارتفاع، موقعیت وابسته به شیب، فاصلهٔ عمودی تا شبکهٔ آبراهه‌ای، سطح مبنای شبکه آبراهه‌ای، ارتفاع نرمال، ارتفاع استاندارد شده، عمق درّه و شاخص همگرایی، بیشترین تأثیر را بر ذخیرهٔ کربن آلی خاک دارد.

مؤلفه سوم (PC3) نیز حدود ۱۲/۲۲ درصد از کل واریانس را توجیه می‌کند. در این مؤلفه، رس، جرم مخصوص ظاهری و ظرفیت تبادل کاتیونی به ترتیب با بار عاملی ۰/۸۵۴، ۰/۷۶۵ و ۰/۷۰۷، بیشترین بار عاملی را دارد. رس خاک نیز با اثرگذاری بر روی مقادیر ظرفیت تبادل کاتیونی به صورت غیر مستقیم با میزان کربن ذخیره‌ای ارتباط دارد. تحقیقات متعددی نشان داده‌است که میزان رس با میزان ظرفیت تبادل کاتیونی رابطهٔ بالایی دارد. از سوی دیگر، احتمال می‌رود این روند به حاصلخیزی خاک و در نتیجه بالابودن پوشش گیاهی و افزایش لاشبرگ ورودی به خاک منجر شود. ویژگی ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، شاخص خوبی برای تعیین کیفیت و تولید خاک است و مقدار آن برحسب میزان رس تغییر می‌کند. رس خاک به علت داشتن سطح ویژهٔ زیاد و باردار بودن، نقش مهمی در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک دارد و با افزایش مقدار رس، مقدار این شاخص افزایش می‌یابد (Hezarjaribi et al, 2013).

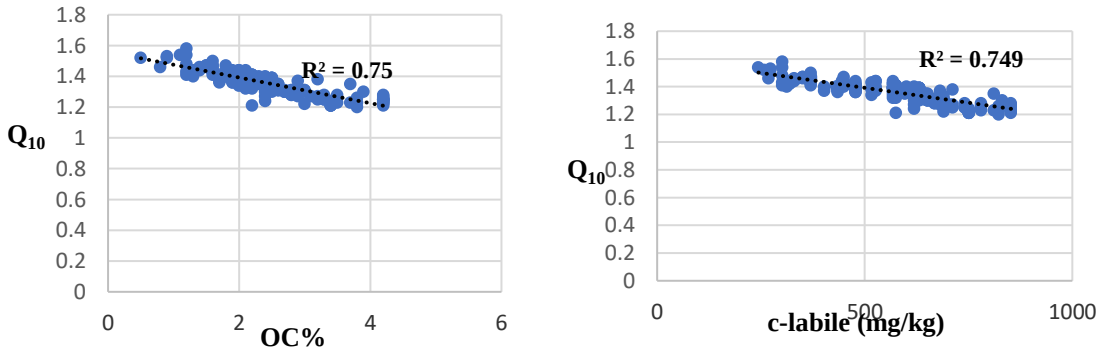
در مؤلفه چهارم که حدود ۱۰/۴۳ درصد از واریانس کل را تشکیل می‌دهد، سطح ویژهٔ حوضه، نمایهٔ همگرایی و طول شیب به ترتیب بیشترین بار عاملی را دارد. طبق جدول ۳ نیز طول شیب با نمایهٔ همگرایی در سطح یک درصد، همبستگی منفی (۰/۲۴) و با سطح ویژه، همبستگی مثبت (۰/۴۲) در سطح یک درصد دارد.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

در مؤلفه پنجم، ارتفاع و تندی شیب به ترتیب بیشترین بارهای عاملی (۰/۸۳۶) و (۰/۸۰۸) را دارد. ارتفاع، محرکی کلیدی برای ویژگی‌های اقلیمی است و در میزان کربن آلی خاک نیز نقش اساسی ایفا می‌کند و اثرات تغییر اقلیم را کاهش می‌دهد (Jiang et al, 2019 & Lomolino, 2001 & Ma et al, 2020 & Prietzel et al, 2016 & Shedayi et al, 2016).

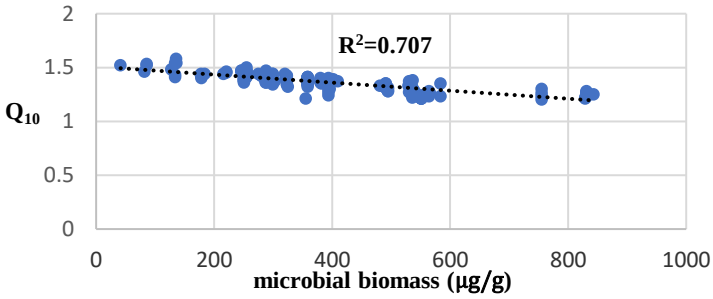
به طور معمول با افزایش ارتفاع، درجه حرارت کاهش می‌یابد؛ بنابراین، از ارتفاع شیب به طور گسترده برای ارزیابی پاسخ تنفس خاک به دما استفاده می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که حساسیت دمایی (Q_{10}) تنفس خاک، با ارتفاع افزایش می‌یابد (Luo et al, 2014 & Rodeghiero and Cescatti, 2005 & Shi et al, 2008 & Zhang et al, 2015)؛ علاوه بر این، وجود رابطهٔ مثبت بین کربن آلی خاک و ارتفاع نشان می‌دهد که ذخایر کربن آلی خاک در سطح جهانی در ارتفاعات زیادتر یا بلندتر، به تغییرات اقلیمی حساس‌تر است و پیش‌بینی می‌شود که در آب و هوای گرم کاهش یابد (Djukic et al, 2010 & Kane et al, 2005 & Kunkel et al, 2011 & Ma et al, 2020 & Prietzel et al, 2016 & Tian et al, 2016).

هر چند بعضی مطالعات، از روندی مخالف با این موضوع گزارش داده‌اند؛ بدین صورت که در ارتفاعات بالاتر، میزان محتوای کربن آلی خاک کمتر و تنفس بیشتر است (Djukic et al, 2010 & Garcia-Pausas et al, 2007 & Zimmermann et al, 2010). این تنوع ممکن است به دلیل شاخص‌های دیگری باشد که علاوه بر دما، بر تنفس نیز تأثیر می‌گذارد. افزایش شیب نیز به دلیل کاهش تشکیل خاک و افزایش فرسایش آن، شرایط نامناسبی برای استقرار پوشش گیاهی و تجمع کربن آلی ایجاد می‌کند. در نهایت، مؤلفه ششم ــ که حدود ۷/۹۹۸ درصد از واریانس کل است ــ به انحنای سطح بازمی‌گردد. افزایش انحنا به عنوان معیاری از افزایش تحدب، به کاهش ماده آلی منجر می‌شود. گزارش شده‌است که در شیب‌های محدب، میزان سرعت رواناب و فرسایش خاک و در نتیجه شستشو و هدر رفت خاک و کربن آلی بالاست (Ritchie et al, 2007). با توجه به بیشترین بار عاملی که به کربن آلی در مؤلفه اول بازمی‌گردد، رابطهٔ رگرسیونی ضریب حساسیت دمایی با کربن آلی، کربن فعال خاک و کربن زیست تودهٔ میکروبی مطابق شکل‌های ۳ و ۴ است:



شکل ۳: رابطهٔ رگرسیونی Q_{10} با الف) کربن فعال و ب) کربن آلی خاک

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]



شکل ۴: رابطهٔ رگرسیونی Q_{10} با کربن بیوماس میکروبی

روند تغییرات Q_{10} بـا نتـایج اکثـر مطالعـات قبلـی (chen et al, 2005 & Kirschbaum, 2006 & Leifeld and Fuhrer, 2005 & Qui et al, 2016 & Xu et al, 2015 & zheng et al, 2009 & Zhu et al, 2017) همانـنـدی و سازگاری دارد؛ به عبارتی، Q_{10} با افزایش کربن آلی و کربن فعال خاک به طور خطی کاهش می‌یابد. این ویژگی‌هـای خاک به شرایط سوبسترا و فراهمی مواد غذایی مربوط است (Atkin et al, 2000 & Jiang et al, 2015 & Johnson et al, 2000 & Wang et al, 2018). Tian و همکاران در (2022) نیز پژوهشی بر روی تغییرات فصلی تنفس خـاک در جنگل‌های مرتفع در شمال چین انجام دادند و دریافتند که با افزایش ارتفاع از ۲۰۰۰ به ۲۳۰۰ متر، میزان (Q_{10}) و کربن آلی افزایش می‌یابد؛ در حالی که فعالیت اینورتاز، سلولاز و اوره‌آز کاهش یافته‌است. نتایج این محققان نشان داد که ۱ـ دمای خاک عامل اصلی است که بر تغییرات تنفس میکروبی اثر می‌گذارد؛ ۲ـ متابولیسم کـربن میکروبـی ضـعیف در نواحی مرتفع، به تجمع و انباشته شدن کربن آلی خاک منجر می‌شود و ۳ـ هر چـه Q_{10} بـالاتر باشـد، اکوسیسـتم‌هـای جنگلی در نواحی مرتفع ممکن است به آسانی تحت‌تأثیر تغییر اقلیم قرار گیرد؛ بـه عبـارتی، Q_{10} در نـواحی مرتفـع و عرض‌های جغرافیایی زیاد بیشتر است و نشان می‌دهد که تنفس میکروبـی خـاک (Rs) در نـواحی مرتفـع بـه دلیـل حساس‌تر بودن کربن خاک به تغییرات دما، در برابر تغییرات دمایی آسیب‌پذیرتر است (Tian et al, 2022).

۵ـ نتیجه گیری

همان گونه که از نتایج استنباط می‌شود، در خاک‌هایی که کربن آلی بیشتری داشتند سرعت مینرالیزاسـیون کـربن بیشتر بوده و دما با اثر گذاشتن بر فعالیت متابولیکی میکروبی، مینرالیزاسیون کربن آلی خاک را افزایش داده‌است؛ بـه طوری که مینرالیزاسیون کربن آلی خاک در دمای ۳۵ درجه بیشتر بوده‌است. نتایج آنالیز آماری تجزیه به مؤلفـه‌هـای اصلی نیز نشان داد که مؤلفه‌های اول، دوم، سوم، چهارم، پنجم و ششم با مقادیر ویـژهٔ ۳/۹۳۱، ۲/۲۰ ، ۲/۱، ۱/۸، ۱/۶ و ۱/۴، به ترتیب ۲۳/۱، ۱۲/۹، ۱۲/۲، ۱۰/۴، ۹/۴۱ و ۷/۹۹ درصد از تغییرات همبستگی بین مقادیر را توجیه می‌کند و تأثیرگذارترین مؤلفه با بار عاملی ۰/۹۸۱ و واریانس ۲۳/۱۲۵، مربوط به کربن آلی خاک است. همچنین Q_{10}، بیشترین همبستگی منفـی را با کربن بیوماس میکروبی، کربن آلی و کربن فعال خاک دارد؛ به عبارتی، هر چه کـربن آلـی خـاک و بیومـاس میکروبی آن بیشتر باشد، مقدار Q_{10} کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج این مطالعه می‌توان گفت هر چند وجـود همبستگی بین برخی مشخصه‌های حاصل از تحلیل عوارض زمین، قابلیت استفاده از آنها را به عنوان متغیرهـای کمکـی در پیش‌بینی کربن آلی خاک به اثبات می‌رساند؛ اما در بهترین حالت تجزیه و تحلیل عوارض زمین، این نکتـه را بایـد

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

در نظر گرفت که عواملی دیگر در فرایند تشکیل و تکامل خاک نقش دارند؛ از این رو، نمی‌توان انتظار داشت که بتوان همهٔ تغییرات را از این طریق پیش‌بینی کرد.

۶ـ سپاس گزاری

نویسندگان بدین وسیله از حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور و دانشگاه گیلان در اجرای این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

1. Atkin, O. K.; Edwards, E. J.; & B. R. Loveys, 2000. Response of Root Respiration to Changes in Temperature and Its Relevance to Global Warming. *New Phytologist*, 147, 141e154.

2. Banaei, M. H.; Bybordi, M.; Malakouti, M. J.; & A. Moameni, 2005. The Soils of Iran, New Achievements in Perception, Management and Use, Soil and Water Research Institute. 471p. (in Persian)

3. Bartlett, M. S., 1954. A Note On The Multiplying Factors For Various Chi Square Approximations, *Journal Of The Royal Statistical Society*, 16, 296-298.

4. Behtari, B.; Jafarian, Z.; & A. Hossenali, 2018. Evaluation Of Temperature Sensitivity Of Soil Organic Matter Decomposition In Relation To Rangeland Management, Element Stoichiometry And Soil Depth, *Journal Of Environmental Studies*, 44(2). (In Persian).

5. Bond-Lamberty, B., & A. Thomson., (2010). A Global Database Of Soil Respiration Data. *Biogeosciences*. 7, 1915e1926.

6. Bond-Lamberty, B.; Bailey, V. L.; Chen, M.; Gough, C. M.; & R. Vargas, 2018. Globally Rising Soil Heterotrophic Respiration Over Recent Decades, *Nature*, 560, 80e83.

7. Brejda, J. J.; Moorman, T. B.; Karlen, D. L.; & T. H. Dao, 2000. Identification Of Regional Soil Quality Factors And Indicators. Central And Southern High Plains, *Soil Science Society Of America Journal*, 64, 2115-2124.

8. Capek, P.; Starke, R.; Hofmockel, K. S.; Bond-Lamberty, B.; & N. Hess, 2019. Apparent Temperature Sensitivity Of Soil Respiration Can Result From Temperature Driven Changes In Microbial Biomass, *Soil Biology*. *Biochemistry*, 135, 286e293.

9. Chen, H., & H. Tian., (2005). Does A General Temperature-Dependent Q10 Model Of Soil Respiration Exist At Biome And Global Scale?. *Integrative Plant Biology*. 47 (11), 1288e1302.

10. Chen, B.; Liu, S.; Ge, J.; & J. Chu, 2010. Annual And Seasonal Variations Of Q10 Soil Respiration In The Subalpine Forests Of The Eastern Qinghai-Tibet Plateau, China, *Soil Biology And Biochemistry*, 42(10), 1735-1742. Relevance To Global Warming. New Phytologist. 147, 141e154.

11. Davidson, E. A., & I. A. Janssens, 2006a. Temperature Sensitivity Of Soil Carbon Decomposition And Feedbacks To Climate Change. *Nature*. 440 (7081), 165e173.

12. Ding, J.; Chen, L.; Zhang, B.; Liu, L.; Yang, G.; Fang, K.; Chen, Y.; Li, F.; Kou, D.; Ji, C.; Luo, Y.; & Y. Yang, 2016. Linking Temperature Sensitivity Of Soil CO_2 Release To Substrate, Environmental, And Microbial Properties Across Alpine Ecosystems, *Global Biogeochemistry Cycles*, 30(9), 1310e1323.

13. Djukic, L.; Zehetner, F.; Tatzber, M.; & M. H. Gerzabek, 2010. Soil Organic-Matter Stocks And Characteristics Along An Alpine Elevation Gradient, *Plant Nutrition Soil Science*, 173, 30-38. Https://Doi.Org/10.1002/Jpln.200900027.

14. Fallah, Gh.; Asadi, M.; & A. Entezari, 2014. Climatic Zoning Of Guilan Province With Multivariate Methods, *Geography And Planning*, (54), 235-251. (In Persian).

15. Fóti, S.; Balogh, J.; Herbst, M.; Papp, M.; Koncz, P.; Bartha, S.; Zimmermann, Z.; Komoly, C.; Szabó, G.; Margóczi, K.; Acosta, M.; & Z. Nagy, 2016. Meta-Analysis Of Field Scale

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

Spatial Variability Of Grassland Soil CO2 Efflux: Interaction Of Biotic And Abiotic Drivers, *Catena*, 143, 78-89.
16. Friedlingstein, P.; Andrew, R. M.; Rogelj, J.; Peters, G. P.; Canadell, J. G.; Knutti, R.; Luderer, G.; Raupach, M. R.; Schaeffer, M.; Van Vuuren, D. P.; & C. Le Qu_Er_E, 2014. Persistent Growth Of CO2 Emissions And Implications For Reaching Climate Targets, *Nature. Geoscience*, 7, 709e715.
17. Garcia-Pausas, J.; Casals, P.; Camarero, L.; Huguet, C.; Sebastia, M. T.; Thompson, R.; & et al, 2007. Soil Organic Carbon Storage In Mountain Grasslands Of The Pyrenees, Effects Of Climate And Topography, *Biogeochemistry*. 82, 279-289. Https://Doi.Org/10.1007/S10533-007-9071-9.
18. Gee, G. W., & J. W. Bauder., (1986). Particle-size analysis. In: Methods of soil Analysis, Part 1, Physical and Mineralogical Methods, Klute A (Ed). Agronomy Monograph No. 9 (2nded). American Society of Agronomy, Madison, WI, 383-411.
19. Ghasemi, A., 2004. Considering The Performance Of The Tea Structure Reform Plan In Organizing Tea Industry, Economical Journal, (5), 51, 52. (In Persian)
20. Guo, Z.; Adhikari, K.; Chellasamy, M.; Greve, M. B.; Owens, P. R.; & M. H. Greve, 2019. Selection Of Terrain Attributes And Its Scale Dependency On Soil Organic Carbon Prediction, *Geoderma*, 340, 303-312.
21. Hassink, J.; Chenu, C.; Dalenberg, J. W.; Bolem, J.; & L. A. Bouwman, 1994. Interactions between soil biota, soil organic matter and soil structure. In: 15th World Congress of Soil Science, vol. 49. Acapulco, Mexico, pp. 57-58.
22. Hair, J. F.; Black, B.; Babin, B.; Anderson, R. E.; & R. L. Tatham, 2006. Multivariate Data Analysis (6th Ed.). New Jersy: Prentice Hall.
23. Hezarjaribi, A.; Nosrati Karizak., F.; Abdollahnezhad, K.; & Kh. Ghorbani, 2013. The Prediction Possibility Of Soil Cation Exchange Capacity By Using Of Easily Accessible Soil Parameters, *Journal Of Water And Soil*, 27(4), 712-719.
24. Hibbard, K.; Law, B.; & M. Reichstein, 2005. An Analysis Of Soil Respiration Across Northern Hemisphere Temperate Ecosystems, *Biogeochemistry*, 73, 29-70.
25. IPCC., 2013. Summary For Policymakers. In: Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G. K.; Tignor, M.; Allen, S. K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V.; Midgley, P. M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution Of Working Group I To The Fifth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom And New York, NY, USA, Pp. 9-27.
26. Jia, Y.; Kuzyakov, Y.; Wang, G.; Tan, W.; Zhu, B.; & X. Feng, 2020. Temperature Sensitivity Of Decomposition Of Soil Organic Matter Fractions Increases With Their Turnover Time, *Land Degradation And Development*, 31(5), 632-645.
27. Jiang, L.; He, Z.; Liu, J.; Xing, C.; Gu, X.; Wei, C.; & et al., 2019. Elevation Gradient Altered Soil C, N, And P Stoichiometry Of Pinus Taiwanensis Forest On Daiyun Mountain. *Forests*, 10, 1089. Https://Doi.Org/10.3390/ F10121089.
28. Jiang, J.; Shi, P. L.; Zong, N.; Fu, G.; Shen, Z. X.; Zhang, X. Z.; & M. H. Song, 2015. Climatic Patterns Modulate Ecosystem And Soil Respiration Responses To Fertilization In An Alpine Meadow On The Tibetan Plateau, *China Ecology Research*, 30, 3e13.
29. Johnson, D. W.; Cheng, W.; & J. T. Ball, 2000. Effects Of CO_2 And Nitrogen Fertilization On Soils Planted With Ponderosa Pine, *Plant Soil*, 224, 99e113.
30. Kaiser, H., 1974. An Index Of Factorial Simplicity, *Psychometrika*, 39, 31-36.
31. Kane, E. S.; Valentine, D. W.; Schuur, E. A. G.; & K. Dutta, 2005. Soil Carbon Stabilization Along Climate And Stand Productivity Gradients In Black Spruce Forests Of Interior Alaska, *Canadian Journal Of Forest Research*, 35, 2118-2129
32. Klute, A., 1986. Methods Of Soil Analysis: Physical And Mineralogical Methods. Part1. Second Edition.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

33. Kirschbaum, M. U., 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(6), 753-60.
34. Kirschbaum, M. U. F., 2006. The Temperature Dependence Of Organic-Matter Decomposition − Still A Topic Of Debate. Soil Biology, *Biochemistry*, 38(9), 2510e2518.
35. Kunkel, M. L.; Flores, A. N.; Smith, T. J.; Mcnamara, J. P.; & S. G. Benner, 2011. A Simplified Approach For Estimating Soil Carbon And Nitrogen Stocks In Semi-Arid Complex Terrain, *Geoderma*, 165(1), 1-11.
36. Kuzyakov, Y., 2006. Sources Of CO_2 Efflux From Soil And Review Of Partitioning Methods. Soil Biology, *Biochemistry*, 38(3), 425e448.
37. Leifeld, J., & J. Fuhrer., (2005). The Temperature Response Of CO_2 Production From Bulk Soils And Soil Fractions Is Related To Soil Organic Matter Quality. *Biogeochemistry*. 75, 433-453.
38. Lomolino, M. V., 2001. Elevation Gradients Of Species-Density: Historical And Prospective Views, *Global Ecology And Biogeography*, 10, 3-13.
39. Luo, S.; Liu, G.; Li, Z.; Hu, C.; Gong, L.; Wang, M.; & et al. 2014. Soil Respiration Along An Altitudinal Gradient In A Subalpine Secondary Forest In China, *Iforest*, 8, 526-532.
40. Ma, J.; Liu, R.; Li, C.; Fan, L.; Xu, G.; & Y. Li, 2020. Herbaceous Layer Determines The Relationship Between Soil Respiration And Photosynthesis In A Shrub-Dominated Desert Plant Community, *Plant Soil*, 449, 193-207. Https://Doi.Org/10.1007/S11104-020-04484-6.
41. Min, K.; Lehmeier, C. A.; Ballantyne, F.; Tatarko, A.; & S. A. Billings, 2014. Differential Effects Of Ph On Temperature Sensitivity Of Organic Carbon And Nitrogen Decay, *Soil Biology Biochemistry*, 76, 193e200.
42. Momeni, M., & A. F. Ghayoumi., (2018). Statistical Analysis With SPSS. 293p. (In Persian)
43. Nadelhoffer, K. J.; Giblin, A. E.; Shaver, G. R.; & A. E. Linkins, 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.; & J. Svoboda, (Eds.). Arctic Ecosystems In A Changing Climate: An Ecophysiological Perspective. Academic Press, San Diego, California, 468p.
44. Page, A., & et al., 1982. Methods Of Soil Analysis. Chemical And Microbiological Properties. Part2. Second Edition.
45. Peng, Y.; Song, S. Y.; Li, Z. Y.; Li, S.; Chen, G. T.; & et al., 2020. Influences Of Nitrogen Addition And Aboveground Litter-Input Manipulations On Soil Respiration And Biochemical Properties In A Subtropical Forest, *Soil Biology And Biochemistry*, 142, 107694. DOI 10.1016/J.Soilbio.2019.107694.
46. Prietzel, J.; Zimmermann, L.; Schubert, A.; & D. Christophel, 2016. Organic Matter Losses In German Alps Forest Soils Since The 1970s Most Likely Caused By Warming, *Nature Geoscience*, 1-8, Https://Doi.Org/10.1038/NGEO2732.
47. Qiu, X.; Luè, M. K.; Huang, J. X.; Li, W.; Zhao, B. J.; Zhang, H.; & et al., 2016. Characteristics Of Soil Organic Carbon Mineralization At Different Temperatures In Severely Eroded Red Soil, *Chinese Journal Of Plant Ecology*, 40(3), 236-245.
48. Rafiee, F.; Habashi, H.; Rahmani, R.; & Kh. Sagheb-Talebi., 2019. Temperature Sensitivity Of Soil Carbon Dioxide Efflux In Beech-Hornbeam Stand (Case Study: Shast-Kalateh Forest, Gorgan), *Iranian Journal Of Forest And Poplar Research*, 27(1). (In Persian)
49. Raich, J. W.; Potter, C. S.; & D. Bhagawati, 2002. Interannual Variability In Global Soil Respiration, 1980e94, *Global Change Biol*, 8(8), 800e812.
50. Raich, J. W., & W. H. Schlesinger., (1992). The Global Carbon Dioxide Flux In Soil Respiration And Its Relationship To Vegetation And Climate. *Tellus B*. 44(2), 81-99.
51. Ritchie, J. C.; Mccarty, G. W.; Venteris, E. R.; & T. C. Kaspar, 2007. Soil And Soil Organic Carbon Redistribution On The Landscape, *Geomorphology*, 89(1-2), 163-171.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

52. Rodeghiero, M., & A. Cescatti., (2005). Main Determinants Of Forest Soil Respiration Along An Elevation/Temperature Gradient In The Italian Alps. *Global Change Biology*. 11, 1024-1041. Https://Doi.Org/10.1111/J.1365-2486.2005.00963.X.
53. Schlesinger, W. H., & J. A. Andrews., (2000). Soil Respiration And The Global Carbon Cycle. *Biogeochemistry*. 48, 7-20.
54. Sheidai, E.; Sepehry, A.; Barani, H.; Motamedi, J.; & F. Shahbz, 2019. Establishing A Suitable Soil Quality Index For Semi-Arid Rangeland Ecosystems In Northwest Of Iran, *Journal Of Soil Science And Plant Nutrition*, Https://Doi.Org/10.1007/S42729-019-00065-4.
55. Shedayi, A. A.; Xu, M.; Naseer, L.; & B. Khan, 2016. Altitudinal Gradients Of Soil And Vegetation Carbon And Nitrogen In A High Altitude Nature Reserve Of Karakoram Ranges, *Springer Plus*, 5, 320. Https://Doi.Org/10. 1186/S40064-016-1935-9 PMID: 27066349 PLOS ONE Soil Respiration Variation Along An Altitudinal Gradient In The Italian Alps PLOS.
56. Shi, Z.; Wang, J. S.; He, R.; Fang, Y. H.; Xu, Z. K.; Quan, W.; & et al., 2008. Soil Respiration And Its Regulating Factor Along An Elevation Gradient In Wuyi Mountain Of Southeast China, *Chinese Journal Ecology*, 27(4), 563-568.
57. Sparks, D., 1996. Methods Of Soil Analysis. Part3. Chemical Methods. SSSA Book Series No.5. Soil. Science. Society. America.
58. Statistical Yearbook Of Iran., 2020. Land And Climate. National Meteorological Organization, General Department Of Information And Communication Technology. (In Persian). Http://Salnameh.Sci.Org.Ir
59. Subke, J. A., & M. Bahn., (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.
60. Tian, Q.; He, H.; Cheng, W.; Bai, Z.; Wang, Y.; & X. Zhan, 2016. Factors Controlling Soil Organic Carbon Stability Along A Temperate Forest Altitudinal Gradient, *Scientific Report*, 6, 18783. Https://Doi.Org/10.1038/Srep18783 PMID: 26733344.
61. Tian, Z.; Jia, X.; Liu, T.; Ma, E.; Xue L.; Hu, Y.; & Q. Zheng, 2022. Seasonal Change In Soil Respiration With An Elevation Gradient In *Abies Nephrolepis* Forest In North China, *Phyton International Journal Of Experimental Botany*, 91, 7.
62. Walkley, A., & I. A. Black., (1934). An Examination Of Degtjareff Method For Determining Soil Organic Matter, And A Proposed Modification Of The Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*. 37, 29-38.
63. Wang, Q.; Zhao, X.; Chen, L.; Yang, Q.; Chen, S.; & W. Zhang, 2018a. Global Synthesis Of Temperature Sensitivity Of Soil Organic Carbon Decomposition: Latitudinal Patterns And Mechanisms, *Functional Ecology*, 33, 514e523.
64. Wang, Q.; Liu, S.; & P. Tian, 2018b. Carbon Quality And Soil Microbial Property Control The Latitudinal Pattern In Temperature Sensitivity Of Soil Microbial Respiration Across Chinese Forest Ecosystems, *Global Change Biology*, 24, 2841e2849.
65. Weil, R. R.; Islam, K. R.; Stine, M. A.; Gruver, J. B.; & S. E. Samson-Liebig, 2003. Estimating Active Carbon For Soil Quality Assessment: A Simplified Method For Laboratory And Field Use, *American Journal Of Alternative Agriculture*, 18, 3-17.
66. Xu, Z.; Tang, S.; Xiong, L.; Yang, W.; Yin, H.; Tu, L.; Wu, F.; Chen, L.; & B. Tan, 2015. Temperature Sensitivity Of Soil Respiration In China's Forest Ecosystems: Patterns And Controls, *Applied. Soil Ecology*, 93, 105e110.
67. Yu, H.; Sui, Y.; Chen, Y.; Bao, T.; & X. Jiao, 2022. Soil Organic Carbon Mineralization And Its Temperature Sensitivity Under Different Substrate Levels In The Mollisols Of Northeast China, *Life*, 12, 712.
68. Zhang, Z. S.; Dong, X. J.; Xu, B. X.; Chen, Y. L.; Zhao, Y.; Gao, Y. H.; & et al., 2015. Soil Respiration Sensitivities To Water And Temperature In A Revegetated Desert, *Journal Of Geophysical Research. Biogeoscience*, 120, 773-787.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

69. Zheng, Z. M.; Yu, G. R.; Fu, Y. L.; Wang, Y. S.; Sun, X. M.; & Y. H. Wang, 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.
70. Zhu, R.; Zheng, Z.; Li, T.; Zhang, X.; He, Sh.; Wang, Y.; Liu, T.; & W. Li, 2017. Dynamics Of Soil Organic Carbon Mineralization In Tea Plantations Converted From Farmland At Western Sichuan, *China. Plos, One*, 12(9), E0185271.
71. Zimmermann, M.; Meir, P.; Bird, M. I.; Malhi, Y.; & A. J. Q. Ccahuana, 2010. Temporal Variation And Climate Dependence Of Soil Respiration And Its Components Along A 3000m Altitudinal Tropical Forest Gradient, *Global Biogeochemistry Cycle*, 24, GB4012. Https://Doi.Org/10.1029/2010GB003787.

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

Considering Relationship between Temperature Sensitivity of Soil Organic Carbon Decomposition with some of the Soil Properties and Topographic Indices in Guilan Tea Gardens

Shirin Seyghalani: *PhD Candidate in Soil Resources Management, Soil Science Department, Faculty of Agricultural Science, University of Guilan, Rasht*
Hassan Ramezanpour[1]: *Associate professor, Soil Science Department, Faculty of Agricultural Science, University of Guilan, Rasht*
Nafiseh Yaghmaeian Mahabadi: *Associate professor, Soil Science Department, Faculty of Agricultural Science, University of Guilan, Rasht*
Mahmood Fazeli Sangani: *Assistant professor, Soil Science Department, Faculty of Agricultural Science, University of Guilan, Rasht*

Article History (Received: 2023/3/17 Accepted: 2023/6/27)

Extended abstract

1- Introduction

Carbon dioxide is one of the main greenhouse gases that affect the world's air temperature. Small changes in the amount of carbon dioxide emissions from the soil have a significant effect on the concentration of this gas in the atmosphere. Soil respiration, the process that emits carbon dioxide from the soil to the atmosphere, is one of the most important carbon flows in the ecosystem and includes two components of heterotrophic respiration (microbial respiration) and autotrophic respiration (root respiration). Researchers measure the rate of soil respiration for every 10 degrees Celsius of temperature change with an index called temperature sensitivity of soil respiration (Q_{10}). The evidence shows that the Q_{10} value of the soil is not constant and has a negative correlation with temperature and a positive correlation with soil moisture. Also, the amount of soil organic carbon, incubation temperature and the interaction of these two have a significant effect on soil organic carbon decomposition. Accordingly, this research measures the temperature sensitivity (Q_{10}) in soil under tea cultivation and investigates its relationship with some soil chemical characteristics and topographic indices.

2- Methodology

After surveying the east and west tea gardens in Guilan province in the north of Iran, 200 samples were taken at a depth of 0 to 40 cm. The experiments were conducted to determine Organic Carbon, Labile carbon, Bulk density, PH, Cation Exchange Capacity, Microbial Biomass and soil microbial respiration. To measure Q_{10}, two temperature treatments of 25 and 35 °C were used. Elevation, slope and aspect were obtained using a DEM map in ArcGIS 10.5 and other topographical indicators such as wetness index, slope length, relative slope position, catchment area, channel network base level, vertical distance to channel network, convergence index, profile curvature and plan curvature were extracted from DEM map in Saga GIS 2.1.0. Pearson correlation was used to investigate whether there is any relationship between soil temperature sensitivity with other soil properties. Then, principal component analysis (PCA) was performed to determine a minimal data set. All the statistical analyses were done with SPSS 24. Regression charts were also drawn using Excel software.

3- Results

The Q_{10} values varied from 1.19 to 1.58. This index has the most negative correlation with organic carbon (-0.863), Labile carbon (-0.863), microbial biomass (-0.837), respiration at 25 °C (-0.831) and 35 °C (-0.8) at 1% level and negative correlation with elevation at 5% (-0.159). The principal component analysis showed that the first six components (PC1, PC2, PC3, PC4, PC5 and PC6) have special values of more than one and were able to describe 73% of the total variance. The first main component (PC1) describes 23.125% of the total variance and includes soil organic carbon, labile

[1] **Corresponding Author: hasramezanpour@yahoo.com**

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]

carbon, microbial biomass and Q_{10} which have the highest factor loading in this component. The second one (PC2), which explains about 12.99% of the total variance, has the highest factor loading with the vertical distance to the channel network (0.880). The third component (PC3) explains about 12.22% of the total variance. In PC3, clay has the highest factor loading. In the fourth component catchment area, convergence profile and slope length have the highest factor loading, respectively. Finally, the fifth and the sixth components are related to the elevation, slope and plan curvature**.**

4- Discussion & Conclusions

The highest positive factor loading is related to soil organic carbon (0.981). Therefore, the first main component can be "part of the role of organic carbon in microbial biomass, labile carbon and temperature sensitivity". The results showed that Q_{10} has the highest negative correlation with soil microbial biomass and organic and labile carbon. In other words, the higher the soil organic and microbial biomass carbon, the lower the amount of Q_{10}. Also, the second component can be considered as topographic indicators related to the channel network. Topographic indices can be used very strongly to model making soil organic carbon. The third component is related to clay properties. Several studies have indicated that the amount of clay has a high relationship with cation exchange capacity and it is a good indicator to determine the quality of soil. According to the results, although the correlation between some characteristics obtained from soil topographical analysis can prove the possibility of using them as auxiliary variables in predicting soil organic carbon, this point should be taken into account that other factors also play a role in the process of soil formation and development.

Key Words: Microbial Respiration (Heterotrophic), Principal Component Analysis, Soil Organic Carbon, Topographic Indices

[DOI: 10.61186/jeer.13.4.194]