

پاسخ تنفس میکروبی خاک به عامل‌های محیطی دما و رطوبت در پنج تیپ جنگلی زاگرس (بررسی موردی: جنگل‌های آرمرده بانه)

سامان ملکی^۱، بابک پیلهور^{۲*} و محمدعلی محمودی^۳

۱- دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. (sam.maleki2017@hotmail.com)
۲- دانشیار، گروه جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. (babakpilehvar@yahoo.com)
۳- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. (a.mahmoodi@uok.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸

چکیده

تنفس میکروبی خاک در جنگل‌ها سهم قابل توجهی از انتشار دی‌اکسیدکربن در اکوسیستم‌های زمینی را تشکیل می‌دهد و به تغییرات محیطی مانند دما و رطوبت خاک و نوع پوشش گیاهی بسیار حساس است. در این پژوهش، تنفس میکروبی خاک و دو عامل محیطی شامل دما و رطوبت خاک در پنج تیپ جنگلی در چهار فصل در سال اندازه‌گیری شد. تنفس میکروبی خاک با روش بطری بسته، رطوبت خاک در آزمایشگاه و دمای خاک با دماسنج هم‌زمان با نمونه‌برداری خاک در مناطقی از خاک سطحی (عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری و روابط بین تنفس میکروبی خاک و متغیرهای محیطی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که نرخ تنفس میکروبی خاک به‌طور معنی‌داری در دوره مرطوب (بهار) بیشتر است. تیپ ویول خالص با میانگین ۰/۰۹۰ میلی‌گرم بر گرم خاک در روز در طول سال بیشترین مقدار و تیپ مازوی خالص با مقدار ۰/۰۷۸ میلی‌گرم بر گرم خاک در روز کمترین مقدار تنفس میکروبی را داشتند. همچنین تفاوت معنی‌داری در تنفس میکروبی خاک بین تیپ‌های جنگلی مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: بهار، دی‌اکسید کربن، مازوی خالص، ویول خالص

(Smith et al., 2021). با این حال، مقدار این بازخورد در تنفس میکروبی خاک هنوز هم در برخی موارد نامشخص است. به طور ویژه، جوامع میکروبی محرک‌های اساسی تنفس میکروبی خاک هستند و حتی نقش جوامع میکروبی خاک در پاسخ تنفس میکروبی خاک به رطوبت و دما تا حد زیادی نامشخص است (Evans et al., 2022). به طور کلی پژوهش‌های زیادی به بررسی تأثیر تیپ‌های جنگلی و گونه‌های مختلف بر تنفس میکروبی خاک پرداخته‌اند که می‌توان به پژوهش (Wei et al., 2015) در جنگل‌های نیمه‌گرمسیری در استان گوانگدونگ، جنوب چین اشاره کرد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که نرخ تنفس میکروبی خاک در جنگل‌های سوزنی‌برگ نسبت به جنگل‌های پهن‌برگ پایین‌تر و همچنین دما مهم‌ترین عامل بر تغییرات فصلی تنفس میکروبی بوده است. در پژوهشی دیگر (Wang et al., 2011) که در ۴ تیپ در جنگل‌های معتدله شمال شرقی چین انجام شد، اذعان کردند که تنفس میکروبی خاک تغییرات آشکاری را در طول فصول مختلف نشان داد و این تغییرات بیشتر توسط دمای خاک کنترل می‌شود. در حالی که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش (Chen et al., 2021) که تنفس میکروبی در توده‌های خالص و آمیخته صنوبر و کاج بررسی کردند، مقدار تنفس میکروبی در توده‌های آمیخته نسبت به توده‌های خالص بیشتر است و تأثیرات متقابل گونه گیاهی با رطوبت خاک را مهم‌ترین عامل بر تنفس میکروبی ذکر کردند. با وجود این اطلاعات در مورد تنفس میکروبی در نقاط مختلف جهان پژوهش‌های کمی بر روی اکوسیستم‌های جنگلی در غرب آسیا انجام شده است. در نتیجه، این پژوهش در تیپ‌های مختلف جنگل‌های پهن‌برگ خزان‌کننده غرب ایران (زاگرس) انجام شد. پهنه جنگلی زاگرس با جنگل‌های نیمه‌خشک تا معتدل مجموعه‌ای غنی از گونه‌های بلوط

جنگل‌ها با $4/06$ میلیارد هکتار حدود ۳۱ درصد از مساحت زمین را پوشش می‌دهند (Jafari et al., 2021) و بالغ بر ۴۵ درصد کربن زمینی را ذخیره می‌کنند. بخشی از کربن از طریق فرآیند فتوسنتز وارد اتمسفر می‌شود، بنابراین کربن اندوخته‌شده در جنگل‌ها به صورت زیست‌توده روی‌زمینی و زیرزمینی ذخیره می‌شود و آن‌ها به طور مداوم کربن را از طریق فرآیند فتوسنتز از جو خارج می‌کنند (Zarafshar et al., 2021). خاک‌ها مقدار کربن را حدود سه برابر بیشتر از جو ذخیره می‌کنند (Mandal et al., 2022). مقدار جریان دی‌اکسید کربن خاک حدود $100-75$ پیکوگرم کربن بر سال است. انتشار کربن آزادشده از طریق تنفس میکروبی جزء اصلی جریان دی‌اکسید کربن جهانی است و همواره تحت تأثیر گونه‌های درختی است (Menyailo et al., 2022)؛ بنابراین، یک تغییر در تنفس میکروبی خاک می‌تواند تعادل غلظت دی‌اکسید کربن اتمسفر را تغییر دهد و در نتیجه بر شرایط آب و هوایی آینده تأثیر بگذارد (Yuan et al., 2022). رطوبت و دمای خاک دو عامل غیرزنده اصلی هستند که تنفس میکروبی خاک را تنظیم می‌کنند. رطوبت و دما ممکن است به طور مستقیم یا به صورت غیرمستقیم بر فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی تأثیر بگذارند. به طور مثال با نزدیک شدن رطوبت خاک به حد اشباع، فعالیت میکروبی با دسترس بودن اکسیژن محدود می‌شود یا در پاسخ به تغییرات شرایط محیطی، ممکن است زیست-توده جوامع میکروبی تغییر کند، این تغییرات در ترکیب و فیزیولوژی جوامع میکروبی سبب پاسخ به تغییرات آب و هوایی می‌شود (Zhang et al., 2022). از سال ۱۹۸۷، بسیاری از پژوهش‌ها به عوامل تأثیرگذار روی مقدار دی‌اکسید کربن و به نقش عوامل زنده و غیرزنده بر فعالیت‌هایی مانند فعالیت میکروبی پرداخته‌اند

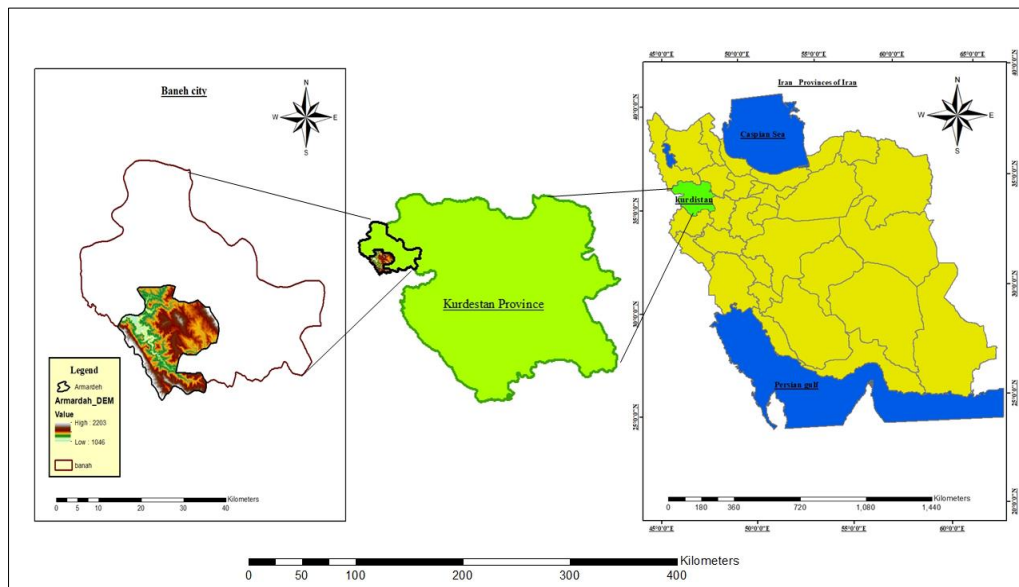
غربی شهرستان بانه در استان کردستان قرار دارد. مقدار بارندگی سالانه تقریباً ۷۶۰ میلی‌متر و متوسط ارتفاع از سطح دریا ۱۵۵۰ متر است. این منطقه دارای زمستان‌های سرد و طولانی و توام با برف و یخبندان و تابستان‌های معتدل است. در طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه بانه دارای اقلیم نیمه‌مرطوب و سرد است. منحنی آمبروترمیک منطقه نشان‌دهنده فصل خشک چهارماهه است. تقریباً ۸۶ درصد گونه‌ها دانه‌زاد و بقیه شاخه‌زاد هستند. بلوط گونه درختی غالب در این جنگل‌ها است. ترکیب اصلی گیاهان کف عبارت‌اند از گراس‌ها یا گندمیان یک یا چندساله مانند انواع فلومیس و پوا و توپلاق و جو و تعدادی از گونه‌های گیاهان خاردار مانند شکر تیغال و کنگر. خاک‌های قهوه‌ای آهکی و خاک‌های جوان از نوع واریزه‌ای لیتوسول و شیبست‌های آهکی از عمده خاک‌های این منطقه هستند (Shabanian, 2009).

است. تقریباً ۳ میلیون هکتار از این جنگل‌ها توسط گونه‌های مختلف بلوط عمدتاً توسط بلوط ایرانی (*Q.brantii*)، مازودار (*Q.infectoria*)، ویول (*Q.libani*) پوشیده شده است (Bashiri et al., 2022). این جنگل‌ها از نظر مساحت، جوامع گیاهی خاص، حفاظت خاک و واقع‌شدن سدهای بزرگ کشور حائز اهمیت فراوان هستند و تاکنون پژوهشی بر روی نرخ فصلی تنفس میکروبی خاک انجام نشده است. سؤالات اصلی پژوهش شامل موارد زیر بود: (۱) آیا نرخ فصلی تنفس میکروبی خاک بین تیپ‌های مختلف متفاوت است؟ روند تغییرات تنفس میکروبی خاک در ارتباط با رطوبت و دما چگونه است؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

منطقه مورد بررسی در عرض جغرافیایی $35^{\circ}45'45''$ تا $35^{\circ}55'15''$ شمالی و طول جغرافیایی $45^{\circ}40'55''$ تا $45^{\circ}50'45''$ شرقی در جنگل‌های آرمرده در جنوب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی در ایران، استان کردستان و شهرستان بانه

Figure 1. The geographical location of study area within Iran, Kurdistan province and Baneh city

روش پژوهش

تعیین تیپ‌های جنگلی مختلف با استفاده از نظرات متخصصین جنگل‌شناسی و همچنین با استفاده از آماربرداری در منطقه مورد بررسی انجام شد. تعداد پنج قطعه نمونه ۲۰ در ۲۰ متری (۴۰۰ مترمربعی) (Padalia et al., 2022) و در مجموع ۲۵ قطعه نمونه در هر یک از تیپ‌های موجود در منطقه مورد بررسی به صورت تصادفی پیاده و آماربرداری شد و مشخصه‌های کمی شامل تعداد درختان، قطر برابرسینه و ارتفاع درخت با استفاده از نوار قطرسنج (سانتی متر) و شیب‌سنج سوننتو اندازه‌گیری شد. در ادامه تعداد در هکتار و مساحت تاج‌پوشش در هر یک از توده‌های مورد بررسی محاسبه شد. به منظور بررسی خاک نمونه‌برداری از چهار گوشه و وسط هر تیپ برداشت به طوری که نمونه خاک‌ها نماینده تیپ مورد نظر باشند (هر نمونه‌برداری خاک خود در چهار طرف درخت و ترکیب به عنوان یک نمونه خاک شناخته شد، برای آزمایش تنفس میکروبی و رطوبت در چهار فصل به صورت مجزا هر بار ۲۵ نمونه در کل تیپ‌ها جمع‌آوری شد) (Habashi, 2015; jaffari, 2021). مجموعاً ۲۵ نمونه خاک از عمق صفر تا ۱۰ سانتی متری از تیپ‌های مشخص شده در فصل رشد برای بررسی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک برداشت شد. از جعبه‌های آلومینیومی برای ذخیره و انتقال خاک به آزمایشگاه استفاده شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، نمونه‌های خاک در هوای آزاد خشک و الک دو میلی متر رد شد و یک نمونه از آن در دمای چهار درجه سانتی‌گراد نگهداری شد.

اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک

pH خاک با روش پتانسیومتری و با استفاده از دستگاه pH متر تعیین شد. EC با استفاده از به‌کارگیری مخلوط ۲/۵: ۱ خاک و آب مقطر به دست آمد. رطوبت خاک در ۴۸ ساعت پس از جمع‌آوری نمونه‌های خاک به روش

Allen et al. (1974) اندازه‌گیری شد. دمای خاک در زمان نمونه‌برداری در جنگل با قرار دادن دماسنج در عمق ۱۰ سانتی متری (Busari et al., 2023) خاک بین ساعات ۱۰ صبح تا ۲ بعد از ظهر (Takada et al., 2015) اندازه‌گیری شد. بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتر، کربن آلی خاک با استفاده از روش تیتراسیون والکلای-بلاک (Walkley and Allan., 1947)، محتوای کل نیتروژن با روش کجلدال، فسفر با روش اولسن (Olsen et al., 1954)، و غلظت پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آهن، منگنز، روی با روش طیف‌سنجی جذب اتمی اندازه‌گیری شدند.

اندازه‌گیری تنفس میکروبی خاک

تنفس میکروبی با قراردادن نمونه‌های خاک در ظروف شیشه‌ای دربسته، انکوبه کردن آن‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در تاریکی در ظرفیت مزرعه و به دام-انداختن CO₂ آزاد شده بعد از یک روز با تیتراسیون توسط NaOH 0.5 تعیین شد. برای تهیه نمونه شاهد، همان روش بدون خاک اجرا شد. پس از پایان انکوباسیون، مقدار دو سی سی کلرید باریم نیم‌مولار به نمونه‌ها اضافه و سه الی چهار قطره محلول شناساگر افزوده شد و با اسیدکلریدریک ۰/۰۵ مولار تیتراژ شدند. در نهایت مقدار تنفس میکروبی خاک بر مبنای میلی گرم بر گرم محاسبه شد (Ungaro et al., 2022).

اندازه‌گیری ویژگی‌های میکروبیولوژیکی و اکوفیزیولوژیکی خاک

برای اندازه‌گیری زی‌توده میکروبی کربن (MBC)، به روش تدخین-استخراج با توجه به تفاوت کربن آلی استخراج شده از خاک نمونه‌ها (تدخین شده) و خاک شاهد (تدخین نشده) مقدار کربن زی‌توده میکروبی خاک بر مبنای میلی‌گرم بر کیلوگرم محاسبه شد. زی‌توده میکروبی نیتروژن خاک (MBN)، به روش تدخین-استخراج بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم

تیپ ویول خالص بیشترین مقادیر ارتفاع کل (۷/۵) متر و قطر برابر سینه (۳۷) سانتی‌متر را نشان داد. تعداد در هکتار برای تیپ ویول-برو-مازو با مقدار (۱۹۷) اصله در هکتار بیشترین تعداد بود. از سوی دیگر مساحت تاج پوشش تیپ ویول-مازو با (۱۲/۸) مترمربع از بهترین وضعیت برخوردار بودند. نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که در بین ویژگی‌های فیزیکی خاک اختلاف معنی‌داری وجود ندارد (جدول ۲) و فقط بافت خاک در تیپ مازو-ویول (لومی) با بقیه تیپ‌ها متفاوت است (جدول ۳). تیپ‌های مختلف از نظر برخی متغیرهای شیمیایی شامل واکنش خاک و هدایت الکتریکی و فسفر قابل جذب اختلاف معنی‌دار داشتند (جدول ۴). میانگین متغیرهای شیمیایی در جدول ۵ آمده است. بین مشخصات میکروبیولوژی خاک نیز نسبت زی‌توده میکروبی کربن به زی‌توده میکروبی نیتروژن دارای اختلاف معنی‌دار بود (جدول ۶). میانگین و اشتباه معیار مشخصه‌های میکروبیولوژی در جدول ۷ آمده است. شکل‌های ۴ و ۵ روند تغییرات دما و رطوبت خاک را در طول چهار فصل نشان می‌دهند که با بیش‌تر شدن دما روند رطوبت خاک افزایش می‌یابد، در زمستان بیشترین رطوبت مربوط به تیپ ویول خالص بود. نمودار PCA قطععات نمونه برداشت شده در ۵ تیپ در شکل ۵ نشان داد که تیپ ویول خالص با داشتن فسفر و ازت نسبت به بقیه تیپ‌ها از حاصلخیزی بیشتری برخوردار است.

اندازه‌گیری شد (Alef et al., 1995). نسبت تنفس میکروبی خاک و زیست‌توده میکروبی کربن خاک برای محاسبه ضریب متابولیکی (qCO_2) و کسر میکروبی ($qMic$) از نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به نسبت کربن آلی تعیین شد (Anderson, 2003).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

مقایسه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار Matlab7.4.0.287 (R2007a) انجام شد. برای بررسی و مقایسه ویژگی‌های مورد بررسی در تیپ‌های مختلف، ابتدا نرمالیت و همگنی واریانس‌ها بررسی شد و سپس از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (One way ANOVA) استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون توکی انجام شد. برای تعیین رابطه بین نرخ تنفس میکروبی خاک به‌عنوان متغیر وابسته و دمای خاک و رطوبت خاک به‌عنوان متغیر مستقل، منحنی سطح پاسخ با استفاده از خروجی مدل Mielnick Dugas and تشکیل شد. این مدل داده‌های دمای خاک و مقدار رطوبت را با تنفس میکروبی خاک برای کل سال ترکیب می‌کند تا بهترین سطح پاسخ را ایجاد کند و در نهایت نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel و Origin ترسیم شدند.

نتایج

نتایج حاصل از میانگین مشخصه‌های کمی درختان در بین تیپ‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- میانگین مشخصه‌های کمی درختان در ارتباط با تیپ‌های مورد بررسی

Table 1. Mean of quantitative characteristics in related with studied types

مساحت تاج پوشش (مترمربع) Canopy area (m ²)	تعداد در هکتار Number per hectare	قطر برابر سینه (سانتی متر) Diameter at breast height (cm)	ارتفاع کل درخت (متر) Total tree height (m)	تیپ‌ها Types
11	90	34	6.7	مازو خالص Pure <i>Quercus infectoria</i>
11.5	140	37	6.7	مازو- ویول <i>Q. infectoria-Q. libani</i>
12	170	33	7.5	ویول خالص Pure <i>Q. libani</i>
12.8	143	35	7	ویول- مازو <i>Q. libanii- Q. infectoria</i>
12	197	36	7.4	ویول- برو- مازو <i>Q. libanii- Q. brantii- Q. infectoria</i>

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس مشخصه‌های فیزیکی خاک در تیپ‌های مختلف جنگل

Table 2. Results of one-way ANOVA for soil physical properties in different types

Sig.	F	میانگین مربعات Mean square	df	تیپ‌ها Types
0.178 ^{ns}	1.74	166.9	4	شن Sand
0.320 ^{ns}	1.25	180.7	4	سیلت Silt
0.616 ^{ns}	0.67	59.3	4	رس Clay

* نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ و ns نشان‌دهنده عدم معنی‌داری است.

* Significant difference at 0.05 levels and ns shows no significant difference.

جدول ۳- میانگین (± standard error) مشخصه‌های فیزیکی خاک در تیپ‌های مختلف جنگل

Table 3. Mean (± standard error) of soil physical properties in different types

ویول - برو - مازو <i>Q. libanii- Q. brantii- Q. infec</i>	ویول- مازو <i>Q. libanii- Q. infectoria</i>	ویول خالص Pure <i>Q. libani</i>	مازو- ویول <i>Q. infectoria-Q. libani</i>	مازو خالص Pure <i>Q. infectoria</i>	مشخصه‌ها Characteristics
34.8±3.38 ^a	37.2±5.73 ^a	23.4±5.19 ^b	27.8±4.68 ^a	34.8±1.49 ^a	شن Sand
37±2.30 ^a	40.4±4.67 ^a	49.2±7.55 ^a	43±6.45 ^a	33.4±4.24 ^a	سیلت Silt
28.2±3.99 ^a	22.4±1.46 ^a	27.4±4.05 ^a	29.2±5.54 ^a	31.8±4.72 ^a	رس Clay
لومی - رسی Clay-loam	لومی - رسی Clay-loam	لومی - رسی Clay-loam	لومی Loam	لومی - رسی Clay-loam	بافت Texture

حروف متفاوت لاتین نشان‌دهنده اختلاف معنی‌داری و حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌داری است.

The different letters indicate significant difference and the same letters indicate non-significant difference

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس مشخصه‌های شیمیایی خاک در تیپ‌های مختلف

Table 4. Results of one-way ANOVA for soil chemical characteristics in different types

Sig.	F	میانگین مربعات Mean square	df	تیپ‌ها Types
0.00127*	6.79	0.05	4	اسیدیته pH
0.0409*	3.04	359	4	هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) EC (μScm^{-1})
0.165 ^{ns}	1.81	0.04	4	کربن آلی خاک (درصد) Organic carbon (%)
0.171 ^{ns}	1.78	0.17	4	نیتروژن آلی خاک (درصد) Total N (%)
0.118 ^{ns}	2.10	3.08	4	کربن آلی خاک به نیتروژن آلی خاک (درصد) C:N
0.001*	6.57	4711.03	4	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) P (mg kg^{-1})
0.247 ^{ns}	1.47	209	4	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) K (mg kg^{-1})
0.245 ^{ns}	1.48	61.32	4	کلسیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Ca (mg kg^{-1})
0.702 ^{ns}	0.54	49.45	4	منیزیم تبادلی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Mg (mg kg^{-1})
0.196 ^{ns}	1.66	53.09	4	آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Fe (mg kg^{-1})
0.242 ^{ns}	1.48	13.36	4	منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Mn (mg kg^{-1})
0.041 ^{ns}	3.03	1.10	4	روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Zn (mg kg^{-1})

* نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ و ns نشان‌دهنده عدم معنی‌داری است.

* Significant difference at 0.05 levels and ns shows no significant difference.

جدول ۵- میانگین (± اشتباه معیار) مشخصه‌های شیمیایی خاک در تیپ‌های مختلف جنگل

Table 5. Mean (±standard error) of soil chemical properties in different types

ویول - برو - مازو <i>Q. libanii- Q. brantii- Q. infec</i>	ویول - مازو <i>Q. libanii- Q. infectoria</i>	ویول خالص Pure <i>Q. libani</i>	مازو - ویول <i>Q. infectoria- Q. libani</i>	مازو خالص Pure <i>Q. infectoria</i>	مشخصه‌های مورد بررسی Characteristics
6.58±0.02 ^a	6.36±0.03 ^a	6.16±0.02 ^b	6.56±0.06 ^a	6.6±0.02 ^a	اسیدیته pH
389±36.99 ^a	476.2±36.86 ^a	504.6±16.64 ^a	592.8±84.06 ^a	393.2±40.24 ^a	هدایت الکتریکی (میکرو زیمنس بر سانتی‌متر) EC (μS cm ⁻¹)
0.65±0.09 ^a	0.88±0.07 ^a	0.73±0.05 ^a	0.66±0.02 ^a	0.68±0.08 ^a	کربن آلی خاک (درصد) Organic carbon (%)
0.76±0.20 ^a	0.43±0.09 ^a	0.80±0.13 ^a	0.39±0.06 ^a	0.58±0.15 ^a	نیتروژن آلی خاک (درصد) Total N (%)
0.98±0.19 ^a	2.80±0.93 ^a	0.98±0.12 ^a	2.12±0.65 ^a	1.48±0.32 ^a	کربن آلی خاک به نیتروژن آلی خاک C:N
72.16±9.02 ^b	42.75±10.87 ^d	99.85±22.17 ^a	47.20±4.13 ^c	19.50±2.86 ^c	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) P (mg kg ⁻¹)
2386.2±120.3 ^a	2368.2±157.1 ^a	2663.9±154.3 ^a	2687.0±272.8 ^a	2213.8±67.45 ^a	پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) K (mg kg ⁻¹)
53.28±1.73 ^a	47.76±2.47 ^a	44.52±5.08 ^a	49.44±2.16 ^a	45.36±1.32 ^a	کلسیم تبدالی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Ca (mg kg ⁻¹)
41.76±7.08 ^a	35.35±1.92 ^a	36.86±4.76 ^a	36.14±1.62 ^a	33.26±3.29 ^a	منیزیم تبدالی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Mg (mg kg ⁻¹)
42.29±1.36 ^a	40.92±0.58 ^a	41.86±1.42 ^a	35.23±4.65 ^a	36.51±2.43 ^a	آهن (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Fe (mg kg ⁻¹)
28.32±0.08 ^a	24.78±2.96 ^a	28.55±0.15 ^a	28.13±0.36 ^a	28.62±0.06 ^a	منگنز (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Mn (mg kg ⁻¹)
2.38±0.26 ^a	1.71±0.25 ^a	2.74±0.32 ^a	1.68±0.28 ^a	1.82±0.20 ^a	روی (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Zn (mg kg ⁻¹)

حروف متفاوت لاتین نشان دهنده اختلاف معنی‌داری و حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌داری است.

The different letters indicate significant difference and the same letters indicate non-significant difference

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس مشخصه‌های میکروبیولوژی خاک در تیپ‌های مختلف

Table 6. Results of one-way ANOVA for soil microbiological characteristics in different types

Sig.	F	میانگین مربعات Mean square	df	تیپ‌ها Types
0.165 ^{ns}	1.81	0.04	4	زی توده میکروبی کربن MBC (mg kg ⁻¹)
0.754 ^{ns}	0.47	456	4	زی توده میکروبی نیتروژن MBN (mg kg ⁻¹)
0.049*	2.88	3.50	4	نسبت زی توده میکروبی کربن به زی توده میکروبی نیتروژن MBC/ MBN
0.823 ^{ns}	0.38	389	4	ضریب متابولیک q Mic
0.382 ^{ns}	1.10	0.26	4	سهم میکروبی q CO ₂

* نشان دهنده معنی داری در سطح ۰/۰۵ و ^{ns} نشان دهنده عدم معنی داری است.

*significant difference at 0.05 levels and ns shows no significant difference.

جدول ۷- میانگین ± (اشتباه معیار) مشخصه‌های میکروبیولوژی خاک در تیپ‌های مختلف جنگل

Table 7. Mean (± standard error) of Soil microbiological properties in different types

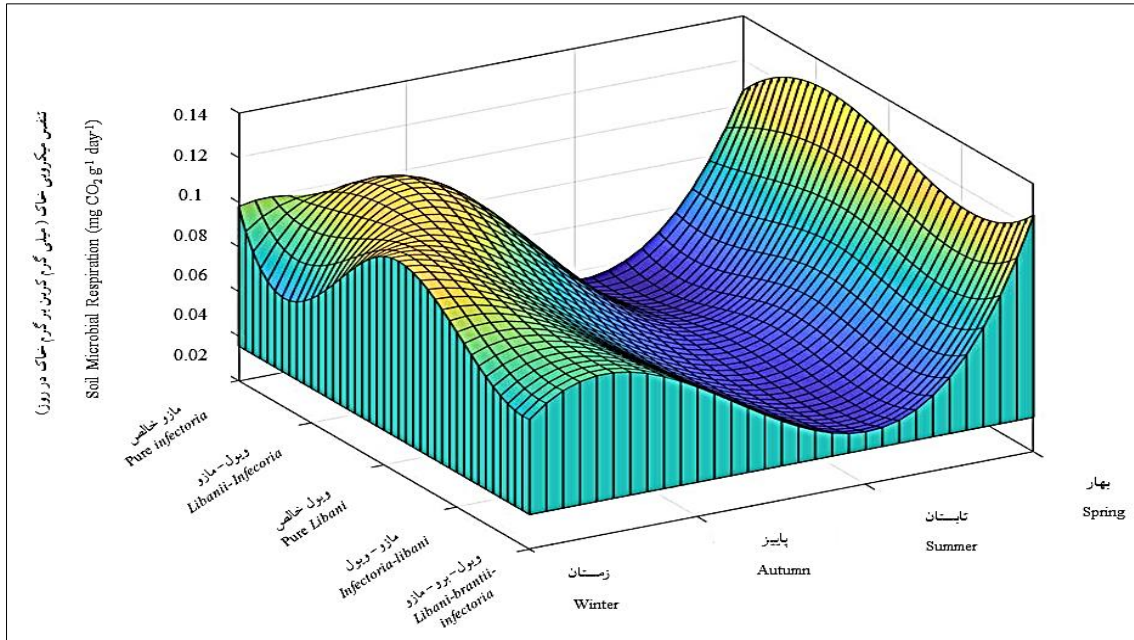
ویول - بر - مازو <i>Q. libanii- Q. brantii- Q. infec</i>	ویول - مازو <i>Q. libanii- Q. infectoria</i>	ویول خالص <i>Pure Q. libani</i>	مازو - ویول <i>Q. infectoria- Q. libani</i>	مازو خالص <i>Pure Q. infectoria</i>	مشخصه‌های مورد بررسی Characteristics
160.5±15.3 ^a	184.2±20.3 ^a	178.9±7.2 ^a	167.9±8.9 ^a	177.9±13.5 ^a	زی توده میکروبی کربن MBC (mg kg ⁻¹)
86.3±20.6 ^{ab}	59.6±16.2 ^{ab}	110.5±17.8 ^a	44.4±2.0 ^b	71.0±10.6 ^{ab}	زی توده میکروبی نیتروژن MBN (mg kg ⁻¹)
2.3±0.6 ^a	3.6±0.6 ^a	1.8±0.3 ^a	3.8±0.2 ^a	2.7±0.5 ^a	نسبت زی توده میکروبی کربن به زی توده میکروبی نیتروژن MBC/ MBN
2.8±0.3 ^a	2.3±0.1 ^a	2.6±0.1 ^a	2.5±0.1 ^a	2.3±0.2 ^a	ضریب متابولیک q Mic
288.5±74.7 ^a	219.1±40.1 ^a	247.7±12.3 ^a	255.9±21.9 ^a	282.3±51.3 ^a	سهم میکروبی q CO ₂

حروف متفاوت لاتین نشان دهنده اختلاف معنی داری و حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی داری است.

The different letters indicate significant difference and the same letters indicate non-significant difference

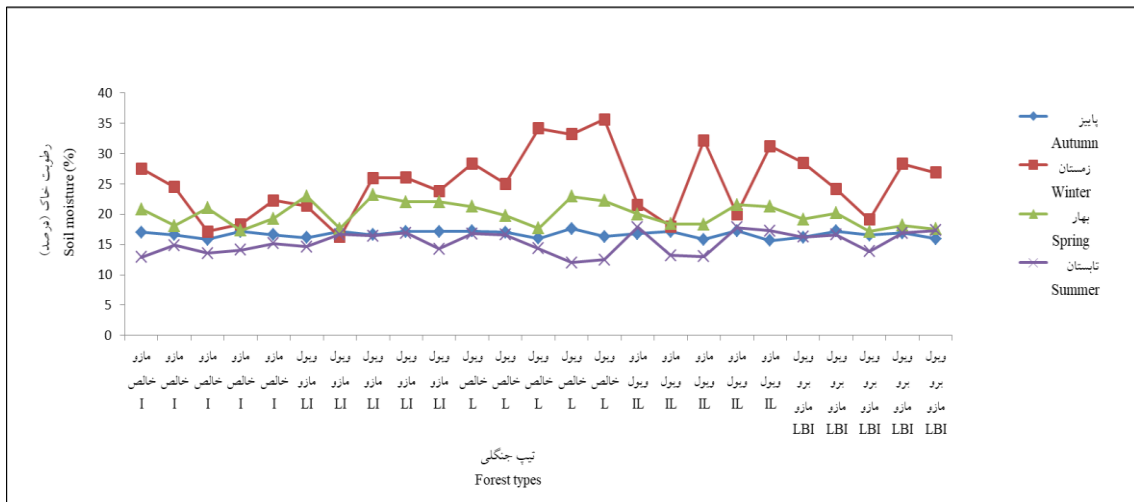
هم نشان داد. مقدار رطوبت خاک در زمستان بیشترین مقدار را نشان داد و در تابستان با افزایش دما (شکل ۴) به کمترین حد در سال رسید (شکل ۳).

مقدار تنفس میکروبی با ترکیب فصل و تیپ جنگلی (شکل ۲) به دست آمد که تابستان کمترین مقدار و بهار بیشترین مقدار تنفس میکروبی را نشان داد. مقایسه مقدار تنفس میکروبی در فصول مختلف اختلاف معنی داری را با



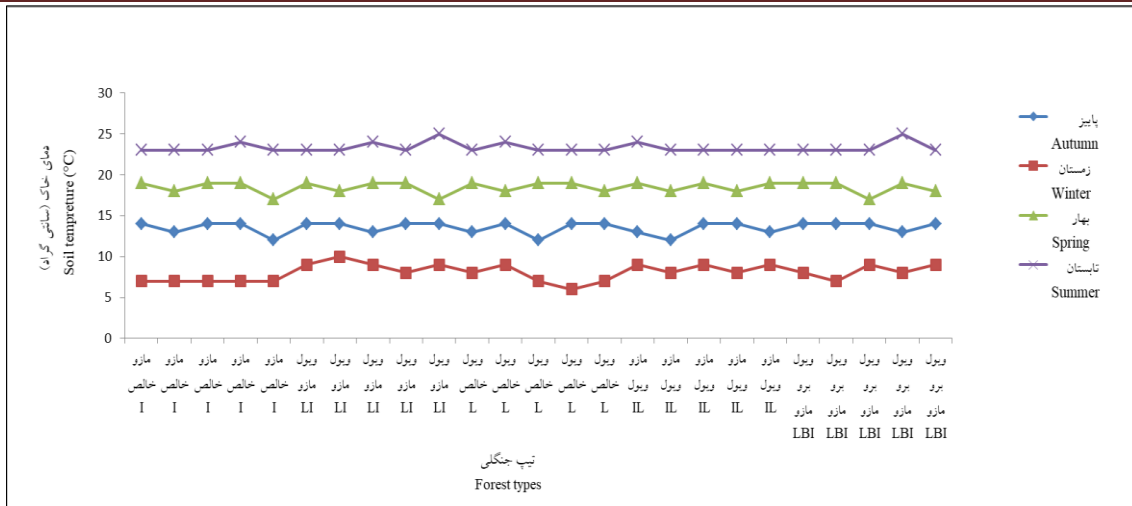
شکل ۲- اثر ترکیبی تیپ جنگلی و فصل بر تنفس میکروبی خاک

Figure 2. Combined effect of forest types and season on soil microbial respiration.



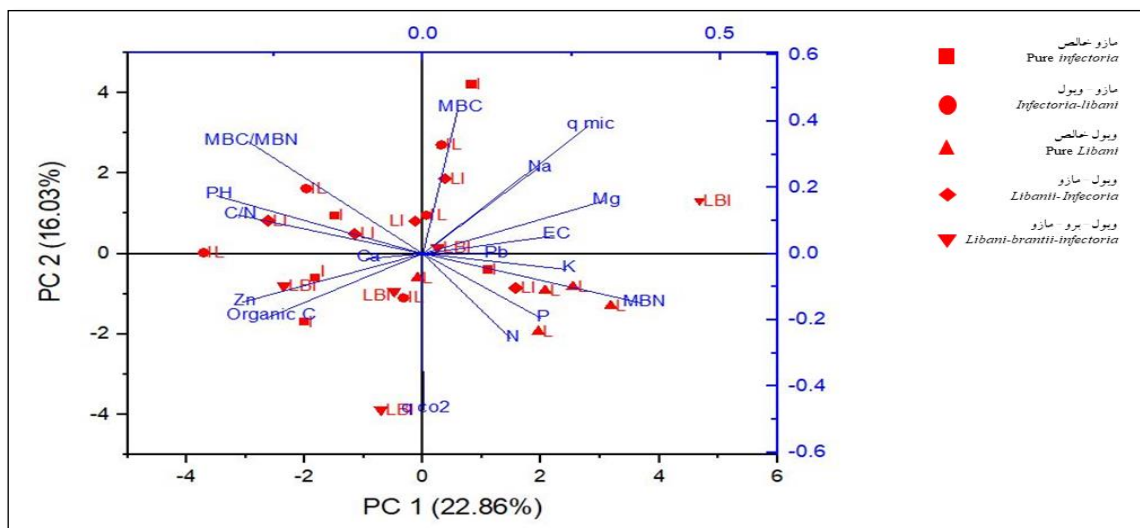
شکل ۳- مقایسه تغییرات رطوبت خاک در ۵ تیپ جنگلی (I-LBI) در فصول مختلف

Figure 4. Comparison of soil moisture at five forest types (I-LBI) in different seasons



شکل ۴- مقایسه تغییرات دما خاک در ۵ نوع جنگل (I-LBI) در فصول مختلف.

Figure 5. Comparison of soil temperature at five forest types (I-LBI) in different seasons.



شکل ۵- نمودار رسته‌بندی PCA برای قطعات نمونه برداشت‌شده و مشخصه‌های خاک

Figure 6. PCA classification chart for sampled plots and soil parameter

می‌گذارند، مقدار تنفس میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های ۵ تیپ مورد بررسی نشان داد که میانگین تنفس میکروبی خاک در تیپ‌ها، مگر بین یک یا دو تیپ در بعضی از فصول سال از اختلاف معنادار برخوردار نیست.

برآوردها سهم تنفس ریشه به تنفس کل خاک را در فصل رشد ۳۰-۵۹ درصد و در برخی منابع ۸۰-۶۲ درصد و سهم تنفس ریشه‌ای و تنفس ریزوسفر را به

بحث

مقدار تنفس خاک به‌طور قابل‌توجهی در میان بیوم‌های مختلف، متفاوت است که این موضوع نشان‌دهنده تأثیر نوع پوشش گیاهی بر مقدار تنفس خاک است (Schedlbauer and Miller, 2022). فصول مختلف سال به‌دلیل متغیربودن درجه حرارت خاک و تفاوت در مقدار بارش در ۴ فصل سال و تأثیر زیادی که عامل‌های محیطی بر مقدار فعالیت زی‌توده میکروبی خاک و ریشه‌های درختان بر اکوسیستم‌های جنگلی

میکروبی، محتوای SOM و تجزیه را نشان می‌دهد (Tang et al., 2022). فصل بهار و پاییز، فصل فعالیت خاکزیان و تجزیه مواد آلی و لاشبرگ‌ها است که افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها، جانوران خاک و تجزیه موجب افزایش تنفس میکروبی خاک می‌شود. تنفس خاک رابطه مثبتی با دمای خاک در تمام اکوسیستم‌های جنگلی دارد (Akbas and Tufekcioglu, 2022). در کوتاه‌مدت افزایش درجه حرارت خاک سبب افزایش تنفس میکروبی خاک می‌شود اما در درازمدت به‌علت اثر ترکیبی ذخیره کربن خاک، زی‌توده میکروبی و سازگاری حرارتی موجب افزایش تنفس میکروبی خاک نمی‌شود و در دمای بیش‌ازحد آستانه با اختلال در فعالیت زی‌توده میکروبی خاک موجب کاهش تنفس میکروبی خاک می‌شود. افزایش محتوای رطوبتی خاک تا حد آستانه تنفس خاک را افزایش می‌دهد و بعد از این حد به‌علت آب‌گرفتگی در منافذ و کاهش هوادهی تنفس کاهش می‌یابد (Zhang et al., 2022) در بررسی تأثیر درجه حرارت و محتوای رطوبتی خاک بر روی تنفس میکروبی خاک با استفاده از مدل Mielnick و Dugas مشاهده شد که عامل رطوبت در تیپ‌های مازو خالص، ویول خالص و ویول-مازو بیشترین همبستگی را داشت و تیپ‌های مازو خالص، ویول خالص باز بیشترین همبستگی را با دما داشتند. در کل بیشترین تغییرات مربوط به تنفس میکروبی در ارتباط با تغییرات رطوبت خاک است؛ به‌عبارت دیگر درجه حرارت نقش ثانویه نسبت به دما دارد. این نتایج با گزارش‌های منتشر شده از دیگر پژوهش‌های علمی مطابقت دارد (Zhang et al., 2022).

نتیجه‌گیری

به‌طورکلی با توجه به نتایج پژوهش می‌توان گفت تنفس میکروبی خاک در ۵ تیپ جنگلی پاسخ مشابهی به تغییرات دما و رطوبت در فصول مختلف داد. اما نرخ

تنفس کل خاک را ۵۶-۵۴ درصد بیان کردند (Kumari et al., 2022). با توجه به سهمی که تنفس ریشه‌ای و ریزوسفر دارند شاید بتوان گفت که بخشی که موجب اختلاف معنادار در تنفس بین بیوم‌های گیاهی می‌شود بخش ریشه‌ای و ریزوسفر بوده و تنفس میکروبی خاک در بین بیوم‌های گیاهی از اختلاف معنی‌دار برخوردار نباشد، زیرا که حتی در زمان‌هایی که تنفس میکروبی در خاک به‌علت شرایط نامساعد محیطی همچون خشکی تابستانه یا سرمای زمستانه به‌شدت کاهش می‌یابد تنفس ریشه‌ای و تنفس ریزوسفر به‌ویژه در فصل رشد گیاه همچنان بالا است و کاهش تنفس هتروتروف خاک در فصول خشک سال بیشتر از جزء ریزوسفر خاک است (Schedlbauer and Miller, 2022). آنالیز تنفس میکروبی خاک در ماه‌ها و فصول مختلف سال نشان داد مقدار تنفس میکروبی خاک در سطح احتمال ۹۵ درصد از اختلاف معنی‌دار برخوردار است. بیشترین مقدار تنفس در فصل بهار و کمترین در فصل تابستان مشاهده شد، زیرا تغییرات ماهانه تنفس خاک، تنفس میکروبی و زیست‌توده میکروبی خاک با نوسانات ماهانه بارش رابطه مثبت دارد (Chu et al., 2022) و سرعت تنفس میکروبی خاک از فصل‌های مرطوب به خشک کاهش می‌یابد. میانگین تنفس میکروبی خاک در فصل بهار و زمستان بیشترین و در فصل تابستان کمترین را نشان داد. در دماهای بالا و فصول گرم سال، پایین‌بودن محتوای رطوبتی خاک، پاسخ تنفس خاک به دما را محدود می‌کند و سرعت تنفس خاک به‌طور قابل توجهی در طول سال در بهار بالا و در تابستان به‌علت خشکی و در زمستان به‌علت درجه حرارت پایین است و سرعت تنفس خیلی بالا در طول پاییز بعد از وقوع بارندگی مشاهده می‌شود (Yan et al., 2022). تنفس خاک با ظرفیت خاک برای حفظ رشد گیاهان، جانوران خاک و میکروارگانیسم‌ها در ارتباط است و سطح فعالیت

میکروبی به دما و رطوبت ناشی از نزولات جوی و به- صورت غیرمستقیم به دیگر عوامل ذکر شده در بالا به- خصوص کیفیت لاشبرگ و کندبودن تجزیه مواد آلی خاک به دلیل سردبودن منطقه وابسته است. در نهایت نتایج این پژوهش دانش ما را در مورد فرآیندهای بیولوژیکی خاک و درک نقش آن‌ها در چرخه کربن در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک افزایش می‌دهد.

References

- Akbas, M.; Tufekcioglu, A., Contribution of the Root Component to Soil Respiration in Oriental Beech Stands in Artvin, Turkey. *Forest Science* **2022**, 68 (4), 399-409.
- Alef, K.; Nannipieri, P. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*; London San Diego: Academic Press, 1995; P 576.
- Allen, S. E.; Grimshaw, H. M.; Parkinson, J. A.; Quarmby, C., *Chemical analysis of ecological materials*. Blackwell Scientific Publications, 1974; p 565.
- Anderson, T.-H., Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **2003**, 98 (1-3), 285-293.
- Bashiri, S.; Abdollahzadeh, J.; Evidente, A., Diagnosing and pathogenicity of *Biscogniauxia* species, the causal agents of oak charcoal canker and decline in Zagros forests of Iran. *Journal of Plant Pathology* **2022**, 104 (3), 1011-1025.
- Busari, M. A.; Bankole, G. O.; Adiamo, I. A.; Abiodun, R. O.; Ologunde, O. H., Influence of mulch and poultry manure application on soil temperature, evapotranspiration and water use efficiency of dry season cultivated okra. *International Soil and Water Conservation Research* **2023**, 11 (2), 382-392.
- Chen, X.; Peng, S.; Chen, C.; Chen, H. Y., Water availability regulates tree mixture effects on total and heterotrophic soil respiration: A three-year field experiment. *Geoderma* **2021**, 402, 115259.
- Chu, H.; Ni, H.; Ma, J.; Shen, Y., Effect of Precipitation Variation on Soil Respiration in Rain-Fed Winter Wheat Systems on the Loess Plateau, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **2022**, 19 (11), 6915.
- Evans, S.; D Allison, S.; V Hawkes, C., Microbes, memory and moisture: Predicting microbial moisture responses and their impact on carbon cycling. *Functional Ecology* **2022**, 36 (6), 1430-1441.
- Habashi, H., Microbial respiration and microbial biomass C relationship with soil organic matter in different types of mixed beech forest. *Forest Research and development* **2015**, 1 (2), 135-144. (In persian)
- Jafari, J.; Tabari, M.; Hosseini, V.; Sadati, S. E., Effect of artificial tree stands on physical, chemical properties and soil microbial biomass (case study: Zaghmarz of Neka). *Forest Research and Development* **2021**, 7 (1), 123-135. (In persian)
- Kumari, T.; Singh, R.; Verma, P.; Raghubanshi, A. S., Monsoon-phase regulates the decoupling of auto- and heterotrophic respiration by mediating soil nutrient availability and root biomass in tropical grassland. *Catena* **2022**, 209, 105808.
- Mandal, A.; Majumder, A.; Dhaliwal, S.; Toor, A.; Mani, P. K.; Naresh, R.; Gupta, R. K.; Mitran, T., Impact of agricultural management practices on soil carbon sequestration and its monitoring through simulation models and remote sensing techniques: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **2022**, 52 (1), 1-49.
- Menyailo, O. V.; Sobachkin, R. S.; Makarov, M. I.; Cheng, C.-H., Tree Species and Stand Density: The Effects on Soil Organic Matter Contents, Decomposability and Susceptibility to Microbial Priming. *Forests* **2022**, 13 (2), 284.
- Olsen, S. R., *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. US Department of Agriculture: 1954.

- Padalia, K.; Bargali, S. S.; Bargali, K.; Manral, V., Soil microbial biomass phosphorus under different land use systems of Central Himalaya. *Tropical Ecology* **2022**, *63*, 30-48.
- Schedlbauer, J. L.; Miller, J., Edge effects increase soil respiration without altering soil carbon stocks in temperate broadleaf forests. *Ecosphere* **2022**, *13* (6), e4092.
- Shabanian, N. Determining the most appropriate time to transfer seedlings of forest species to the field of Seedling field in Kurdistan province; Executive plan of the agricultural and natural resources research center of the province; Kurdistan, Iran, 2009; p 105. (In persian)
- Smith, L. C.; Orgiazzi, A.; Eisenhauer, N.; Cesarz, S.; Lochner, A.; Jones, A.; Bastida, F.; Patoine, G.; Reitz, T.; Buscot, F.; Matthias C. Rillig, M.C.; Heintz-Buschart, A.; Lehmann, A.; Guerra, C.A., Large-scale drivers of relationships between soil microbial properties and organic carbon across Europe. *Global Ecology and Biogeography* **2021**, *30* (10), 2070-2083.
- Takada, M.; Yamada, T.; Shamsudin, I.; Okuda, T., Spatial variation in soil respiration in relation to a logging road in an upper tropical hill forest in Peninsular Malaysia. *Tropics* **2015**, *24* (1), 1-9.
- Ungaro, F.; Maienza, A.; Ugolini, F.; Lanini, G.; Baronti, S.; Calzolari, C., Assessment of joint soil ecosystem services supply in urban green spaces: A case study in Northern Italy. *Urban Forestry & Urban Greening* **2022**, *67*, 127455.
- Wang, X.; Zhao, J.; Wu, J.; Chen, H.; Lin, Y.; Zhou, L.; Fu, S., Impacts of understory species removal and/or addition on soil respiration in a mixed forest plantation with native species in southern China. *Forest Ecology and Management* **2011**, *261* (6), 1053-1060.
- Wei, H.; Chen, X.; Xiao, G.; Guenet, B.; Vicca, S.; Shen, W., Are variations in heterotrophic soil respiration related to changes in substrate availability and microbial biomass carbon in the subtropical forests? *Scientific Reports* **2015**, *5* (1), 18370.
- Yuan, M.; Na, M.; Hicks, L. C.; Rousk, J., Will a legacy of enhanced resource availability accelerate the soil microbial response to future climate change? *Soil Biology and Biochemistry* **2022**, *165*, 108492.
- Zarafshar, M.; Iranmanesh, Y.; Pourhashemi, M.; Bordbar, S. K.; Negahdarsaber, M.; Rousta, M. J.; Enayati, K.; Abbasi, A., The impact of wild pear (*Pyrus syriaca* and *P. globra*) stand management on carbon storage of soil and litters and some soil characteristics (case study: Dehkohne forest of Sepidan, Fars Province). *Forest Research and Development* **2021**, *7* (2), 313-325. (In persian)
- Zhang, C.; Song, C.; Wang, D.; Qin, W.; Zhu, B.; Li, F. Y.; Wang, Y.; Ma, W., Precipitation and land use alter soil respiration in an Inner Mongolian grassland. *Plant and Soil* **2022**, 1-14.

Response of soil microbial respiration to environmental factors of temperature and moisture in five forest types of Zagros (case study: Armardeh Baneh forests)

S. Maleki¹, B. Pilehvar^{*2} and M. Mahmoodi³

1- Ph.D. Student of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, I. R. Iran. (sam.maleki2017@hotmail.com)

2- Associate professor, Department of Forestry, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, I. R. Iran. (babakpilehvar@yahoo.com)

3- Assistant Professor, Department of Soil Science, University of Kurdistan, Sanandaj, Kurdistan, I. R. Iran. (a.mahmoodi@uok.ac.ir)

Received: 23.08.2022 Accepted: 19.12.2022

Abstract

Soil microbial respiration in forests constitutes a significant share of carbon dioxide emissions in terrestrial ecosystems and is very sensitive to environmental changes such as soil temperature and moisture and the type of vegetation. In this study, soil microbial respiration and two environmental factors including temperature and soil moisture were conducted in five forest types in four seasons. Soil microbial respiration was measured by the closed bottle method, soil moisture in the laboratory and soil temperature with a thermometer simultaneously with soil sampling in areas of surface soil (0 to 10 cm depth), and the relationships between soil microbial respiration and environmental variables were analyzed. The results showed that the soil microbial respiration rate is significantly higher in the wet period (spring). The pure *Quercus libani* types with an average of 0.090 throughout the year had the highest amount and the pure *Q. infectoria* types with an amount of 0.078 mg/g of soil per day had the lowest amount of microbial respiration. Also, no significant difference was observed in soil microbial respiration between forest types.

Keywords: Carbon dioxide, Spring, Pure *Quercus libani*, Pure *Q. infectoria*.

* Corresponding author

Tel: +989125228512