Iranian Journal of Soil and Water Research
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir
ISNN: 2423-7833

Investigating the Effect of Controlled Fire on Soil Thermal-Humidity Profile and Simulating Carbon and Nitrogen Cycles Using the DNDC Model

Fatemeh Ozar[1] | Ataallah Khademalrasoul[2]✉ | Hadi Amerikhah[3]

1. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: fatemeh.ozar79s@gmail.com
2. Corresponding Author, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: a.khademalrasoul@scu.ac.ir
3. Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: hadi.ameri@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: July. 21, 2026

Revised: Aug. 29, 2026

Accepted: Sep. 9, 2026

Published online: Nov. 23, 2026

Keywords:
Soil infiltration rate,
Moisture profile,
DNDC model,
Land use,
Soil temperature

ABSTRACT

Fire is one of the most important ecological disturbances that can significantly affect the physical, chemical, and biological properties of soil. The intensity, duration, and frequency of fire, are effective on soil properties. In Khuzestan Province, intentional and managed fires are widely practiced in agricultural lands, especially after sugarcane harvest. In order to conduct this study, three land uses including sugarcane, wheat and virgin shrubland were selected and the effect of fire on four land treatments including sugarcane (SAH), wheat with residues (WCR), wheat without residues (WRR) and shrubland (BSA) was investigated. Soil sampling was carried out from a depth of 0 to 10 cm, before and after the fire. Also, temperature changes during and after the fire were monitored at surface up to 60 cm. The data were analyzed using a paired t-test. In addition, the DNDC model was used to evaluate soil carbon and nitrogen cycles. The results showed that the highest temperature increase occurred at the soil surface and decreased with increasing depth. In the WCR treatment, fire caused a significant increase in electrical conductivity and a significant decrease in the final infiltration rate and microbial respiration. In the BSA treatment, more severe changes were observed; organic carbon, total nitrogen, electrical conductivity, wilting point moisture, final infiltration rate, and microbial respiration were significantly reduced, while bulk density showed a significant increase. The DNDC model results also showed a significant decrease in soil organic carbon and organic nitrogen in BSA and WCR treatments up to one year after the fire. Fire can severely reduce soil quality and, in arid and semi-arid regions such as Khuzestan, it is a serious threat to the sustainability of ecosystems and sustainable soil management.

Cite this article: Ozar, F., Khademalrasoul, A., & Amerikhah, H. (2026). Investigating the Effect of Controlled Fire on Soil Thermal-Humidity Profile and Simulating Carbon and Nitrogen Cycles Using the DNDC Model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (9),2161-2183. https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.418875.670180

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.418875.670180

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil, as a vital and non-renewable resource on a human timescale, plays fundamental roles in ecosystems. Fire, as an ecological disturbance, leaves profound and multifaceted effects on soil properties. National statistics indicate the widespread occurrence of fires in Iran, particularly in natural and agricultural areas, and the burning of sugarcane field residues in Khuzestan has also exacerbated this problem. This phenomenon leads to structural transformations in the soil, including the formation of recalcitrant (pyrogenic) organic matter, changes in soil aggregate stability, and disruption of microbial communities. Physiological consequences for plants, such as reduced water-holding capacity and increased water stress, have also been observed. Furthermore, long-term chemical changes in the soil, including increases in pH, electrical conductivity, and nutrient mobility, are among the other reported effects. The total soil respiration rate (SR), as a measure of microbial activity, typically decreases after fire, but the magnitude and nature of this decrease depend on the ecosystem type and fire severity. Therefore, this study aims to comprehensively examine the impacts of fire on the physicochemical and biological properties of soil, thereby providing a scientific basis for the development of sustainable land management strategies.

Method

This study was conducted in the Ahvaz region, at the experimental fields of Shahid Chamran University and the Deabel Khazaei Sugarcane Agro-industry, characterized by a hot desert climate and young alluvial soils (Entisol order). The effect of fire was evaluated across four land-use treatments, including burned sugarcane (SAH), wheat with residue removal (WCR), wheat without residue removal (WRR), and natural shrubland (BSA), within 1×1 m plots replicated three times. The monitoring process included measuring temperature changes at five depths (surface to 60 cm) using infrared and digital thermometers, and examining soil moisture content by gravimetric method in the pre- and post-fire stages. In the laboratory section, physical properties (texture, bulk density and particles, field capacity, wilting point, porosity and permeability rate) and chemical and biological indices (EC, organic carbon, total nitrogen and microbial activity) were measured using standard methods. In order to accurately simulate the dynamics of carbon and nitrogen cycles in response to fire, the comprehensive DNDC 95 model was used with accurate soil inputs, climate data from the Ahvaz station and agricultural management calendar (plowing, irrigation and fertilization). These simulations, which were adjusted based on the Julian calendar, predicted the long-term effects of fire on soil biogeochemistry for a one-year period. After data collection, in order to evaluate the effect of fire on the physical, chemical and biological properties of the soil, paired t-test was used to compare the means of the studied traits in the conditions before and after the fire. Statistical analysis of the data was performed using SPSS version 27 software and graphs were drawn using Excel software.

Results

The fire caused an increase in surface soil temperature, creating a severe thermal gradient. The greatest impact was observed in the surface layers, with a significant decrease in heat intensity as depth increased. The intensity and extent of heat transfer were dependent on soil properties such as texture, sand content, initial moisture, and bulk density; for instance, coarse-textured soils experienced deeper heat penetration due to their higher thermal conductivity and lower heat capacity. The results also showed that the soil's response to fire varied across different treatments and was influenced by fire intensity, duration of heat exposure, initial soil conditions, and land use type. The results of this study showed that fire has significant effects on the chemical, biological and physical properties of the soil. From a chemical and biological perspective, combustion caused a decrease in organic carbon (OC), total nitrogen (TN), and basal microbial respiration. These decreases were mainly attributed to the volatilization of volatile organic compounds and the destruction of microbial communities due to high temperatures. Also, changes in soil electrical conductivity (EC) were affected by the initial soil properties and fire intensity, increasing in some applications and decreasing in others. From a physical perspective, fire led to an increase in soil bulk density and, as a result, total porosity, water holding capacity and soil permeability decreased. Comparison of different treatments showed that the severity of changes in the BSA treatment was significantly greater than in the other treatments due to the higher fire intensity. These results emphasize the determining role of soil texture, initial soil organic matter (SOM) content, and other intrinsic soil properties, as well as fire intensity and duration, in soil fire vulnerability. In contrast, the SAH treatment, which experienced lower fire intensity and duration with higher flame height above the soil surface, showed limited changes. Therefore, investigating the long-term effects of fire on soil The DNDC model showed that fire has significant immediate and long-term effects on soil carbon and nitrogen reserves; this disturbance can disrupt the balance of these elements' cycles and delay the soil's return to its

initial state for several years.

Conclusions

Overall, the results of this study showed that fire, by creating a strong thermal gradient, causes significant changes in the physical, chemical and biological properties of the soil; so that the severity of these effects depends on the intrinsic properties of the soil such as texture, initial moisture and bulk density, as well as on the intensity and duration of the fire. The reduction of organic carbon, total nitrogen and microbial respiration, along with changes in soil physical properties, indicate a weakening of soil quality and fertility after fire. The DNDC model simulation results also show that this disturbance is not limited to the time of fire, but can also affect soil carbon and nitrogen stocks up to a year after the fire, delaying the process of soil recovery to its initial conditions. Therefore, in the arid and semi-arid climate of Iran, where the natural recovery capacity of ecosystems after fire is limited, continuous monitoring and active management intervention, especially through sustainable agricultural practices, are crucial to maintain soil health and prevent secondary degradation.

Funding

Financial support for this research was provided by the Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, under research grant number SCU.AS1404.364.

Authorship contribution

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

There is no use of any type of artificial intelligence-based technology in this paper.

Data availability statement

Data from this study are available upon request from the authors.

Acknowledgements

We would like to thank the Honorable Vice Chancellor for Research of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support in carrying out this research.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. The absence of scientific and writing similarity has been confirmed through approval number: 91120242982 /T date: 27/04/1405 Samim Noor Certificate.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۷، شماره ۹ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

بررسی اثر آتش‌سوزی کنترل‌شده بر پروفیل حرارتی-رطوبتی خاک و شبیه‌سازی چرخه کربن و نیتروژن با استفاده از مدل DNDC

فاطمه عذار[۱] | عطاالله خادم الرسول[۲]✉ | هادی عامری‌خواه[۳]

۱. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: fatemeh.ozar79s@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: a.khademalrasoul@scu.ac.ir

۳. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: hadi.ameri@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۳۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۶/۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۱۸
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۹/۱

واژه‌های کلیدی:
نرخ نفوذ خاک،
شعله‌افکن،
مدیریت پایدار خاک،
کشت نیشکر،
کاربری اراضی،
دمای خاک

چکیده

آتش‌سوزی یکی از مهم‌ترین اختلالات اکولوژیکی است که می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد. شدت، مدت و فراوانی آتش، نوع پوشش گیاهی و شرایط محیطی از عوامل تعیین‌کننده در میزان و دامنه‌ی این تغییرات محسوب می‌شوند. در استان خوزستان، آتش‌سوزی‌های عمدی و مدیریتی در اراضی کشاورزی، به‌ویژه پس از برداشت نیشکر، به‌طور گسترده اجرا می‌شود. به منظور انجام این پژوهش، سه کاربری شامل کشت نیشکر، گندم و بوته‌زار بکر انتخاب شد و اثر آتش‌سوزی بر چهار تیمار اراضی شامل نیشکر (SAH)، گندم با بقایا (WCR)، گندم بدون بقایا (WRR) و بوته‌زار (BSA) بررسی گردید. نمونه‌برداری خاک از عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر، قبل و بعد از آتش‌سوزی انجام شد و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری شدند. همچنین، تغییرات دما در حین و پس از آتش‌سوزی در اعماق سطح تا ۶۰ سانتی‌متر پایش شد. داده‌ها با استفاده از آزمون t زوجی تجزیه‌وتحلیل شدند. علاوه بر این، مدل DNDC برای ارزیابی تغییرات چرخه‌های کربن و نیتروژن خاک پیش و پس از آتش‌سوزی به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که بیشترین افزایش دما در سطح خاک رخ داده و با افزایش عمق کاهش یافته است. در تیمار WCR، آتش‌سوزی موجب افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی و کاهش معنی‌دار نرخ نفوذ نهایی و تنفس میکروبی شد. در تیمار BSA، تغییرات شدیدتری مشاهده شد؛ به‌طوری‌که کربن آلی، نیتروژن کل، هدایت الکتریکی، رطوبت در نقطه پژمردگی، نرخ نفوذ نهایی و تنفس میکروبی به‌طور معنی‌دار کاهش یافتند، در حالی‌که جرم مخصوص ظاهری افزایش معنی‌داری نشان داد. نتایج مدل DNDC نیز کاهش چشمگیر کربن آلی و نیتروژن آلی خاک را در تیمارهای BSA و WCR تا یکسال پس از آتش‌سوزی نشان داد. آتش‌سوزی می‌تواند کیفیت خاک را به‌شدت کاهش دهد و در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند خوزستان، تهدیدی جدی برای پایداری اکوسیستم‌ها و مدیریت پایدار خاک به شمار می‌آید.

استناد: عذار، فاطمه؛ خادم الرسول، عطاالله؛ و عامری‌خواه، هادی (۱۴۰۵). بررسی اثر آتش‌سوزی کنترل شده بر پروفیل حرارتی-رطوبتی خاک و شبیه‌سازی چرخه کربن و نیتروژن با استفاده از مدل DNDC، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۷ (۹)، ۲۱۸۳-۲۱۶۱.
https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.418875.670180

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.418875.670180

مقدمه

خاک به‌عنوان یکی از منابع طبیعی حیاتی، نقش بنیادینی در اکوسیستم‌های طبیعی و اجتماعی– اکولوژیکی ایفا می‌کند (Alcañiz et al., 2018). این بستر، وظایف متعددی از جمله تسهیل چرخه عناصر غذایی، ذخیره‌سازی مواد معدنی، جذب و نگهداری کربن اتمسفری و فراهم آوردن زیرساخت برای رشد و نمو گیاهان را بر عهده دارد (Osman, 2013). همچنین، به دلیل فرآیند تدریجی تشکیل و حساس بودن در برابر عوامل مخرب و فرساینده، به عنوان یک منبع با امکان تجدیدپذیری بسیار کم در مقیاس زمانی انسان شناخته می‌شود (Lal, 2015).

آتش‌سوزی به عنوان یک عامل اکولوژیکی، تأثیرات چشمگیری بر خواص فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک دارد؛ این تأثیرات می‌توانند بسته به شرایط، ماهیتی مخرب یا در برخی موارد، مثبت و احیاکننده داشته باشند. بر اساس منشأ وقوع، آتش‌سوزی‌ها به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: آتش‌سوزی‌های طبیعی که با عوامل غیرانسانی نظیر صاعقه، فوران‌های آتشفشانی یا خودآشتعالی مواد آلی آغاز شده و بخشی از فرآیندهای دینامیک اکوسیستم محسوب می‌گردند (Pausas & Keeley, 2009)، و آتش‌سوزی تجویزشده، آتش‌سوزی‌هایی عمدی و کنترل‌شده با شدت کم هستند که به منظور دستیابی به اهداف مدیریتی خاص (Francos & Úbeda, 2021; Hiers et al., 2020) همچون آماده‌سازی زمین برای کشت بعد (Verma et al., 2018)،کنترل آفات و بیماری‌های گیاهی (Weir, 2009)، کنترل علف‌های هرز (DiTomaso et al., 2006)، تسهیل در عملیات برداشت (منجزی، ۱۳۹۹) و کاهش بار سوخت به منظور جلوگیری از آتش‌سوزی‌های گسترده (Agbeshie et al., 2022; Alcañiz et al., 2018)، تحت شرایط اقلیمی مشخص و با نظارت کارشناسان اجرا می‌شود.

تأثیر آتش‌سوزی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، تا حد زیادی تابع شدت و مدت آتش است. شدت آتش نیز خود تحت تأثیر مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی قرار دارد که فرآیند احتراق را کنترل می‌کنند. از مهم‌ترین این متغیرها می‌توان به مقدار، نوع و میزان رطوبت سوخت‌های زنده و مرده، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه اشاره کرد(Certini, 2005). شدت آتش‌سوزی، که به میزان گرمای خروجی در هر ناحیه سوخته شده در هر زمان مربوط می‌شود، می‌تواند به شدت کم (کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد)، شدت متوسط (تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) و شدت زیاد (بیش از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) طبقه‌بندی شود (Caon et al. 2014).

بررسی داده‌های گزارش‌شده توسط پایگاه اطلاعات آنلاین، حاکی از وقوع ۲۲۱۰۳ فقره آتش‌سوزی در عرصه‌های طبیعی کشور طی بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ است. بر اثر این حریق‌ها، مجموعاً ۲۲۷۹۲۸ هکتار از اراضی جنگلی و مرتعی دچار خسارت شده که سهم عرصه‌های جنگلی از این تخریب، بالغ بر ۱۰۳۴۴۲ هکتار (معادل ۴۵ درصد از کل مساحت سوخته‌شده) برآورد می‌شود. تحلیل این داده‌ها بیانگر وقوع میانگین ۶ آتش‌سوزی در روز (بیش از ۲۲۱۰ مورد در سال) است که نشان‌دهنده روند صعودی و گسترده حریق‌ها در سال‌های اخیر می‌باشد (روزنامه اطلاعات، ۱۴۰۳). وقوع این رخدادها، به‌ویژه در فصول گرم سال، نقشی تعیین‌کننده در تخریب بوم‌سازگان‌های جنگلی و کاهش خدمات اکوسیستمی آن‌ها ایفا کرده است.

در سال‌های اخیر، با پررنگ شدن نگرانی‌های زیست‌محیطی در سطح بین‌المللی، سوزاندن بقایای مزارع نیشکر پیش از برداشت به یکی از مسائل کلیدی در این حوزه بدل شده است. این رویکرد، فشارهای فزاینده‌ای را از سوی جوامع عمومی و سازمان‌های بین‌المللی برای ممنوعیت یا محدودسازی آن در کشورهای مختلف به همراه داشته است (Caldeira-Pires et al., 2018). استان خوزستان در ایران، با بیش از ۱۱۰ هزار هکتار سطح زیر کشت نیشکر (با نام علمی: *Saccharum officinarum*)، با این چالش مواجه است. هر ساله در این استان، به دلایلی چون تسهیل عملیات برداشت، انجام مراحل پس از برداشت و نبود تجهیزات و ماشین‌آلات کافی، مزارع نیشکر پیش از برداشت، مورد سوزاندن قرار می‌گیرند (Monjezi, 2020). هرچند آتش‌سوزی‌های هدفمند در مزارع نیشکر با هدف تسهیل فرایند برداشت انجام می‌گیرد، اما این رویکرد پیامدهای اکولوژیک گسترده‌ای در پی دارد. این اقدام با ایجاد تنش‌های فیزیولوژیک در گیاه برای چرخه‌های رشد آتی، فرسایش زیستی و کاهش حاصلخیزی خاک، و همچنین از میان بردن تنوع زیستیِ لایه‌های سطحی خاک، نه‌تنها بهره‌وری محصول را در بلندمدت با چالش مواجه می‌کند، بلکه با تحمیل هزینه‌های پنهان تولید، پایداری نظام کشاورزی نیشکر را به‌طور جدی تهدید می‌نماید (Go & Conag, 2019).

مدیریت بقایای گیاهی پس از برداشت محصول، یکی از چالش‌های مهم در کشاورزی پایدار امروزی است. روش رایج سوزاندن این بقایا، گرچه به ظاهر ساده و کم‌هزینه به نظر می‌رسد، اما پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی بلندمدت و زیان‌باری دارد. این عمل موجب از بین رفتن مواد آلی حیاتی و ریزجانداران مفید خاک می‌شود (Certini, 2005) و با انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن و متان،

به روند تغییرات آب‌وهوایی دامن می‌زند (Singh, 2022). همچنین، سوزاندن بقایا باعث افزایش فرسایش خاک و تولید رواناب سطحی شده و در نهایت، موجب کاهش چشمگیر کیفیت و حاصلخیزی خاک می‌شود (Agbeshie et al., 2022). این اثرات منفی، ضرورت بازنگری اساسی در شیوه‌های مرسوم مدیریت بقایای گیاهی و حرکت به سمت رویکردهای پایدارتر و سازگارتر با محیط زیست را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

یکی از سازوکارهای کلیدی که از طریق آن آتش‌سوزی می‌تواند بر ذخایر بلندمدت کربن خاک تأثیر بگذارد، تشکیل ماده آلی پیروژنیک حاصل از احتراق ناقص زیست‌توده است. این ماده آلی، به دلیل ساختار عمدتاً آروماتیک چندحلقه‌ای خود، از پایداری شیمیایی و مقاومت زیستی بالایی برخوردار بوده (Knicker, 2011) و معمولاً در دسترس بودن خود را برای جامعه میکروبی خاک کاهش می‌دهد. بعلاوه، بسته به شدت حرارتی حریق، ماده آلی موجود در خاک ممکن است دستخوش فرآیندهای مختلفی نظیر تقطیر جزئی (Certini, 2005) (که منجر به تبخیر ترکیبات فرار می‌شود)، زغال‌شدن (Zhang & Biswas 2017) یا حتی اکسیداسیون کامل (Miesel et al. 2015) گردد. از آنجا که در خاک، ماده آلی اغلب ارتباط نزدیکی با فاز معدنی دارد، می‌توان عنوان کرد که تغییرات ساختاری ناشی از آتش در محتوای آلی خاک، به ترکیب کانی‌شناسی خاک نیز بستگی دارد. در این راستا، Miltner & Zech (1997) نشان دادند که حضور اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز، تجزیه حرارتی پلی‌ساکاریدها و لیگنین را تسریع کرده و تشکیل حلقه‌های آروماتیک را افزایش می‌دهد، در حالی که کانی‌هایی مانند مونت‌موریلونیت و کوارتز تقریباً هیچ تأثیر قابل توجهی بر این فرآیند ندارند.

پایداری خاکدانه‌ها یکی از مهم‌ترین شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک بوده، که نقش کلیدی در حفظ ساختار خاک، تهویه، نفوذ آب، و مقاومت در برابر فرسایش دارد. این ویژگی به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک از جمله بافت خاک، مقدار ماده آلی، درصد سدیم تبادلی (ESP)، کربنات‌ها و محتوای اکسیدهای آهن و آلومینیوم قرار دارد (Bronick & Lal, 2005). برخی مطالعات نشان داده‌اند که آتش‌سوزی یا اعمال حرارت تأثیر معنی‌داری بر پایداری خاکدانه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد ندارد؛ با این حال، نتایج برخی پژوهش‌ها از افزایش یا کاهش پایداری خاکدانه‌ها در اثر حرارت حکایت دارند، که این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از شدت و مدت زمان آتش و یا حرارت، ویژگی‌های ذاتی و شرایط رطوبتی خاک در زمان آتش‌سوزی یا حرارت دهی باشد (Mataix-Solera et al., 2011).

آب‌گریزی خاک، به‌عنوان یکی از ویژگی‌های فیزیکی حیاتی که به‌شدت تحت تأثیر رژیم‌های آتش‌سوزی قرار می‌گیرد، نقشی کلیدی در هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز ایفا می‌کند (Robichaud et al., 2016). بروز این پدیده باعث کاهش نفوذپذیری آب و متعاقب آن، تشدید رواناب‌های سطحی و فرسایش خاک می‌گردد (Weninger et al., 2018). مکانیسم اصلی تشکیل این ویژگی، تصعید ترکیبات آلی در اثر حرارت و سپس میعان آن‌ها در لایه‌های سردتر خاک است (Mataix-Solera et al., 2011) که منجر به شکل‌گیری پوششی دافع آب در عمقی معین (معمولاً در سطح خاک تا عمق ۶ سانتی‌متر) می‌شود (Hoffman et al., 2001). میزان حساسیت خاک به این فرآیند، متأثر از بافت آن است؛ به‌طوری‌که خاک‌های درشت‌بافت به دلیل سطح ویژه کمتر، مستعدتر از خاک‌های ریزبافت هستند (DeBano, 1981). شواهد تجربی در جنگل‌های زاگرس نشان می‌دهد که اگرچه بلافاصله پس از آتش‌سوزی، میزان آب‌گریزی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد، اما این اثر در بلندمدت (ده سال پس از وقوع) تعدیل شده و به شرایط اولیه بازمی‌گردد (صادقی‌فر و همکاران، ۱۳۹۵).

پژوهش‌های میدانی نیز پیامدهای اکولوژیک آتش‌سوزی را در مقیاس‌های زمانی مختلف تأیید کرده‌اند. González-Pelayo et al (2023) در مطالعه‌ای بر تأثیر فراوانی آتش‌سوزی در جنگل‌های کاج پرتغال، مشخص شد که تکرار حریق منجر به کاهش میزان آب در دسترس، تسریع در رسیدن به آستانه تنش آبی گیاه، طولانی‌تر شدن دوره‌های تنش و کاهش توانایی بازسازی پوشش گیاهی شده است. جالب‌توجه آنکه علی‌رغم افزایش محتوای ماده آلی خاک در اثر آتش‌سوزی‌های مکرر، میزان آب در دسترس کاهش یافته بود؛ این موضوع اهمیت «کیفیت» ماده آلی خاک را در تنظیم ویژگی‌های هیدرولیکی برجسته می‌سازد. در سطح تغییرات شیمیایی، مطالعه Dhungana et al (2024) که ۱۴ سال پس از وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های نپال انجام شد، نشان‌دهنده اثرات بلندمدت بر ویژگی‌های خاک بود. این تحقیق افزایش pH (۳ درصد)، هدایت الکتریکی (۸۱ درصد) و پتاسیم قابل‌جذب (۵۳ درصد) را گزارش کرد، در حالی‌که فسفر موجود ۶ درصد کاهش یافت. نیتروژن کل و ماده آلی نیز به‌ترتیب ۲۰ و ۱۲ درصد کاهش داشتند، اما این موارد از نظر آماری معنی‌دار نبودند. نیکنام و همکاران (۱۴۰۰) نیز در مطالعه‌ای بر روی اراضی جنگلی، مرتعی و کشاورزی استان گلستان، تأثیر آتش‌سوزی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک را ارزیابی کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که آتش‌سوزی موجب تغییرات معناداری در لایه سطحی (۰ تا ۵ سانتی‌متر) شده است؛ به طوری که در کاربری‌های جنگلی، مرتعی و کشاورزی، به‌ترتیب شاهد کاهش قابل‌توجه رس (۲۴، ۱۱ و ۶ درصد)، میانگین وزنی قطر خاکدانه (۴۷، ۴۱/۹ و ۷/۴ درصد)، تخلخل (۱۰، ۸ و ۹ درصد)، گنجایش هوایی (۳۴/۶، ۲۱/۴و ۲۷/۳ درصد)، شاخص پایداری ساختمان

خاک (۲۵/۶، ۷/۴ و ۱۱/۳ درصد)، شاخص S دکستر (۱۹/۷، ۱۵/۴ و ۷/۳ درصد) و کربن آلی (۸، ۹/۶ و ۱۳/۷ درصد) بودیم. همچنین، جرم مخصوص ظاهری در این عمق با افزایش ۱۱، ۸ و ۶ درصدی در کاربری‌های مذکور همراه بود. در مقابل، تغییرات در لایه‌های زیرسطحی (۵ تا ۳۰ سانتی‌متر) معنادار گزارش نشد. نویسندگان علت این پدیده را به عمق نفوذ محدود حرارت نسبت دادند؛ عاملی که به شدت آتش، تراکم پوشش گیاهی، رطوبت خاک و فشردگی ذرات در زیر مواد قابل‌اشتعال وابسته است.

آتش می‌تواند به‌طور مستقیم با افزایش دمای خاک و تخریب جوامع زیستی میکروبی، و به‌طور غیرمستقیم از طریق ایجاد تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، بر ساختار و عملکرد میکروبی خاک اثرگذار باشد (Certini, 2005; Certini et al., 2021). شدت، مدت و ویژگی‌های آتش‌سوزی نقش تعیین‌کننده‌ای در تعدیل فرآیندهای زیستی پس از حریق ایفا می‌کنند. مطالعات انجام شده بر روی خاک جنگل‌ها نشان می‌دهد که آتش‌سوزی‌های با شدت بالا و پایین منجر به کاهش معنی‌دار در نرخ تنفس کل خاک (SR) می‌شوند، در حالی‌که آتش‌سوزی‌های با شدت متوسط تأثیر قابل‌توجهی بر این پارامتر ندارند. به‌طور میانگین، آتش‌سوزی‌های طبیعی موجب کاهش ۱۳/۹ درصدی SR در جنگل‌ها شده‌اند، در مقابل، آتش‌سوزی‌های تجویزی تنها باعث کاهش ۸/۴ درصدی در میزان SR می‌گردند. واکنش SR به آتش‌سوزی با نوع اکوسیستم جنگلی ارتباط مستقیم دارد؛ به‌گونه‌ای‌که میزان کاهش SR پس از وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های بوره‌آل (شمالی)، معتدل و گرمسیری به‌ترتیب ۱۴/۸، ۱۳/۸ و ۲۸/۹ درصد گزارش شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که حساسیت تنفس خاک به آتش‌سوزی، علاوه بر شدت و نوع حریق، به ویژگی‌های اقلیمی و بوم‌شناختی اکوسیستم‌های جنگلی نیز وابسته است (Gui et al., 2023). پاسخ تنفس خاک به آتش‌سوزی همواره یکنواخت نبوده و در برخی موارد، افزایش موقت در نرخ تنفس پس از حریق مشاهده شده است. نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی در خصوص اثر آتش بر ویژگی‌های خاک نشان داد که طی ۱ تا ۳ روز نخست پس از شروع دوره انکوباسیون ۷۰ روزه، تنفس خاک افزایش می‌یابد. این افزایش کوتاه‌مدت می‌تواند ناشی از آزادسازی مواد مغذی ناشی از سوختگی از مواد گیاهی کشته شده و تغییر شکل یافته و نکروماس میکروبی باشد که به سرعت توسط فعالیت میکروبی تخلیه می‌شود و اشکال مقاوم‌تری از کربن را باقی می‌گذارد. با این حال، این افزایش گذرا بوده و در بلندمدت، نرخ تنفس خاک کاهش یافته و میزان آن پایین‌تر از مناطق کنترل (سوخته‌نشده) قرار گرفته است (Johnson et al., 2024). همچنین، پژوهشگران دیگری نیز تنفس پایه بالاتری را برای خاک‌های سوخته نسبت به خاک‌های نسوخته تا ۶ ماه پس از آتش‌سوزی گزارش کرده‌اند (Dalias et al., 2024).

مدل DNDC[1] یک مدل فرآیندی دینامیکی است که چرخه‌های کربن و نیتروژن را در خاک‌های کشاورزی و طبیعی به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند. این مدل فرآیندهای زیست‌فیزیکی و زیست‌شیمیایی مانند تجزیه مواد آلی، نیتریفیکاسیون، دنیتریفیکاسیون و انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2، CH_4 و N_2O) را مدلسازی می‌کند. ورودی‌های اصلی مدل شامل داده‌های اقلیمی (دمای هوا، بارندگی)، مشخصات خاک (بافت، ماده آلی، نیتروژن کل) و اطلاعات مدیریت کشاورزی (کشت، برداشت، کوددهی) است. DNDC ابزاری کارآمد برای ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم و مدیریت خاک بر کیفیت خاک و انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود (Li, 2000).

با توجه به اثرات گسترده آتش‌سوزی بر ویژگی‌های خاک، پژوهش حاضر بر ارزیابی اثرات کوتاه‌مدت آتش‌سوزی‌های هدفمند و تصادفی بر پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، و همچنین پیش‌بینی پیامدهای بلندمدت آن‌ها بر پویایی چرخه‌های کربن و نیتروژن با استفاده از مدل DNDC تمرکز دارد. به بیان بهتر استفاده از مدل DNDC این امکان را فراهم می‌سازد که اثرات رخدادهای آتش‌سوزی را برای مدت زمان‌های طولانی پس از رخداد بر روی ویژگی‌های خاک و چرخه‌های کربن و نیتروژن ارزیابی نمود که در بسیاری از پژوهش‌ها خلا این امکان محسوس است.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه‌ی مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در شهرستان اهواز با موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه ۶۵ دقیقه طول شرقی در مزارع دانشگاه شهید چمران اهواز و کشت و صنعت نیشکر واحد دعبل خزاعی واقع شده است. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه، جزو اقلیم بیابانی گرم محسوب می‌شود. میانگین دمای سالانه حدود ۲۶/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه بین ۲۱۰ تا ۲۳۰ میلی‌متر است که عمدتاً در فصل زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهد. خاک‌های منطقه عمدتاً از نوع خاک‌های جوان رده‌ی انتی‌سول بوده، رژیم حرارتی

1. DeNitrification Decomposition

آن‌ها Thermic و Hyperthermic و رژیم رطوبتی آن‌ها عمدتا Aridic است. زمین‌شناسی غالب منطقه متأثر از رسوبات آبرفتی دوران چهارم زمین‌شناسی است که عمدتاً از فرسایش ارتفاعات زاگرس و انتقال رسوب توسط رودخانه کارون به دشت خوزستان شکل گرفته‌اند.

روش کار و کاربری‌های مورد مطالعه

به منظور انجام این پژوهش، سه کاربری شامل کشت نیشکر، گندم بوته‌زارهای بکر انتخاب و اثر آتش‌سوزی بر چهار تیمار اراضی تحت کشت نیشکر (SAH) و اراضی تحت کشت گندم با جمع‌آوری بقایا (WCR)، گندم بدون جمع‌آوری بقایا (WRR) و بوته‌زار (BSA) بررسی شد. این مطالعه بر روی این تیمارها در بلوک‌هایی با ابعاد ۱ در ۱ متر و با ۳ تکرار انجام شد. پیش از شروع آزمایش پروفیلی در فاصله ۲۰ سانتی‌متری لبه‌ی بلوک‌های آزمایشی حفر شد که جهت اندازه‌گیری درجه حرارت با دماسنج‌های میله‌ای دیجیتال مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است برای تیمار نیشکر، آتش‌سوزی در سطح کل مزرعه به مساحت ۱۳/۰۳ هکتار و با استفاده از روش‌های مرسوم آتش‌سوزی انجام گرفت. به منظور مدیریت بهتر و افزایش دقت، مزرعه به سه بلوک مساوی تقسیم شد و از هر بلوک به صورت جداگانه نمونه برداری شد. زمان اجرای آتش‌سوزی در تیمار نیشکر اواخر پاییز (آذرماه) بود. همچنین، برای تیمار بوته‌زار از شرایط طبیعی استفاده شد در حالی که به دلیل عدم وجود طبیعی بلوک‌های آزمایشی برای تیمار گندم، این بلوک‌ها در مزارع آزمایشی از طریق افزودن بیوماس شبیه‌سازی گردیدند. زمان اجرای آتش‌سوزی در تیمار گندم همراه با جمع آوری بقایا، گندم بدون جمع آوری بقایا و بوته‌زار در اوایل زمستان (دی‌ماه) بود.

این پژوهش به منظور ارزیابی تأثیر آتش‌سوزی بر تغییرات پروفیل حرارتی و ویژگی‌های کیفی خاک سطحی در شرایط میدانی انجام شد. دمای لایه سطحی خاک با استفاده از دماسنج مادون‌قرمز (برند MASTECH دقت ۰/۱ درجه سانتی گراد و دامنه‌ی اندازه‌گیری بین ۲۰- الی ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. برای پایش تغییرات دمایی در اعماق زیرسطحی، از دماسنج‌های میله‌ای دیجیتال (مدل TP۱۰۱، دقت ۰/۱ درجه سانتی گراد و دامنه‌ی اندازه‌گیری بین ۵۰- الی ۳۰۰+ درجه سانتی‌گراد) در پروفیل حفر شده در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از دیواره بلوک‌های آزمایشی بهره گرفته شد. اندازه‌گیری‌های دما در پنج عمق مختلف شامل سطح خاک، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر ثبت گردید. آزمایش از طریق ایجاد حریق با استفاده از شعله‌افکن دستی آغاز شد و قرائت دما در بخش‌های مختلف پروفیل تا زمان فرونشینی کامل آتش ادامه یافت. پس از فرآیند سرد شدن بقایا، نمونه‌برداری از خاک سطحی (عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر) به‌منظور بررسی تأثیر حریق بر ویژگی‌های کیفی آن صورت پذیرفت. در همین راستا، پروفیل رطوبتی خاک (قبل از آتش‌سوزی و بعد از سرد شدن خاک) در اعماق مورد نظر نیز به روش وزنی تعیین گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی خاک

ویژگی‌های خاک شامل بافت خاک، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی، جرم مخصوص ظاهری ، جرم مخصوص حقیقی و نفوذپذیری به ترتیب با استفاده از هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، روش صفحات فشاری در پتانسیل‌های ماتریک ۰/۳۳ و ۱۵ بار (Klute & Dirksen, 1986)، استوانه (Blake & Hartge, 1986)، پیکنومتر و استوانه مضاعف (Reynolds et al., 2002) اندازه‌گیری شد و تخلخل با استفاده از رابطه شماره ۱، تعیین گردید.

$$n = (1 - \rho_b/\rho_p) \times 100$$

هدایت الکتریکی خاک در عصاره ۱:۱ با استفاده از EC متر (Rhoades, 1982)، کربن آلی با روش والکلی– بلک (Walkley & Black, 1934) و نیتروژن کل با روش کجلدال (Bremner & Mulvaney , 1982) تعیین شد. فعالیت میکروبی خاک نیز از طریق اندازه‌گیری تنفس پایه به صورت اندازه گیری میلی گرم دی اکسید کربن رها شده از یک کیلوگرم خاک طی ۴۸ ساعت (Anderson, 1982) در شرایط کنترل‌شده رطوبت و دما ارزیابی گردید.

شبیه‌سازی توسط مدل DNDC

جهت ارزیابی اثرات آتش‌سوزی بر چرخه‌های کربن و نیتروژن خاک، از مدل DNDC 95 استفاده شد. این مدل پیش‌تر در مطالعات عامری‌خواه و چرم (۱۳۸۵)، برای خاک‌های استان خوزستان ارزیابی شده و توانمندی بالایی در شبیه‌سازی چرخه عناصر و تخمین انتشار گازهای گلخانه‌ای (CO_2 ، N_2O، CH_4) نشان داده است. در مرحله نخست، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، داده‌های اقلیمی و مدیریت زراعی (شامل نوع کاربری، شخم، آبیاری و کوددهی) مطابق با شرایط واقعی منطقه در مدل تنظیم گردید. همچنین، مقدار نیتروژن حاصل از رسوب اتمسفری بر اساس یافته‌های عامری‌خواه و چرم (۱۳۸۵)، معادل ۲ کیلوگرم نیتروژن در هکتار سالانه لحاظ شد و شبیه‌سازی

بر پایه تقویم Julian Day و برای یک دوره زمانی ۳۶۵ روزه انجام گرفت. برای اعمال اثر آتش‌سوزی، زمان وقوع آن در هر تیمار به صورت مشخص تعیین گردید: تیمار بوته‌زار در روز ۳۶۵، تیمار مزرعه گندم همراه با جمع آوری بقایا و بدون جمع آوری بقایا در روز ۵، و تیمار مزرعه نیشکر در روز ۳۴۹. بدین معنی که داده‌های میانگین ۳ تکرار خاک قبل از فرایند آتش‌سوزی وارد مدل شده و برای مدت زمان یکسال (۳۶۵ روز) پس از رخداد آتش‌سوزی شبیه‌سازی انجام شد سپس خصوصیات جدید خاک پس از آتش‌سوزی به عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی سال دوم مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به کوتاه بودن مدت زمان آتش‌سوزی (۱۵ دقیقه تا یک ساعت)، در این مدل‌سازی صرفاً از تغییرات فیزیکی و شیمیایی ناشی از آتش در ویژگی‌های خاک استفاده شد و از متغیرهای زمان و شدت آتش صرف‌نظر گردید. بدین منظور، ویژگی‌های خاک پس از آتش‌سوزی به‌روزرسانی شده و به عنوان نقطه شروع شبیه‌سازی در مدل اعمال گردید تا تغییرات آتی در چرخه‌های کربن و نیتروژن مورد تحلیل قرار گیرد.

شرح ورودی‌های مدل و نحوه شبیه‌سازی با استفاده از مدل DNDC

اقلیم

در این بخش به جهت تعریف اقلیم منطقه پس از تهیه داده‌های روزانه هواشناسی از ایستگاه اهواز فایل اقلیم جهت شبیه سازی ایجاد گردید. این فایل‌ها به ترتیب شامل شماره روز (۳۶۵روزه)، درجه حرارت حداقل روزانه، درجه حرارت حداکثر روزانه و بارندگی بوده و توسط نرم افزار EXCEL به صورت فایل متنی (TXT) تهیه شد.

خاک

به منظور شبیه‌سازی وضعیت خاک، ابتدا نوع کاربری اراضی بر اساس ویژگی‌های منطقه تعیین گردید. برای بازسازی شرایط اراضی بکر گزینه DRY GRASSLAND/PASTURE و برای شبیه‌سازی شرایط کشت نیشکر و گندم گزینه UPLAND CROP FIELD انتخاب شد. در مرحله بعد، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، جرم مخصوص ظاهری و pH خاک، درصد رس، ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی وارد فیلدها شد. سپس، میزان کربن آلی در لایه ۱۰ سانتی‌متری سطحی بر حسب کیلوگرم کربن در کیلوگرم خاک تعریف شد. جهت کنترل متغیرهای زیستی و توپوگرافی، شاخص فعالیت میکروبی[1]به دلیل فقدان عوامل سمی برابر با ۱ فرض گردید. همچنین، میزان شیب برای اراضی بکر ۱ درصد و برای اراضی تسطیح‌شده و تحت کشت، ۲ درصد در نظر گرفته شد.

مدیریت زراعی

کاربری‌بوته‌زار بکر: فاقد هرگونه مدیریت زراعی (بدون شخم، آبیاری یا کوددهی).

کاربری‌گندم: شامل خاک‌ورزی تا عمق ۱۰ سانتی‌متر (ploughing with disk or chisel to 10 cm depth) و کوددهی پیش از کاشت با نرخ ۲۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار.

کاربری‌نیشکر (مرحله راتون ۳): بدون عملیات خاک‌ورزی؛ شامل ۲۲ نوبت آبیاری در سال و کوددهی مرحله‌ای در ابتدای دوره رشد (۱۰۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار با فواصل ۲۰ روزه).

تجزیه و تحلیل آماری

پس از جمع‌آوری داده‌ها، به‌منظور ارزیابی اثر آتش‌سوزی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، از آزمون t زوجی برای مقایسه میانگین صفات مورد بررسی در شرایط قبل و بعد از آتش‌سوزی استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۷ انجام گرفت و نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel ترسیم شدند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های اولیه خاک در تیمارهای مختلف پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. همانگونه که نتایج مندرج در جدول شماره ۱ نشان می‌دهد تیمار SAH دارای بالاترین میزان کربن آلی (۰/۹۸ درصد) می‌باشد و در مقابل تیمار BSA دارای کمترین مقدار کربن آلی (۰/۸۰ درصد) می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱ میزان نرخ نفوذ نهایی (میلی‌متر بر ساعت) در تیمار SAH به شکل معنی‌داری در مقایسه با سایر

1. Microbial Activity Index (MAI)

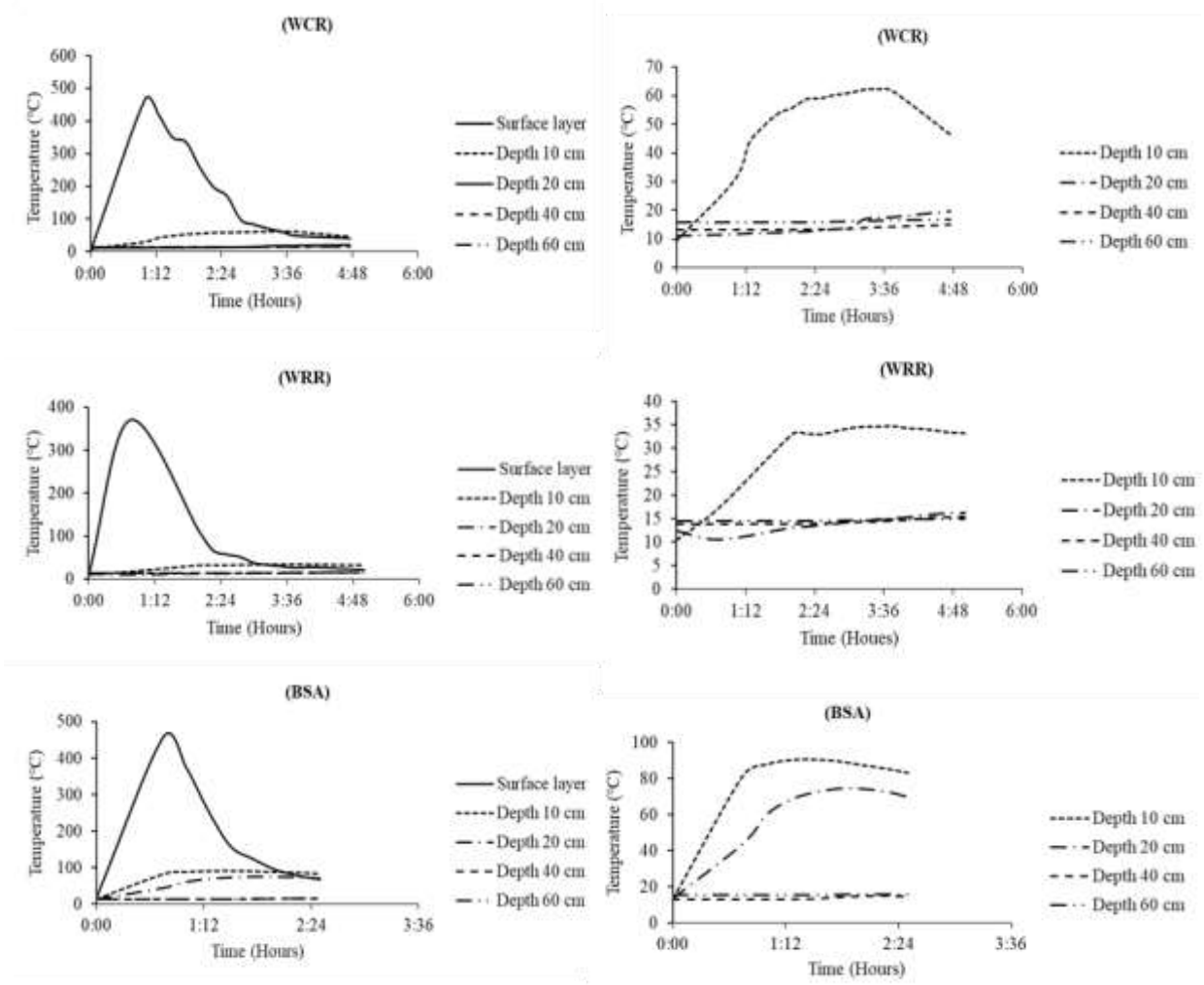
تیمارهای مطالعاتی پایین‌تر است (۰/۰۷ میلیمتر بر ساعت) و در مقابل نرخ نفوذ نهایی در تیمار WCR دارای بالاترین مقدار (۱۸/۴۵ میلی‌متر بر ساعت) می‌باشد که موید اثرگذاری معنی‌دار کاربری بر روی ویژگی‌های خاک است. همچنین هدایت الکتریکی خاک در تیمارهای BSA و SAH به شکل چشمگیری در مقایسه با تیمارهای زراعی گندم WCR و WRR دارای اختلاف است و تیمار BSA دارای بیشترین مقدار هدایت الکتریکی خاک است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک منطقه مورد مطالعه در تیمارهای مختلف

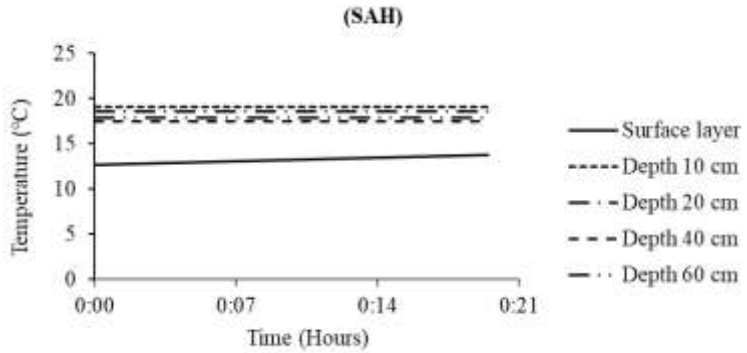
	پارامتر	WCR	WRR	BSA	SAH
شیمیایی	(ds/m) EC	۲/۳۱	۲/۳۸	۱۴/۶	۱۳/۳۵
	کربن آلی (درصد)	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۸۰	۰/۹۸
	نیتروژن کل (درصد)	۰/۰۸۳	۰/۰۸۵	۰/۰۷۱	۰/۰۹۳
فیزیکی	رس (درصد)	۲۱/۳۳	۲۰/۶۷	۱۵/۴۹	۲۰/۱۱
	سیلت (درصد)	۴۶/۳۳	۴۶/۳۳	۵۴/۰۰	۴۷/۶۷
	شن (درصد)	۳۲/۳۳	۳۳	۳۰/۵۱	۳۲/۲۳
	بافت خاک	لوم	لوم	لوم سیلتی	لوم
	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	۱/۳۰	۱/۳۶	۱/۴۲	۱/۳۵
	جرم مخصوص حقیقی (g/cm^3)	۲/۵۸	۲/۵۹	۲/۷۲	۲/۴۷
	تخلخل (درصد)	۴۹/۴۱	۴۷/۶۹	۴۷/۸۵	۴۵/۴۰
	حد ظرفیت زراعی (درصد)	۲۱/۴۷	۲۲/۲۷	۱۸/۳۳	۱۹/۳۰
	نقطه پژمردگی (درصد) رطوبت	۱۲/۶	۱۳	۱۰/۴۰	۱۳/۷۳
	نرخ نفوذ نهایی (mm/h)	۱۸/۴۵	۱۵/۲۲	۳/۴۲	۰/۰۷
زیستی	تنفس میکروبی پایه $(mg\ CO^2\text{-}C\ kg^{-1}soil\ 48h^{-1})$	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۵۴	۰/۷۱

اثر آتش بر پروفیل حرارتی خاک

پروفیل حرارتی حاصل از پایش‌های انجام‌شده نشان داد که در تمامی مناطق مورد بررسی، بیشترین افزایش دمای خاک در لایه‌ی سطحی خاک رخ داده و در نتیجه افزایش دما در این ناحیه به‌طور معنی‌دار بیشتر از لایه‌های زیرین است. همچنین، گرمای اعمال‌شده تا عمق ۱۰ سانتی‌متری نفوذ کرده و در این عمق نیز افزایش دما نسبت به سایر لایه‌ها، قابل‌توجه مشاهده شد با این وجود، در مزرعه نیشکر به دلیل شدت و مدت زمان کم آتش‌سوزی و نیز ارتفاع بیش‌تر شعله نسبت به سطح زمین، تغییرات پروفیل حرارتی محدود بوده است، به‌گونه‌ای که در لایه‌های سطحی و زیرین خاک، تغییرات دما چشمگیر نبوده است (شکل ۲). بیشینه دمای سطح و عمق ۱۰ سانتی‌متری در کاربری‌های WCR، WRRو BSA به‌ترتیب شامل ۴۶۷/۰۷ در ساعت ۱:۰۰ و ۶۲/۱۳ در ساعت ۳:۳۰، ۳۷۰/۸۷ در ساعت ۰:۴۵ و ۳۴/۷۰ در ساعت ۳:۴۵ ، و۴۵۷/۶۷ در ساعت ۰:۴۵ و ۹۰/۵۰ در ساعت ۱:۳۰ پس از شروع آتش بود. (شکل ۱). در SAH، بیشینه دمای سطح ۱۳/۸ در ساعت ۰:۲۰ و دمای عمق ۱۰ سانتی‌متری ۱۹/۱ ثبت شد که بیانگر نوسان حرارتی محدود در این کاربری است(شکل ۲). انتقال حرارت در خاک تحت تأثیر متغیرهای فیزیکی متعددی از جمله بافت (نسبت شن، سیلت و رس)، رطوبت، چگالی ظاهری، تخلخل و میزان ماده آلی قرار دارد. بر این اساس، رسانایی حرارتی با درشت‌تر شدن بافت خاک، افزایش میزان رطوبت و چگالی، افزایش می‌یابد؛ این امر به دلیل بهبود تماس میان‌ذره‌ای و کاهش اثر عایق‌کنندگی هوا در منافذ خاک است. در مقابل، افزایش محتوای ماده آلی نقش بازدارنده داشته و منجر به کاهش توان انتقال حرارتی در خاک گردید(Abu-Hamdeh & Reeder, 2000).. و توانایی کمتری در ذخیره‌سازی آن دارند. در همین راستا، Sandhu et al (2013) در مطالعه‌ای در فلوریدا و کاستاریکا نشان دادند که واکنش حرارتی خاک به روش برداشت نیشکر، به‌ویژه در هنگام سوزاندن بقایا، به‌طور معنی‌دار تحت تأثیر نوع بافت و عمق خاک است. به‌گونه‌ای که در عمق ۲ سانتی‌متری، افزایش دما در خاک‌های رسی بین ۴/۶ تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد و در خاک‌های شنی بین ۶ تا ۷/۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شد. در عمق ۱۰ سانتی‌متری نیز این افزایش به‌ترتیب در خاک‌های رسی ۰/۷ تا ۰/۹ درجه سانتی‌گراد و در خاک‌های شنی ۱/۹ تا ۲/۲ درجه سانتی‌گراد بود. همچنین، از آن‌جا که این افزایش دما کمتر از نوسانات فصلی معمول خاک ارزیابی شد، اثر حرارتی ناشی از سوزاندن بقایا بر ریز موجودات خاک در لایه‌های زیرسطحی (۲ تا ۱۰ سانتی‌متر) محدود و گذرا خواهد بود.



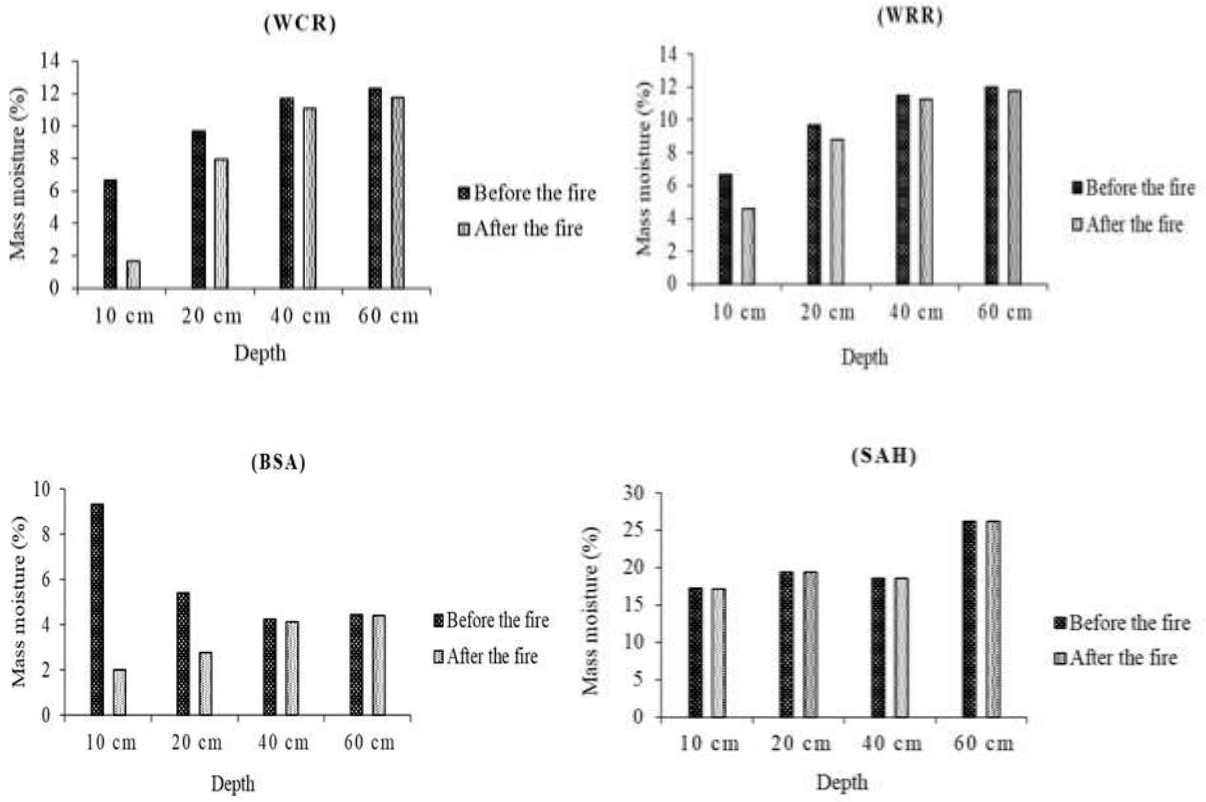
شکل ۱. تاثیر آتش بر پروفیلی حرارتی خاک در لایه‌های سطحی و عمقی تیمارهای WCR (a,b) ، WRR (c,d) و BSA (e,f)



شکل ۲. تأثیر آتش بر پروفیل حرارتی خاک در لایه‌های سطحی و عمقی تیمار SAH

اثر آتش بر پروفیل رطوبتی خاک

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که آتش‌زدن بقایای مزارع، کاهش قابل توجهی در محتوای رطوبتی لایه‌های سطحی خاک (۰-۱۰ سانتی‌متر) به همراه دارد. این افت رطوبت همزمان با افزایش دمای خاک در همان عمق مشاهده شد، که مؤید نفوذ حرارت بالا به لایه‌های بالایی خاک است. در مقابل، لایه‌های عمیق‌تر خاک (بیش از ۱۰ سانتی‌متر) تأثیرات کمتری از نظر تغییرات رطوبت و دما پذیرفتند (شکل ۳). رطوبت اولیه خاک، عاملی تعیین‌کننده در تنظیم پروفیل حرارتی است. این رطوبت علاوه بر تسهیل توزیع یکنواخت انرژی در بافت خاک از طریق بهبود رسانایی حرارتی (Abu-Hamdeh & Reeder, 2000; Campbell et al., 1994)، با ارتقای ظرفیت گرمایی کل سیستم (DeVries, 1963)، مقاومت در برابر نوسانات دمایی را نیز افزایش می‌دهد.



شکل ۳. تاثیر آتش بر پروفیل رطوبتی خاک تیمارهای WCR، WRR، BSA و SAH

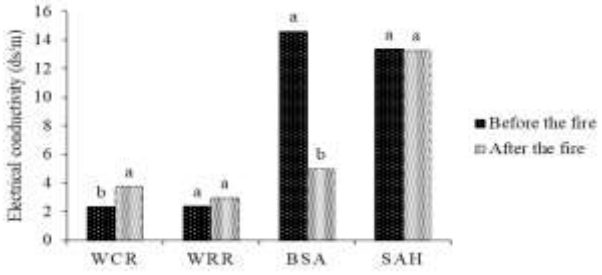
اثر آتش بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک

یافته‌های این پژوهش نشان داد که آتش‌سوزی اثرات متناقضی بر هدایت الکتریکی خاک داشته است؛ به‌طوری‌که در برخی تیمارها افزایش و در برخی دیگر کاهش معنی‌دار مشاهده شد. به طور مشخص، در تیمار WCR افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی ($p < 0/05$) خاک مشاهده شد، در حالی که در تیمار BSA، آتش‌سوزی کاهش معنی‌دار هدایت الکتریکی ($p < 0/01$) را به دنبال داشت (جدول ۲ و شکل ۴). نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که آتش‌سوزی می‌تواند هدایت الکتریکی خاک را تغییر دهد و این تغییرات در مطالعات مختلف یکسان نیست. به طور کلی، افزایش هدایت الکتریکی پس از آتش‌سوزی در بسیاری از بررسی‌ها گزارش شده است (Agbeshie et al., 2022; Certini, 2005; Heydari et al., 2016). برای نمونه، محسنی‌فر و محمدزاده (۱۴۰۲) افزایش معنی‌دار هدایت الکتریکی را از ۳/۳۶ به ۴/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر پس از سوزاندن بقایای گندم در مزارع شهرستان دزفول مشاهده کردند. با این حال، بخشی از نتایج مطالعات نشان می‌دهد که آتش‌سوزی همیشه به افزایش هدایت الکتریکی منجر نمی‌شود. علاوه بر این، Marfella et al (2025) نشان دادند که پنج سال پس از آتش‌سوزی، مناطق سوخته‌شده نسبت به مناطق شاهد دارای هدایت الکتریکی کمتری بودند. همچنین Brye (2006) در مطالعه‌ای بر علفزار، پس از ۱۲ سال سوزاندن سالانه، کاهش هدایت الکتریکی خاک را پس از آتش‌سوزی گزارش کرد. نتایج نشان می‌دهد که هدایت الکتریکی خاک تحت تأثیر ویژگی‌های اولیه خاک، شدت و مدت زمان حرارت‌دهی قرار دارد. در دماهای پایین، حرارت‌دهی می‌تواند به دلیل آزاد شدن یون‌های محلول ناشی از سوختن موادآلی و ترکیب خاکستر با خاک، باعث افزایش موقتی هدایت الکتریکی شود (Certini, 2005). اما احتمالاً در دماهای بالاتر، کاتیون‌های فلزی مانند سدیم، کلسیم، پتاسیم و منیزیم در اثر واکنش با ترکیبات سیلیکاتی به فازهای آلومینوسیلیکاتی پایدار و نامحلول تبدیل شده و از فاز محلول خارج می‌شوند. همچنین در این شرایط، کلرید سدیم ممکن است با کربن و اکسیژن واکنش داده و اکسید سدیم و تتراکلرید کربن تولید کند؛ ترکیبی که در مجاورت رطوبت محیط می‌تواند هیدرولیز شده و به اسید کلریدریک و دی‌اکسید کربن تبدیل شود. در مجموع، این فرآیندها با کاهش غلظت یون‌ها و نمک‌های محلول در خاک، موجب کاهش هدایت الکتریکی خاک می‌شوند (Li & Cong, 2017).

جدول ۲. تحلیل آماری تغییرات ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک در اثر آتش‌سوزی

		Paired t-test			
		WCR	WRR	BSA	SAH
EC (ds/m)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۰/۵۵۹۱۲	۰/۴۴۵۶۳	۰/۹۸۵۵۴	۰/۱۵۵۳۵
	t	−۴/۴۶۶	−۲/۱۴۰	۱۶/۹۶۳	۰/۵۹۵
	Sig. (2-tailed)	۰/۰۴۷*	۰/۱۶۶	۰/۰۰۳**	۰/۶۱۲
OC (%)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۰/۰۷۵۴۱	۰/۰۷۰۵۷	۰/۰۴۱۱۸۳	۰/۰۰۸۸۶
	t	۳/۵۹۷	۱/۱۳۹	۱۶/۵۷۳	۰/۳۷۸
	Sig. (2-tailed)	۰/۰۶۹	۰/۳۷۳	۰/۰۰۴ **	۰/۷۴۲
TN (%)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۰/۰۰۶۶۶	۰/۰۰۶۴۳	۰/۰۰۴۷۳	۰/۰۰۱
	t	۳/۵۵۵	۱/۲۵۷	۱۳/۸۰۵	۰/۰۰۰
	Sig. (2-tailed)	۰/۰۷۱	۰/۳۳۶	۰/۰۰۵**	۱/۰۰۰
BMR ($mg\ CO^2\text{-}C\ kg^{-1}soil\ 48h^{-1}$)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۰/۰۳۶۰۶	۰/۱۰۴۴۰	۰/۰۴۱۶۳	۰/۰۲۳۰۹
	t	۹/۱۲۷	۱/۱۶۱	۵/۶۸۶	−۰/۵۰۰
	Sig. (2-tailed)	۰/۰۱۲*	۰/۳۶۵	۰/۰۳۰*	۰/۶۶۷

**و * به‌ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ درصد و ۵ درصد و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

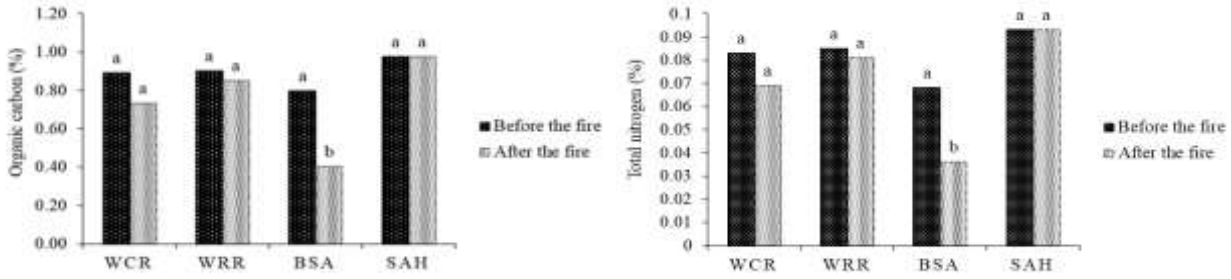


شکل ۴. مقایسه میانگین هدایت الکتریکی خاک قبل و بعد از آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف

در بررسی اثرات آتش‌سوزی، روند کاهشی در محتوای کربن آلی خاک در تمامی تیمارها مشاهده شد. با این حال، این کاهش تنها در تیمار BSA از نظر آماری معنی‌دار ($p < 0/01$) بود (جدول ۲ و شکل ۵). کاهش محتوای کربن آلی خاک پس از آتش‌سوزی‌های شدید می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد. از جمله این عوامل می‌توان به احتراق مستقیم ماده آلی خاک، افزایش نرخ معدنی شدن کربن به دنبال گرم شدن خاک، و همچنین تبخیر یا انحلال ترکیبات آلی فرار در محیط با pH قلیایی که توسط خاکستر غنی از مواد مغذی ایجاد می‌شود، اشاره کرد (Rodriguez-Cardona et al., 2020). میزان تغییرات کربن آلی خاک تحت تأثیر آتش‌سوزی، پدیده‌ای متغیر بوده و به عواملی چون میزان زیست‌توده موجود و رطوبت اولیه آن، و همچنین نوع، شدت و مدت آتش‌سوزی بستگی دارد (Reyes et al., 2015). فرآیند از دست رفت کربن آلی خاک از دمای تقریبی ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد آغاز شده و احتراق کامل آن در محدوده دمایی ۴۶۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (Badía et al., 2014). علاوه بر آن، تأثیر آتش‌سوزی بر محتوای کربن آلی خاک به شدت آتش‌سوزی نیز بستگی دارد؛ به گونه‌ای که مطالعات نشان داده‌اند آتش‌سوزی با شدت کم، تغییرات اندک یا حتی افزایش در کربن آلی خاک را به دنبال دارد، در حالی که آتش‌سوزی با شدت بالا می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه این عنصر شود (Caon et al., 2014). در همین راستا، Badía et al (2014) کاهش ۲۷/۹ درصدی کربن آلی را در لایه سطحی (۱ سانتی‌متر) خاک جنگل‌های کاج اسپانیا پس از یک آتش‌سوزی شدید گزارش کردند. در مقابل، نتایج مطالعات Kara & Bolat (2009) نشان‌دهنده افزایش کربن آلی خاک پس از سوزاندن بقایای گیاهی بود. این افزایش عمدتاً به دلیل خاکستر باقی‌مانده از فرآیند سوزاندن نسبت داده شده است. با این حال، لازم به ذکر است که بخش قابل توجهی از این کربن افزوده‌شده، به شکل بیوچار است که هرچند از نظر ترسیب کربن در خاک اهمیت دارد، اما تأثیر چندانی بر تغذیه موجودات زنده خاک و یا ویژگی‌های شیمیایی و زیستی آن ندارد (قریشی و همکاران، ۱۳۹۸).

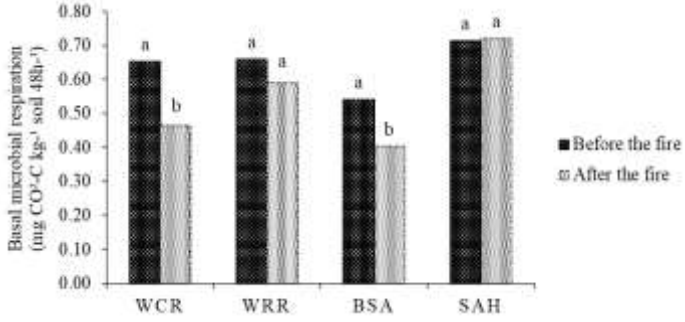
داده‌ها حاکی از آن است که آتش‌سوزی موجب کاهش نیتروژن کل خاک در تمامی تیمارها شده است، هرچند این کاهش تنها در تیمار BSA به سطح معنی‌داری آماری ($p < 0/01$) رسید (جدول ۲ و شکل ۵). این کاهش می‌تواند ناشی از خروج ترکیبات نیتروژنی خاک در اثر افزایش دما و احتراق باشد. به‌طور کلی، نیتروژن موجود در خاک، شامل آمونیوم، نیترات و نیتروژن آلی، در اثر حرارت بالای ناشی از

آتش‌سوزی می‌تواند به صورت گازهایی نظیر N_2، NOx و NH_3 متصاعد شده و از خاک خارج شود (Neary et al., 1999). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که آتش‌سوزی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه نیتروژن کل خاک به‌ویژه در لایه‌های سطحی خاک شود. برای مثال، Franco et al (2019)در جنگل‌های Pinus halepensis و Quercus ilex در اسپانیا دریافتند که آتش‌سوزی‌های جنگلی باعث کاهش نیتروژن کل خاک سطحی می‌شوند. به‌طور مشابه، Dzwonko et al (2015) نیز کاهش نیتروژن کل را در خاک هیستوسول Sapri-dystric در زیر پوشش جنگل مرطوب کاج اسکاتلندی[1]در لهستان، پس از یک آتش‌سوزی شدید گزارش کردند. در ایالات متحده، Hahn et al (2021) در جنگل Fishburn در ویرجینیا نشان دادند که یک آتش‌سوزی تجویز شده با شدت کم تا متوسط، منجر به کاهش ۳۳ درصد در میزان نیتروژن کل خاک شد.



شکل ۵. مقایسه میانگین نیتروژن کل خاک قبل و بعد از آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف

نتایج جدول ۲ و شکل ۶ نشان داد که آتش‌سوزی موجب کاهش قابل توجه تنفس میکروبی پایه خاک در تیمارهای WCR و BSA شده است ($p < 0/05$)؛ این کاهش احتمالاً در اثر آتش و به‌علت نابودی بخش قابل توجهی از ریزجانداران خاک رخ داده است (Certini, 2005). Singh et al (2021) در مطالعه‌ای با عنوان اثر آتش‌سوزی جنگل بر زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیمی خاک در جنگل‌های بلوط و کاج هیمالیا نشان دادند که پس از آتش‌سوزی، تنفس پایه خاک به طور معنی‌داری در جنگل‌های بلوط و کاج کاهش می‌یابد. کاهش SBR در جنگل بلوط بین ۱۷/۶ تا ۳۱/۸ درصد و در جنگل کاج بین ۵۳/۳ تا ۶۱/۳ درصد گزارش شده است که بسته به منطقه مورد مطالعه متفاوت است. برخی از پژوهشگران دیگری نیز کاهش تنفس خاک را پس از آتش‌سوزی در جنگل‌ها گزارش کرده‌اند (Kooch et al., 2024; Zhou et al., 2023). از سوی دیگر، Plaza-Álvarez et al (2017) در بررسی اثر آتش‌سوزی تجویز شده بر ویژگی‌های خاک در جنگل‌های مدیترانه‌ای کاج سیاه اسپانیایی، هیچ تفاوت معنی‌داری در نرخ تنفس خاک بین مناطق سوخته و کنترل (بلا فاصله بعد از آتش) مشاهده نکردند.



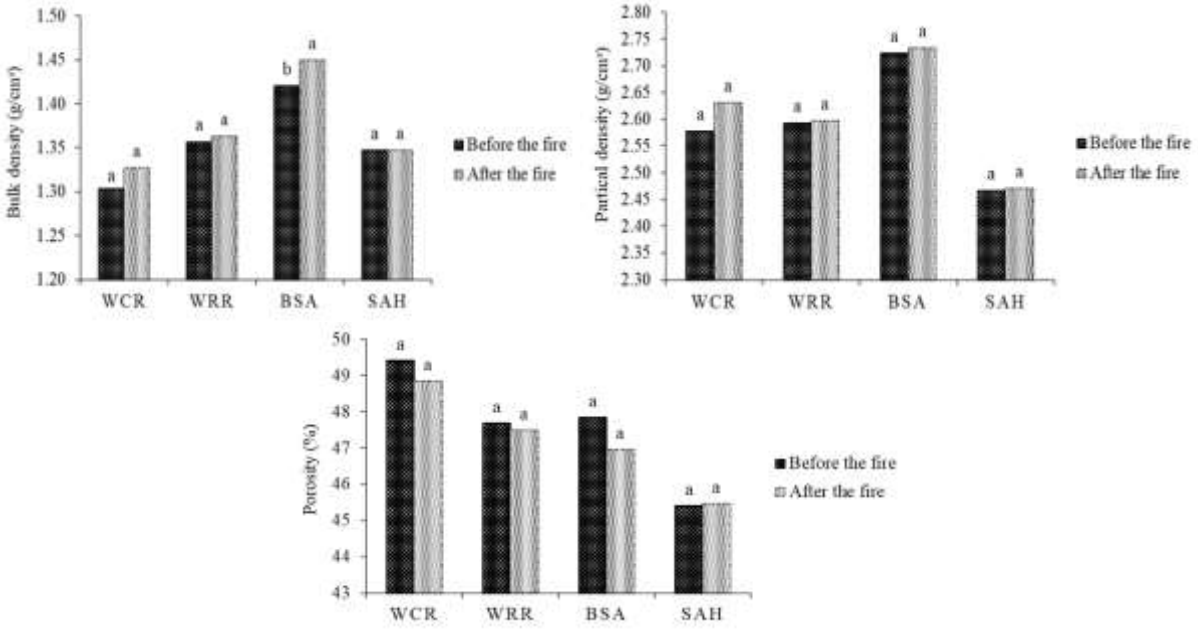
شکل ۶. مقایسه میانگین تنفس میکروبی پایه خاک قبل و بعد از آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف

اثر آتش بر ویژگی‌های فیزیکی خاک

از میان چهار تیمار مورد بررسی، تنها در تیمار BSA، تغییرات جرم مخصوص ظاهری خاک پس از آتش‌سوزی از نظر آماری معنی‌دار ($p < 0/05$) بود (جدول ۳ و شکل ۷). با این حال، نتایج پژوهش نشان داد که آتش‌سوزی علی‌رغم ایجاد افزایش جزئی در جرم مخصوص حقیقی خاک، تأثیر آماری معنی‌داری بر این ویژگی در هیچ‌یک از تیمارهای دیگر نداشته است (جدول ۳ و شکل ۷). در رابطه با تخلخل خاک نیز، نتایج نشان داد که آتش‌سوزی با وجود ایجاد کاهش اندک، تأثیر معنی‌داری بر تخلخل خاک در هیچ‌یک از تیمارهای مورد مطالعه

1. Pinus sylvestris

نداشته است (جدول ۳ و شکل ۷). این یافته‌ها با نتایج برخی مطالعات که افزایش جرم مخصوص ظاهری را پس از آتش‌سوزی گزارش کرده بودند، همسو است (Heydari et al., 2016; Kooch et al., 2024; Tadesse, 2016)؛ برای نمونه، Fadaei et al (2022) افزایش جرم مخصوص ظاهری از ۱/۶۲ به ۱/۷۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و همچنین افزایش جرم مخصوص حقیقی از ۲/۸۱ به ۲/۹۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب و کاهش تخلخل خاک را گزارش نمودند. همچنین Hubbert et al (2006) افزایش ۲۶ درصدی جرم مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل خاک را مشاهده کردند. به‌طور کلی، علت افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در اثر آتش‌سوزی را می‌توان ناشی از تخریب ساختار و منافذ خاک همراه با کاهش مواد آلی دانست (Heydari et al., 2016).



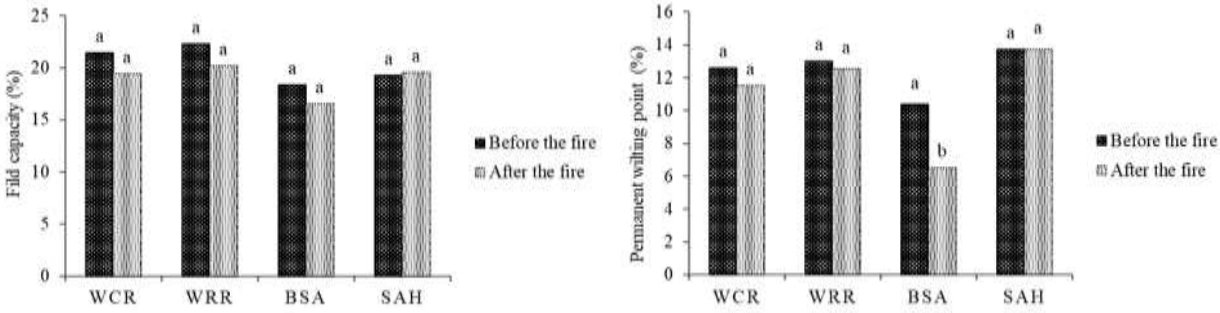
شکل ۷. مقایسه میانگین جرم مخصوص ظاهری، جرم مخصوص حقیقی و تخلخل خاک قبل و بعد از آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف

جدول ۳. تحلیل آماری تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک در اثر آتش‌سوزی

		Paired t-test			
		WCR	WRR	BSA	SAH
Bulk density (g/cm³)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۰/۰۱۵۲۸	۰/۰۰۵۷۷	۰/۰۱۰۰۰	۰/۰۱۷۳۲
	t	−۲/۶۴۶	−۲/۰۰۰	−۵/۱۹۶	۰/۰۰۰
	Sig. (2-tailed)	۰/۱۱۸	۰/۱۸۴	۰/۰۳۵*	۱/۰۰۰
Partical density(g/cm³)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۰/۰۲۸۸۷	۰/۰۰۵۷۷	۰/۰۴۳۵۹	۰/۰۳۵۱۲
	t	−۱/۰۰۰	−۱/۰۰۰	−۰/۳۹۷	−۰/۱۶۴
	Sig. (2-tailed)	۰/۴۲۳	۰/۴۲۳	۰/۷۲۹	۰/۸۸۵
Porosity (%)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۰/۸۹۹۳۲	۰/۱۹۲۳۹	۰/۹۴۵۶۷	۱/۴۰۰۴۷
	t	۱/۱۰۲	۱/۷۰۳	۱/۶۴۱	−۰/۰۸۷
	Sig. (2-tailed)	۰/۳۸۵	۰/۲۳۱	۰/۲۴۲	۰/۹۳۹
FC (%)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۱/۵۹۴۷۸	۱/۶۱۶۵۸	۱/۴۴۳۳۸	۰/۶۸۰۶۹
	t	۲/۲۴۵	۲/۲۱۴	۲/۲۰۰	−۰/۵۹۴
	Sig. (2-tailed)	۰/۱۵۴	۰/۱۵۷	۰/۱۵۹	۰/۶۱۳
PWP (%)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۰/۶۵۵۷۴	۰/۲۳۰۹۴	۰/۹۱۶۵۲	۰/۲۶۴۵۸
	t	۲/۹۰۵	۳/۵۰۰	۷/۳۷۰	۰/۰۰۰
	Sig. (2-tailed)	۰/۱۰۱	۰/۰۷۳	۰/۰۱۸*	۱/۰۰۰
I (mm/h)	df	۲	۲	۲	۲
	Standard deviation	۴/۳۱۵۰۰	۸/۰۴۵۵۰	۱/۰۵۹۸۳	۰/۰۱۵۲۸
	t	۶/۸۲۷	۱/۴۶۸	۴/۹۷۹	۰/۳۷۸
	Sig. (2-tailed)	۰/۰۲۱*	۰/۲۸۰	۰/۰۳۸*	۰/۷۴۲

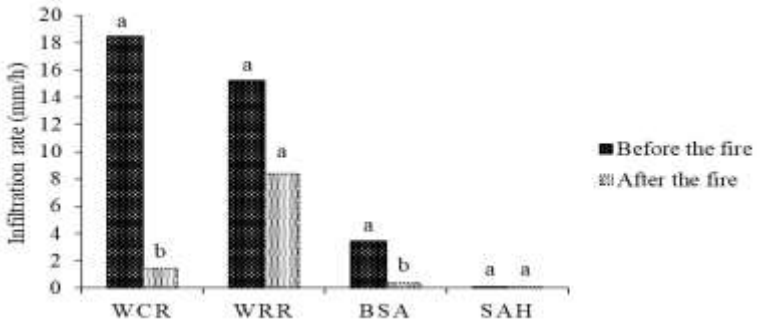
**و * به‌ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ درصد و ۵ درصد و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

نتایج حاصل از بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نشان داد که وقوع آتش‌سوزی منجر به کاهش میانگین ظرفیت زراعی در تمامی تیمارها شده است؛ با این حال، این کاهش از نظر آماری در هیچ‌یک از تیمارهای مورد مطالعه معنی‌دار نبود (جدول ۳ و شکل ۸). در رابطه با رطوبت نقطه پژمردگی، روند کاهشی در اکثر تیمارها مشاهده شد، اما این کاهش تنها در تیمار BSA از نظر آماری معنی‌دار برآورد گردید (جدول ۳ و شکل ۸). این کاهش در پارامترهای رطوبتی می‌تواند ناشی از تخریب ساختار خاک، تجزیه ماده آلی و انسداد منافذ باشد که منجر به افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل و در نتیجه کاهش ظرفیت نگهداری آب می‌گردد (Heydari et al., 2016). Granged et al (2011) کاهش ۴۴ درصدی رطوبت اشباع خاک را پس از وقوع یک آتش‌سوزی شدید گزارش کردند. Tadesse (2016) نیز در مطالعاتی مستقل کاهش ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی و ظرفیت نگهداری آب موجود در خاک‌های تحت تأثیر آتش‌سوزی را گزارش کردند.ابراهیمی محمدی و همکاران (۱۳۹۵) نیز، در مطالعات خود بر روی بررسی تاثیر آتش بر ویژگی‌های هیدرولوژی و فرسایشی خاک در حوضه آبخیز دریاچه زریبار کاهش ۴۶ درصدی ذخیره رطوبتی خاک را در شیب‌های صفر تا ۳۰ درصد و کاهش ۶ درصدی را در شیب‌های ۳۰ تا ۶۰ درصد گزارش کردند. همچنین آنها عنوان نمودند که آتش با افزایش آبگریزی خاک موجب افزایش معنی‌دار فرسایش در هر دو کلاس شیب و افزایش معنی‌دار رسوب در شیب‌های زیر ۳۰ درصد می‌شود. برخلاف سایر پژوهش‌ها، نتایج Are et al (2009) نشان داد که اعمال آتش در خاک‌های آلفیسول، تأثیر معنی‌داری بر میزان آب دردسترس ندارد.



شکل ۸. مقایسه میانگین رطوبت زراعی و رطوبت نقطه پژمردگی خاک قبل و بعد از آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف

مقایسه میانگین‌ها نشان داد آتش‌سوزی موجب کاهش معنی‌دار ($p < 0/05$) نرخ نفوذ نهایی خاک در تیمارهای WCR و BSA (به ترتیب از ۱۸/۴۵ به ۱/۴۴ میلی‌متر بر ساعت و ۳/۴۲ به ۰/۳۷ میلی‌متر بر ساعت) شده است (جدول ۳ و شکل ۹). این کاهش نفوذپذیری ناشی از تشکیل لایه‌های آبگریز بر روی ذرات معدنی در ماتریکس خاک در جریان احتراق مواد آلی است (Mataix-Solera et al. 2011). محسنی‌فر و محمدزاده (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای به بررسی اثر سوزاندن کاه و کلش گندم بر آبگریزی و برخی ویژگی‌های خاک در مزارع شهرستان دزفول پرداختند. آنها کاهش نفوذپذیری خاک را پس از آتش‌سوزی از ۲۱/۲ به ۷/۵۴ میلی‌متر بر ساعت گزارش کردند. همچنین آنهادریافتند که با گذشت ۱ ماه پس از آتش‌سوزی میزان نفوذ به ۱۱/۲۱ میلی‌متر بر ساعت افزایش یافت. Fadaei et al (2022) نیز در مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی واکنش ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در جنگل‌های هیرکانی ایران به رویدادهای آتش‌سوزی جنگل، کاهش سرعت نفوذ اولیه، نهایی و متوسط به ترتیب از ۱۴۵/۸۵، ۵/۳۷ و ۲۶/۱۳ میلی‌متر بر دقیقه به ۳۷/۰۵، ۱/۸ و ۵/۳۶ میلی‌متر بر دقیقه را پس از وقوع آتش‌سوزی گزارش کردند.



شکل ۹. مقایسه میانگین نرخ نفوذ نهایی خاک قبل و بعد از آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف

بافت خاک در تیمارهای WCR، WRR و SAH پس از وقوع آتش‌سوزی بدون تغییر باقی مانده و تنها در تیمار BSA از لومی سیلتی به لوم تغییر یافته است (جدول ۴). می‌توان دلیل درشت شدن بافت خاک پس از آتش‌سوزی را، تبدیل ذرات ریزتر ناشی از تخریب و فروپاشی ساختار رس، به ذرات بزرگتر عنوان نمود (Alcañiz et al., 2018). در همین راستا، شریفی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای به بررسی اثر سه سال متوالی آتش‌سوزی بر برخی از ویژگی‌های یک خاک جنگلی در اطراف دریاچه زریوار مریوان پرداختند. نتایج حاصل از بررسی بافت خاک در هر دو منطقه‌ی سوخته و شاهد، و در دو عمق مورد مطالعه، نشان داد که بافت کلی خاک در تمامی نمونه‌ها بدون تغییر باقی مانده است. با این حال، در منطقه‌ی سوخته‌شده، درصد رس در اعماق ۰ تا ۵ و ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر به ترتیب ۹/۱ و ۴/۰ درصد کمتر از منطقه‌ی شاهد بود. در مقابل، درصد شن در همین اعماق به ترتیب ۸/۸ و ۵/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت.

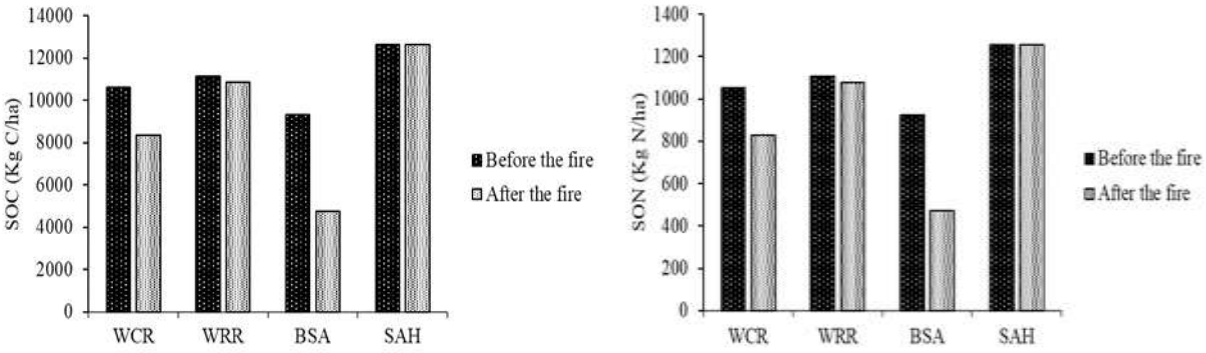
جدول ۴. تغییرات بافت خاک قبل و بعد از آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف

	Soil texture			
	WCR	**WRR**	**BSA**	**SAH**
Before the fire	Loam	Loam	Silt-Loam	Loam
After the fire	Loam	Loam	Loam	Loam

نتایج به دست آمده از مدل DNDC نشان می‌دهد که آتش‌سوزی نه‌تنها سبب کاهش فوری ذخایر کربن و نیتروژن خاک می‌شود، بلکه بر تعادل چرخه کربن و نیتروژن خاک تا یکسال پس از آتش‌سوزی تأثیر منفی گذاشته و ممکن است سال‌ها طول بکشد تا مقدار کربن و نیتروژن خاک به شرایط اولیه بازگردد (شکل ۱۰). در همین راستا، مشاهدات میدانی نیز مؤید این نتایج هستند؛ به‌طوری که Granged et al (2011) در بررسی خاک‌های مناطق مدیترانه‌ای، کاهش محتوای ماده آلی را پس از آتش‌سوزی گزارش کردند؛ یافته‌های آن‌ها نشان داد که تا یک سال پس از رویداد، تغییرات چندانی در ماده آلی رخ نمی‌دهد و تنها از سال سوم افزایشی جزئی مشاهده می‌شود. به طور مشابه، صادقی‌فر و همکاران (۱۳۹۵) نیز دریافتند که کاهش ماده آلی و نیتروژن خاک در جنگل‌های زاگرس ایران، حتی پس از گذشت یک دهه، همچنان در سطوح پایین‌تر از شرایط پیش از آتش‌سوزی باقی مانده است.

اکوسیستم‌ها در مواجهه با رویدادهای آتش‌سوزی، طیف گسترده‌ای از سطوح سازگاری و تاب‌آوری را از خود بروز می‌دهند (McLauchlan et al., 2020)؛ چرا که مسیرهای توالی پوشش گیاهی پس از آتش‌سوزی، محصول برهم‌کنش‌های پیچیده میان شدت و وسعت آتش، شرایط اقلیمی پیش و پس از رویداد، تاریخچه آتش‌سوزی‌های گذشته و ویژگی‌های استراتژیک گونه‌ها جهت بقا و استقرار مجدد است (Davis et al., 2018; Johnstone et al., 2016). در این میان، شدت آتش‌سوزی عاملی تعیین‌کننده در میزان آسیب به جوامع میکروبی خاک، به‌ویژه گروه‌های هتروتروف و میکوریزا محسوب می‌شود (Whitman et al., 2019)؛ پدیده‌ای که می‌تواند پویایی فرآیندهای میکروبی–اکوسیستمی و مسیر بازیابی پوشش گیاهی را به‌طور بنیادین دگرگون سازد. تداوم پاسخ‌های زیست‌توده و تغییرات در تنوع میکروبی بسته به نوع بیوم، شدت آتش و میزان تخریب افق آلی، می‌تواند تا بیش از یک دهه تداوم یابد (Dooley & Treseder, 2012; Pressler et al., 2018). علاوه بر این، تعامل هم‌افزای آتش‌سوزی با سایر تنش‌های محیطی (نظیر خشکسالی، آسیب‌های بادی، شیوع آفات و رانش زمین)، می‌تواند ساختار فیزیکوشیمیایی خاک و تعاملات اکولوژیکی آتی را تحت تأثیر قرار دهد (McLauchlan et al., 2020). پاسخ خاک به پدیده آتش‌سوزی ماهیتی چندمقیاسی داشته و به متغیرهای مورد بررسی وابسته است؛ به‌طوری‌که در حالی که تغییرات در ترکیب میکروبی و زیست‌توده در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (از زیر یک سال تا یک دهه) قابل مشاهده است (Dooley & Treseder, 2012)، فرآیند تشکیل زغال‌چوب می‌تواند اثراتی ماندگار بر ذخایر کربن خاک در بازه‌های زمانی بسیار طولانی (صد تا هزار سال) بر جای بگذارد (He et al., 2016). افزون بر این، پویایی کربن خاک در بیوم‌های مختلف رفتاری متمایز نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که بازگشت ذخایر کربن در علفزارهای معتدل سریع، در جنگل‌های شمالی بسیار کند و در برخی پیت‌زارها ممکن است به‌صورت دائمی مفقود گردد (Harden et al., 2000). در نهایت، میزان تغییرات مواد مغذی تحت تأثیر تقاطع ویژگی‌های اولیه خاک، شدت آتش و نرخ بازگشت پوشش گیاهی قرار دارد (Godwin et al., 2017; Kranabetter et al., 2016) که این امر می‌تواند منجر به بازآرایی روابط گیاه–میکروب و ساختار جوامع میکروبی گردد (Kardol et al., 2013). به‌طور کلی، فرآیند بازیابی ویژگی‌های خاک پس از آتش‌سوزی در اکوسیستم‌های گرم و خشک با محدودیت‌های جدی مواجه است. کمبود رطوبت، کاهش ورود مواد آلی و اختلال در فعالیت‌های میکروبی، روند احیای ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را کُند کرده و مانع از بازگشت سریع آن به شرایط پیش از حادثه می‌گردد. همچنین، حذف پوشش گیاهی و بقایای سطحی، با تشدید فرآیندهای فرسایش و کاهش پایداری خاک، از طریق ایجاد بازخوردهای منفی میان خاک و پوشش گیاهی، روند بازسازی

اکوسیستم را با تأخیر مواجه می‌سازد. در نتیجه، آثار آتش‌سوزی می‌تواند برای سالیان متمادی بر عملکرد و پایداری این اکوسیستم‌ها اثرگذار باشد (McLauchlan et al., 2020). از این رو، اتخاذ راهکارهای مدیریتی هوشمندانه به‌منظور کاهش اختلالات پس از آتش‌سوزی، کنترل فرسایش، حفظ منابع آلی خاک و تسهیل استقرار مجدد پوشش گیاهی، برای تسریع روند احیا و بازیابی عملکرد اکولوژیکی اکوسیستم‌های آسیب‌دیده ضرورتی انکارناپذیر است (Francos et al., 2024).



شکل ۱۰. بررسی تغییرات کربن آلی و نیتروژن آلی خاک به مدت یک‌سال قبل و بعد از آتش‌سوزی در تیمارهای مختلف با استفاده از مدل DNDC

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که آتش‌سوزی به‌عنوان یک اختلال اکولوژیکی، تأثیرات معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک بر جای می‌گذارد. نتایج پژوهش نشان داد که میزان این دگرگونی‌ها تابع شدت و مدت‌زمان آتش‌سوزی و همچنین ویژگی‌های اولیه خاک می‌باشد؛ به‌طوری‌که تیمار BSA، با داشتن بافت خاک سبک و ماده آلی کم، به‌دلیل مقاومت حرارتی پایین‌تر، بیشترین میزان کاهش را در مقادیر کربن آلی، نیتروژن کل، تنفس میکروبی و رطوبت نقطه پژمردگی نشان داد. همچنین، افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در تیمار BSA، مؤید تخریب ساختمان خاک است که این تخریب ساختمان خاک بسیاری از ویژگی‌های تهویه‌ای و نقل و انتقالات آب و مواد غذایی را در سطح و مقطع پروفیلی خاک مختل می‌نماید. اگرچه تغییراتی در سایر ویژگی‌های خاک (از جمله کاهش ظرفیت زراعی و تخلخل خاک) مشاهده شد، اما این تغییرات از نظر آماری معنی‌دار نبودند. روند تغییرات EC دو مسیر متمایز را نشان داد: در تیمار BSA، کاهش EC ناشی از واکنش‌های شیمیایی شدید و تشکیل فازهای پایدار آلومینوسیلیکاتی و تثبیت کاتیون‌ها بود، در حالی که در تیمار WCR، افزایش EC بر اثر آزادسازی کاتیون‌های قابل‌تبادل و تجمع نمک‌های حاصل از تجزیه ماده آلی و خاکستر رخ داد. در مقابل، در تیمارهای WRR و SAH، به دلیل شدت و مدت‌زمان پایین‌تر آتش‌سوزی نسبت به سایر تیمارها، تغییرات در ویژگی‌های خاک محدود و از نظر آماری غیرمعنی‌دار گزارش شد. همچنین، شبیه‌سازی با مدل DNDC نشان داد که این تغییرات در ویژگی‌های خاک، پیامدهای بلندمدت و مخربی بر ذخایر کربن و نیتروژن خواهد داشت. در نهایت، با توجه به حساسیت خاک به آتش‌سوزی، مدیریت پایدار اراضی از طریق ارتقای ماده آلی، بهبود ساختمان خاک و به‌کارگیری مدیریت‌های اصلاحی مناسب پس از آتش‌سوزی، راهکاری کلیدی برای افزایش تاب‌آوری اکوسیستم در برابر تنش‌های حرارتی و جلوگیری از تخریب‌های زیست‌محیطی است. در مجموع توجه به مقوله‌ی دمای خاک و تغییرات آن در قالب پروفیل حرارتی توامان با پروفیل رطوبتی خاک از اهمیت شایانی برخوردار است و قادر است بسیاری از ویژگی‌ها و رفتارهای خاک را تحت تاثیر خود قرار دهد؛ این موضوع با تاکید بر این نکته است که در بیشتر مواقع ویژگی‌ها و تغییرات حرارتی خاک ملحوظ نمی‌شود در حالیکه نتایج این پژوهش به‌وضوح جایگاه عامل حرارتی و تاثیرات آن بر روی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی را نشان داد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانهٔ شماره SCU.AS1404.364 انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیهٔ مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در این مقاله از هیچ نوع فناوری مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده نشده است.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به خاطر حمایت مالی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان از جعل داده‌ها، تحریف، سرقت ادبی و هرگونه تخلف اجتناب کردند. عدم وجود مشابهت علمی و نگارشی از طریق تاییدیه شماره شماره: ۹۱۱۲۰۲۴۲۹۸۲ /ت تاریخ: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷ ساماه سمیم نور تایید شده است.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

ابراهیمی محمدی، شیرکو ؛ آذری، محمود و منوچهری، اسماعیل . (۱۳۹۵). اثرات آتش سوزی بر خصوصیات خاک، فرسایش و رژیم هیدرولوژی حوضه آبخیز دریاچه زریبار. آب و خاک, ۳۰(۲)، ۶۱۸-۶۳۱.

روزنامه اطلاعات. (۱۴۰۳). آتش‌سوزی جنگل‌ها در ایران: آمار و نحوه‌ی کاهش خسارت .روزنامه اطلاعات. https://www.ettelaat.com/news/41214/آتش-سوزی-جنگل-ها-در-ایران-آمار-و-نحوه-کاهش-خسارت.

شریفی، زاهد؛ نظری، چیاکو؛ محمدی سمانی،کیومرث و شعانیان، نقی. (۱۳۹۴). اثر سه سال آتش‌سوزی متوالی بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی یک خاک جنگلی در اطراف دریاچه زریوار مریوان. تحقیقات آب و خاک ایران, ۴۶(۳)، ۵۵۵-۵۶۵.

صادقی فر، مصطفی؛ بهشتی آل آقا ،علی و پوررضا، مرتضی. (۱۳۹۵). تغییرپذیری عناصر غذایی خاک و پایداری خاکدانه در زمان‌های مختلف پس از آتش سوزی در جنگل‌های زاگرس (مطالعه موردی: جنگل‌های پاوه) بوم شناسی جنگل‌های ایران (علمی- پژوهشی) ۴ (۸) :۲۷-۱۹.

عامری خواه، هادی و چرم، مصطفی. (۱۳۸۵). بررسی کارایی مدل DNDC در برآورد نقش خاکها و بخش کشاورزی در تولید و تثبیت گازهای گلخانه ای،همایش خاک، محیط زیست و توسعه پایدار،کرج،https://civilica.com/doc/10475

قریشی، فاطمه ؛ لکزیان، امیر ؛ فتوت، امیر و ذبیحی، حمیدرضا. (۱۳۹۸). اثر مدیریت‌های مختلف بقایای گیاهی گندم و چغندرقند بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک. پژوهشهای زراعی ایران, ۱۷(۳)، ۳۵۹-۳۷۲.

محسنی‌فر، کامران و محمدزاده، عاطفه . (۱۴۰۲). اثر سوزاندن کاه و کلش گندم برآب‌گریزی و برخی ویژگی‌های خاک در مزارع شهرستان دزفول. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک, ۳۰(۳)، ۸۷-۱۰۵.

منجزی،نسیم. (۱۳۹۹). مقایسه روش‌های برداشت سبز و سوخته نیشکر و بررسی اثرات زیست محیطی آتش زدن مزارع در برداشت سوخته نیشکر در استان خوزستان. نشریه محیط زیست طبیعی, ۷۳(۲)، ۳۸۳-۳۹۶.

نیکنام، لیلی؛ امامی، حجت و خراسانی، رضا. (۱۴۰۰). تاثیر آتش سوزی بر ویژگی‌های فیزیکی خاک در کاربری‌های مرتع، کشاورزی و جنگل در استان گلستان، *نشریه تحقیقات کاربردی خاک*، ۹(۱)، ۱-۱۳.

REFERENCES

Abu-Hamdeh, N. H., & Reeder, R. C. (2000). Soil Thermal Conductivity Effects of Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter. *Soil Science Society of America Journal*, *64*(4), 1285-1290.

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.

Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Sci Total Environ*, *613-614*, 944-957.

Amerikhah, H & Charm, M. (2006). Investigation of the efficiency of the DNDC model in estimating the role of soils and the agricultural sector in the production and fixation of greenhouse gases, Conference on Soil, Environment and Sustainable Development, Karaj, https://civilica.com/doc/10475. (In Persian).

Anderson, J. P. E. (1982). Soil Respiration. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 831-871).

Are, K., Oluwatosin, G., Olateju, D., & Adebayo Olubukola, O. (2009). Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, *103*, 4-10.

Badía, D., Martí, C., Aguirre, A. J., Aznar, J. M., González-Pérez, J. A., De la Rosa, J. M., 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.

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk Density. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 363-375).

Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen—Total. In Methods of Soil Analysis (pp. 595-624). https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31

Bronick, C. J., & Lal ,R. (2005). Soil Structure and Management: A Review. *Geoderma*, *124*, 3-22.

Brye, K. R. (2006). Soil physiochemical changes following 12 years of annual burning in a humid–subtropical tallgrass prairie: a hypothesis. *Acta Oecologica*, *30*(3), 407-413.

Caldeira-Pires, A., Benoist, A., Luz, S., Silverio, V., Silveira, C., & Machado, F. (2018). Implications of removing straw from soil for bioenergy: An LCA of ethanol production using total sugarcane biomass. *Journal of Cleaner Production*, *181*.

Campbell, G., Jungbauer, J., Bidlake, W., & Hungerford, R. (1994). Predicting the Effect of Temperature on Soil Thermal Conductivity. Soil Science, 158.

Caon, L., Vallejo, R., Ritsema, C., & Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, *139*.

Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, *143*(1), 1-10.

Certini, G., Moya, D., Lucas-Borja, M. E., & Mastrolonardo, G. (2021). The impact of fire on soil-dwelling biota: A review. *Forest Ecology and Management*, *488*, 118989.

Dalias, P., Hadjisterkotis, E., Omirou, M., Michaelidou, O., Ioannides, I. M., Neocleous, D., & Christou, A. (2024). Wildfire Effects on the Soil Respiration and Bacterial Microbiota Composition in Mediterranean-Type Ecosystems. *Fire*, *7* .(۷)

Davis, K. T., Higuera, P. E., & Sala, A. (2018). Anticipating fire-mediated im- pacts of climate change using a demographic framework. Functional Ecology, 32, 1729–1745.

DeBano, L. F. (1981). Water repellent soils: a state-of-the-art.

DeVries, D. A. (1963). Thermal properties of soils. In W. R. van Wijk (Ed.), Physics of plant environment (pp. 210–235). North-Holland Publishing Co.

Dhungana, B. P., Chhetri, V. T., Baniya, C. B., Sharma, S. P., Ghimire, P., & Vista, S. P. (2024). Post-fire Effects on Soil Properties in High altitude Mixed-conifer Forest of Nepal. *Trees, Forests and People*, *17*,, 100633.

DiTomaso, J., Brooks, M., Allen, E., Minnich, R., Rice, P., & Kyser, G. U. Y. (2006). Control of Invasive Weeds with Prescribed Burning 1. *Weed Technology - WEED TECHNOL*, *20*, 535-548.

Dooley, S. R., & Treseder, K. K. (2012). The effect of fire on microbial bio- mass: A meta-analysis of field studies. Biogeochemistry, 109, 49–61.

Dzwonko, Z., Loster, S., & Gawroński, 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.

Ebrahimi Mohammadi,S , Azari,M & Manoochehri,E . (2016). Effects of Fire on Soil Properties, Erosion and Hydrologic Regime of Zrebar Lake Watershed. *Water and Soil*, *30*(2), 618-631. (In Persian).

Fadaei, Z., Kavian, A., Solaimani, K., Sarabsoreh, L. Z., Kalehhouei, M., Zuazo, V. H., & Rodrigo-Comino, J. (2022). The Response of Soil Physicochemical Properties in the Hyrcanian Forests of Iran to Forest Fire Events. *Fire, 5(6).*

Francos, M.; Colino-Prieto, F.; Sánchez-García, C. How Mediterranean Ecosystem Deals with Wildfire Impact on Soil Ecosystem Services and Functions: A Review. Land 2024, 13, 407.

Francos, M., Stefanuto, E. B., Úbeda, X., & Pereira, P. (2019). Long-term impact of prescribed fire on soil chemical properties in a wildland-urban interface. Northeastern Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment*, *689*, 305-311.

Francos, M., & Úbeda, X. (2021). Prescribed fire management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *21*, 100250.

Gee, G. W., & Bauder, J. W .(1986) .Particle-size Analysis. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 383-411).

Ghoreishi,F , Lakzian,A , Fotovat,A & Zabihi,H R. (2019). Effect of Different Management of Wheat and Sugar Beet Residues on Some Chemical and Biological Properties of Soil. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *17*(3), 359-372. (In Persian).

Go, A. W., & Conag, A. T. (2019). Utilizing sugarcane leaves/straws as source of bioenergy in the Philippines: A case in the Visayas Region. *Renewable Energy*, *132*, 1230-1237.

Godwin, D. R., Kobziar, L. N., & Robertson, K. M. (2017). Effects of fire frequency and soil temperature on soil CO2 efflux rates in old-field pine-grassland forests. Forests, 8.

Gonzalez-pelayo, O., Prats, S., Van den Elsen, E., Malvar, M., Ritsema, C., Bautista, S., & Keizer, J. (2023). The effects of wildfire frequency on post-fire soil surface water dynamics. *European Journal of Forest Research*, *143*.

Granged, A. J. P., Zavala, L. M., Jordán, A., & Bárcenas-Moreno, G. (2011). Post-fire evolution of soil properties and vegetation cover in a Mediterranean heathland after experimental burning: A 3-year study. *Geoderma*, *164*(1), 85-94.

Gui, H., Wang, J., Hu, M., Zhou, Z., & Wan, S. (2023). Impacts of fire on soil respiration and its components: A global meta-analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, *336*, 109496.

Hahn, G. E., Coates, T. A., & Aust, W. M. (2021). Soil Chemistry following Single-Entry, Dormant Season Prescribed Fires in the Ridge and Valley Province of Virginia, USA. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *52*(17), 2065-2073.

Harden, J. W., Trumbore, S. E., Stocks, B. J., Hirsch, A., Gower, S. T,. O'Neill, K. P., & Kasischke, E. S. (2000). The role of fire in the bo- real carbon budget. Global Change Biology, 6, 174–184.

He, Y., Trumbore, S. E., Torn, M. S., Harden, J. W., Vaughn, L. J. S., Allison, S. D., & Randerson, J. T. (2016). Radiocarbon constraints imply re- duced carbon uptake by soils during the 21st century. Science, 353, 1419–1424.

Heydari, M., Rostamy, A., Najafi, F., & Dey, D. (2016). Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (Quercus brantii Lindl.) forests in Iran. *Journal of Forestry Research*, *28*.

Hiers, J. K., O'Brien, J. J., Varner, J. M., Butler, B. W., Dickinson, M., Furman, J., Gallagher, M., Godwin, D., Goodrick, S. L., Hood, S. M., Hudak, A., Kobziar, L. N., Linn, R., Loudermilk, E. L., McCaffrey, S., Robertson, K., Rowell, E. M., Skowronski, N., Watts, A. C., & Yedinak, K. M. (2020). Prescribed fire science: the case for a refined research agenda. *Fire Ecology*, *16*(1), 11.

https://www.ettelaat.com/news/41214/%D8%A2%D8%AA%D8%B4-%D8%B3%D9%88%D8%B2%DB%8C-%D8%AC%D9%86%DA%AF%D9%84-%D9%87%D8%A7-%D8%AF%D8%B1-%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86-%D8%A2%D9%85%D8%A7%D8%B1-%D9%88-%D9%86%D8%AD%D9%88%D9%87-%DA%A9%D8%A7%D9%87%D8%B4-%D8%AE%D8%B3%D8%A7%D8%B1%D8%AA(In Persian).

Hubbert, K. R., Preisler, H. K., Wohlgemuth, P. M., Graham, R. C., & Narog, M. G. (2006). Prescribed burning effects on soil physical properties and soil water repellency in a steep chaparral watershed, southern California, USA. *Geoderma*, *130*(3), 284-298.

Huffman, E., MacDonald, L., & Stednick, J. (2001). Strength and Persistence of Fire-Induced Soil Hydrophobicity Under Ponderosa and Lodgepole Pine, Colorado Front Range. *Hydrological Processes - HYDROL PROCESS*, *15*, 2877-2892

Johnson, D. B., Yedinak, K. M., Sulman, B. N., Berry, T. D., Kruger, K., & Whitman, T. (2024). Effects of fire and fire-induced changes in soil properties on post-burn soil respiration. *Fire Ecology*, *20*(1), 90.

Johnstone, J. F., Allen, C. D., Franklin, J. F., Frelich, L. E., Harvey, B. J,. Higuera, P. E., … Turner, M. G. (2016). Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience. Frontiers in Ecology and the Environment, 14, 369–378.

Kara, Ö., & Bolat, İ. (2009). Short-term effects of wildfire on microbial biomass and abundance in black pine plantation soils in Turkey. *Ecological Indicators*, *9*, 1151-1155.

Kardol, P., De Deyn, G. B., Laliberte, E., Mariotte, P., & Hawkes, C. V. (2013). Biotic plant-soil feedbacks across temporal scales. Journal of Ecology, 101, 309–315.

Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate Stability and Size Distribution. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 425-442).

Klute, A. & Dirksen, C. (1986) Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Miner Alogical Methods, 2nd Edition, Agronomy Monograph No. 9, ASA, Madison, 687-734.

Knicker, H. (2011). Pyrogenic organic matter in soil: Its origin and occurrence, its chemistry and survival in

soil environments. *Quaternary International*, *243*, 251-263.
Kooch, Y., Nouraei, A., Wu, D., Francaviglia, R., & Frouz, J. (2024). The effect of fire disturbance on the dynamics of soil physical, chemical, and biological properties over time in a semi-arid region. *Applied Soil Ecology*, *202*, 10. 5568.
Korav, S., Yadav, D. B., Yadav, A., Rajanna, G. A., Parshad, J., Tallapragada, S., Elansary, H. O., & Mahmoud, E. A. (2024). Rice residue management alternatives in rice–wheat cropping system: impact on wheat productivity, soil organic carbon, water and microbial dynamics [Article]. *Scientific Reports*, *14*(1), Article 1822.
Kranabetter, J. M., McLauchlan, K. K., Enders, S. K., Fraterrigo, J. M,. Higuera, P. E., Morris, J. L., … Perakis, S. (2016). A framework to assess biogeochemical response to ecosystem disturbance using nutrient partitioning ratios. Ecosystems, 19, 387–395.
Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation [Article]. *Sustainability (Switzerland)*, *7*(5), 5875-5895.
Li, C. S. (2000). Modeling Trace Gas Emissions from Agricultural Ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *58*, 259-276.
Li, M., & Cong, X. (2017). Chemical changes and the mechanisms in the sintering process of sea silt. Bulgarian Chemical Communications, 49(1), 250–255.
Marfella, L., Ashby, M. A., Hennessy, G., Rowe, J., Marzaioli, R., Rutigliano, F. A., & Glanville, H. C . (2025) .Mid-term (5 years) impacts of wildfire on soil chemical and biological properties in a UK peatland. *Applied Soil Ecology*, *207*, 105953.
Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A & ,.Zavala, L. (2011). Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews*, *109*, 44-60.
McLauchlan KK, Higuera PE, Miesel J, et al. (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. J Ecol. 108:2047–2069.
Miesel JR, Hockaday WC, Kolka RK., & Townsend PA (2015) Soil organic matter composition and quality across fire severity gra- dients in coniferous and deciduous forests of the southern boreal region. J Geophys Res 120(6):1124–1141
Miltner, A., & Zech, W. (1997). Effects of minerals on the transformation of organic matter during simulated fire-induced pyrolysis. *Organic Geochemistry*, *26*(3), 175-182.
Mohsenifar, K& Mohamadzadeh, A. (2023). Effect of burning wheat straw and stubble on water repellency and some soil properties in the fields of Dezful city. Journal of Water and Soil Conservation, 30(3), 87-105. (In Persian).
Monjezi, N. (2020). Comparison of green and burnt sugarcane harvesting methods and Environmental Impacts of Burning Farms on Sugarcane Harvesting in Khuzestan Province. *Journal of Natural Environment*, *73*(2), 383-396. (In Persian).
Neary, D. G., Klopatek, C. C., DeBano ,L. F., & Ffolliott, P. F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, *122*(1), 51-71.
Niknam, L., Emami, H., & Khorassani, R. (2021). Effect of Fire on Soil Physical Properties in Range Land, Agriculture and Forest Land Uses in Golestan Province, *Applied Soil Reseach*, 9(1), 1-13. (In Persian).
Osman, K. (2013). Forest Soils. In (pp. 229-251).
Pausas, J., & Keeley, J. (2009). A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life. Bioscience, 59, 593-601. https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10
Plaza-Álvarez, P. A., Lucas-Borja, M. E., Sagra, J., Moya, D., Fontúrbel, T., & De las Heras, J. (2017). Soil Respiration Changes after Prescribed Fires in Spanish Black Pine (Pinus nigra Arn. ssp. salzmannii) Monospecific and Mixed Forest Stands. *Forests*, *8* .(۷)
Pressler, Y., Moore, J. C., & Cotrufo, M. F. (2018). Belowground commu- nity responses to fire: Meta-analysis reveals contrasting responses of soil microorganisms and mesofauna. Oikos, 128, 309–327.
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*.
Reynolds, D., Elrich, D. E., Young, E. G., Amoozegar, A., Booltink, H. W. G., & Bouma, J. (2002). Methods of soil analysis, part 4: physical methods. *Soil Sci. Soc .Am* .
Rhoades, J. D. (1982). Soluble salts. In A. L. Page, Miller R. H., and Keeney D. R. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties (2nd ed., pp. 167–179). Madison, WI: ASA and SSSA
Robichaud, P., Wagenbrenner, J., Pierson, F., Spaeth, K., Ashmun, L., & Moffet, C. (2016). Infiltration and interrill erosion rates after a wildfire in western Montana, USA. *Catena*, *142*, 77-88.

Rodríguez-Cardona, B., Coble, A., Wymore, A., Kolosov, R., Podgorski, D., Zito, P., Spencer, R., Prokushkin, A., & McDowell, W. (2020). Wildfires lead to decreased carbon and increased nitrogen concentrations in upland arctic streams. *Scientific Reports*, *10*.

Sadeghifar, M., Beheshti, A., & Pourreza, M. (2017). Variability of Soil nutrient variability and soil aggregate stability at different times after fire in Zagros forests (Case study: Paveh forests). *Ecol Iran For*. *4*(8), 19-27. (In Persian).

Sandhu, H. S., Gilbert, R. A., Kingston, G., Subiros, J. F., Morgan, K., Rice, R. W., Baucum, L., Shine, J. M., & Davis, L. (2013). Effects of sugarcane harvest method on microclimate in Florida and Costa Rica. Agricultural and Forest Meteorology, 177, 101-109.

Sharifi, Z,. Nazari, C,. Mohammadi Samani, K,. & Shaanian, N. (2015). Effect of Three Successive Years of Fire on Some Physicochemical Properties of a Forest Soil around Zarivar Lake in Marivan. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *46*(3), 555-565. (In Persian).

Singh, D., Sharma, P., Kumar, U., Daverey, A., & Arunachalam, K. (2021). Effect of forest fire on soil microbial biomass and enzymatic activity in oak and pine forests of Uttarakhand Himalaya, India. *Ecological Processes*, *10*(1), 29.

Singh, S. (2022). Forest fire emissions:A contribution to global climate change.Front. For. Glob. Change 5:925480.

Tadesse, K. (2016). Effects of traditional practice of soil burning (guie) on soil physical properties at Sheno areas of North Shoa, Oromia Region, Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, *11*, 1134-1140.

Verma, S., Dar, J., Malasiya, D., Khare, P. K., Dayanandan, S & ,.Khan, M. (2018). A MODIS-based spatiotemporal assessment of agricultural residue burning in Madhya Pradesh, India. *Ecological Indicators*, *105*.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *soil science*, *37*(1).

Weir, J. (2009). Conducting Prescribed Fires: A comprehensive manual .

Weninger, T., Filipović, V., Mešić, M., Clothier, B., & Filipović, L. (2018). Estimating the extent of fire induced soil water repellency in Mediterranean environment. *Geoderma*, *338*, 187-196.

Whitman, T., Whitman, E., Woolet, J., Flannigan, M. D., Thompson, D. K,. & Parisien, M.-A. (2019). Soil bacterial and fungal response to wild- fires in the Canadian boreal forest across a burn severity gradient. bioRxiv, 512798.

Zhang Y., & Biswas A (2017) The effects of forest fire on soil organic matter and nutrients in boreal forests of North America: a review. Adapt Soil Manage 2017:465–476

Zhou, L., Liu, S., Gu, Y ,.Wu, L., Hu, H.-W., & He, J.-Z. (2023). Fire decreases soil respiration and its components in terrestrial ecosystems. *Functional Ecology*, *37*(12), 3124-3135.