

Daily and seasonal changes of soil respiration under the influence of temperature and moisture factors in different types of oak

Saman Maleki¹, Babak Pilehvar^{*2}, Mohammad Ali Mahmoodi³

1. Ph.D. Student, Dept. of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: sam.maleki2017@hotmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: babakpilehvar@yahoo.com
3. Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: a.mahmoodi@uok.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 11.28.2022

Revised: 01.26.2023

Accepted: 01.26.2023

Keywords:

Exponential model,
Soil moisture,
Soil temperature,
TDR

ABSTRACT

Background and Objectives: Soil respiration is the emission of carbon dioxide from soil surfaces that controls the primary carbon cycle in ecosystems. Recently, soil respiration has become an important ecological process in the global carbon balance and has an important impact on global climate change. Measuring soil respiration is important for quantifying the flux of CO₂ from soils to the atmosphere. In the forests of Iran, no study has been conducted on the process of soil respiration at different times of the day and night, which underlines the innovative aspect of this study. The aim of this study was to compare soil respiration rates at different times of the day between five forest types (Pure *Quercus infectoria*), (*Quercus infectoria-Quercus libani*), (Pure *Quercus libani*), (*Quercus libani- Quercus brantii- Quercus infectoria*) and (*Quercus libani- Quercus infectoria*) in the four seasons of the year (i.e., spring, summer, autumn, and winter) and to identify the effect of environmental factors (i.e., temperature and moisture) that cause changes in soil respiration rates using different models. In addition, the correlation between respiration rates and soil chemical properties was analyzed.

Materials and Methods: Five dominant forest types were selected and sample plots of 20×20 meters were delineated within each forest type. In order to measure soil respiration, 8 PVC pipes of specific size and diameter were installed at a depth of 5 cm in the selected sample piece and measured using Anderson's method at different times of the day. Soil temperature and soil moisture were measured with a thermometer and a TDR device, respectively, simultaneously with soil respiration measurement. In order to perform chemical tests, 5 soil samples of each type were taken during the growing season and transferred to the laboratory.

Results: The greatest amount of soil respiration was observed at 2:00 p.m., the Pure *Libani* type also showed the highest soil respiration rate with an average of 0.3550 mg carbon cm⁻¹ per day for the whole year, but this value was not statistically significant between different forest types. The highest correlation coefficient between soil respiration rates, temperature and moisture found in the *Libani-Infectoria* type with a higher value for soil moisture than soil temperature. Spring showed the highest amount of soil respiration due to optimum temperature and moisture. Looking at the fitted models of soil respiration, the exponential model showed a better fit than the linear model to the measured data. Finally, respiration did not show a significant correlation with soil chemical properties.

Conclusion: According to the results, in spring and summer, the daily changes in soil respiration in the afternoon were significantly higher than at other times, and the soil respiration was the highest value for the Pure *Libani* type. Our study also showed that forest species can affect soil phosphorus and pH. The highest correlation coefficient of soil respiration with climatic elements and soil chemical properties was observed with soil moisture and organic nitrogen, respectively. Our findings showed that a combination of soil chemical properties rather than a single factor, together with temperature and moisture factors at different times and seasons, can determine changes in soil respiration. Finally, the effect of different forest types on the soil respiration rate caused slight differences, but it cannot be significant in different oak types of Armardeh forests. Although these findings help to fill out the gaps in the study of soil respiration in different forest types under current climate conditions. The rate of soil respiration in relation to the effect of different species is not yet precisely known. Therefore, further study should focus on factors driving autotrophic respiration and heterotrophic respiration and the response of microorganisms to climate change.

Cite this article: Maleki, Saman, Pilehvar, Babak, Mahmoodi, Mohammad Ali. 2023. Daily and seasonal changes of soil respiration under the influence of temperature and moisture factors in different types of oak. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 29 (4), 57-73.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JWFST.2023.20825.1993

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تغییرات روزانه و فصلی تنفس خاک تحت تأثیر فاکتورهای دما و رطوبت در تیپ‌های مختلف بلوط

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

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: تنفس خاک انتشار دی‌اکسید کربن از سطح خاک است که چرخه کربن اولیه در اکوسیستم‌ها را کنترل می‌کند. اخیراً تنفس خاک به یک فرآیند اکولوژیکی مهم در تعادل جهانی کربن تبدیل شده است و تأثیر مهمی بر تغییرات آب‌وهوای جهانی دارد. اندازه‌گیری تنفس خاک برای تعیین کمیت شار دی‌اکسید کربن از خاک به اتمسفر مهم است. در جنگل‌های ایران هنوز بر روند نرخ تنفس خاک در ساعات مختلف روز مطالعه‌ای صورت نگرفته است و این بر جنبه نوآوری این پژوهش تأکید دارد. هدف از این مطالعه مقایسه میزان تنفس خاک در ساعات مختلف روز بین پنج نوع تیپ جنگلی (<i>Pure Quercus infectoria</i>)، (<i>Quercus libani- Quercus infectoria</i>)، (<i>Pure Quercus libani</i>)، (<i>Quercus infectoria-Quercus libani</i>)، (<i>Quercus libani- Quercus brantii- Quercus infectoria</i>) در چهار فصل سال (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) و شناسایی تأثیر عوامل محیطی (دما و رطوبت) بود. هم‌چنین برای تأثیر دما و رطوبت روی تنفس خاک از مدل‌های مختلف و برای میزان همبستگی بین تنفس و ویژگی‌های شیمیایی خاک از ضریب همبستگی استفاده شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷	مواد و روش‌ها: پنج تیپ جنگلی غالب منطقه پس از جنگل‌گردشی و مرور منابع انتخاب شدند و در هر تیپ قطعه‌نمونه‌هایی به ابعاد ۲۰×۲۰ مترمربع (به‌طوری‌که نماینده تیپ مورد نظر باشد) انتخاب شدند. جهت اندازه‌گیری تنفس خاک ۸ لوله PVC با اندازه و قطر مشخص در عمق ۵ سانتی‌متری خاک در قطعه‌نمونه انتخابی نصب و با استفاده از روش اندرسون در ساعات مختلف روز اندازه‌گیری شد. دما و رطوبت خاک به ترتیب با دماسنج و دستگاه TDR هم‌زمان با اندازه‌گیری تنفس خاک ثبت گردید. جهت انجام آزمایش‌های شیمیایی ۵ نمونه خاک از هر تیپ در فصل رشد برداشت و به آزمایشگاه انتقال یافت.
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶	واژه‌های کلیدی: دمای خاک، رطوبت خاک، مدل نمایی، TDR
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶	

یافته‌ها: بیش‌ترین مقدار تنفس خاک در طول روز در ساعت ۱۴ بعدازظهر مشاهده شد، هم‌چنین تیپ *Pure Libani* بیش‌ترین نرخ تنفس خاک را با میانگین ۰/۳۵۵۰ میلی‌گرم کربن در سانتی‌متر مربع در روز برای کل سال نشان داد، اما این مقدار بین تیپ‌های مختلف معنی‌دار نبود. بیش‌ترین همبستگی تنفس خاک با دما و رطوبت در تیپ *Libani- Infectoria* مشاهده و رطوبت نسبت به دمای خاک همبستگی بیش‌تری را نشان داد. فصل بهار بیش‌ترین مقدار تنفس خاک را به دلیل حد بهینه دما و رطوبت نشان داد. در بررسی مدل‌های برازش شده تنفس خاک، مدل نمایی در کل نسبت به مدل خطی برازش بهتری نسبت با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد. درنهایت نیز تنفس با ویژگی‌های شیمیایی خاک همبستگی زیادی را نشان نداد.

نتیجه‌گیری: طبق نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، در طول بهار و تابستان تغییرات روزانه تنفس خاک در بعدازظهر به‌طور چشمگیری بیش‌تر از زمان‌های دیگر بود و تنفس خاک برای تیپ *Pure Libani* بیش‌ترین مقدار بود. مطالعه ما هم‌چنین نشان داد که گونه‌های جنگلی می‌توانند بر فسفر و pH خاک تأثیرگذار باشند. هم‌چنین بیش‌ترین ضریب همبستگی تنفس با عناصر اقلیمی و مشخصه‌های شیمیایی خاک به ترتیب با رطوبت و نیتروژن آلی خاک مشاهده شد. یافته‌های ما نشان داد که ترکیبی از ویژگی‌های شیمیایی خاک به‌جای یک عامل واحد، هم‌راستا با عوامل دما و رطوبت در ساعات و فصول مختلف ممکن است تغییرات تنفس خاک را تعیین کنند. درنهایت تأثیر تیپ‌های مختلف بر مقدار تنفس خاک سبب اختلافات ناچیزی گردید اما در تیپ‌های مختلف بلوط جنگل‌های آرم‌رده نمی‌تواند معنی‌دار باشد. اگرچه این یافته‌ها به رفع برخی شکاف‌ها در مطالعه تنفس خاک در اکوسیستم‌های جنگلی مختلف تحت شرایط آب و هوایی فعلی کمک می‌کنند، بااین‌حال، نرخ تنفس خاک در رابطه با تأثیر گونه‌های مختلف در قالب تیپ جنگلی در بیوم‌های متفاوت هنوز هم به‌طور دقیق مشخص نیست. بنابراین، پژوهش‌های بیش‌تر باید بر روی عوامل محرک تنفس اتوتروف و تنفس هتروتروف و بر واکنش میکروارگانیسم‌ها به تغییرات آب و هوایی متمرکز شود.

استناد: ملکی، سامان، پبلهور، بابک، محمودی، محمدعلی (۱۴۰۱). تغییرات روزانه و فصلی تنفس خاک تحت تأثیر فاکتورهای دما و رطوبت در تیپ‌های مختلف بلوط. نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل، ۲۹ (۴)، ۷۳-۵۷.

DOI: 10.22069/JWFST.2023.20825.1993



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

گرمایش جهانی در حال حاضر یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی است و تأثیر جدی بر اکوسیستم‌های زمینی دارد (۱). تغییرات آب و هوایی می‌تواند به رشد گیاهان، ذخیره آب، تولیدات کشاورزی و فعالیت‌های اقتصادی آسیب و بر خشک‌سالی و تعادل اکولوژیکی تأثیرگذار باشد (۲). انتشار دی‌اکسید کربن ارتباط نزدیکی با گرمایش جهانی دارد (۳). تنفس خاک که بزرگ‌ترین جریان دی‌اکسید کربن در اکوسیستم‌های زمینی را دارد، اولین مسیر بازگشت دی‌اکسید کربن تثبیت‌شده در پوشش گیاهی به اتمسفر است (۴). ذخایر کربن آلی خاک تقریباً دو برابر بزرگ‌تر از ذخایر کربن آلی در موجودات زنده زمینی و جو و حتی بیش از ۱۰ برابر بیش‌تر از میزان کربن آلی ناشی از فعالیت‌های انسانی است (۵). تغییرات کوچک در تنفس خاک ممکن است نقش مهمی بر چرخه کربن داشته باشد و متعاقباً بر اقلیم محلی و حتی جهانی از طریق بازخوردهای مختلف تأثیر بگذارد (۶)؛ بنابراین، اطلاعات در مورد تنفس خاک و عوامل محیطی کنترل‌کننده آن در تخمین غلظت دی‌اکسید کربن و تأثیر آن بر تغییرات آب‌وهوای جهانی اهمیت زیادی دارد. پایش تنفس خاک در مزرعه روشی مؤثر برای مطالعه میزان تغییرات این پارامتر است و یک منبع علمی برای بررسی اثرات گرمایش طولانی‌مدت بر پویایی کربن خاک ارائه می‌کند (۷). نرخ تنفس خاک تحت تأثیر دما و رطوبت خاک است. دما و رطوبت مستقیماً بر میکروارگانیسم‌های خاک و فعالیت ریشه گیاه تأثیر می‌گذارند و با تغییر لاشبرگ و رشد گیاه تأثیرات غیرمستقیمی دارند (۸). افزایش متوسط دما می‌تواند تجزیه هوموس خاک را تسریع کند و تنفس اتوتروف را تقویت کند و در نتیجه فعالیت تنفس خاک را بهبود ببخشد (۹). رطوبت خاک نیز می‌تواند با دخالت بر

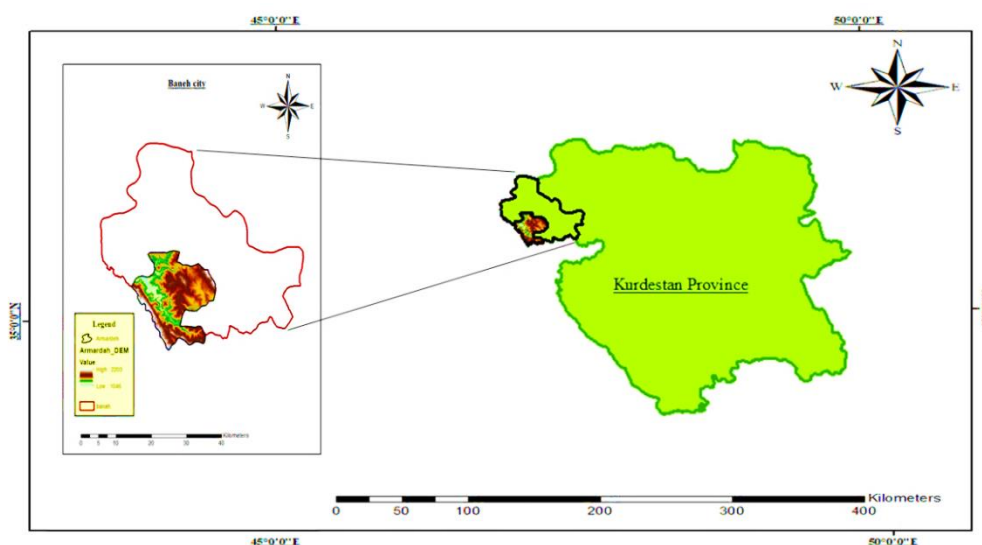
لاشبرگ و تجزیه مواد آلی به‌شدت بر تنفس هتروتروف و کربن خروجی تأثیر می‌گذارد (۱۰). تا به امروز، نشان داده شده است که با افزایش بیش‌ازحد دما و کاهش رطوبت، تنفس خاک کاهش می‌یابد. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان داده‌اند که تنفس خاک در جنگل‌های مختلف تحت تأثیر عوامل عمده‌ای از جمله دما و رطوبت خاک، زیست‌توده ریشه، مقدار لاشبرگ، جمعیت‌های میکروبی، متابولیسم گیاه، سایر شرایط و فرآیندهای نوسان‌پذیر فصلی یا سالانه و حتی چرخه‌های زیستی گیاهی قرار دارد (۱۱، ۱۲، ۱۳). تنفس خاک هم‌چنین تحت تأثیر خواص خاک از جمله pH خاک، نیتروژن کل، فسفر موجود و لاشبرگ است (۸)، این عوامل می‌تواند ترکیب جامعه میکروبی خاک را تغییر دهند (۱۴).

مطالعات متعدد در جنگل‌های معتدل (۱۵)، جنگل‌های بارانی (۱۶)، جنگل‌های استوایی (۱۷) و جنگل‌های شمالی (۱۸) گزارش کرده‌اند که هم دما و هم رطوبت خاک محرک اصلی تنفس خاک در اکوسیستم‌های جنگلی هستند (۱۹). علی‌رغم این حجم قابل‌توجه اطلاعات در مورد تنفس خاک در نقاط مختلف جهان، پژوهش‌های محدودی بر روی جنگل‌های پهن‌برگ خزان‌کننده در ایران انجام شده است. در جنگل‌های ایران هنوز بر روند نرخ تنفس خاک در ساعات مختلف روز مطالعه‌ای صورت نگرفته است و این بر جنبه نوآوری این پژوهش تأکید دارد. جنگل‌های بلوط زاگرس به دلایل زیست‌محیطی و اکولوژیکی یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی هستند (۲۰) و نقش مهمی در چرخه کربن در مناطق نیمه‌خشک ایفا می‌کنند. هدف از این مطالعه مقایسه میزان تنفس خاک در ساعات مختلف روز بین پنج نوع تیپ جنگلی (*Pure Quercus infectoria*), (*Quercus libani- Quercus infectoria*), (*Pure Quercus libani- Quercus infectoria*)

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش: جنگل‌های آرمرده در جنوب غربی شهرستان بانه و در شمال غربی استان کردستان واقع شده است (شکل ۱). بر اساس داده‌های آماری سازمان هواشناسی کشور میانگین بارندگی و دمای سالانه به ترتیب حدود ۶۰۰ میلی‌متر و ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. اینسپتی‌سول و آنتی‌سول مهم‌ترین رده‌های خاکی منطقه مورد مطالعه هستند. پوشش عمده گیاهی شامل جوامع گیاهی گون همراه با خانواده گندمیان، نخودیان، علف‌ها و درختچه‌ها است. مهم‌ترین عناصر درختی تشکیل‌دهنده این جنگل‌ها گونه‌های مازودار (*Q. infectoria* Oliv)، ویول (*Q. brantii* Lindl) و برودار (*Q. libani* Oliv) هستند (۲۱).

Quercus libani- Quercus و (*Quercus libani brantii- Quercus infectoria*) در چهار فصل سال (بهار، تابستان، پاییز و زمستان) و شناسایی تأثیر عوامل محیطی (دما و رطوبت) با به کار بردن مدل‌های مختلف می‌باشد. هم‌چنین میزان همبستگی بین تنفس و ویژگی‌های شیمیایی خاک نیز مورد ارزیابی واقع شد. این پژوهش با اهداف ذکر شده به آزمون فرضیه‌های زیر می‌پردازد: (۱) تیپ‌های جنگلی مختلف با ویژگی‌های مختلف جنگل‌شناسی موجب پاسخ متفاوت تنفس خاک در ساعات مختلف روز خواهند شد. (۲) تغییرات دما و رطوبت در فصول مختلف باعث پاسخ متفاوت تنفس خاک خواهند شد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. Location of the study area.

آزمایش تنفس، دما و رطوبت در میانه هر فصل به مدت دو هفته پارامترهای مذکور هر دو ساعت یکبار در طول روز ثبت شدند (۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶). قبل از انجام تمام اندازه‌گیری‌ها قسمت لاشبرگ خاک حذف شد. نمونه‌های خاک برای آزمایش‌های

شیوه اجرای پژوهش: تیپ‌های غالب منطقه پس از جنگل‌گردشی و مرور منابع تعیین شدند و در هر تیپ قطعه‌نمونه‌هایی به ابعاد ۲۰×۲۰ مترمربع انتخاب شدند (۲۲). تمامی قطعه‌نمونه‌ها دارای شرایط تقریباً یکسانی از لحاظ جهت، شیب و ارتفاع بودند. برای

$$Y = a + bT \quad (1)$$

$$Y = a + bW \quad (2)$$

$$Y = ae^{bT} \quad (3)$$

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها: برای بررسی و مقایسه مشخصه‌های شیمیایی خاک در تیپ‌های مورد بررسی، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف و همگنی واریانس‌ها با آزمون لون انجام و سپس با آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه با استفاده از نرم‌افزار Origin تجزیه و تحلیل شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از آزمون توکی انجام گرفت. برای بررسی روابط بین تغییرات تنفس با ویژگی‌های شیمیایی خاک از رگرسیون خطی یا غیرخطی استفاده شد. با استفاده از برنامه Matlab برای تعیین رابطه بین نرخ تنفس میکروبی خاک به عنوان متغیر وابسته و دما و رطوبت خاک به عنوان متغیر مستقل، منحنی سطح پاسخ با استفاده از خروجی مدل Mielnick and Dugas تشکیل شد، این مدل داده‌های دمای خاک و میزان 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 ترسیم شدند.

نتایج

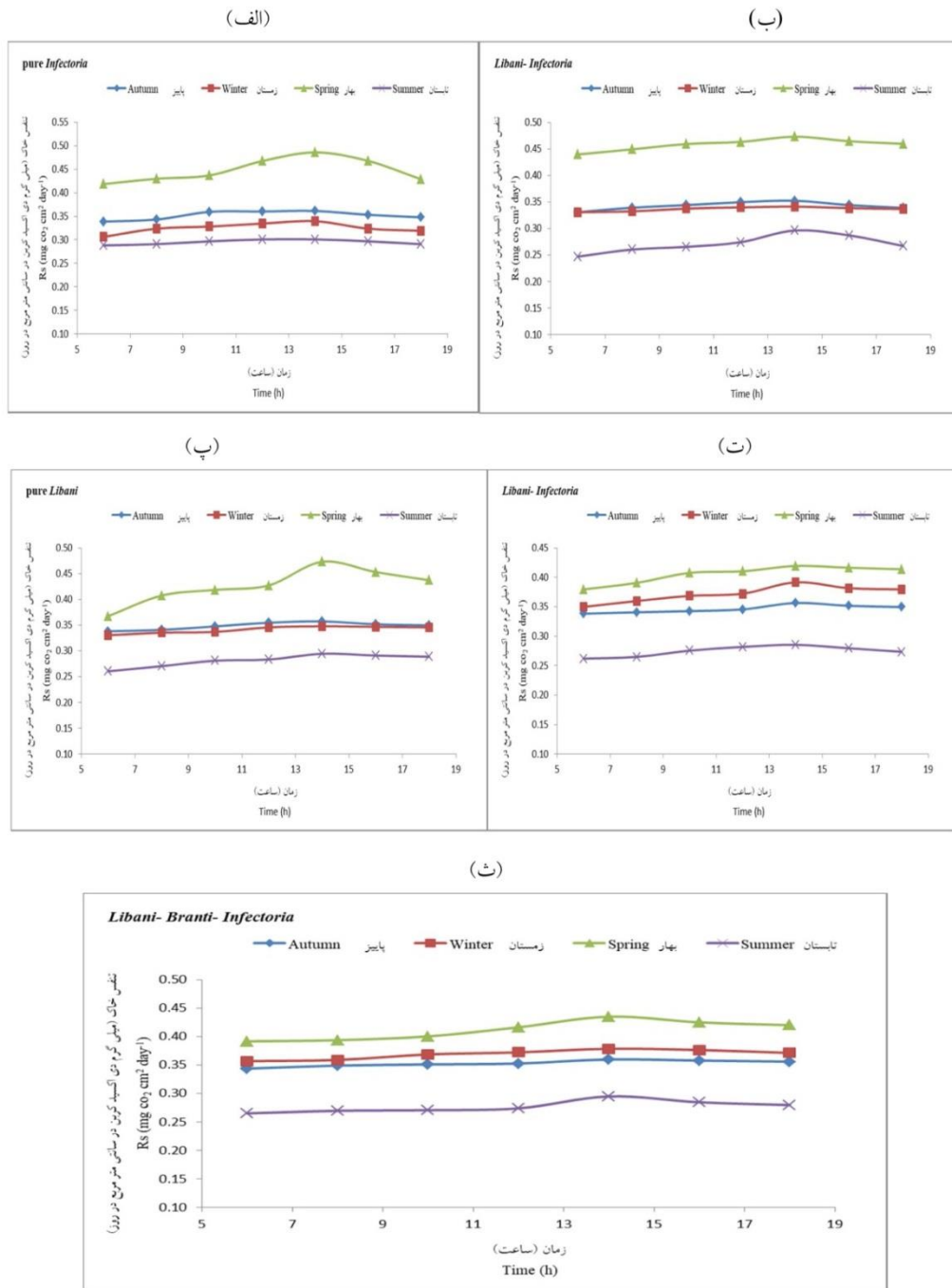
تغییرات تنفس خاک: بر پایه نتایج ارائه شده در شکل ۲ میزان تغییرات روزانه تنفس خاک تقریباً در تمام تیپ‌ها در بعدازظهر و ساعت ۱۴ ثبت شد. لازم به ذکر است در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری دمای خاک تقریباً در تمام تیپ‌های مورد بررسی نرخ مشابهی را نشان داد (شکل ۳). کم‌ترین مقدار تنفس به دلیل دمای پایین در ساعت شش صبح ثبت شد. هم‌چنین تیپ *Pure Infectoria* با میانگین ۰/۳۵۵۰

شیمیایی خاک فقط در فصل رشد برداشت شدند. در هر قطعه نمونه پنج نمونه خاک به صورت تصادفی از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری (۲۷) برداشت، سپس این نمونه‌ها برای اندازه‌گیری و تجزیه متغیرها به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های خاک قبل از انجام آزمایش‌های خشک و پس از آن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. pH خاک مستقیماً با pH متر تعیین شد (۲۸). برای تعیین کربن آلی خاک از روش کجلدال، فسفر قابل جذب از روش اولسن و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر، میزان پتاسیم نیز با روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم و قرائت با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند (۲۹).

برای اندازه‌گیری تنفس خاک یکی از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها برای تخمین نرخ دی‌اکسید کربن از خاک‌های دست‌نخورده استفاده شد (۳۰). برای این منظور هشت لوله PVC (قطر ۱۰ سانتی‌متر × ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر) در هر تیپ (جمعاً ۴۰ عدد) در عمق ۵ سانتی‌متری خاک تیپ‌های موردنظر نصب شد (تلاش شد تا محل قرارگیری لوله‌های نصب‌شده تا حد امکان از هر لحاظ شبیه یکدیگر باشد تا مقدار تنفس را به صورت منطقی در هر تیپ نشان دهند) (۳۱). از ظروف نمونه‌ای کوچک حاوی مقدار مشخص سود جهت به دام انداختن دی‌اکسید کربن آزاد شده بعد از یک روز استفاده شد. بعد از خروج ظرف سود با اسیدکلریدریک ۰/۰۵ مولار تیترا شدند. برای تهیه نمونه شاهد، همان روش بدون خاک اجرا شد. در نهایت میزان تنفس خاک بر مبنای میلی‌گرم در سانتی‌متر در روز محاسبه گردید (۳۲، ۳۳). دما و رطوبت خاک هم‌زمان با اندازه‌گیری تنفس خاک در ۱۰ سانتی‌متری خاک به ترتیب با استفاده از دماسنج و دستگاه TDR ثبت شدند. برای تعیین رابطه تنفس با دما و رطوبت خاک از مدل‌های زیر استفاده شد:

تا ساعت ۱۲ بعدازظهر روند کاهشی را طی کرد و در اوج گرمای روز به کم‌ترین مقدار خود رسید (شکل ۴).

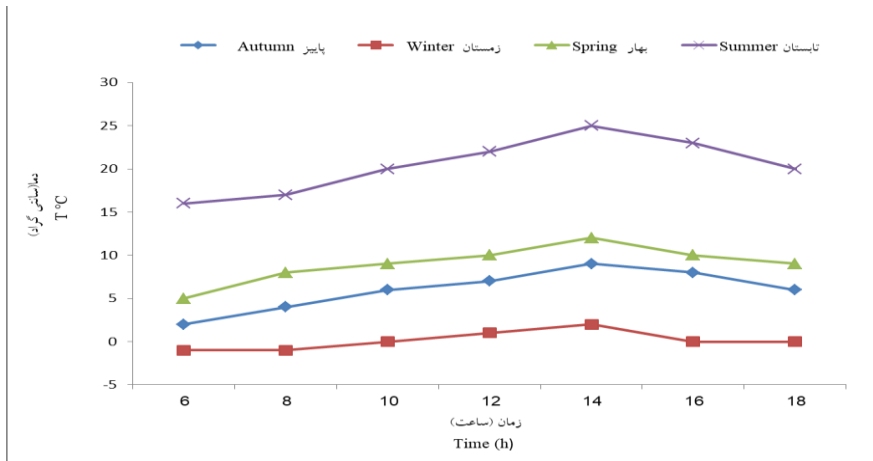
میلی‌گرم در سانتی‌متر مربع بیش‌ترین مقدار تنفس را بین تیپ‌های مورد آزمایش نشان داد (شکل ۲ الف). روند تغییرات رطوبت خاک نیز با گرم شدن دما



شکل ۲- نمودار تنفس خاک در ساعات متفاوت روز در فصول مختلف تیپ‌های الف) Pure *Q. infectoria* ب) *Q. libani-Q. infectoria*

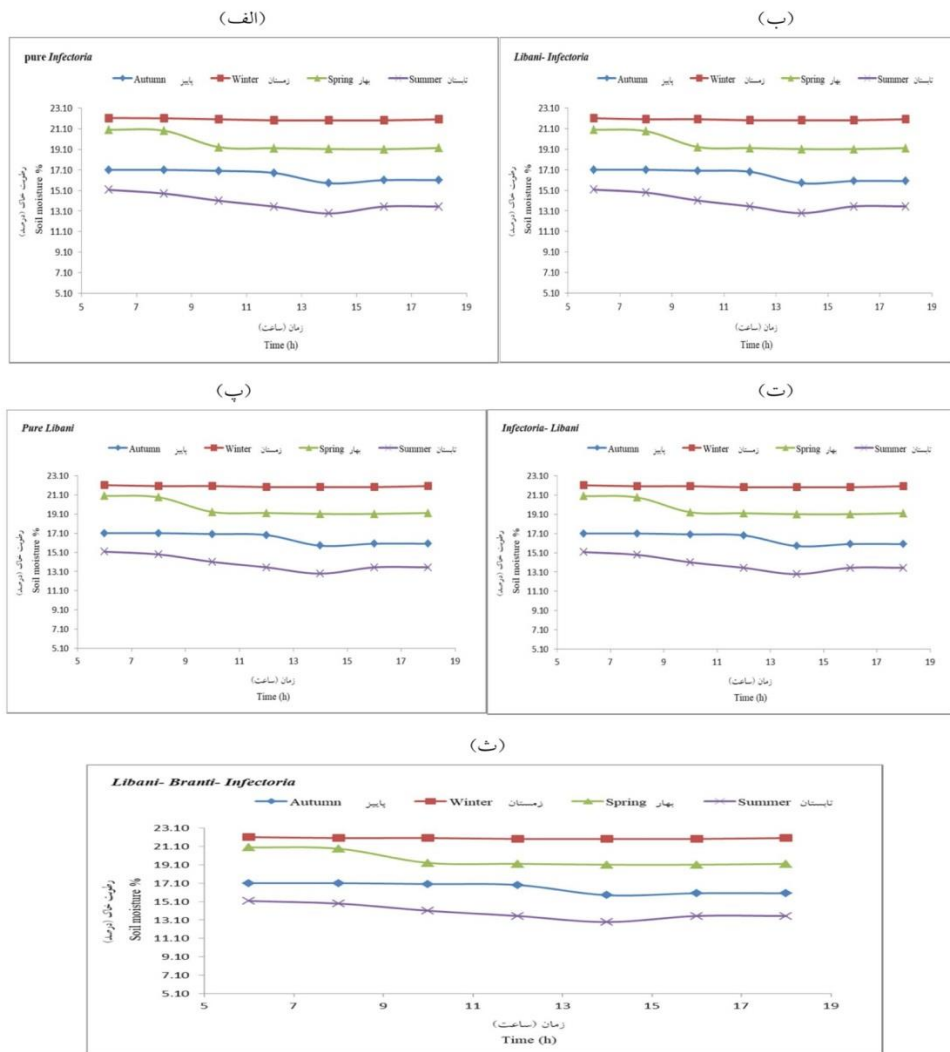
پ) Pure *Q. libani* ت) *Q. infectoria-Q. libani* ث) *Q. libani-Q. brantii-Q. infectoria*

Figure 2. Diagram of soil respiration at different hours of the day in different seasons of (a) Pure *Q. infectoria* (b) *Q. libani-Q. infectoria* (c) Pure *Q. libani* (d) *Q. infectoria-Q. libani* (e) *Q. libani-Q. brantii-Q. infectoria*.



شکل ۳- نمودار دما در ساعات متفاوت فصول مختلف سال در منطقه مورد مطالعه.

Figure 3. Temperature graph at different times of different seasons in the study area.



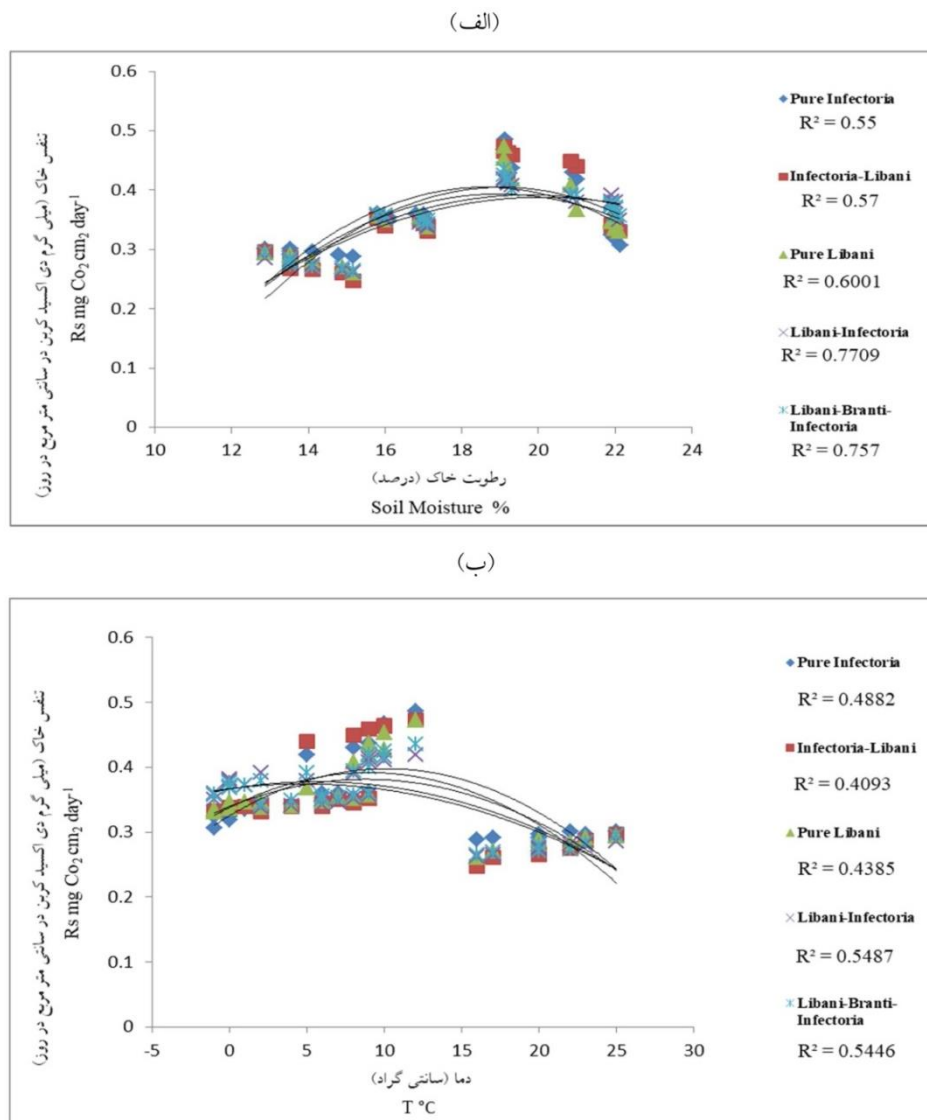
شکل ۴- نمودار رطوبت خاک در ساعات متفاوت روز در فصول مختلف تیپ‌های الف) *Q. infectoria* (ب) *Q. libani-Q. infectoria*

(پ) *Q. libani* (د) *Q. infectoria-Q. libani* (ه) *Q. libani-Q. brantii-Q. infectoria*

Figure 4. Soil moisture diagram at different hours of the day in different seasons of (a) Pure *Q. infectoria* (b) *Q. libani-Q. infectoria* (c) Pure *Q. libani* (d) *Q. infectoria-Q. libani* (e) *Q. libani-Q. brantii-Q. infectoria*.

مقدار ۰/۵۵ درصد مشاهده شد. در رابطه با تنفس و دمای خاک نیز مشابه رطوبت خاک بیش‌ترین همبستگی را تیپ *Libani- Infectoria* با مقدار ۰/۵۴ و کم‌ترین همبستگی را نیز تیپ *Infectoria-Libani* نشان داد.

رابطه بین تنفس با رطوبت و دمای خاک: نتایج همبستگی بین تنفس با رطوبت (شکل ۵ الف) و دما (شکل ۵ ب) نشان از همبستگی بیش‌تر تنفس با رطوبت داشت. هم‌چنین بیش‌ترین همبستگی تنفس با رطوبت در تیپ *Libani- Infectoria* با مقدار ۰/۷۷ و کم‌ترین همبستگی در تیپ *Pure Infectoria*



شکل ۵- رابطه نمایی تنفس با (الف) رطوبت و (ب) دمای خاک.

Figure 5. Exponential relationship of respiration with (a) moisture and (b) soil temperature.

تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) اثر تیپ‌های مختلف جنگلی بر pH و فسفر خاک معنی‌دار بود. در مقایسه میانگین پارامترهای خاک در سطح ۹۵ درصد فسفر خاک دارای تفاوت معنی‌داری بود و سایر خصوصیات تفاوت معنی‌داری را نشان ندادند، البته pH خاک در تیپ *Pure Libani* با سایر تیپ‌ها اختلاف معنی‌داری را نشان داد (جدول ۲).

مشخصه‌های شیمیایی خاک: بر اساس جدول ۳، همبستگی متغیرهای pH، کربن آلی، نیتروژن آلی، فسفر قابل جذب و پتاسیم قابل جذب با تنفس خاک، بیانگر تأثیر این مشخصه‌ها بر تنفس خاک است. باین‌حال این همبستگی مقدار بالایی به‌خصوص در مقدار کربن آلی و پتاسیم نشان نداد. همبستگی تنفس با نیتروژن خاک با مقدار ۰/۴۸ بیش‌ترین درصد را نشان داد. هم‌چنین بر پایه نتایج ارائه‌شده در جدول

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس مشخصه‌های شیمیایی خاک در تیپ‌های مختلف.

Table 1. Results of one-way ANOVA for soil chemical characteristics in different types.

Sig.	F	میانگین مربعات Mean square	df	تیپ‌ها / مشخصه‌ها Type/Characteristics
0.00127*	6.79	0.05	4	واکنش خاک pH
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 (%)
0.001*	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)

جدول ۲- میانگین (± اشتباه معیار) مشخصه‌های شیمیایی خاک در تیپ‌های مختلف جنگلی.

Table 2. Mean (± standard error) chemical characteristics of soil in different forest types.

پتاسیم قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) K(mg kg ⁻¹)	فسفر قابل جذب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) P(mg kg ⁻¹)	نیتروژن آلی خاک (درصد) Total N (%)	کربن آلی خاک (درصد) Organic carbon (%)	pH	تیپ جنگلی Forest types
2213.8±67.45 ^a	19.50±2.86 ^c	0.58±0.15 ^a	1.08±0.08 ^a	6.6±0.02 ^a	مازو خالص <i>Pure Infectoria</i>
2368.2±157.19 ^a	42.75±10.87 ^{bc}	0.43±0.09 ^a	1.88±0.07 ^a	6.36±0.03 ^a	ویول-مازو <i>Libani-Infectoria</i>
2663.9±154.37 ^a	99.85±22.17 ^a	0.80±0.13 ^a	1.73±0.05 ^a	6.16±0.02 ^b	ویول خالص <i>Pure Libani</i>
2687.0±272.83 ^a	47.20±4.13 ^{bc}	0.39±0.06 ^a	1.02±0.02 ^a	6.56±0.06 ^a	مازو-ویول <i>Infectoria-Libani</i>
2386.2±120.3 ^a	72.16±9.02 ^{ab}	0.76±0.20 ^a	0.95±0.09 ^a	6.58±0.02 ^a	ویول-برو-مازو <i>Libanii-Brantii- Infecoria</i>

حروف متفاوت نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۹۵ می‌باشد

Different letters indicate a significant difference at the 95 level

جدول ۳- ضریب همبستگی تنفس با مشخصه‌های شیمیایی خاک در تیپ‌های مختلف جنگل.

Table 3. Correlation coefficient of respiration with chemical characteristics of soil in different forest types.

پتاسیم قابل جذب K	فسفر قابل جذب P	نیترژن آلی خاک Total N	کربن آلی خاک Organic carbon	pH	خصوصیات شیمیایی ضریب همبستگی R ²
0.2782	0.3558	0.4824	0.3427	0.3482	

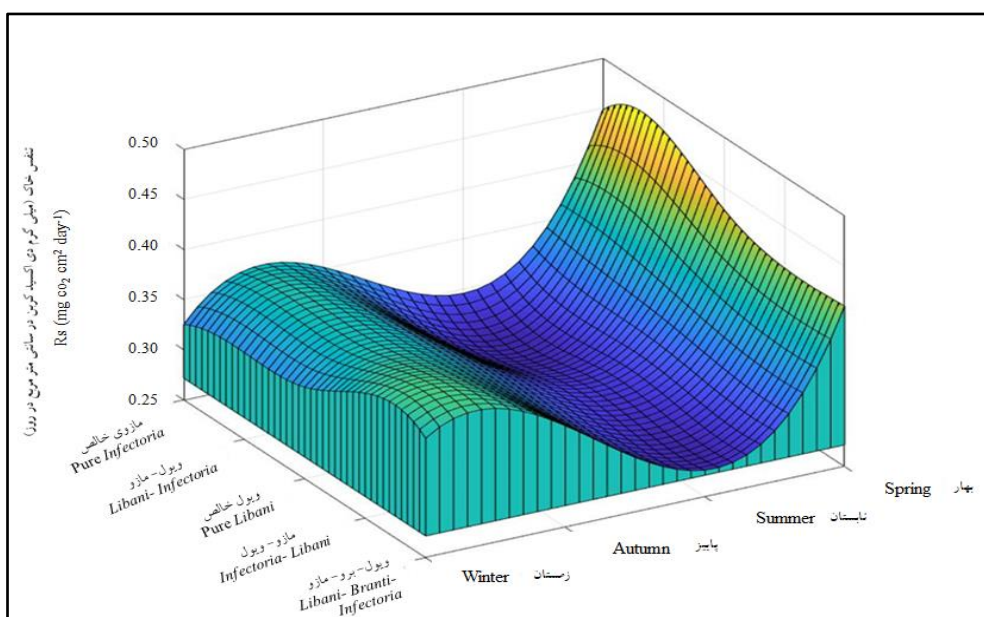
افزایش دما می‌باشند. مدل نمایی در کل نسبت به مدل خطی برازش بهتری نسبت با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد.

مدل‌های تنفس خاک با دما و رطوبت: در جدول ۴ مدل‌های برازش شده بین تنفس و دما و رطوبت خاک در تیپ‌های مورد مطالعه ارائه شده است. مدل‌های ساده خطی و نمایی بیانگر افزایش تنفس خاک با

جدول ۴- مدل‌های برازش شده بین تنفس با رطوبت و دمای خاک برای تیپ‌های مختلف.

Table 4. Fitted models between respiration and soil moisture and temperature for different types.

$Y = aW + b$			$A = ae^{bT}$			$Y = a + bT$			تیپ جنگلی Forest types
R ²	b	a	R ²	b	a	R ²	b	a	
0.40	0.63	-0.015	0.88	0.015	0.308	0.82	0.30	0.005	مازو خالص Pure <i>Infectoria</i>
0.70	0.59	-0.013	0.99	0.012	0.315	0.99	0.31	0.004	ویول-مازو <i>Libani-Infectoria</i>
0.91	0.74	-0.022	0.92	0.019	0.294	0.87	0.29	0.005	ویول خالص Pure <i>Libani</i>
0.96	0.67	-0.017	0.94	0.013	0.309	0.89	0.30	0.004	مازو-ویول <i>Infectoria-Libani</i>
0.89	0.68	-0.018	0.89	0.012	0.315	0.84	0.30	0.004	ویول-برو-مازو <i>Libanii-Brantii- Infectoria</i>



شکل ۶- اثر ترکیبی رطوبت و دمای خاک بر تنفس خاک.

Figure 6. Combined effect of soil moisture and temperature on soil respiration.

ترکیب تنفس با دما و رطوبت خاک برای درک مکانیسم‌های آب‌وهوا در پژوهش‌های تنفس بسیار مهم است (۱۹). نرخ تنفس خاک با شروع روز و افزایش دما روند صعودی پیدا کرد و با کم شدن دما در بعدازظهر روند نزولی را نشان داد (شکل ۲). در بین تیپ‌های مورد مطالعه بیش‌ترین ضریب همبستگی در طول سال بین تنفس با رطوبت و دمای خاک در تیپ *Libani- Infectoria* مشاهده شد (شکل ۵). هم‌چنین با بررسی تغییرات فصلی، بیش‌ترین تنفس به‌خاطر حد بهینه دما و رطوبت در بهار ثبت شد (شکل ۶). این نتایج با نتایج Chen و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد (۳۶). پژوهش‌گران بر این عقیده‌اند که حد بهینه رطوبت خاک در جنگل‌های مختلف متفاوت می‌باشد. هنگامی‌که حد رطوبت خاک بیش‌تر از حد آستانه است، تنفس خاک با محدود شدن هوادهی و کاهش فعالیت میکروبی کاهش می‌یابد (۳۷). پژوهش‌های ما هم‌چنین با مقایسه ویژگی‌های خاک در هر تیپ جنگلی (جدول ۱) نشان داد که کربن آلی

بحث

دما و رطوبت خاک عوامل محیطی اصلی کنترل‌کننده تنفس خاک هستند و تغییرات آن‌ها تنفس خاک را در انواع جنگل‌های مختلف تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. تغییرات روزانه دما و رطوبت خاک در پوشش‌های جنگلی مختلف به‌دلیل تأثیر تاج پوشش موجب نوسانات تنفس خاک می‌شود و این نشان‌دهنده عدم تأثیر عوامل فیزیکی خاک است. نتایج این پژوهش با یافته‌های به‌دست‌آمده از اقلیم‌های نیمه‌خشک همسو بود (۳۴). علاوه بر این، میانگین تنفس خاک در تیپ *Pure Infectoria* بیش‌تر از تیپ‌های دیگر بود (شکل ۶) که علت این امر می‌تواند به دلیل همبستگی مثبت و بالا بودن میزان pH خاک در این تیپ باشد؛ زیرا خاک‌های اسیدی معمولاً مواد غذایی ضعیف‌تری نسبت به خاک‌های با pH بالاتر دارند (۳۵). این نتیجه باعث تجزیه آهسته لاشبرگ و در نتیجه مهار فعالیت میکروارگانیسم‌ها برای کاهش تنفس خاک می‌شود.

تنفس خاک را تنظیم می‌کنند که ارزیابی تنفس خاک را پیچیده می‌کند (۴۰).

نتیجه‌گیری کلی

طبق نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، در طول بهار و تابستان تغییرات روزانه تنفس خاک در بعدازظهر به‌طور چشمگیری بیش‌تر از زمان‌های دیگر بود و تنفس خاک برای تیپ *Pure Infectoria* بیش‌ترین مقدار بود. مطالعه ما هم‌چنین نشان داد که گونه‌های جنگلی می‌توانند بر فسفر و pH خاک تأثیرگذار باشند. هم‌چنین بیش‌ترین ضریب همبستگی تنفس با عناصر اقلیمی و مشخصه‌های شیمیایی خاک به ترتیب با رطوبت و نیتروژن آلی خاک مشاهده شد. یافته‌های ما نشان داد که ترکیبی از ویژگی‌های شیمیایی خاک به‌جای یک عامل واحد، هم‌راستا با عوامل دما و رطوبت در ساعات و فصول مختلف ممکن است تغییرات تنفس خاک را تعیین کنند و درنهایت تأثیر تیپ‌های مختلف بر مقدار تنفس خاک سبب اختلافات ناچیزی گردید اما در تیپ‌های مختلف بلوط جنگل‌های آرم‌رده نمی‌تواند معنی‌دار باشد، اگرچه این یافته‌ها به رفع برخی شکاف‌ها در مطالعه تنفس خاک در اکوسیستم‌های جنگلی مختلف تحت شرایط آب و هوایی فعلی کمک می‌کنند، بااین‌حال، نرخ تنفس خاک در رابطه با تأثیر گونه‌های مختلف در قالب تیپ جنگلی در بیوم‌های متفاوت هنوز هم به‌طور دقیق مشخص نیست؛ بنابراین، پژوهش‌های بیش‌تر باید بر روی عوامل محرک تنفس اتوتروف و تنفس هتروتروف و بر واکنش میکروارگانیسم‌ها به تغییرات آب و هوایی متمرکز شود.

خاک در تیپ *Libanii-Brantii-Infectoria* بیش‌ترین مقدار را دارد. این نتیجه نشان داد که ساختار جنگل‌های آمیخته می‌تواند به‌طور مؤثر رشد و متابولیسم درختان را ارتقا ببخشد.

دمای خاک با تأثیر بر رشد ریشه گیاه، فعالیت میکروبی و تجزیه لاشبرگ به تنفس خاک کمک می‌کند. جهت بررسی پاسخ تنفس خاک به تغییرات دما مدل خطی (جدول ۳) و مدل نمایی ترسیم شد، ضریب همبستگی در مدل خطی برای بررسی اثر دما بر روی تنفس خاک از ۸۲-۹۹ درصد متغیر بود. هم‌چنین ضریب همبستگی در مدل نمایی از ۸۸-۹۹ درصد متغیر بود. دلیل تفاوت در ضریب همبستگی در تیپ‌های مختلف ممکن است به دلیل عدم تشابه سیستم ریشه و فعالیت میکروبی باشد (۳۸). مدل‌های همبستگی دما و تنفس خاک می‌توانند بیش‌تر تغییرات فصلی انتشار کربن خاک را توضیح دهند، اگرچه عوامل دیگری مانند میزان رطوبت خاک بر تنفس خاک تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، ما یک مدل رگرسیون خطی از تنفس و رطوبت خاک را هم بررسی کردیم. همبستگی بین تنفس و رطوبت خاک در پنج تیپ جنگلی به‌طور قابل‌توجهی متفاوت بود که ممکن است به این دلیل تأثیرات رطوبت خاک بر کربن ورودی و تجزیه لاشبرگ باشد (۳۹). بین ویژگی‌های شیمیایی خاک به غیر از فسفر و pH خاک سایر پارامترهای اندازه‌گیری شده با هم تفاوت معنی‌داری نداشتند و با بررسی همبستگی تنفس با پارامترهای شیمیایی خاک بیش‌ترین همبستگی با نیتروژن خاک مشاهده شد (جدول ۲) که برخلاف نتایج Wertin و همکاران (۲۰۱۸) بود (۷). درنهایت یافته‌های ما نشان داد که عوامل ترکیبی به‌جای یک عامل واحد، تغییرات

منابع

1. Yu, H., Chen, Y., Zhou, G., and Xu, Z. 2022. Coordination of leaf functional traits under climatic warming in an arid ecosystem. *BMC plant biology*. 22: 1. 1-15.
2. Kumar, A., Bhattacharya, T., Mukherjee, S., and Sarkar, B. 2022. A perspective on biochar for repairing damages in the soil-plant system caused by climate change-driven extreme weather events. *Biochar*. 4: 1. 1-23.
3. Shi, K., Chen, Y., Yu, B., Xu, T., Chen, Z., and Liu, R. 2016. Modeling spatiotemporal CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis. *Applied Energy*. 168: 523-33.
4. Wu, F., Peng, C., Liu, W., Liu, Z., Wang, H., and Chen, D. 2021. Effects of Nitrogen Additions on Soil Respiration in an Asian Tropical Montane Rainforest. *Forests*. 12: 6. 802.
5. Chen, S., Wang, J., Zhang, T., and Hu, Z. 2020. Climatic, soil, and vegetation controls of the temperature sensitivity (Q10) of soil respiration across terrestrial biomes. *Global Ecology and Conservation*. pp. 1-22.
6. Shi, P., Qin, Y., Liu, Q., Zhu, T., Li, Z., and Li, P. 2020. Soil respiration and response of carbon source changes to vegetation restoration in the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*. 707: 135507.
7. Wertin, T.M., Young, K., and Reed, S.C. 2018. Spatially explicit patterns in a dryland's soil respiration and relationships with climate, whole plant photosynthesis and soil fertility. *Oikos*. 127: 9. 1280-90.
8. Li, Y., Lin, S., Chen, Q., Ma, X., Wang, S., and He, K. 2022. Response of soil respiration to environmental and photosynthetic factors in different subalpine forest-cover types in a loess alpine hilly region. *J. of Forestry Research*. 33: 2. 653-65.
9. Dong, L., Zeng, W., Wang, A., Tang, J., Yao, X., and Wang, W. 2020. Response of soil respiration and its components to warming and dominant species removal along an elevation gradient in alpine meadow of the Qinghai-Tibetan plateau. *Environmental Science & Technology*. 54: 17. 10472-82.
10. Hosseiniaghdam, E. 2021. Quantifying the combined effect of abiotic factors on the decomposition of organic matter in semiarid grassland soils: The University of Nebraska-Lincoln.
11. Silletta, L.C., Cavallaro, A., Kowal, R., Pereyra, D.A., Silva, R.A., and Arias, N.S. 2019. Temporal and spatial variability in soil CO₂ efflux in the Patagonian steppe. *Plant and Soil*. 444: 1. 165-76.
12. Čater, M., Darenova, E., and Simončič, P. 2021. Harvesting intensity and tree species affect soil respiration in uneven-aged Dinaric forest stands. *Forest Ecology and Management*. 480: 118638.
13. Zheng, S., Zhao, X., Sun, Z., Li, J., Jing, Y., and Wang, Q. 2022. Carbon addition modified the response of heterotrophic respiration to soil sieving in ectomycorrhizal-dominated forests. *Forests*. 13: 8. 1263.
14. Shang, R., Li, S., Huang, X., Liu, W., Lang, X., and Su, J. 2021. Effects of soil properties and plant diversity on soil microbial community composition and diversity during secondary succession. *Forests*. 12: 6. 805.
15. Garvey, S.M., Templer, P.H., Pierce, E.A., Reinmann, A.B., and Hutyra, L.R. 2022. Diverging patterns at the forest edge: Soil respiration dynamics of fragmented forests in urban and rural areas. *Global Change Biology*. 28: 9. 3094-109.
16. Marzolf, N.S., Small, G.E., Oviedo-Vargas, D., Ganong, C.N., Duff, J.H., and Ramírez, A. 2022. Partitioning inorganic carbon fluxes from paired O₂-CO₂ gas measurements in a Neotropical headwater stream, Costa Rica. *Biogeochemistry*. 160: 2. 259-273.
17. Zhang, G., Zhou, G., Zhou, X., Zhou, L., Shao, J., and Liu, R. 2022. Effects of tree mycorrhizal type on soil respiration and carbon stock via fine root biomass and litter dynamic in tropical plantations. *J. of Plant Ecology*.

18. Xing, A., Du, E., Shen, H., Xu, L., Zhao, M., and Liu, X. 2022. High-level nitrogen additions accelerate soil respiration reduction over time in a boreal forest. *Ecology Letters*. 25: 8. 1869-1878.
19. Ma, M., Zang, Z., Xie, Z., Chen, Q., Xu, W., and Zhao, C. 2019. Soil respiration of four forests along elevation gradient in northern subtropical China. *Ecology and evolution*. 9: 22. 12846-1257.
20. Khosravi, S., Maleknia, R., and Khedrizeh, M. 2017. Understanding the contribution of non-timber forest products to the livelihoods of forest dwellers in the northern Zagros in Iran. *Small-scale Forestry*. 16: 2. 235-248.
21. Ghazanfari, H., Namiranian, M., Sobhani, H., and Mohajer, R.M. 2004. Traditional forest management and its application to encourage public participation for sustainable forest management in the northern Zagros Mountains of Kurdistan Province, Iran. *Scandinavian J. of forest research*. 19: 65-71.
22. Yan, G., Xing, Y., Xu, L., Wang, J., Meng, W., and Wang, Q. 2016. Nitrogen deposition may enhance soil carbon storage via change of soil respiration dynamic during a spring freeze-thaw cycle period. *Scientific reports*. 6: 1. 1-9.
23. Parton, W.J. 1984. Predicting soil temperatures in a shortgrass steppe. *Soil Science*. 138: 2. 93-101.
24. Stathers, R., Black, T., and Novak, M. 1985. Modelling soil temperature in forest clearcuts using climate station data. *Agricultural and forest meteorology*. 36: 2. 153-64.
25. Xu, M., and Qi, Y. 2001. Spatial and seasonal variations of Q10 determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*. 15: 3. 687-696.
26. Moyes, A.B., and Bowling, D.R. 2013. Interannual variation in seasonal drivers of soil respiration in a semi-arid Rocky Mountain meadow. *Biogeochemistry*. 113: 1. 683-697.
27. Su, F., Xu, S., Sayer, E.J., Chen, W., Du, Y., and Lu, X. 2021. Distinct storage mechanisms of soil organic carbon in coniferous forest and evergreen broadleaf forest in tropical China. *J. of Environmental Management*. 295: 113142.
28. Gao, W., Huang, Z., Ye, G., Yue, X., and Chen, Z. 2018. Effects of forest cover types and environmental factors on soil respiration dynamics in a coastal sand dune of subtropical China. *J. of Forestry Research*. 29: 6. 1645-55.
29. Ghazanshahi, J. 2006. *Soil and Plant Analysis* (translation). Homa Publication, Tehran.
30. Anderson, J.P. 1983. Soil respiration. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*. 9: 831-71.
31. Ding, W., Cai, Y., Cai, Z., Yagi, K., and Zheng, X. 2007. Soil respiration under maize crops: effects of water, temperature, and nitrogen fertilization. *Soil Science Society of America J.* 71: 3. 944-951.
32. Ungaro, F., Maienza, A., Ugolini, F., Lanini, G., Baronti, S., and Calzolari, C. 2022. Assessment of joint soil ecosystem services supply in urban green spaces: A case study in Northern Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*. 67: 127455.
33. Haber, W. 1958. *Ökologische untersuchung der bodenatmung: (Mit einer Übersicht über frühere Bearbeitungen, insbesondere deren Methoden)*. *Flora oder Allgemeine Botanische Zeitung*. 146: 1-2. 109-57.
34. Jia, X., Zha, T., Wang, S., Bourque, C.P.A., Wang, B., and Qin, S. 2018. Canopy photosynthesis modulates soil respiration in a temperate semi-arid shrubland at multiple timescales. *Plant and Soil*. 432: 1. 437-450.
35. Xu, X., Han, L., Wang, Y., and Inubushi, K. 2007. Influence of vegetation types and soil properties on microbial biomass carbon and metabolic quotients in temperate volcanic and tropical forest soils. *Soil Science and Plant Nutrition*. 53: 4. 430-40.
36. Chen, Y., Luo, J., Li, W., Yu, D., and She, J. 2014. Comparison of soil respiration among three different subalpine ecosystems on eastern Tibetan Plateau, China. *Soil Science and Plant Nutrition*. 60: 2. 231-241.

37. Han, G., Sun, B., Chu, X., Xing, Q., Song, W., and Xia, J. 2018. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*. 256: 292-303.
38. Rezaei-Chiyaneh, E., Amirnia, R., Fotuhi Chiyaneh, S., Maggi, F., Barin, M., and Razavi, B. 2021. Improvement of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) yield quality through a coupled intercropping system and vermicompost application along with maintenance of soil microbial activity. *Land Degradation & Development*. 32: 9. 2833-2848.
39. Webb, J.R. 2022. Spatial patterns of CO₂ fluxes across litter amended, non-amended, and native soils on cotton farms in southern NSW.
40. Okin, G.S., Heras, M.M-dl., Saco, P.M., Throop, H.L., Vivoni, E.R., and Parsons, A.J. 2015. Connectivity in dryland landscapes: shifting concepts of spatial interactions. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 13: 1. 20-27.

