



Research Paper

Analysis of Changes in Soil Chemical and Biological Characteristics after Fire in Zagros Forests (Case study: Gahvareh, Kermanshah)

Moslem Raziani¹, Ali Beheshti Ale Agha² , Rohollah Sharifi³

1- M.Sc. in Soil Biology, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, (Corresponding author: beheshtiali97@gmail.com)

3- Assistant Professor, Department of Plant Protection, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 26 January, 2024

Accepted: 14 May, 2024

Extended Abstract

Background: Forest fire is very common in all ecosystems of the world that affects both vegetation and soil and is also helpful in maintaining the diversity and stability of ecosystems. The effect of forest fires and prescribed fires on forest soil is very complex. It affects the organic matter, macro and micronutrients, and physical properties of soil, such as texture, color, pH, and bulk density, as well as soil biota. Fire is a natural factor in the forest that temporarily reduces the vegetation on the soil surface. After a fire, the soil can experience long-term, medium-term, and short-term changes, which are different depending on the type of soil characteristics, weather conditions, duration, intensity, and frequency of the fire. The Zagros forest ecosystem is generally in the coppice form, and these forests are not safe from fire, which constantly affects them. Considering that the long-term stability of these forests depends on maintaining the soil quality, it is essential to investigate the effects of fire on soil properties. This study aimed to investigate the effect of fire on Zagros forests in Kermanshah province, Gahvareh city in the Lerini region.

Methods: The studied area is a part of Zagros forests in Kermanshah province, Gahvareh city, the Lerini region located at 34° 10' 35" E and 46° 34' 28" N, with an average height of 1468 m above sea level. In this research, the points were determined by measuring with a meter on transects, and they were sampled regularly in specific time intervals (October, November, February, April, and June). The distance between the samples in each row was 20 m and the distance between the rows was 50 m, and three rows were determined in each of the burnt and control areas. Some soil characteristics, such as pH, electrical conductivity (EC), organic carbon, absorbable phosphorus, soil respiration, microbial biomass carbon, substrate-induced respiration, and metabolic quotient, were measured in soil samples. The effect of the treatments on all measured variables was investigated by the two-way ANOVA. Means were compared by Duncan's Multiple Range Test (DMRT). Data were analyzed using the Windows version of SAS (version 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC).

Results: The soil pH decreased with the passage of time and a decrease in air temperature under the crown (unburnt and burned) and outside the unburnt crown. An upward trend in the pH of the soil in these three places occurred after the cold season. The soil pH ranged from 7.31 to 7.66 in all treatments from October to June. The results of the two-way ANOVA showed that the fire and sampling location did not affect the soil EC in different months of sampling. The amount of absorbable phosphorus increased with the occurrence of fire. The highest and lowest amounts of absorbable phosphorus occurred under and outside the burnt and the control crowns, respectively. The range of organic carbon changes indicates that soil organic carbon has increased over time in all treatments. The highest and the lowest increases were observed under the burnt (1.51%) and the control (unburned) crowns, respectively. Examining the changes indicates that the basic soil respiration was high at the beginning of the fire but decreased gradually, and then the initial value also increased in the last months of sampling. In this research, the amount of basic respiration in the soil of burned areas is not higher than that of unburned areas despite the occurrence of fire



and the negative effect on soil organic carbon. According to the results, the amount of substrate-induced respiration decreases under and outside the crown (burnt and control) with the passage of time and the decrease in temperature. According to the ANOVA results, the effects of fire and the sampling location were significant on the microbial metabolic quotient of the soil, although no significant interaction effects on the microbial metabolic quotient were observed in February and June. The highest and the lowest microbial metabolic quotients were measured under (0.94 mg C/mg MBC.day) and outside (0.26 mg C/mg MBC.day) the unburned crown, respectively. With the passage of time and a decrease in temperature, the amount of this parameter decreased in the treatment under the crown of the unburnt area and increased in the three treatments under and outside the burned crown and outside the unburnt crown. At the end of the period, the highest and the lowest microbial metabolic quotients were measured under (0.72 mg C/ mg MBC. day) and outside (0.59 mg C/ mg MBC. day) the crown of the burned area, respectively.

Conclusion: The results showed that the fire was superficial in both places under and outside the crown and did not significantly affect the soil's chemical and biological characteristics. Therefore, no significant changes occurred in indicators such as soil organic carbon and EC, and the fire only increased phosphorus in the burned areas compared to the control. Due to the occurrence of surface fire, combustion did not significantly increase biological indicators. The results of this research demonstrate that the fire changes the soil's chemical and biological characteristics when it occurs with a higher intensity and at a higher temperature.

Keywords: Bacteria, Fertility Island, Fire, Fungus, Organic Carbon

How to Cite This Article: Raziani, H., Beheshti Ale Agha, A., & Sharifi, R. (2024). Analysis of Changes in Soil Chemical and Biological Characteristics after Fire in Zagros Forests (Case study: Gahvareh, Kermanshah). *Ecol Iran For*, 12(2), 115-129. DOI: [10.61186/ifej.12.2.115](https://doi.org/10.61186/ifej.12.2.115)



مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات برخی ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک پس از آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: گهواره- کرمانشاه)

مسلم رازیانی^۱، علی بهشتی آل آقا^۲ و روح‌الله شریفی^۳

۱- کارشناس ارشد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده رازی، دانشکده کشاورزی، کرمانشاه، ایران، (نویسنده مسوول: beheshtiali97@gmail.com)
۳- استادیار، گروه گیاهپزشکی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۶

صفحه: ۱۱۵ تا ۱۲۹

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: آتش‌سوزی جنگل در تمام اکوسیستم‌های جهان بسیار رایج است. هم روی پوشش گیاهی و هم خاک تأثیر می‌گذارد. همچنین در حفظ تنوع و ثبات اکوسیستم‌ها مفید است. اثر آتش‌سوزی جنگل بر خاک جنگل بسیار پیچیده است. آتش‌سوزی بر مواد آلی خاک، عناصر ماکرو و ریز مغذی، خواص فیزیکی خاک مانند بافت، رنگ، pH، تراکم ظاهری و همچنین جامعه میکروبی خاک تأثیر می‌گذارد. خاک پس از وقوع آتش‌سوزی می‌تواند تغییرات بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدتی را تجربه کند؛ که این تغییرات بسته به نوع ویژگی‌های خاک، شرایط آب و هوایی، مدت، شدت و فراوانی آتش‌سوزی متفاوت است. جنگل‌های زاگرس که بیشتر شاخه‌زاد هستند از خطر آتش‌سوزی در امان نبوده و آتش به‌طور مداوم این جنگل‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اینکه پایداری طولانی‌مدت این جنگل‌ها وابسته به حفظ کیفیت خاک است، بررسی اثرات آتش بر خصوصیات خاک بسیار مهم است. این مطالعه جهت بررسی اثر آتش‌سوزی بر تغییرات ویژگی‌های شیمیایی و زیستی جنگل‌های زاگرس در استان کرمانشاه، شهرستان گهواره در منطقه لرینی انجام شد.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه بخشی از جنگل‌های زاگرس در استان کرمانشاه، شهرستان گهواره، منطقه لرینی با طول جغرافیایی ۳۴ درجه، ۱۰ دقیقه و ۳۵ ثانیه و عرض جغرافیایی ۴۶ درجه، ۳۴ دقیقه و ۲۸ ثانیه که ارتفاع آن از سطح دریا به‌طور متوسط ۱۴۶۸ متر بود. این بررسی در سال ۱۴۰۰ انجام شد و آتش‌سوزی‌های متعددی قبل از آن در وسعت‌های متفاوت در منطقه رخ داده است. برای نمونه‌برداری از خاک، نقاط با اندازه‌گیری به‌وسیله متر بر روی ردیف‌ها مشخص شد و به‌صورت منظم و با فواصل زمانی مشخص در ماه‌های مهر، آذر، بهمن، فروردین و خرداد، نمونه‌برداری از خاک صورت گرفت. فاصله نمونه‌ها در هر ردیف ۲۰ متر و فاصله ردیف‌ها از هم ۵۰ متر بود به‌گونه‌ای که ۳ ردیف در منطقه سوخته و ۳ ردیف در منطقه شاهد (نسوخته) مشخص شدند. برخی از ویژگی‌های خاک مانند، pH و هدایت الکتریکی، کربن آلی، فسفر قابل‌جذب، تنفس خاک، کربن زیست‌توده میکروبی، تنفس برانگیخته با سوبسترا و کسر متابولیک در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند. داده‌ها با نرم‌افزار SAS 9.4 مورد تجزیه واریانس قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال خطا ۱ و ۵ درصد بررسی شدند.

یافته‌ها: pH خاک با گذشت زمان و کاهش دمای هوا در زیر تاج (نسوخته و سوخته) و بیرون تاج نسوخته کاهش یافت و پس از گذر از فصل سرما pH خاک در این سه محل روند صعودی داشت. دامنه pH خاک از مهر ماه تا خرداد ماه در هر ۴ تیمار از ۷/۳۱ تا ۷/۶۶ متغیر بود. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده آتش‌سوزی و محل نمونه‌برداری و اثرات متقابل تیمارها تأثیری بر مقدار هدایت الکتریکی خاک در ماه‌های مختلف نمونه‌برداری نداشت. با وقوع آتش‌سوزی میزان فسفر قابل جذب افزایش یافت. بیشترین مقدار فسفر قابل جذب در زیر و بیرون تاج سوخته و کمترین میزان آن در زیر و بیرون تاج شاهد بود. همچنین دامنه تغییرات کربن آلی بیانگر این است که با گذشت زمان در هر ۴ تیمار، کربن آلی خاک افزایش یافته است. بیشترین افزایش در زیر تاج سوخته (۱/۵۱ درصد) و کمترین میزان آن نیز در زیر تاج شاهد (نسوخته) مشاهده شد. با بررسی روند تغییرات مشاهده می‌شود تنفس پایه خاک در ابتدای آتش‌سوزی بالا بوده ولی به‌مرور کاهش پیدا می‌کند و سپس در ماه‌های آخر نمونه‌برداری از مقدار اولیه نیز بیشتر شده است. در این پژوهش علی‌رغم بروز آتش‌سوزی و تأثیر منفی بر کربن آلی خاک مقدار تنفس پایه در خاک مناطق سوخته بیشتر از مناطق سوخته نشده است. نتایج نشان داد با گذشت زمان و کاهش دما مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در زیر و خارج تاج (سوخته و شاهد) کاهش می‌یابد. در ابتدای نمونه‌برداری زیر تاج سوخته نشده بیشترین میزان تنفس ناشی از سوبسترا (۵۶۲ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم) و بیرون تاج سوخته کمترین مقدار (۵۱۳/۱۱ میلی‌گرم کربن بر کیلوگرم) را به‌خود اختصاص داد. با گذشت زمان و کاهش دما مقدار تنفس ناشی از سوبسترا در زیر و خارج تاج (سوخته و شاهد) کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات متقابل آتش‌سوزی و محل نمونه‌برداری بر کسر متابولیکی خاک معنی‌دار شد البته معنی‌داری اثرات متقابل بر کسر متابولیکی در بهمن و خرداد ماه مشاهده نشد. بیشترین مقدار کسر متابولیک در زیر تاج نسوخته (۰/۹۴ میلی‌گرم کربن بر میلی‌گرم کربن زیست‌توده در روز) و کمترین مقدار آن در بیرون تاج سوخته نشده (۰/۲۶ میلی‌گرم کربن بر میلی‌گرم کربن زیست‌توده در روز) اندازه‌گیری شد. با گذشت زمان و کاهش دما میزان این پارامتر در تیمار زیر تاج منطقه سوخته نشده کاهش و در سه تیمار زیر و بیرون تاج سوخته و بیرون تاج سوخته نشده، افزایش یافت. در پایان دوره بیشترین مقدار کسر متابولیک در زیر تاج منطقه سوخته شده (۰/۷۲ میلی‌گرم کربن بر میلی‌گرم کربن زیست‌توده در روز) و کمترین مقدار آن در بیرون تاج منطقه سوخته شده (۰/۵۹ میلی‌گرم کربن بر میلی‌گرم کربن زیست‌توده در روز) اندازه‌گیری شد.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد آتش‌سوزی در هر دو محل زیر تاج و خارج تاج سطحی بوده و تأثیر چندانی بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک نداشته است. از این رو در شاخص‌هایی چون کربن آلی و هدایت الکتریکی خاک تغییر قابل‌توجهی دیده نشد و آتش‌سوزی تنها موجب افزایش فسفر در مناطق سوخته نسبت به شاهد شد. به دلیل رخداد آتش‌سوزی سطحی، احتراق موجب افزایش چشمگیری در شاخص‌های زیستی نشد.

واژه‌های کلیدی: آتش، باکتری، جزیره حاصل‌خیزی، قارچ، کربن آلی

مقدمه

اکوسیستم‌های جنگلی است بنابراین، آتش‌سوزی می‌تواند تغییرات گوناگونی در ویژگی‌های خاک ایجاد کند (Verma & Jayakumar, 2012).

بر اساس آمار سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور

آتش‌سوزی یکی از فاکتورهای مهم زیستی است که عملکرد اکوسیستم‌های جنگلی را تغییر می‌دهد (Barreiro et al., 2010; Ulery et al., 2017). خاک مهم‌ترین جزء

سالانه صدها آتش‌سوزی در مناطق مختلف ایران رخ می‌دهد (Zarekar et al., 2013). بنا بر گزارش‌های سازمان خواروبار جهانی، هرساله حدود ۰/۰۶ درصد از جنگل‌های ایران در اثر آتش‌سوزی از بین می‌رود (Miraki et al., 2014). آتش‌سوزی‌های جنگل، صرف‌نظر از منشأ پیدایش (طبیعی یا مصنوعی)، می‌توانند به‌صورت مستقیم بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی خاک و جانوران خاکزی و به‌صورت غیرمستقیم از طریق تأثیر بر پوشش گیاهی، توده شاخ و برگ و بر کیفیت رویشگاه اثر داشته باشد (Javanmiri Pour, 2021).

این تغییرات، دامنه وسیعی از ویژگی‌های کانی‌شناختی، فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را در برمی‌گیرد که بسته به رژیم آتش‌سوزی می‌تواند متفاوت باشد. تغییرات به‌وجود آمده توسط آتش‌سوزی در محیط خاک روی چرخه عناصر غذایی اکوسیستم، تنوع زیستی، موجودات خاکزی، آبشویی و فرسایش تأثیرگذار است (Bento-Gonçalves et al., 2012; González-Pérez et al., 2004; Mataix-Solera et al., 2011; Úbeda & Outeiro, 2009).

آتش‌سوزی در حال حاضر از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی جنگل‌ها به‌شمار می‌رود و سالانه میلیون‌ها هکتار از جنگل‌ها را نابود می‌کند (Alcañiz et al., 2016). فعالیت‌های انسانی به‌تنهایی سالانه $5/1 \times 10^8$ هکتار از جنگل‌های جهان را از بین می‌برد (Lewis et al., 2015). خسارت‌های ناشی از آتش‌سوزی در جنگل علاوه بر حذف گونه‌های گیاهی ارزشمند گریبان‌گیر محیط خاک نیز خواهد بود (Certini, 2005).

تغییر ویژگی‌های خاک بر اثر آتش‌سوزی در سه مقیاس، کوتاه‌مدت، طولانی‌مدت و تغییرات دائمی بررسی می‌شود. تأثیر آتش‌سوزی به شرایط آب و هوایی پس از آتش‌سوزی، میزان شدت و اثرات آتش‌سوزی بستگی دارد (Verma & Jayakumar, 2012). ماده آلی، پایداری خاکدانه‌ها و تهویه خاک بر اثر آتش‌سوزی کاهش ولی جرم مخصوص ظاهری خاک افزایش می‌یابد (Certini, 2005).

شدت خسارت آتش‌سوزی به نوع گونه درختی، میزان تاج پوشش و پوشش گیاهی و محیط متفاوت بستگی دارد (Jaiswal et al., 2002). گیاهان علفی و گونه‌های چوبی در مواجهه با آتش‌سوزی، بخشی یا کل پوشش و اندام خود را از دست می‌دهند و پس از آن شروع به ترمیم می‌کنند. این فرایند به‌طورمعمول توسط جست در گونه‌هایی که توانایی تولید جست دارند انجام می‌شود. بعد از آتش‌سوزی جست‌ها می‌توانند از جوانه‌های خفته، قسمت‌های سطحی پوشش گیاهی و یا لاشبرگ، هوموس و لایه‌های سطحی خاک به‌وجود بیایند (Flinn & Wein, 1977).

کربن آلی خاک به‌دلیل ارتباط آن با کیفیت خاک، یکی از عوامل مورد مطالعه در خاک پس از آتش‌سوزی است (Aaltonen et al., 2019; Hobley et al., 2017). این‌حال، تغییرات در کربن آلی خاک متغیر است و به‌مدت زمان آتش‌سوزی، زیست‌توده موجود، و میزان رطوبت آن، و نوع و شدت آتش بستگی دارد (Reyes et al., 2015).

مطالعات گوبرما و همکاران (Goberna et al., 2012) برای *Rosmarinus officinalis* L. در اسپانیا، سوترز و همکاران

(Switzer et al., 2012) برای جنگل صنوبر داگلاس در کانادا، داوینینگ و همکاران (Downing et al., 2017) برای مناطق کوهستانی کنیا، اکبوراک و همکاران (Akburak et al., 2018) برای جنگل *Quercus frainetto* Ten در ترکیه و فرانچرز-گارسیا و همکاران (Fernández-García et al., 2019) برای جنگل *Pinus pinaster* Ait در اسپانیا، هیچ تغییری در کربن آلی خاک پس از آتش‌سوزی مشاهده نکردند، درحالی‌که بنت و همکاران (Bennett et al., 2014) و مقدس و همکاران (Muqaddas et al., 2015) برای جنگل‌های اسکروفیل در استرالیا، لیو و همکاران (Liu et al., 2018) برای مراتع در چین، و مویا و همکاران (Moya et al., 2019) برای جنگل کاج *halepensis* در اسپانیا تغییراتی را در کربن آلی خاک به دنبال آتش‌سوزی گزارش کردند.

اغلب موجودات زنده و مواد آلی در لایه سطحی خاک قرار دارند و این لایه در هنگام آتش‌سوزی به‌شدت تحت تأثیر پرتوهای گرمایی و یا دود ناشی از احتراق قرار خواهد گرفت؛ بنابراین بسته به جمعیت ریز جانداران مستقر در سطح خاک و همچنین شدت آتش‌سوزی خسارت‌هایی به این بخش از خاک وارد می‌شود (Certini, 2005). لازم به ذکر است که بسته به نوع ریز جاندار گرمای حاصل از آتش‌سوزی می‌تواند کشنده و یا تغییردهنده توانایی تولیدمثلی آن‌ها باشد (Certini et al., 2021).

باکتری‌ها به تنش‌هایی نظیر آنچه در اثر فعالیت‌های کشاورزی اتفاق می‌افتد، آتش‌سوزی، آلودگی یا سایر تنش‌ها حساس هستند. تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در اثر آتش‌سوزی، یکی از این تنش‌هاست که بستر رشد جمعیت باکتریایی خاک را تغییر می‌دهد (Iriberry et al., 1988).

دی اسکولی و همکاران (D'Ascoli et al., 2005)، تنوع جامعه میکروبی را در منطقه مکوئیس مدیترانه یک سال پس از آتش‌سوزی مورد بررسی قرار دادند. در اولین هفته پس از آتش‌سوزی، تغییرات در تنوع جمعیت میکروبی در خاک تحت آتش‌سوزی در مقایسه با شاهد مشاهده گردید. تنفس پایه خاک در تیمارهای آتش‌سوزی ۲ تا ۷۰ درصد کاهش یافت. افزایش در زیست‌توده میکروبی در طول ۳ ماه اول پس از آتش‌سوزی نشان داد که اثرات آتش‌سوزی بر جامعه قارچی بیشتر از جامعه باکتریایی است. همچنین، یک سال پس از آتش‌سوزی pH خاک کاهش یافت.

سرتینی (Certini, 2005)، با بررسی تأثیرات آتش‌سوزی بر ریز جانداران خاک دریافت که تأثیر مستقیم آتش بر روی میکروارگانیسم‌های خاک به‌شدت آتش و به‌عبارت‌دیگر، به دما و همچنین زمان بودن در این حرارت و نیز رطوبت اولیه خاک بستگی دارد. حرارت بالای آتش (بالتر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) موجب پاسخ منفی و یا مرگ ریز جانداران خاک می‌شود. اثر آتش روی میکروبیوم برای همه گروه‌های میکروبی یکسان نیست. به‌طورکلی مطالعات چندین محقق نشان داده است که قارچ‌ها و باکتری‌های چرخه کربن نسبت به باکتری‌های چرخه نیتروژن نسبت به آتش‌سوزی حساس‌ترند (Kennedy et al., 2015; Mataix-Solera et al., 2009).

خاک خواهد شد که این عامل افزایش رواناب و کاهش نفوذ خاک را به دنبال دارد. این وضعیت باعث از بین رفتن بخش چشم‌گیری از عناصر غذایی سطحی خاک خواهد شد (Badía-*et al.*, 2014; González-Pérez *et al.*, 2004). آتش‌سوزی تأثیرات مختلفی بر خاک دارد. خواص خاک مانند وزن مخصوص ظاهری، رطوبت خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی و هدایت الکتریکی از جمله عواملی است که پس از آتش‌سوزی تغییر می‌کند (Inbar *et al.*, 2014; Ngole-*et al.*, 2019). به دنبال تغییر در این ویژگی‌ها، خواص زیستی خاک نیز دچار تغییر می‌شود (Mataix-Solera *et al.*, 2009; Verma & Jayakumar, 2012).

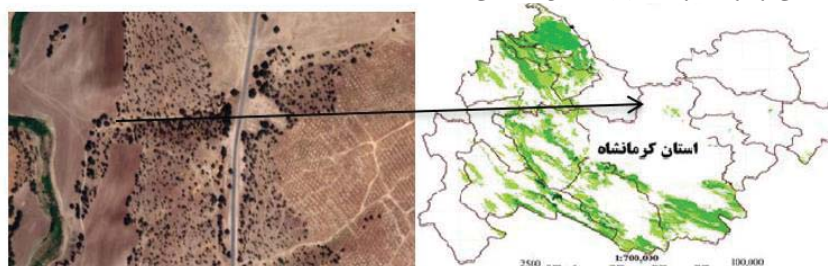
جنگل‌های زاگرس که بیشتر شاخه‌زاد هستند از خطر آتش‌سوزی در امان نبوده و آتش به‌طور مداوم این جنگل‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اینکه پایداری طولانی‌مدت این جنگل‌ها وابسته به حفظ کیفیت خاک است، بررسی اثرات آتش بر خصوصیات خاک بسیار مهم است (Hosseini *et al.*, 2022). در بیشتر مطالعات اثرات کوتاه‌مدت آتش‌سوزی بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک بررسی شده است و مطالعات کمی درباره اثرات بلندمدت آتش‌سوزی روی ویژگی‌های زیستی در اکوسیستم‌های جنگلی انجام شده است؛ بنابراین این پژوهش با هدف بررسی تغییرات ویژگی‌های شیمیایی و زیستی پس از آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بخشی از جنگل‌های زاگرس در استان کرمانشاه، شهرستان گهواره، منطقه لرینی با طول جغرافیایی ۳۴ درجه، ۱۰ دقیقه و ۳۵ ثانیه و عرض جغرافیایی ۴۶ درجه، ۳۴ دقیقه و ۲۸ ثانیه که ارتفاع آن از سطح دریا به‌طور متوسط ۱۴۶۸ متر بود. این بررسی در سال ۱۴۰۰ انجام شد و آتش‌سوزی‌های متعددی قبل از آن در وسعت‌های متفاوت در منطقه رخ داده است.

تنوع باکتری‌ها گزارش شده است (Barreiro & Díaz-*et al.*, 2021; Certini, 2005). همان‌طور که انتظار می‌رفت، بزرگی این اثر با شدت آتش‌سوزی همبستگی معکوس داشت (Goberna *et al.*, 2012). حرارت‌های داده شده به خاک در آزمایشگاه، کاهش در فعالیت باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن و افزایش اندک در فعالیت باکتری‌های چرخه کربن را نشان می‌دهد (Diao *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022). بورگوینی و همکاران (Borgogni *et al.*, 2019) مشاهده کردند که تنوع باکتریایی و قارچی سه روز پس از آتش‌سوزی کاهش یافت. پالس و همکاران (Palese *et al.*, 2004)، تأثیرات آتش‌سوزی را بر میزان کربن آلی و نیتروژن و همچنین کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی و میزان فعالیت‌های آنزیمی در ۲/۵ سانتیمتری سطح خاک بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که میزان کربن آلی و نیتروژن در رابطه با شدت دما، طول مدت قرار گرفتن در مقابل گرما و فصل اندازه‌گیری متغیر است. همچنین فعالیت‌های آنزیمی در ماه اردیبهشت به‌طور معنی‌داری بیشتر از ماه مهر است.

ماتیکس-سولرا و همکاران (Mataix-Solera *et al.*, 2011)، در مطالعات خود بر روی اثرات آتش‌سوزی بر روی تراکم خاک پارامترهایی نظیر ماده آلی خاک، زیست‌توده میکروبی، توزیع دانه‌ها و بافت خاک را برای برآورد شدت آتش‌سوزی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که آتش‌سوزی با شدت بالا، تغییرات قابل توجهی نسبت به آتش‌سوزی با شدت کم بر پایداری خاکدانه ایجاد می‌کند. نتایج مطالعه‌ای نشان داد که میزان کلسیم، منیزیم، پتاسیم، آمونیوم، نیترات و فسفر یک هفته پس از آتش‌سوزی در عمق یک سانتی‌متری به‌طور قابل توجهی افزایش یافت (Badía *et al.*, 2014). آتش‌سوزی می‌تواند ترکیب گونه‌ها، رشد گیاهان، موجودات زنده و رژیم عناصر غذایی اکوسیستم خاک را تغییر دهد (York *et al.*, 2012). عمده این تغییرات به دلیل از بین رفتن ماده آلی، تخریب ساختمان خاک و کاهش عناصر غذایی رخ می‌دهد (Certini, 2005; González-Pérez *et al.*, 2004). آتش‌سوزی‌هایی با شدت متوسط و بالا موجب تخریب پوشش گیاهی، مواد آلی و تولید مواد آبریز در افق سطحی



شکل ۱- موقعیت منطقه نمونه‌برداری شده
Figure 1. Location of the sampled area

روی ردیف‌ها مشخص شده و به‌صورت منظم و با فواصل زمانی مشخص، نمونه‌برداری از آن‌ها صورت گرفت. فاصله نمونه‌ها در هر ردیف ۲۰ متر و فاصله ردیف‌ها از هم ۵۰ متر بود به‌گونه‌ای که ۳ ردیف در منطقه سوخته و ۳ ردیف در منطقه

این مطالعه به‌صورت فاکتوریل (با ۲ فاکتور آتش‌سوزی و محل نمونه‌برداری) در قالب طرح کاملاً تصادفی و در ۳ تکرار انجام شد. آتش‌سوزی شامل بخش‌های سوخته شده و نسوخته (شاهد) بود. نقاط نمونه‌برداری با اندازه‌گیری به‌وسیله متر بر

رفع گردد). آتش‌سوزی به‌صورت سطحی و در تابستان (تیرماه) اتفاق افتاده بود. نمونه‌برداری در ۵ مرحله از تمامی نقاط به‌صورت منظم و با فاصله زمانی هر ۲ ماه (در ماه‌های مهر، آذر، بهمن، فروردین، خرداد) انجام شد. در این مطالعه در کنار جنگل‌های سوخته یک منطقه شاهد نیز جهت بررسی در نظر گرفته شد.

شاهد مشخص شدند. نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری خاک، هم از محدوده زیر تاج درختان (جزیره حاصل‌خیزی) و هم از محدوده خارج از تاج درخت صورت گرفت (با توجه به اندازه تاج درخت و وسعت آن نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌برداری از اطراف تاج درخت و به‌صورت مرکب و تصادفی بود تا تأثیر شیب و توپوگرافی در نمونه‌ها ادغام شده و



شکل ۲- نقاط نمونه‌برداری شده از خاک (دایره‌های زرد محل نمونه‌برداری می‌باشد)
Figure 2. Soil sampling points (The yellow circles are the sampling locations)

کاهش یافت و پس از گذر از فصل سرما pH خاک در این سه محل روند صعودی داشت (شکل ۳). این در حالی است که با کاهش دمای هوا، pH خاک در بیرون تاج سوخته افزایش و پس از آن کاهش یافت. دامنه pH خاک از مهر ماه تا خرداد ماه در هر ۴ تیمار از ۷/۳۱ تا ۷/۶۶ متغیر بود (شکل ۳). بیشتر مطالعات حاکی از افزایش pH خاک در اثر آتش‌سوزی است (Boerner et al., 2009; Certini, 2005; Dzwonko et al., 2015)؛ اما این افزایش دوام زیادی ندارد زیرا افزایش pH خاک به‌دلیل حضور هیدروکسیدها، کربنات‌ها و اکسیدهای پتاسیم و سدیم اتفاق می‌افتد و در بیشتر اوقات با شروع بارندگی در محل از بین می‌رود (Pivello et al., 2010; Verma & Jayakumar, 2012). افزایش pH خاک در اثر آتش‌سوزی یکی از فواید این اختلال اکوسیستمی است زیرا با افزایش pH خاک به‌ویژه در خاک‌هایی که اسیدی هستند جذب عناصر غذایی خاک افزایش خواهد یافت (Agbeshie et al., 2022). بینکلی و فیشر (Binkley & Fisher, 2019) اظهار داشتند که pH خاک پس از آتش‌سوزی افزایش می‌یابد و سپس به مقدار قبل از آتش‌سوزی باز خواهد گشت که این روند نیازمند دوره‌ای چند ماهه و یا چند ساله است. گرانجید و همکاران (Granged et al., 2011) با بررسی مقادیر pH خاک پس از آتش‌سوزی گزارش کردند که pH خاک بلافاصله پس از آتش‌سوزی افزایش یافت و پس از گذشت ۳ سال به مقادیر پیش از آتش‌سوزی رسید (Granged et al., 2011).

در نمونه‌های جمع‌آوری شده مقدار هدایت الکتریکی و pH خاک (Rayment & Lyons, 2011)، فسفر قابل جذب خاک (Rayment & Lyons, 2011)، کربن آلی خاک (Rayment & Lyons, 2011)، تنفس پایه (Anderson, 1983) و تنفس برانگیخته خاک (Beare et al., 1990)، کربن زیست‌توده میکروبی (Vance et al., 1987)، کسر متابولیکی (Wardle & Ghani, 1995) اندازه‌گیری شدند. داده‌ها با نرم‌افزار SAS 9.4 مورد تجزیه واریانس قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال خطا ۱ و ۵ درصد بررسی شدند.

نتایج و بحث

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های شیمیایی خاک

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات متقابل آتش‌سوزی و محل نمونه‌برداری بر میزان pH خاک در ماه‌های مهر، آذر، بهمن و فروردین معنی‌دار شد ولی اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر مقدار pH خاک در خرداد ماه معنی‌دار نبود (جدول ۱). در مهر ماه مقدار pH خاک در زیر تاج درخت و در مناطقی که آتش‌سوزی رخ نداده بود بیشتر بود با گذشت زمان مقدار pH خاک در خارج از تاج درختان و در مناطقی که آتش‌سوزی رخ داده بود بیشتر شد (شکل ۳). این نتیجه نشان می‌دهد با رخ داد آتش‌سوزی در مناطق جنگلی مقدار pH خاک تغییر می‌کند (شکل ۳). pH خاک با گذشت زمان و کاهش دمای هوا در زیر تاج (نسوخته و سوخته) و بیرون تاج نسوخته

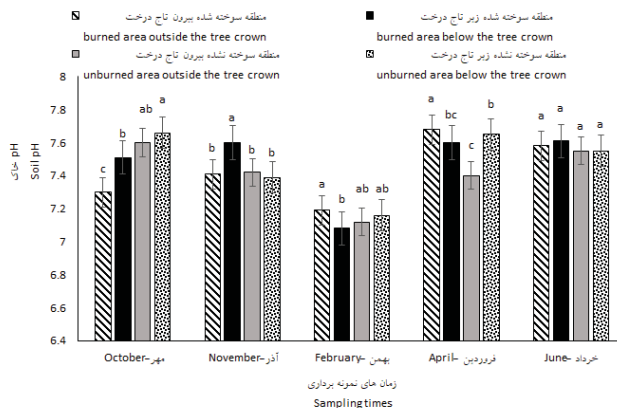
جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های شیمیایی خاک

Table 1. Results of variance analysis of soil chemical properties

میانگین مربعات Mean squares				df	منابع تغییرات Sources of variation	زمان نمونه‌برداری Sampling time
کربن آلی Organic carbon	فسفر phosphorus	EC	pH			
0.07 ^{ns}	955.84 ^{**}	0.000003 ^{ns}	0.44 ^{**}	1	آتش‌سوزی (Fire)	مهر October
0.03 ^{ns}	51.12 ^{**}	0.01 ^{**}	0.15 ^{**}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
0.0001 ^{ns}	28.62 ^{**}	0.00001 ^{ns}	0.05 ^{**}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.03	4.45	0.0005	0.01	32	خطا (Sampling location)	
14.35	6.85	7.14	1.49	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	
0.05 ^{**}	496.57 ^{**}	0.00002 ^{ns}	0.08 ^{**}	1	آتش‌سوزی (Fire)	آذر November
0.04 [*]	0.61 ^{ns}	0.003 [*]	0.06 ^{**}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
0.04 [*]	105.07 [*]	0.0001 ^{ns}	0.10 ^{**}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.008	24.44	0.0007	0.002	32	خطا (Sampling location)	
7.65	15.77	7.52	0.59	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	
0.11 ^{**}	629.17 ^{**}	0.002 ^{ns}	0.000007 ^{ns}	1	آتش‌سوزی (Fire)	بهمن February
0.07 [*]	28.62 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.008 ^{ns}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
0.004 ^{ns}	21.00 ^{ns}	0.000002 ^{ns}	0.05 ^{**}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.01	26.07	0.0007	0.008	32	خطا (Sampling location)	
10.18	16.68	8.22	1.28	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	
0.05 ^{**}	12.36.43 ^{**}	0.003 [*]	0.13 ^{ns}	1	آتش‌سوزی (Fire)	فروردین April
0.004 ^{ns}	6.23 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.06 ^{ns}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
0.03 ^{**}	96.11 [*]	0.001 ^{ns}	0.24 [*]	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.004	23.97	0.0008	0.05	32	خطا (Sampling location)	
4.89	15.31	9.20	2.95	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	
0.07 ^{**}	1792.11 ^{**}	0.004 [*]	0.01 ^{ns}	1	آتش‌سوزی (Fire)	خرداد June
0.007 ^{ns}	1.96 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	0.005 ^{ns}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
0.001 ^{ns}	49.00 ^{ns}	0.000004 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.007	32.19	0.0006	0.02	32	خطا (Sampling location)	
5.95	16.89	7.83	2.11	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	

** و * به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively



شکل ۳- تغییرات pH خاک در زمان‌های مختلف پس از آتش‌سوزی در بیرون و زیر تاج درختان
Figure 3. pH changes at different times after the fire (below the crown and outside the crown of the trees)

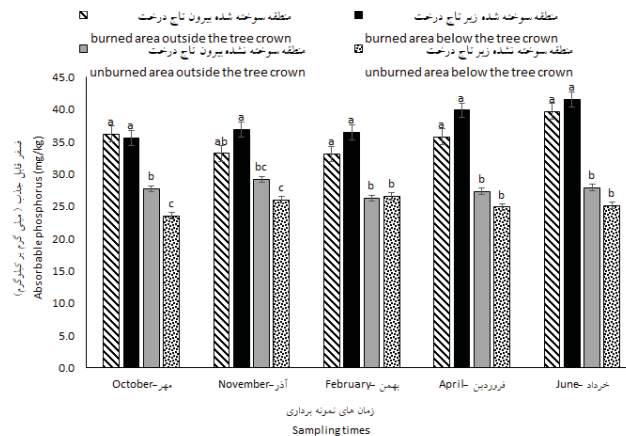
معنی‌دار نبود. با وقوع آتش‌سوزی میزان فسفر قابل جذب افزایش یافت (شکل ۴). بیشترین مقدار فسفر قابل جذب در زیر و بیرون تاج سوخته و کمترین میزان آن در زیر و بیرون تاج شاهد بود و دامنه این روند در زیر تاج سوخته از ۳۵/۶۰ تا ۴۱/۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در بیرون تاج سوخته از ۳۶/۲۳ تا ۳۹/۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود (شکل ۴). افزایش فسفر خاک احتمالاً به دلیل انباشته شدن خاکستر حاصل از بقایا

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات ساده آتش‌سوزی و محل نمونه‌برداری و اثرات متقابل تیمارها تأثیری بر مقدار هدایت الکتریکی خاک در ماه‌های مختلف نمونه‌برداری نداشت (جدول ۱).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر میزان فسفر قابل جذب خاک در ماه‌های مهر، آذر و فروردین معنی‌دار شد (جدول ۱) ولی در بقیه ماه‌ها

تأثیر سوختن پوشش گیاهی و لاشبرگ‌ها قرار می‌گیرد و موجب می‌شود که شکل آلی فسفر به شکل‌های معدنی تبدیل گردد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که آتش‌سوزی از طریق تأثیری که بر هدایت الکتریکی و pH دارد و آن‌را به سمت خنثی شدن پیش می‌برد، موجب می‌شود که فسفر معدنی غیرقابل استفاده به شکل اورتوفسفات (شکل قابل استفاده گیاهان و خاکزیان) تبدیل شود.

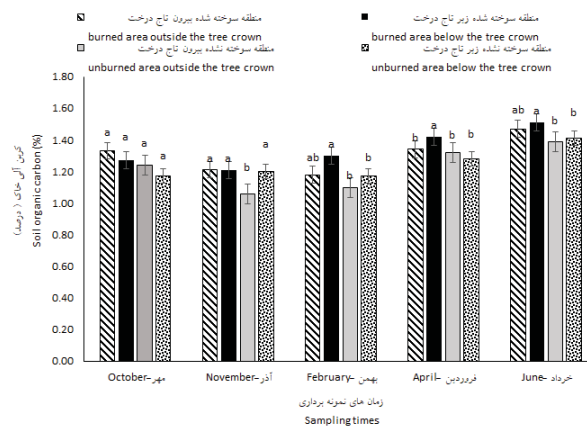
و گیاهان پس از آتش‌سوزی است. همچنین آتش‌سوزی موجب تبدیل فسفر آلی خاک به فسفر قابل جذب می‌شود (Maksimova & Abakumov, 2015). تحقیقات بسیاری، افزایش فسفر پس از آتش‌سوزی را نشان می‌دهد که با نتایج پژوهش حاصل مطابقت دارد (Jimeno-García *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2010; Schaller *et al.*, 2000). نتایج پژوهش ریسنده و همکاران (Resende *et al.*, 2011) نشان می‌دهد چرخه بیوشیمیایی فسفر به‌طور قابل توجهی تحت



شکل ۴- تغییرات فسفر خاک در زمان‌های مختلف پس از آتش‌سوزی در بیرون و زیر تاج درختان
Figure 4. Phosphorus changes at different times after the fire (below the crown and outside the crown of the trees)

(۱/۳۰ درصد) در زیر تاج سوخته و کمترین میزان آن (۱/۱۰ درصد) در بیرون تاج شاهد مشاهده شد (شکل ۵). درختان بلوط می‌توانند خسارات ناشی از کاهش کربن آلی را پس از آتش‌سوزی جبران کنند (González-Pérez *et al.*, 2004) به‌همین دلیل کاهش زیادی در مقدار کربن این مناطق مشاهده نمی‌شود که این عامل می‌تواند بالا بودن مقدار کربن آلی در جنگل بلوط را توجیه کند. بیشتر مطالعات نشان می‌دهد که کربن آلی خاک پس از آتش‌سوزی کاهش خواهد یافت (Cui *et al.*, 2014; González-Pérez *et al.*, 2004; Pellegrini *et al.*, 2022).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر کربن آلی خاک تنها در زمان‌های نمونه‌برداری آذر و فرودین معنی‌دار بود (جدول ۱). دامنه تغییرات کربن آلی بیانگر این است که با گذشت زمان در هر ۴ تیمار، کربن آلی خاک افزایش یافته است. بیشترین افزایش در زیر تاج سوخته (۱/۵۱ درصد) و کمترین میزان آن نیز در زیر تاج شاهد (نسوخته) مشاهده شد (شکل ۵). نتایج نشان می‌دهد که در اثر آتش‌سوزی، کربن آلی در دو محل زیر تاج و بیرون تاج افزایش یافته است. در بهمن ماه بیشترین درصد کربن



شکل ۵- تغییرات کربن آلی خاک در زمان‌های مختلف پس از آتش‌سوزی در بیرون و زیر تاج درختان
Figure 5. Organic carbon changes at different times after the fire (below the crown and outside the crown of the trees)

می‌دهند. دود حاصل از گیاهان، فرآیند جوانه‌زنی را در جوامع مختلف گیاهی تحریک می‌کند. با تحریک جوامع گیاهی و تولید ترشحات ریشه در خاک جمعیت میکروبی نیز افزایش خواهد یافت (Staden *et al.*, 2000). از این رو با افزایش دما و نزدیک شدن به فصل بهار، تنفس پایه روند افزایشی خواهد یافت. در انتها مقدار این پارامتر در مرتع سوخته (۱۳۱/۸۳ میلی گرم کربن بر کیلوگرم) بیشتر بود (شکل ۶) که این عامل را می‌توان به پاسخ سریع مرتع به آتش‌سوزی نسبت داد. پژوهشگران بر این باورند که عواملی مانند پوشش گیاهی، شرایط جوی و شدت آتش‌سوزی تأثیر بسیار زیادی بر میزان تنفس خاک خواهند داشت؛ زیرا این پارامتر وابسته به درجه حرارت خاک و الگوهای رشد است (Bond & Van Wilgen, 2012; Keeley, 2006).

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های زیستی خاک
با توجه به نتایج جدول تجزیه واریانس داده‌ها، اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر میزان تنفس پایه خاک در زمان‌های نمونه‌برداری معنی‌دار نشد (جدول ۲)، ولی اثر ساده آتش‌سوزی بر تنفس پایه خاک در تمام زمان‌های نمونه‌برداری به جز خرداد ماه در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). با بررسی روند تغییرات مشاهده می‌شود تنفس پایه خاک در ابتدای آتش‌سوزی بالا بوده ولی به مرور کاهش پیدا می‌کند و سپس در ماه‌های آخر نمونه‌برداری از مقدار اولیه نیز بیشتر شده است. در این پژوهش علی‌رغم بروز آتش‌سوزی و تأثیر منفی بر کربن آلی خاک مقدار تنفس پایه در خاک مناطق سوخته بیشتر از مناطق سوخته نشده است (شکل ۶).

گونه‌های مستقر در محیط مستعد به آتش‌سوزی، به دود تولید شده در هنگام آتش‌سوزی در جنگل و مرتع پاسخ مثبت

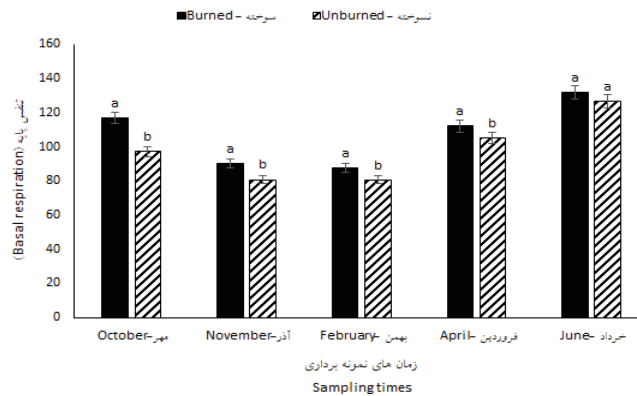
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های زیستی خاک

Table 2. Results of variance analysis of soil biological properties

میانگین مربعات Mean squares				df	منابع تغییرات Sources of variation	زمان نمونه‌برداری Sampling time
کسر متابولیکی metabolic quotient	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon	تنفس برانگیخته substrate-induced respiration	تنفس پایه Basal respiration			
0.19 ^{ns}	786473.36 ^{**}	53824.00 [*]	3490.80 ^{**}	1	آتش‌سوزی (Fire)	مهر October
0.60 ^{ns}	374340.02 ^{**}	31447.11 ^{ns}	24.17 ^{ns}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
1.65 ^{ns}	96617.36 ^{ns}	7281.77 ^{**}	6.67 ^{ns}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.17	31413.75	9948.47	179.86	32	خطا (Sampling location)	
79.39	68.17	19.63	12.52	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	
0.22 ^{ns}	98596.00 [*]	12395.11 ^{ns}	793.45 ^{**}	1	آتش‌سوزی (Fire)	آذر November
0.0007 ^{ns}	6833.77 ^{ns}	8836.00 ^{ns}	23.41 ^{ns}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
*0.39	47378.77 ^{ns}	178084.00 ^{**}	6.25 ^{ns}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.08	21312.14	9833.55	66.57	32	خطا (Sampling location)	
56.28	49.68	15.55	9.54	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	
0.004 ^{ns}	5160.02 ^{ns}	1213.36 ^{ns}	434.02 ^{**}	1	آتش‌سوزی (Fire)	بهمن February
0.006 ^{ns}	448.02 ^{ns}	210.25 ^{ns}	124.69 ^{ns}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
0.09 [*]	73893.36 ^{ns}	22650.25 ^{ns}	26.69 ^{ns}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.02	29336.75	11038.88	67.09	32	خطا (Sampling location)	
32.30	55.82	23.83	9.73	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	
0.09 ^{ns}	44.44 ^{ns}	3410.77 ^{ns}	403.34 ^{**}	1	آتش‌سوزی (Fire)	فروردین April
0.29 [*]	1469.44 ^{ns}	3061.77 ^{ns}	582.01 ^{**}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
0.007 ^{ns}	13845.44 ^{ns}	2635.11 ^{ns}	43.34 ^{ns}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.07	41136.90	15207.44	74.43	32	خطا (Sampling location)	
41.84	62.94	18.04	7.93	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	
0.0005 ^{ns}	45227.11 ^{ns}	2773.77 ^{ns}	232.56 ^{ns}	1	آتش‌سوزی (Fire)	خرداد June
0.07 ^{ns}	100067.77 ^{ns}	21.77 ^{ns}	680.34 ^{ns}	1	محل نمونه‌برداری (Sampling location)	
0.01 ^{ns}	168647.11 [*]	1547.11 ^{ns}	12.84 ^{ns}	1	آتش‌سوزی × محل نمونه‌برداری (Fire × Sampling location)	
0.11	32090.81	1384.36	439.26	32	خطا (Sampling location)	
51.76	58.78	17.47	16.21	-	درصد ضریب تغییرات (CV%)	

** و * به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

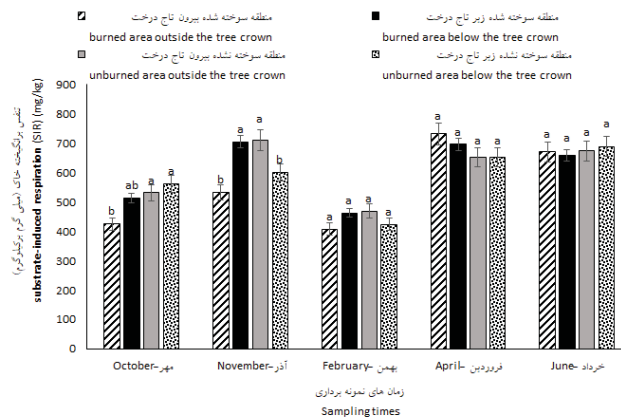
**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively



شکل ۶- تغییرات تنفس پایه خاک در زمان‌های مختلف پس از آتش‌سوزی
Figure 6. Basal respiration changes at different times after the fire

پارامترهای اساسی برای رشد و دوام جامعه میکروبی است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش دما و رسیدن فصل بهار مقدار این پارامتر در تمامی مناطق مطالعاتی افزایش یافت که مجدداً این افزایش در زیر تاج نسوخته بیشترین (۶۸۹/۳۳ میلی گرم کربن بر کیلوگرم) و در زیر تاج سوخته کمترین مقدار (۶۵۸/۶۷ میلی گرم کربن بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شد (شکل ۷). علت این کاهش را می‌توان جامعه میکروبی ضعیف در زیر تاج حتی قبل از آتش‌سوزی در آن محل دانست.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان که اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر میزان تنفس برانگیخته خاک (تنفس ناشی از سوستر) تنها در مهر و آذر ماه در سطح احتمال خطای یک درصد معنی‌دار شد و در بقیه زمان‌های نمونه‌برداری معنی‌دار نبود (جدول ۲). در ابتدای نمونه‌برداری زیر تاج سوخته نشده بیشترین میزان تنفس ناشی از سوستر (۵۶۲ میلی گرم کربن بر کیلوگرم) و بیرون تاج سوخته کمترین مقدار (۵۱۳/۱۱ میلی گرم کربن بر کیلوگرم) را به‌خود اختصاص داد. با گذشت زمان و کاهش دما مقدار تنفس ناشی از سوستر در زیر و خارج تاج (سوخته و شاهد) کاهش می‌یابد (شکل ۷) زیرا دما یکی از



شکل ۷- تغییرات تنفس برانگیخته خاک در زمان‌های مختلف پس از آتش‌سوزی در بیرون و زیر تاج درختان
Figure 7. Substrate-induced respiration changes at different times after the fire (below the crown and outside the crown of the trees)

آن بخش از زیست‌توده میکروبی از جمله قارچ‌های میکوریزا شود، با افزایش مواد معدنی مغذی در خاک و تأمین کربن سهل‌الوصول در اثر آتش‌سوزی، جمعیت باکتری‌های فرصت‌طلب به‌طور چشمگیری افزایش یافته و غالبیت میکروبی خاک از قارچ‌ها به باکتری‌ها و به‌ویژه باکتری‌های فرصت‌طلب تغییر خواهد یافت (Chandra & Bhardwaj, 2015). باکتری‌های فرصت‌طلب نسبت به قارچ‌های خاکی از qCO_2 بالاتری برخوردار بوده و پاسخ آن‌ها به گلوکز اضافه شده به

فراوانی و تنوع زیستی جامعه میکروبی ممکن است در اثر آتش‌سوزی تحت تأثیر قرار گیرد. البته شدت آتش‌سوزی در میزان این تغییرات بسیار مؤثر خواهد بود. قطعاً در خاک‌هایی که به‌شدت تحت تأثیر آتش قرار می‌گیرند، افزودن سوستر نیز قادر به بازیابی فعالیت میکروبی مانند یک خاک سالم یا کمتر آسیب‌دیده نخواهد شد (D'Ascoli et al., 2005). در صورتی که آتش‌سوزی به‌حدی باشد که سبب وارد آمدن آسیب به جامعه میکروارگانیسم‌های بومی و در نتیجه نابودی

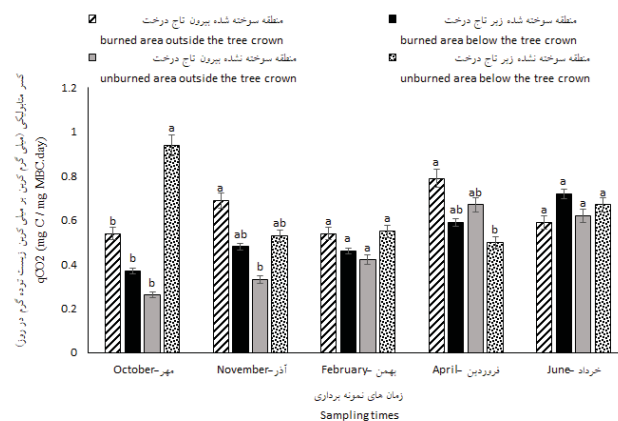
میکروارگانیزم بومی در خاک می‌شود که با وارد ساختن یک سوپسترای سهل‌الوصول نیز سبب تحریک سریع جمعیت و تنفس شدید در خاک نخواهد شد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر میزان کربن زیست‌توده میکروبی معنی‌دار نشد (جدول ۲).

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثرات متقابل آتش‌سوزی و محل نمونه‌برداری بر کسر متابولیکی خاک معنی‌دار شد (جدول ۲) البته معنی‌داری اثرات متقابل بر کسر متابولیکی در بهمن و خرداد ماه مشاهده نشد (جدول ۲).

بیشترین مقدار کسر متابولیک در زیر تاج سوخته (۰/۹۴) میلی‌گرم کربن بر میلی‌گرم کربن زیست‌توده در روز) و کمترین مقدار آن در بیرون تاج سوخته نشده (۰/۲۶) میلی‌گرم کربن بر میلی‌گرم کربن زیست‌توده در روز) اندازه‌گیری شد (شکل ۸). با گذشت زمان و کاهش دما میزان این پارامتر در تیمار زیر تاج سوخته و بیرون تاج سوخته نشده کاهش و در سه تیمار زیر و بیرون تاج سوخته و بیرون تاج سوخته نشده، افزایش یافت (شکل ۸). در پایان دوره بیشترین مقدار کسر متابولیک در زیر تاج سوخته شده (۰/۷۲) میلی‌گرم کربن بر میلی‌گرم کربن زیست‌توده در روز) و کمترین مقدار آن در بیرون تاج سوخته شده (۰/۵۹) میلی‌گرم کربن بر میلی‌گرم کربن زیست‌توده در روز) اندازه‌گیری شد (شکل ۸).

خاک نیز بیشتر می‌باشد (Dilly, 2005). در نتیجه تنفس ناشی از سوپسترا در جامعه‌ای که جمعیت غالب آن باکتری‌ها هستند نسبت به خاکی که فراوانی قارچ‌ها در آن مشهود است، بیشتر خواهد بود (Dilly, 2005). همچنین مواردی همچون استرس (تغذیه‌ای، خشکی، عناصر سنگین و ...) می‌تواند q_{CO2} را در خاک افزایش دهد (Blagodatskaya & Anderson, 1998). در خاک‌هایی که از زیست‌توده میکروبی مناسبی برخوردارند، اما کمیت مواد آلی و یا کیفیت این مواد مناسب نیست، جامعه میکروبی نسبت به افزایش سوپسترا به‌خوبی واکنش نشان داده و میزان تنفس برانگیخته در این خاک نسبت به تنفس پایه در شرایط عادی، به‌طور چشمگیری افزایش نشان می‌دهد. در عوض اگر جامعه میکروبی آسیب‌دیده باشد (مثلاً در اثر آتش‌سوزی)، پاسخ به اضافه کردن سوپسترا کم است (Fontúrbel *et al.*, 2012). در پژوهش پوررضا و همکاران (Pourreza *et al.*, 2014) تنفس برانگیخته با سوپسترا یک سال پس از آتش‌سوزی در خاک افزایش یافت. درحالی‌که این پارامتر ۳ و ۱۰ سال پس از آتش‌سوزی از خاک شاهد کمتر بود این امر می‌تواند ناشی از مصرف مواد آلی زیاد در اولین سال پس از آتش‌سوزی و عدم جایگزینی این مواد در سال‌های پس از آتش‌سوزی باشد که موجب عدم بازگشت تعادل در مخازن کربن برای سالیان طولانی شده است. با گذشت زمان، تنوع و جمعیت میکروبی خاک نسبتاً ترمیم‌شده و سبب استقرار دوباره



شکل ۸- تغییرات کسر متابولیکی خاک در زمان‌های مختلف پس از آتش‌سوزی در بیرون و زیر تاج درختان
Figure 8. Metabolic quotient changes at different times after the fire (below the crown and outside the crown of the trees)

بخشی از ماده آلی خاک، شرایط برای رشد و تکثیر باکتری‌های فرصت‌طلب در این بخش از مناطق فراهم شده که در نتیجه آن، شاهد روند افزایشی کسر متابولیک در طی مراحل مختلف نمونه‌برداری بوده‌ایم (شکل ۸). در خصوص مناطق سوخته خارج از تاج روند تغییرات کسر متابولیک ممکن است تحت تأثیر چندین پارامتر مختلف قرار گرفته باشد. چراکه پیچیدگی آن به‌حدی است که با داده‌های موجود، این روند تغییرات قابل تفسیر نمی‌باشد. تحقیقات بسیاری نشان می‌دهد که یک سال پس از آتش‌سوزی، کسر متابولیک خاک دچار کاهش می‌گردد (Barreiro *et al.*, 2016; Goberna *et al.*, 2012). این در

پس از فصل سرما و ذخیره رطوبتی در زمستان و نیز بارندگی‌های بهاری و افزایش دما، شرایط برای رشد گیاهان علفی در زیر و خارج تاج درختان فراهم شده و با افزایش ترشحات و نیز اضافه شدن برخی از بقایای این گیاهان در طی فصل بهار، رشد باکتری‌های فرصت‌طلب افزایش یافته و در نتیجه سبب افزایش کسر متابولیک در فلور میکروبی خاک شده است. در مناطق سوخته و زیر تاج چنین به نظر می‌رسد که شدت دما به‌حدی بوده است که سبب حذف بسیاری از میکروفلور خاک به‌ویژه قارچ‌های خاکزی و نیز باکتری‌های بومی خاک شده است و از سوی دیگر با اضافه شدن خاکستر بقایا و تأمین عناصر غذایی معدنی و نیز سهل‌الوصول شدن

هدایت الکتریکی تغییر قابل‌توجهی دیده نشد و آتش‌سوزی تنها موجب افزایش فسفر در مناطق سوخته نسبت به شاهد شد. شاخص‌های میکروبی، شاخص‌های حساسی هستند و سریعاً تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار می‌گیرند و می‌توانند پارامترهای قابل‌توجهی برای تشخیص روند بهبود یا عدم بهبود خاک پس از آتش‌سوزی باشند. به دلیل رخ‌داد آتش‌سوزی سطحی، احتراق موجب تغییرات نه‌چندان چشمگیری در شاخص‌های زیستی شد.

حالی است که گزارش‌هایی مبنی بر افزایش کسر متابولیک پس از آتش‌سوزی نیز وجود دارد (Muñoz-Rojas et al., 2016).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تغییرات شاخص‌های شیمیایی و به‌خصوص بیولوژیک خاک در طول یک دوره ۹ ماهه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد آتش‌سوزی در هر دو محل زیر تاج و خارج تاج سطحی بوده و تأثیر چندانی بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک نداشت. از این‌رو در شاخص‌هایی چون کربن و

References

- Aaltonen, H., Köster, K., Köster, E., Berninger, F., Zhou, X., Karhu, K., Biasi, C., Bruckman, V., Palviainen, M., & Pumpanen, J. (2019). Forest fires in Canadian permafrost region: the combined effects of fire and permafrost dynamics on soil organic matter quality. *Biogeochemistry*, 143, 257-274. doi.org/10.1007/s10533-019-00560-x
- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419-1441.
- Akburak, S., Son, Y., Makineci, E., & Çakir, M. (2018). Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a Quercus frainetto forest. *Journal of Forestry Research*, 29, 687-696. doi.org/10.1007/s11676-017-0486-4
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., Farguell, J., & Úbeda, X. (2016). Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain). *Science of the total environment*, 572, 1329-1335.
- Anderson, J. P. (1983). Soil respiration. *Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties*, 9, 831-871.
- Badía-Villas, D., González-Pérez, J. A., Aznar, J. M., Arjona-Gracia, B., & Martí-Dalmau, C. (2014). Changes in water repellency, aggregation and organic matter of a mollic horizon burned in laboratory: Soil depth affected by fire. *Geoderma*, 213, 400-407.
- Badía, D., Martí, C., Aguirre, A. J., Aznar, J. M., González-Pérez, J., De la Rosa, J., León, J., Ibarra, P., & Echeverría, T. (2014). Wildfire effects on nutrients and organic carbon of a Rendzic Phaeozem in NE Spain: changes at cm-scale topsoil. *Catena*, 113, 267-275.
- Barreiro, A., & Díaz-Raviña, M. (2021). Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 22, 100264.
- Barreiro, A., Martín, A., Carballas, T., & Díaz-Raviña, M. (2010). Response of soil microbial communities to fire and fire-fighting chemicals. *Science of the total environment*, 408(24), 6172-6178.
- Barreiro, A., Martín, A., Carballas, T., & Díaz-Raviña, M. (2016). Long-term response of soil microbial communities to fire and fire-fighting chemicals. *Biology and Fertility of Soils*, 52(7), 963-975.
- Beare, M. H., Neely, C. L., Coleman, D. C., & Hargrove, W. L. (1990). A substrate-induced respiration (SIR) method for measurement of fungal and bacterial biomass on plant residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(5), 585-594.
- Bennett, L. T., Aponte, C., Baker, T. G., & Tolhurst, K. G. (2014). Evaluating long-term effects of prescribed fire regimes on carbon stocks in a temperate eucalypt forest. *Forest Ecology and Management*, 328, 219-228.
- Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., & Martin, D. (2012). Fire and soils: Key concepts and recent advances. *Geoderma*, 191, 3-13.
- Binkley, D., & Fisher, R. F. (2019). *Ecology and management of forest soils*. John Wiley & Sons.
- Blagodatskaya, E. V., & Anderson, T.-H. (1998). Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and qCO₂ of microbial communities in forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(10-11), 1269-1274.
- Boerner, R. E., Huang, J., & Hart, S. C. (2009). Impacts of Fire and Fire Surrogate treatments on forest soil properties: a meta-analytical approach. *Ecological Applications*, 19(2), 338-358.
- Bond, W. J., & Van Wilgen, B. W. (2012). *Fire and plants* (Vol. 14). Springer Science & Business Media.
- Borgogni, F., Lavecchia, A., Mastrolonardo, G., Certini, G., Ceccherini, M. T., & Pietramellara, G. (2019). Immediate and short-term wildfire impact on soil microbial diversity and activity in a Mediterranean forest soil. *Soil Science*, 184(2), 35-42.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143, 1-10.

- Certini, G., Moya, D., Lucas-Borja, M. E., & Mastrodonato, G. (2021). The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. *Forest Ecology and Management*, 488, 118989.
- Chandra, K., & Bhardwaj, A. K. (2015). Incidence of forest fire in India and its effect on terrestrial ecosystem dynamics, nutrient and microbial status of soil. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 5(2), 69-78.
- Cui, X., Gao, F., Song, J., Sang, Y., Sun, J., & Di, X. (2014). Changes in soil total organic carbon after an experimental fire in a cold temperate coniferous forest: A sequenced monitoring approach. *Geoderma*, 226, 260-269.
- D'Ascoli, R., Rutigliano, F. A., De Pascale, R. A., Gentile, A., & De Santo, A. V. (2005). Functional diversity of the microbial community in Mediterranean maquis soils as affected by fires. *International Journal of Wildland Fire*, 14(4), 355-363.
- Diao, T., Peng, Z., Niu, X., Yang, R., Ma, F., & Guo, L. (2020). Changes of soil microbes related with carbon and nitrogen cycling after long-term CO₂ enrichment in a typical Chinese maize field. *Sustainability*, 12(3), 1250.
- Dilly, O. (2005). Microbial energetics in soils. In *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions* (pp. 123-138). Springer.
- Downing, T. A., Imo, M., Kimanzi, J., & Otinga, A. N. (2017). Effects of wildland fire on the tropical alpine moorlands of Mount Kenya. *Catena*, 149, 300-308. doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.003
- Dzwonko, Z., Loster, S., & Gawronski, S. (2015). Impact of fire severity on soil properties and the development of tree and shrub species in a Scots pine moist forest site in southern Poland. *Forest Ecology and Management*, 342, 56-63.
- Fernández-García, V., Marcos, E., Fernández-Guisuraga, J. M., Taboada, A., Suárez-Seoane, S., & Calvo, L. (2019). Impact of burn severity on soil properties in a Pinus pinaster ecosystem immediately after fire. *International Journal of Wildland Fire*, 28(5), 354-364. https://doi.org/10.1071/WF18103
- Flinn, M. A., & Wein, R. W. (1977). Depth of underground plant organs and theoretical survival during fire. *Canadian Journal of Botany*, 55(19), 2550-2554. https://doi.org/https://doi.org/10.1139/b77-291
- Fontúrbel, M., Barreiro, A., Vega, J., Martín, A., Jiménez, E., Carballas, T., Fernández, C., & Díaz-Raviña, M. (2012). Effects of an experimental fire and post-fire stabilization treatments on soil microbial communities. *Geoderma*, 191, 51-60.
- Gimeno-García, E., Andreu, V., & Rubio, J. L. (2000). Changes in organic matter, nitrogen, phosphorus and cations in soil as a result of fire and water erosion in a Mediterranean landscape. *European journal of soil science*, 51(2), 201-210.
- Goberna, M., García, C., Insam, H., Hernández, M., & Verdú, M. (2012). Burning fire-prone Mediterranean shrublands: immediate changes in soil microbial community structure and ecosystem functions. *Microbial ecology*, 64, 242-255. doi.org/10.1007/s00248-011-9995-4
- González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter—a review. *Environment international*, 30(6), 855-870.
- Granged, A. J., Jordán, A., Zavala, L. M., Muñoz-Rojas, M., & Mataix-Solera, J. (2011). Short-term effects of experimental fire for a soil under eucalyptus forest (SE Australia). *Geoderma*, 167, 125-134.
- Hobley, E. U., Brereton, A. J. L. G., & Wilson, B. (2017). Forest burning affects quality and quantity of soil organic matter. *Science of the total environment*, 575, 41-49. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.231
- Hosseini, v., Mohammadi Samani, K., & Abdolmaleki, F. (2022). Evaluation influence of wildfire on the chemical properties of forest soil at the top and toe slope in Sarvabad, Kurdistan province. *Applied Soil Research*, 10(2), 29-39.
- Inbar, A., Lado, M., Sternberg, M., Tenau, H., & Ben-Hur, M. (2014). Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region. *Geoderma* 221, 131-138.
- Iriberry, J., Rodriguez, M., Egea, L., & Barcina, I. (1988). Spatial and seasonal distribution of bacterial physiological groups in two reservoirs with different trophic levels. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 16(2), 145-155.
- Jaiswal, R. K., Mukherjee, S., Raju, K. D., & Saxena, R. (2002). Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 4(1), 1-10. doi.org/10.1016/S0303-245
- Javanmiri Pour, M. (2021). The characteristics of wildfires created in Zagros forest ecosystem in Kermanshah province (Case study: forests and rangelands of Gilan-e-Gharb region). *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 9(1), 219-246. https://www.magiran.com/paper/2326883
- Keeley, J. E. (2006). Fire management impacts on invasive plants in the western United States. *Conservation Biology*, 20(2), 375-384.

- Kennedy, N. M., Robertson, S. J., Green, D. S., Scholefield, S. R., Arocena, J. M., Tackaberry, L. E., Massicotte, H. B., & Egger, K. N. (2015). Site properties have a stronger influence than fire severity on ectomycorrhizal fungi and associated N-cycling bacteria in regenerating post-beetle-killed lodgepole pine forests. *Folia microbiologica*, 6, ۴۱۰-۴۹۹ .
- Lewis, S. L., Edwards, D. P., & Galbraith, D. (2015). Increasing human dominance of tropical forests. *Science*, 349(6250), 827-832.
- Li, D., Sun, S., Zhou, T., Du, Z., Wang, J., Li, B., Wang, J., & Zhu, L. (2022). Effects of pyroxsulam on soil enzyme activity, nitrogen and carbon cycle-related gene expression, and bacterial community structure. *Journal of Cleaner Production*, 355, 131821.
- Liu, G., Gu, B., Miao, S., Li, Y., Migliaccio, K., & Qian, Y. (2010). Phosphorus release from ash and remaining tissues of two wetland species after a prescribed fire. *Journal of environmental quality*, 39(5), 1585-1593.
- Liu, J., Qiu, L., Wang, X., Wei, X., Gao, H., Zhang, Y., & Cheng, J. (2018). Effects of wildfire and topography on soil nutrients in a semiarid restored grassland. *Plant and Soil*, 428, 123-136. doi.org/10.1007/s11104-018-3659-9
- Maksimova, E., & Abakumov, E. (2015). Wildfire effects on ash composition and biological properties of soils in forest-steppe ecosystems of Russia. *Environmental Earth Sciences*, 74, 4395-4405.
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. (2011). Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews*, 109(1-2), 44-60.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., García-Orenes, F., Bárcenas, G. M., & Torres, M. P. (2009). Forest fire effects on soil microbiology. In *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 149-192). CRC press.
- Miraki, M., Akbarinia, M., Ghazanfari, H., Ezzati, S., & Heidari, A. (2014). Presentation of management solutions for firefighting, using the decision support system at Northern Zagros forests (Case study: Marivan forests). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(4), 742-755. doi.org/10.22092/ijfpr.2014, 5147
- Moya, D., González-De Vega, S., Lozano, E., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Lucas-Borja, M., & de Las Heras, J. (2019). The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and mid-terms after wildfire. *Journal of environmental management*, 235, 250-256. doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.029
- Muñoz-Rojas, M., Erickson, T. E., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. *Restoration Ecology*, 24, S43-S52.
- Muqaddas, B., Zhou, X., Lewis, T., Wild, C., & Chen, C. (2015). Long-term frequent prescribed fire decreases surface soil carbon and nitrogen pools in a wet sclerophyll forest of Southeast Queensland, Australia. *Science of the total environment*, 536, 39-47. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.023
- Ngole-Jeme, V. M. (2019). Fire-induced changes in soil and implications on soil sorption capacity and remediation methods. *Applied Sciences*, 9(17), 3447.
- Palese, A., Giovannini, G., Lucchesi, S., Dumontet, S., & Perucci, P. (2004). Effect of fire on soil C, N and microbial biomass. *Agronomie*, 24(1), 47-53.
- Pellegrini, A. F., Harden, J., Georgiou, K., Hemes, K. S., Malhotra, A., Nolan, C. J., & Jackson, R. B. (2022). Fire effects on the persistence of soil organic matter and long-term carbon storage. *Nature Geoscience*, 15(1), 5-13.
- Pivello, V. R., Oliveras, I., Miranda, H. S., Haridasan, M., Sato, M. N., & Meirelles, S. T. (2010). Effect of fires on soil nutrient availability in an open savanna in Central Brazil. *Plant and Soil*, 337, 111-123.
- Pourreza, M., Hosseini, S. M., Sinigani, A. A. S., Matinizadeh, M., & Dick, W. A. (2014). Soil microbial activity in response to fire severity in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests, Iran, after one year. *Geoderma*, 213, 95-102.
- Rayment, G. E., & Lyons, D. J. (2011). *Soil chemical methods: Australasia* (Vol. 3). CSIRO publishing.
- Resende, J. C. F., Markewitz, D., Klink, C. A., Bustamante, M. M. d. C., & Davidson, E. A. (2011). Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequent burning. *Biogeochemistry*, 105, 105-118.
- Reyes, O., García-Duro, J., & Salgado, J. (2015). Fire affects soil organic matter and the emergence of *Pinus radiata* seedlings. *Annals of forest science*, 72, 267-275. doi.org/10.1007/s13595-014-0427-8
- Schaller, J., Tischer, A., Struyf, E., Bremer, M., Belmonte, D. U., & Potthast, K. (2015). Fire enhances phosphorus availability in topsoils depending on binding properties. *Ecology*, 96(6), 1598-1606.
- Staden, J. V., Brown, N. A., Jäger, A. K., & Johnson, T. A. (2000). Smoke as a germination cue. *Plant Species Biology*, 15(2), 167-178.

- Switzer, J. M., Hope, G. D., Grayston, S. J., & Prescott, C. E. (2012). Changes in soil chemical and biological properties after thinning and prescribed fire for ecosystem restoration in a Rocky Mountain Douglas-fir forest. *Forest Ecology and Management*, 275, 1-13. doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.025
- Úbeda, X., & Outeiro, L. R. (2009). Physical and chemical effects of fire on soil. In *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 121-148) CRC Press.
- Ulery, A. L., Graham, R. C., Goforth, B. R., & Hubbert, K. R. (2017). Fire effects on cation exchange capacity of California forest and woodland soils. *Geoderma*, 286, 125-130.
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703-707.
- Verma, S., & Jayakumar, S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review. *proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2(3), 168.
- Wardle, D. A., & Ghani, A. (1995). A critique of the microbial metabolic quotient (qCO₂) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biology and Biochemistry*, 27(12), 1601-1610.
- York, A., Bell, T. L., & Weston, C. J. (2012). *Fire regimes and soil-based ecological processes: implications for biodiversity*. CSIRO Publishing, Collingwood.
- Zarekar, A., Kazemi Zamani, B., Ghorbani, S., Ashegh Moalla, M., & Jafari, H. R. (2013). Mapping Spatial Distribution of Forest Fire using MCDM and GIS (Case Study: Three Forest Zones in Guilan Province). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 21(2), 218-230. doi.org/10.22092/ijfpr.2013.3854